

**Aus dem Institut für Medizinische Psychologie der Universität  
Tübingen**

**Direktor: Professor Dr. N. Birbaumer**

**Identifikation von neuromagnetischen Korrelaten  
verschiedener Stufen sprachlicher Verarbeitung mit der  
Technik der Magnetoenzephalographie**

Grundlage für einen klinischen Einsatz des MEG zur Lokalisation  
sprachgebundener Aktivitäten im Rahmen der funktionellen  
Neuronavigation

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von**

**Ilona Konstanze Henseler**

**aus**

**Hilden**

**2007**

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Professor Dr. N. Birbaumer

2. Berichterstatter: Professor Dr. Dr. H.-O. Karnath

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VI
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Ziele der Arbeit .....	6
<b>2 Theoretische und experimentelle Grundlagen</b>	<b>8</b>
2.1 Neuronale Modelle der Sprachverarbeitung .....	8
2.1.1 Die klassische Lokalisationslehre .....	8
2.1.2 Neuronale Netze.....	10
2.1.3 Aktivierungsmodelle und Lemma-Retrieval.....	11
2.2 Methoden der funktionellen Darstellung des Gehirns.....	16
2.2.1 Bildgebende Verfahren .....	16
2.2.2 Elektrophysiologische Verfahren.....	18
2.2.3 Zusammenfassung .....	19
<b>3 Neuronale Korrelate der Sprachverarbeitung</b>	<b>21</b>
3.1 Die „visual word form area“.....	21
3.2 Der frontale Kortex .....	22
3.2.1 Das Broca-Areal .....	23
3.2.2 Der Präfrontale Kortex.....	26
3.3 Der Temporale Kortex .....	27
3.3.1 Das Wernicke-Areal.....	28
3.3.2 Der Mittlere Temporale Gyrus (MTG) .....	30
3.4 Zusammenfassung .....	32

4	Der Zeitverlauf der Sprachverarbeitung	34
4.1	EEG-Komponenten	34
4.1.1	N200 / N2b	35
4.1.2	P150 / P200	36
4.1.3	ELAN / N280 / LPN	37
4.1.4	P400 / N400 / LAN	38
4.1.5	P600 / SPS	40
4.1.6	Zusammenfassung	41
4.2	MEG-Korrelate	42
4.2.1	Die evozierte Aktivität	42
4.2.1.1	Die prälexikalische Verarbeitung	42
4.2.1.2	Die sprachspezifische Verarbeitung	44
4.2.1.3	Semantik	46
4.2.1.4	Grammatik und Syntax	49
4.2.2	Die induzierte Aktivität	51
4.2.3	Zusammenfassung	52
5	Die Technik der Magnetoenzephalographie	53
5.1	Die evozierte und die induzierte Aktivität	55
5.2	Methoden der Quellenlokalisation	57
5.3	Vergleichbarkeit mit anderen Techniken	58
6	Die durchgeführten Experimente	61
6.1	Die Auswahl der Stimuli	61
6.1.1	Wortlänge und Uniqueness-Point	63
6.1.2	Die Worthäufigkeit	64
6.1.3	Der Erwerbszeitpunkt	66
6.2	Die Experimente	67
6.2.1	Experiment 1: Kategorisierung von Nomina	67
6.2.2	Experiment 2: Use Monitoring	70
6.2.3	Experiment 3: Non-Wörter	72
6.2.4	Experiment 4: Satzverarbeitung	73
6.2.5	Experiment 5: Symbolketten	75

6.3 Die Durchführung .....	76
6.3.1 Die Probanden.....	76
6.3.2 Die Messung.....	76
6.4 Die Auswertung .....	79
7 Resultate .....	80
7.1 Verhaltensdaten .....	80
7.2 Die evozierte magnetische Aktivität.....	82
7.2.1 Aktivität im Vergleich zur Baseline .....	82
7.2.2 Vergleiche zwischen Bedingungen .....	85
7.2.3 Zeitverlauf der Amplitude des magnetischen Feldes.....	92
7.3 Die induzierte Aktivität .....	97
8 Diskussion .....	98
8.1 Die Prälexikalische Verarbeitung.....	98
8.2 Lexikalische Evaluationsprozesse .....	100
8.3 Lexikalische Repräsentationen.....	102
8.4 Die semantische Verarbeitung.....	104
8.5 Die Verarbeitung von Nomina und Verben .....	107
8.6 Die Verarbeitung syntaktischer Inkorrektheit .....	109
9 Zusammenfassung .....	111
10 Kritik und Ausblick .....	113
Literaturverzeichnis .....	115

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Das Logogen-Modell nach Morton (1970) .....	12
Abbildung 2	Das Modell der Sprachperzeption von McClelland und Rumelhart (1981).....	14
Abbildung 3	Das Modell des lexikalischen Abrufs bei der Sprachproduktion nach Levelt (1999).....	15
Abbildung 4	Zeitliches und räumliches Auflösungsvermögen funktioneller Messverfahren..	17
Abbildung 5	Die zytoarchitektonischen Rindenfelder nach Brodmann. ....	23
Abbildung 6	Die Beteiligung kortikaler Areale an der Satzverarbeitung .....	26
Abbildung 7	Die Sprachverarbeitung im inferioren frontalen Gyrus der linken Hemisphäre .	33
Abbildung 8	Die Quellen des MEG-Signals. ....	54
Abbildung 9	Die Bereiche des Gehirns, die mit der MEG-Technik erfasst werden können ..	55
Abbildung 10	Phrasenstruktur eines Stimulussatzes.....	74
Abbildung 11	Der Messraum .....	78
Abbildung 12	Die mittleren Reaktionszeiten und Standardfehler für die vier Stimulusklassen	80
Abbildung 13	Die Verteilung der 151 MEG-Sensoren .....	82
Abbildung 14	Signifikante Unterschiede im Vergleich zur Baseline .....	84
Abbildung 15	Signifikante Unterschiede im Vergleich zur Baseline .....	85
Abbildung 16	Signifikante Unterschiede zwischen Nomina bzw. Verben und Symbolen .....	87
Abbildung 17	Signifikante Unterschiede zwischen Nomina und Non-Wörtern .....	88
Abbildung 18	Die semantische Verarbeitung.....	90
Abbildung 19	Signifikante Unterschiede zwischen Verben und Nomina .....	91
Abbildung 20	Signifikante Unterschiede zwischen korrekten und inkorrekten Sätzen .....	92
Abbildung 21	Aktivierungszeitverlauf für die Nomina, Verben, Non-Wörter und Symbole an dem Sensor MLT22 .....	93
Abbildung 22	Aktivierungszeitverlauf für die Nomina, Verben, Non-Wörter und Symbole an dem Sensor MLF43 .....	94
Abbildung 23	Aktivierungszeitverlauf für die Nomina, Verben, Non-Wörter und Symbole an dem Sensor MLO33.....	94

Abbildung 24	Aktivierungszeitverlauf für die semantisch passenden und die semantisch unpassenden Nomina an dem Sensor MLT23 .....	95
Abbildung 25	Aktivierungszeitverlauf für die syntaktisch korrekten und die syntaktisch inkorrekten Sätze an dem Sensor MLT11 .....	96
Abbildung 26	Signifikante Unterschiede im Frequenzband um 2Hz zwischen syntaktisch korrekten und syntaktisch inkorrekten Sätzen.....	97
Abbildung 27	Aktivierungszeitverlauf für die semant. passenden Nomina, die semant. unpassenden Nomina, die Non-Wörter und die Symbole an dem Sensor MLT22 .....	103
Tabelle 1	Die durchgeführten Experimente .....	62
Tabelle 2	Die Vergleiche zwischen Bedingungen.....	65
Tabelle 3	Mittelwerte der Worthäufigkeiten der semantisch passenden und semantisch unpassenden Nomina und Verben in den Experimenten U1 und U2.....	66

# Abkürzungsverzeichnis

BA	Brodmann Area
CT	Computertomographie
ECD	equivalent current dipole
EEG	Elektroenzephalographie
ELAN	early left anterior negativity
EPSP	exzitatorische postsynaptische Potentiale
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
fT	Femtotesla
IFG	inferiorer frontaler Gyrus
ITG	inferiorer temporaler Gyrus
LAN	left anterior negativity
MEG	Magnetoenzephalographie
MMN	Mismatch Negativity
ms	Millisekunden
MTG	mittlerer temporaler Gyrus
p. s.	post stimulus (= nach Stimulusonset)
PET	Positronenemissionstomographie
PFC	Präfrontaler Kortex
STG	superiorer temporale Gyrus
STS	superiorer temporaler Sulcus
U1 - U5	Unterexperiment 1 bis 5
UP	Uniqueness Point
VWFA	visual word form area

# 1 Einleitung

Die Fähigkeit zur Kommunikation ist eines der wichtigsten Merkmale des Gemeinschaftslebens und gleichzeitig eine der komplexesten menschlichen Fähigkeiten. Wir brauchen Sprache, um mit unserer Umwelt in Kontakt zu treten und vielleicht sogar, um sie besser zu strukturieren. Aufgrund dieser großen kulturellen Relevanz hat ihre Erforschung ebenfalls eine lange Tradition. Bis ins 19. Jahrhundert hinein war dies eine Domäne der klassischen Philologie. Diese Wissenschaft sah - vereinfacht gesagt - Sprache als ein abstraktes Gebilde des menschlichen Geistes an, das eng mit philosophischen Aspekten des Weltaufbaus verknüpft ist. Eines ihrer Hauptziele bestand darin, die Organisationsregeln von Sprache deskriptiv darzustellen. Demgegenüber rückte in den letzten Jahrzehnten immer mehr auch der dynamische Aspekt von Sprache, d.h. die Sichtweise von Sprache als Mitteilungssystem eines informationstragenden Codes, in den Mittelpunkt des Interesses. Im Zuge dessen entwickelten sich neue Forschungszweige. So wird der sprachliche Code in der statistischen Linguistik unter informationstheoretischen Aspekten gesehen und auf seine Regularitäten unter quantitativen Gesichtspunkten hin untersucht und in der Computerlinguistik wird daran gearbeitet, diesen Code einer automatisierten Verarbeitung zuzuführen.

Aus der Annahme der Existenz eines sprachlichen Codes ergeben sich gleichzeitig auch Fragen nach dem Enkodieren und Dekodieren dieses Codes. Diese Vorgänge sind u. a. Gegenstand der psychologischen und medizinischen Forschung. Die Sprachmitteilung wird dabei als ein Prozess der Informationsübertragung gesehen, der stark von den Charakteristika der die Nachricht sendenden und empfangenden Individuen geprägt ist. Darüber hinaus interessiert die Forscher, wie das Gehirn als Bearbeitungsorgan eine sprachliche Mitteilung konzipiert und analysiert. Neben Beobachtungen auf der Verhaltensebene und der Untersuchung gestörter Verarbeitungsprozesse, wie sie beispielsweise im Rahmen von Aphasien auftreten, findet die Erforschung dieser Prozesse mit computergesteuerten neuronalen Simulationsmodellen und funktionell-bildgebenden Verfahren statt. Mithilfe dieser Verfahren wird

versucht, die Vorgänge der Analyse und Produktion von Sprache auf neuronaler Ebene zu simulieren und die beteiligten Strukturen im Gehirn zu identifizieren.

Durch die Entwicklung und Anwendung der genannten Techniken und Methoden kam es in den letzten Jahrzehnten zu einem enormen Anwachsen des Wissensbestandes über die Verarbeitung von Sprache. In der Sprachwissenschaft wurde ein Theoriewandel eingeleitet, der die strukturalistischen Modelle der klassischen Linguistik um empirisch fundierte und anwendungsorientierte Modelle erweiterte. Da die Ansätze, Modelle und Methoden der genannten Forschungsdisziplinen stark divergieren, ist es allerdings bis zum heutigen Zeitpunkt nicht gelungen, ein allgemeingültiges Modell der Sprachverarbeitung zu formulieren. Vielmehr existieren unzählige Modelle und Theorien nebeneinander. Nur in einer verstärkten interdisziplinären Zusammenarbeit wird in der Zukunft die Chance liegen, dieses fragmentarische Wissen in *ein* stimmiges Modell zu integrieren.

## **1.1 Problemstellung**

Der Einsatz funktionell-bildgebender Verfahren wie der funktionellen Kernspinresonanztomographie (fMRT), der Positronenemissionstomographie (PET), der Elektroenzephalographie (EEG) und der Magnetoenzephalographie (MEG) hat in den letzten Jahrzehnten entscheidend dazu beigetragen, ein besseres Verständnis der neuronalen Prozesse zu erlangen, die der Verarbeitung von Sprache beim Menschen zugrunde liegen. Dieses Wissen soll nun auch für die Diagnostik und Therapie von Patienten nutzbar gemacht werden.

Ein potentes zukünftiges Einsatzgebiet ist in diesem Zusammenhang die funktionelle Neuronavigation im Rahmen neurochirurgischer Eingriffe. Der Grundgedanke ist hierbei, dass das präzise Wissen über die Lage funktionsrelevanter Hirnstrukturen dem Operateur dabei helfen kann, das Risiko postoperativer Funktionseinbußen bei den Patienten zu minimieren. Besondere Bedeutung hat dies bei Palliativeingriffen, bei denen das vorrangige

Ziel die Erhöhung oder Erhaltung der Lebensqualität ist. Da kein kurativer Anspruch besteht, existiert ein gewisser Spielraum bzgl. des Resektionsgebietes und -ausmaßes (s. Ganslandt et al. 2004). Gleichzeitig ist es besonders entscheidend, keine zusätzlichen Störungen hervorzurufen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine verlässliche Zuordnung von kognitiven Funktionen zu kortikalen Arealen notwendig. Bei sensomotorischen Prozessen ist dies bereits relativ problemlos möglich, da diese Funktionen einfache Verteilungsmuster im Gehirn aufweisen und die Lage der beteiligten Areale interindividuell nur gering variiert. Die Anordnung der Gebiete, die an kognitiven Operationen wie der Verarbeitung von Sprache beteiligt sind, weist im Gegensatz dazu eine hohe Komplexität und eine hohe interindividuelle Variabilität auf (Ojemann et al. 1989). Es muss daher bei jedem Patienten eine *individuelle* Zuordnung dieser Funktionen zu kortikalen Strukturen vorgenommen werden. Für diesen Zweck bietet sich der Einsatz funktionellbildgebender Messverfahren an. Es gelingt allerdings bisher nur selten, eine solche Vorgehensweise in die klinische Praxis zu integrieren, was u. a. in dem hohen apparativen, zeitlichen und finanziellen Aufwand begründet ist. Zudem existieren noch methodische und messtechnische Probleme, die vor einem klinischen Einsatz gelöst werden müssen.

Aus den genannten Gründen gilt bis heute die elektrokorticale Stimulation als Gold-Standard für die Lokalisation funktionsrelevanter Areale im Rahmen neurochirurgischer Eingriffe (Ojemann et al. 1989; Haglund et al. 1994; Herholz et al. 1997; Duffau et al. 1999; Steinmeier et al. 2002). Bei diesem Verfahren werden dem wachen Patienten während der Operation Elektroden auf den Kortex aufgelegt. Während einzelne Hirnareale gezielt stimuliert werden, werden periphere Reaktionen gemessen oder die Leistungen bei der Bearbeitung kognitiver Aufgaben geprüft. Aus den peripheren Nervenaktivierung bzw. aus Störungen in der Aufgabenbearbeitung können dann Rückschlüsse auf die Funktionen der stimulierten Areale gezogen werden. Diese Vorgehensweise weist einige Nachteile auf. So setzt eine intraoperative Testung die aktive Mitarbeit des wachen Patienten voraus. Die damit verbundene extreme physische und psychische Belastung der Patienten ist ein

Hauptgrund dafür, dass nach alternativen Verfahren gesucht wird. Zusätzlich liegen dem Operateur bei der elektrokortikalen Stimulation vor Beginn der Operation keine Daten über die Lage zu schützender Hirnareale vor. Diese Informationen sind allerdings wichtig, um beispielsweise den optimalen Ort für die Kraniektomie zu bestimmen. Zudem sind für eine intraoperative Stimulation größere Kraniektomien erforderlich und die Gesamtdauer der Operation verlängert sich. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Schärfe der räumlichen Darstellung durch die begrenzte Anzahl von Elektroden relativ gering ist. Schließlich kann eine elektrische Stimulation der Kortexoberfläche in Einzelfällen sogar zum Auslöser eines epileptischen Anfalls werden.

Viele dieser Nachteile könnten durch den Einsatz der stereotaktisch gesteuerten Neuronavigation eliminiert werden. Bei diesem Verfahren werden funktionsrelevante Areale bei einem Patienten individuell vor einem anstehenden neurochirurgischen Eingriff mit einem funktionellen Messverfahren lokalisiert (Kelly 1986; Steinmeier et al. 2002). Die funktionell-anatomischen Informationen werden dann mit einem 3D-MRT-Datensatz des Patienten fusioniert und in ein stereotaktisches Navigationssystem eingespeist. In einem nächsten Schritt werden im Operationssaal die so gewonnenen Ortsinformationen mit dem realen Operationssitus in Beziehung gesetzt. Dies geschieht, indem korrespondierende Punkte im physikalischen und virtuellen Raum mithilfe einer Transformationsmatrix identifiziert werden. Dies ermöglicht es dem Operateur, während der Operation zu jedem Zeitpunkt auf einem Bildschirm zu kontrollieren, in welcher räumlichen Relation er sich zu funktionsrelevanten Strukturen befindet.

Bildgebende Messverfahren, die prinzipiell für einen Einsatz im Rahmen der funktionellen Neuronavigation geeignet sind, sind die funktionelle Kernspintomographie und die Magnetoenzephalographie. In den letzten Jahren wurden bereits mehrere Studien durchgeführt, in denen präoperativ somatosensorische, motorische und auditorische Funktionen mit diesen Techniken bei Patienten lokalisiert wurden (Martin et al. 1993; Gallen et al. 1994; Rezai et al.

1996; Stippich et al. 1998; Ganslandt et al. 1999, 2004; Roberts et al. 2000; Duffner et al. 2003; Schiffbauer et al. 2003; Freudenstein et al. 2000). Viele dieser Studien belegen ein besseres Outcome der Patienten, die sich einer solchen präoperativen Lokalisationsdiagnostik unterzogen, im Vergleich zu den Patienten, die ohne diese Zusatzuntersuchung operiert wurden (Rezai et al. 1996; Ganslandt et al. 1999).

Ob sich diese guten Ergebnisse auch auf die Lokalisation von Sprache übertragen lassen, ist allerdings noch unklar. Die wenigen bisher zur Lokalisation von Sprache im Rahmen der Neuronavigation durchgeführten Studien lassen aufgrund ihrer großen Heterogenität und methodischer Schwächen noch keine klare Linie erkennen (s. Steinmeier et al. 2002 für einen Überblick). So lokalisierten beispielsweise Herholz et al. (1997) bei Patienten mit Hirntumoren sprachgebundene kortikale Aktivitäten mit einer Kombination aus PET und fMRT (*MRI-guided PET*). Die Patienten sollten in dieser Studie Verben bilden und Bilder benennen. Bei der Überprüfung der so gewonnenen Ortsinformationen mit der Technik der elektrokortikalen Stimulation ließ sich das Auftreten von Sprachstörungen durch die intraoperative Stimulation von kortikalen Arealen zu einem gewissen Grad aus den präoperativ gewonnenen Daten vorhersagen. Es fielen allerdings auch zahlreiche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der prä- und der intraoperativen Messung auf.

Auch Martin et al. (1993) verglichen zwei funktionelle Messverfahren, in diesem Fall die Magnetoenzephalographie und die elektrokortikale Stimulation, hinsichtlich ihrer Leistung bei der Lokalisation von sprachrelevanten Gebieten miteinander. Die Messungen wurden bei einem Patienten mit einer arteriovenösen Malformation (AVM) durchgeführt und die Stimulation bestand in der auditorischen Präsentation von Silben. Die Ergebnisse der prä- und der intraoperativen Messung zeigten eine hohe Übereinstimmung und wurden daher bei der anschließenden Operation berücksichtigt. Allerdings entwickelte der Patient dennoch postoperativ eine Aphasie. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich darin, dass in dieser Studie ein Test für die Darstellung der sprachlichen Verarbeitung gewählt wurde, der für diesen Zweck nicht geeignet

ist. So wurden ausschließlich Silben präsentiert und es wurde eine Komponente mit einer Latenz von 110 ms für die Lokalisation von sprachgebundenen Aktivitäten herangezogen. Es ist unwahrscheinlich, dass es sich bei dieser Aktivität um ein Korrelat komplexerer sprachlicher Verarbeitungsprozesse gehandelt hat.

Aus den genannten Beispielen ergeben sich einige Forderungen, die an zukünftige Studien zu stellen sind, in denen die Lokalisation sprachgebundener Aktivitäten im Rahmen der funktionellen Neuronavigation untersucht werden soll. Ein erster Schritt sollte darin bestehen, ein Stimulationsparadigma zu konzipieren, das auf neurolinguistischen Modellen basiert. Dieses Paradigma sollte es zudem ermöglichen, verschiedene sprachliche Verarbeitungsprozesse in einer Messsitzung zu untersuchen. Gleichzeitig muss geklärt werden, welches funktionelle Messverfahren für die Darstellung sprachassoziierter Hirnaktivierungen am besten geeignet ist. Danach sollte überprüft werden, ob die interessierenden Funktionen mit dem gewählten Paradigma und Messverfahren zuverlässig bei Gesunden dargestellt werden können. Erst, wenn dies der Fall ist, können klinische Studien mit Patienten durchgeführt werden.

## **1.2 Ziele der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit setzt an den oben genannten Punkten an. Gegenstand der Arbeit war die Prüfung eines eigens konzipierten Stimulationsparadigmas hinsichtlich der Frage, ob mit diesem Paradigma und der Technik der Magnetoenzephalographie umschriebene neuronale Antworten identifiziert werden können, die verschiedene Stufen der Sprachverarbeitung abbilden. Diese Prüfung geschah in Form einer explorativen Studie mit gesunden Probanden, wobei allerdings bereits den Anforderungen für einen potentiellen klinischen Einsatz bei Patienten im Rahmen der funktionellen Neuronavigation Rechnung getragen wurde. Die Arbeit kann somit als Grundlage für zukünftige klinische Studien dienen.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wird der Frage

nachgegangen, inwieweit die Technik der Magnetoenzephalographie generell für die Darstellung neuronaler Aktivitäten geeignet ist, die mit der Verarbeitung von Sprache assoziiert sind. Dies geschieht anhand eines Literaturüberblicks über ca. 30 Studien aus den letzten 10 Jahren, in denen die Verarbeitung von Sprache mit dem MEG untersucht wurde. Die Ergebnisse dieser Studien werden sowohl zu den Ergebnissen aus Studien, in denen andere funktionellbildgebende Messverfahren wie fMRT und PET eingesetzt wurden, als auch zu neurolinguistischen Modellen der Sprachverarbeitung in Beziehung gesetzt.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die durchgeführten Experimente vorgestellt. Entsprechend der oben genannten Anforderungen wurde ein Stimulationsparadigma mit dem Ziel zusammengestellt, biomagnetische Korrelate verschiedener sprachlicher Verarbeitungsschritte in einer Messsitzung mit der Technik der Magnetoenzephalographie zu identifizieren. Um zu überprüfen, ob dies zuverlässig gelingt, wurde das Paradigma an einer Gruppe gesunder Probanden erprobt.

Ausgehend von dem Literaturüberblick und den Ergebnissen der Experimente wird abschließend beurteilt, ob zum jetzigen Zeitpunkt bereits die notwendigen Voraussetzungen erfüllt sind, um die Magnetoenzephalographie im Rahmen der funktionellen Neuronavigation zur Identifikation sprachassoziierter neuronaler Aktivitäten einzusetzen. Neben dieser klinisch orientierten Fragestellung bietet die Durchführung verschiedener sprachlicher Experimente bei denselben Probanden innerhalb einer Messsitzung die Möglichkeit, die zeitliche Beziehung einzelner sprachlicher Verarbeitungsschritte zueinander detailliert darzustellen. Die Arbeit kann somit auch im Bereich der Grundlagenforschung neue Erkenntnisse über die zeitliche Dynamik der Sprachverarbeitung liefern.

## 2 Theoretische und experimentelle Grundlagen

Ein Grundprinzip der Untersuchung von Sprache mittels bildgebender und elektrophysiologischer Verfahren ist die Darstellung physikalisch messbarer Reaktionen des Gehirns auf sprachliche Reize. Eine offene Frage ist allerdings, ob diese Reaktionen wirklich ein Spiegelbild dessen sind, was auf linguistischer Ebene im Gehirn passiert. Um dies zu postulieren, muss eine Verbindung zwischen der linguistischen Beschreibungsebene und der Biologie des Gehirns hergestellt werden.

### 2.1 Neuronale Modelle der Sprachverarbeitung

Es existieren mehrere konkurrierende Modelle, die Aussagen über die Implementierung sprachlicher Verarbeitungsprozesse im Gehirn machen. Im Rahmen der klassischen Lokalisationslehre wird angenommen, dass die Verarbeitung sprachlicher Informationen in eng umgrenzten, spezialisierten Zentren des Gehirns stattfindet. Bekannte Vertreter dieser Vorstellungen sind u. a. Broca (1861) und Wernicke (1874). Die Vertreter einer holistischen Anschauung postulieren dagegen, dass es keine feste Zuordnung von Funktionen zu bestimmten kortikalen Arealen gibt, sondern dass große Bereiche des Kortex an vielen verschiedenen kognitiven Operationen beteiligt sind. Dazwischen bewegen sich die Modelle, die von der Existenz relativ spezialisierter neuronaler Netzwerke ausgehen, die sich über kortikale und subkortikale Gebiete des Gehirns erstrecken (Kochendörfer 1997; Mesulam 1990; Pulvermüller 1999). Unter den genannten Modellen haben die Lokalisationsmodelle die längste Tradition.

#### 2.1.1 Die klassische Lokalisationslehre

Da sprachliche Ausfälle ein häufig auftretendes Symptom bei Erkrankungen des Gehirns sind, lag es schon früh nahe, eine Verbindung zwischen sprachlichen Defiziten und strukturellen Läsionen herzustellen. Ausgehend von solchen Untersuchungen, die um die Jahrhundertwende u. a. von Broca, Wernicke, Pick und Kleist betrieben wurden, fielen erste Zusammenhänge

zwischen dem Ort der Läsion und der Art der sprachlichen Ausfälle auf <sup>1</sup> (Broca 1861, Wernicke 1874). Diese Erkenntnisse führten schließlich zu der Postulation eines Modells mit zwei Sprachzentren (Lichtheim 1885). In diesem Modell wird ein frontal in der linken Hemisphäre gelegenes Gebiet angenommen, das für die Sprachproduktion zuständig ist (Broca-Gebiet), sowie ein temporal, ebenfalls linkshemisphärisch gelegenes Gebiet, in dem die perzeptive Verarbeitung von Sprache stattfindet (Wernicke-Gebiet).

Durch die Einführung der Computertomographie (CT) (Hounsfield 1973) und der Magnetresonanztomographie (MRT) (Lauterbur 1989) wurde das, was Broca und seine Zeitgenossen nur an den Gehirnen bereits verstorbener Patienten untersuchen und rückschließend zu deren sprachlichen Ausfällen in Beziehung setzen konnten, erstmals am lebenden Menschen darstellbar. Eine läsionsunabhängige Analyse der Funktionen einzelner Hirnareale war aber auch mit diesen Techniken nicht möglich. Erneut bestand die Grenze dieser nicht-funktionellen Methoden darin, dass nur Funktionen, die als Folge von Läsionen gestört waren, kortikalen Strukturen zugeordnet werden konnten. Zusätzlich waren aufgrund der individuell stark variierenden Schädigungsmuster nur Einzelfallanalysen möglich. Aus diesen Gründen wurde verstärkt nach Verfahren gesucht, die eine läsionsunabhängige Beobachtung der neuronalen Aktivität *während* der Ausführung von kognitiven Aufgaben ermöglichen. Solche Verfahren werden als funktionelle Messverfahren bezeichnet.

Eines der ersten funktionellen Messverfahren ist die bereits im Jahre 1937 angewandte Technik der Ableitung elektrischer Aktivität von der operativ freigelegten Hirnoberfläche (Penfield 1937; Ojemann et al. 1989). Für eine Untersuchung größerer Gruppen war diese Methode aufgrund ihrer Invasivität allerdings ebenfalls nicht geeignet. Erst die Einführung der Positronen-emissionstomographie (Ter-Pogossian et al. 1975) und der funktionellen

---

<sup>1</sup> Broca prägte den Begriff der „Aphémie“ für den Verlust der Artikulationsfähigkeit bei einer Schädigung der pars opercularis der linken Stirnhirnwindung, nicht den Begriff „Aphasie“, der oft fälschlicherweise mit ihm in Verbindung gebracht wird. Dieser Begriff wurde entscheidend von Wernicke geprägt.

Magnetresonanztomographie (Ogawa et al. 1990; Kwong et al. 1992) ermöglichte es, die Anordnung sprachrelevanter Areale auf dem menschlichen Kortex detailliert bei einer großen Anzahl von Personen zu untersuchen. Die mithilfe dieser funktionellen Messverfahren erarbeiteten Lokalisationsmodelle sind heute wesentlich differenzierter als das klassische Zwei-Sprachzentren-Modell und führten zur Annahme, dass sprachliche Verarbeitungsprozesse innerhalb von neuronalen Netzwerken stattfinden.

### **2.1.2 Neuronale Netze**

Neben den Modellen der klassischen Lokalisationslehre werden seit einigen Jahren zunehmend kognitiv-neuropsychologische Modelle diskutiert, die eine Implementierung kognitiver Prozesse in neuronalen Netzwerken annehmen (Kochendörfer 1997; Mesulam 1990; Pulvermüller 1999).

Die Grundannahmen zum Aufbau derartiger Netzwerke stammen aus der Neurophysiologie. Hebb (1949) postulierte, dass Verbindungen zwischen Neuronen, die häufig simultan aktiv sind, verstärkt werden. Die Summe solcher funktionell assoziierter Einheiten nannte er ein *Cell Assembly*. Wenn bei einer genügend großen Anzahl von Neuronen eines solchen Assemblies der Schwellenwert überschritten wird, führt dies zu einer Aktivierung des gesamten Assemblies. Auch für die heute gültigen Modelle neuronaler Netzwerke gelten im Kern noch diese Annahmen. Sie wurden allerdings um neue Erkenntnisse erweitert. So waren die Cell Assemblies in ihrer ursprünglichen Definition aus einer überschaubaren Anzahl von Nervenzellen aufgebaut und auf einen Ort beschränkt. Heute weiß man aus neuroanatomischen und elektro-physiologischen Untersuchungen, dass auch verschiedene Regionen des Gehirns über Faserverbindungen im Sinne von größeren Netzwerken miteinander verbunden sind (Braitenberger et al. 1991; Deacon 1992a; Pulvermüller 1999). In diesen größeren Netzwerken, die als transkortikale Cell Assemblies bezeichnet werden können, kann es ebenfalls zu einer Ausbreitung der Erregung bei Überschreitung eines bestimmten Schwellenwertes kommen (McClelland & Rumelhart 1981, 1986; Braitenberger et al. 1978, 1991, 1992:

Pulvermüller et al. 1996). Elektrophysiologische Untersuchungen erbrachten, dass eine solche Aktivierung zu einer Synchronisation von Neuronen innerhalb des Netzwerkes führt (Braitenberger 1978; Wickens and Arbutnott 1993). In den letzten Jahren wurden zahlreiche weitere Studien durchgeführt, die zu neuen Erkenntnissen über die Funktionsweise von neuronalen Netzwerken und ihre Implementierung im Gehirn führten. Auf diese kann hier allerdings nicht im Detail eingegangen werden.

### 2.1.3 Aktivierungsmodelle und Lemma-Retrieval

In Hinblick auf die Verarbeitung von Sprache wurde versucht, die genannten Vorstellungen von der Funktionsweise des menschlichen Gehirns auf die Verarbeitung von sprachlichem Material zu übertragen. Unter den vorhandenen Modellen zur Sprachverarbeitung hat dabei die Gruppe der sogenannten Aktivierungsmodelle die größte Nähe zu den Prinzipien aus der Neurophysiologie. Zu diesen Modellen gehören als wichtige Vertreter die Logogentheorie von Morton (1969) und die interaktiven Aktivierungsmodelle von McClelland und Rumelhart (McClelland et al. 1981; Rumelhart and McClelland 1982, 1986).

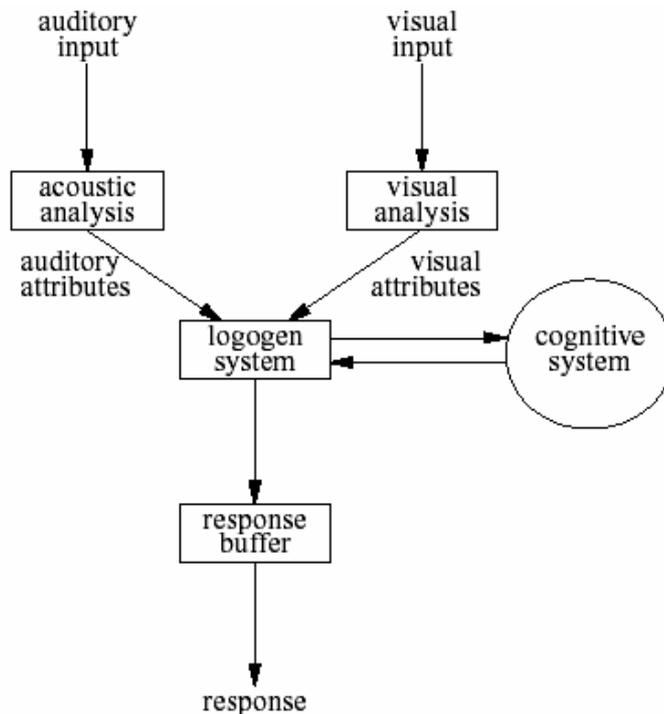
J. Morton ging bereits 1964 davon aus, dass sprachliche Bausteine in neuronalen Einheiten repräsentiert sind. Er beschrieb die Charakteristika einer solchen *neural unit* folgendermaßen:

- „1. When a unit fires, a particular word is available as a response.
2. Each unit has a basic, relatively stable level of activation.
3. The level of activation can be increased by „noise“ or by outside events.
4. Each unit has a threshold; when the level of activation exceeds the threshold the unit fires.”<sup>2</sup>

Diese neuronalen Einheiten nannte Morton (1969, 1970) Logogene. Sie sind als System der Mustererkennung (sog. *feature counters*) zu verstehen, in denen Informationen aus den sensorischen Analysemechanismen gesammelt und mit gespeicherten Merkmalen verglichen werden (s. Abbildung 1).

---

<sup>2</sup> Morton, J. (1964), A preliminary functional model for language behaviour. *International Audiology* 3, 216-25, S. 216.

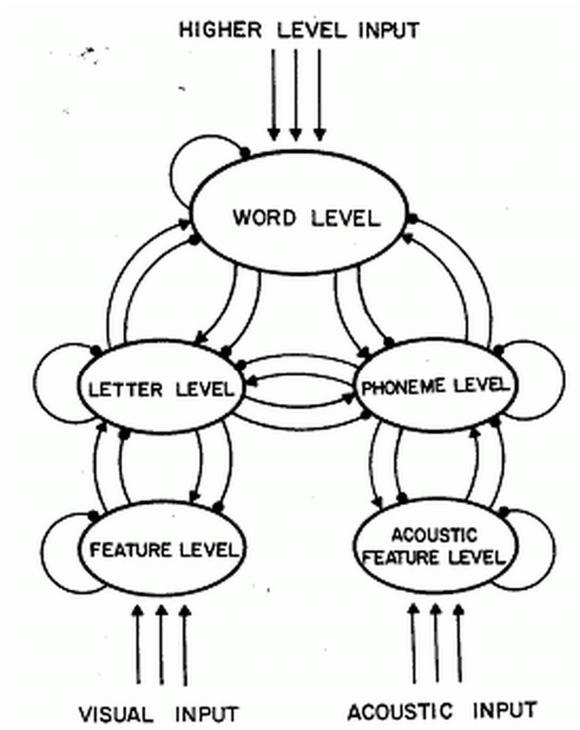


**Abbildung 1** Das Logogen-Modell nach Morton (1970)

Nach dem Modell von Morton werden bei der Perzeption sprachlicher Äußerungen anfangs alle Logogene parallel und unabhängig aktiviert, die bestimmte Features enthalten. Erst wenn die Aktivität einer Einheit ihren Schwellenwert überschreitet, feuert diese Einheit und der zugehörige lexikalische Eintrag wird verfügbar. Dabei haben die verschiedenen Logogene unterschiedliche Ruheaktivierungszustände: Die Units höherfrequenter Wörter haben ein höheres Aktivierungsniveau als die Units niederfrequenter Wörter und sind somit leichter abrufbar. In zahlreichen empirischen Untersuchungen konnten Hinweise auf die Richtigkeit der von Morton gemachten Annahmen gefunden werden. So belegen empirische Untersuchungen eine parallele Aktivierung von Wörtern mit gleichem Wortbeginn (Marslen-Wilson 1987) und eine schnellere Verfügbarkeit von hochfrequenten Wörtern und Silben (Anderson 1983; MacKay 1987; Grosjean 1980; Levelt and Wheeldon 1994). Neben Ergebnissen, welche die Modellannahmen von Morton stützten, ergaben sich allerdings auch erste Kritikpunkte. Diese bezogen sich vorwiegend auf die

Aussage, dass Logogene voneinander unabhängig arbeiten. Entgegen dieser Annahme wurden in empirischen Untersuchungen Hinweise auf eine Interaktion zwischen Einträgen gefunden. So zeigte sich, dass es für die Identifikation eines Wortes auch entscheidend ist, welche Frequenz seine direkten Konkurrenten haben (Grosjean 1980; Marslen-Wilson 1987). Aus diesen Ergebnissen wurde gefolgert, dass Verbindungen zwischen den Einträgen einer Ebene existieren müssen. Derartige Verbindungen werden in den interaktiven Aktivierungsmodellen von McClelland und Rumelhart postuliert (McClelland et al. 1981, 1986, s. auch Seidenberg and McClelland 1989), die daher eine gute Erweiterung zu dem Logogenmodell darstellen. In diesen Modellen wird die Existenz von mehreren Ebenen und das Bestehen von faszilitatorische und inhibitorische Verbindungen zwischen den Einheiten einer Ebene sowie zwischen den Ebenen angenommen (s. Abbildung 2). Während der Sprachverarbeitung interagieren die Einträge über diese Verbindungen so lange miteinander, bis ein Wort definitiv ausgewählt werden kann.

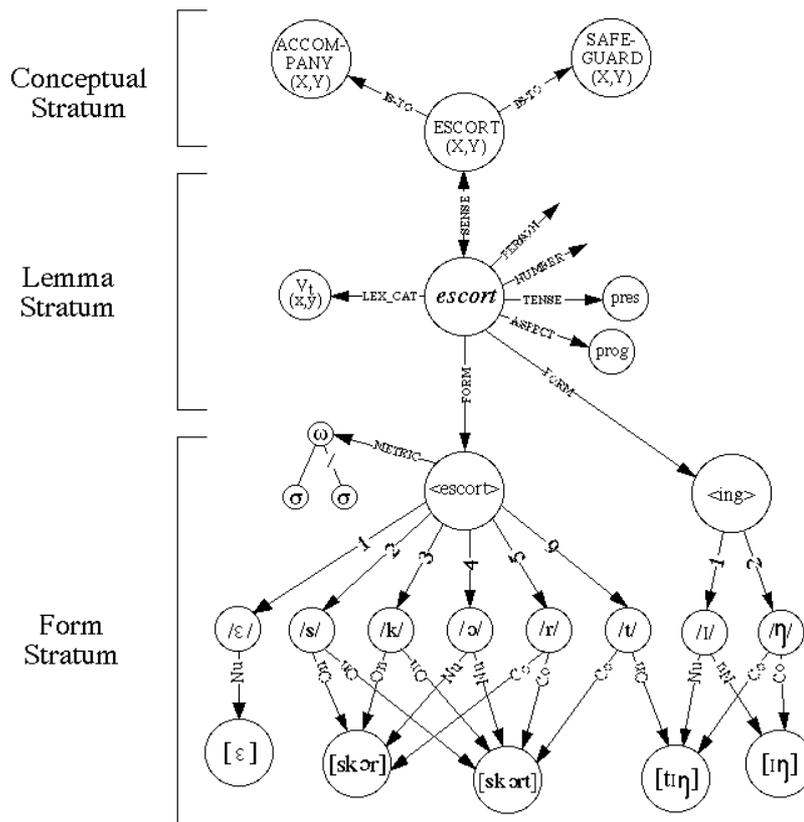
Neben den genannten Einflüssen der Gebrauchsfrequenz und der Konkurrenten auf die Abrufbarkeit eines Wortes wird diese auch durch den Kontext beeinflusst. Schon Morton stellte fest, dass der Einfluss des Kontextes umso stärker ausgeprägt ist, je schlechter die Wahrnehmung der sensorischen Information gelingt (Morton 1964). Weiter konnte in empirischen Studien gezeigt werden, dass Kontexteffekte stärker bei niederfrequenten als bei hochfrequenten Wörtern ausgeprägt sind (Norris 1986; Marslen-Wilson 1987). Auf der anderen Seite kann das Vorhandensein eines Kontextes ebenso dazu führen, dass messbare Unterschiede als Folge von Frequenzeffekten wegfallen (Kutas and Van Petten 1990). Um die Auswirkungen des Kontextes auf die Abrufbarkeit eines Eintrages erklären zu können, muss angenommen werden, dass während der Perzeption eines Wortes Informationen über dessen Interaktionsmöglichkeiten mit anderen Wörtern auf grammatikalischer, thematischer und konzeptueller Ebene zu Verfügung stehen.



**Abbildung 2** Das Modell der Sprachperzeption von McClelland und Rumelhart (1981)

Es bleibt zu diskutieren, ob der Zugriff auf diese Informationen von einem zentralen Punkt oder von mehreren Punkten im System aus erfolgt. Da die verschiedenen Informationen interagieren, ist es allerdings wahrscheinlich, dass sie von einem Eintrag aus abgerufen werden können. Levelt (1989) nannte einen solchen zentralen Eintrag ein Lemma<sup>3</sup>. Ein Lemma ist eine sprachliche Repräsentationsform, die den Zugriff auf zahlreiche linguistische Informationen bündelt (s. Abbildung 3). In Analogie zu den Prinzipien der interaktiven Aktivierungsmodelle wird angenommen, dass mehrere Lemmas durch einen Stimulus angesprochen werden und parallel und interaktionell aktiv sind, bis ein Ziellemma definitiv ausgewählt wird (s. auch Roelofs 1992).

<sup>3</sup> Der Terminus „Lemma“ stammt ursprünglich von Kempen und Huijbers (1983).



**Abbildung 3** Das Modell des lexikalischen Abrufs bei der Sprachproduktion (Levelt 1999)

In der vorliegenden Arbeit wurden die Modellannahmen, dass es verschiedene Ebenen der Verarbeitung von sprachlichen Reizen gibt, dass verschiedene Einträge während der Perzeption miteinander interagieren, sowie das Konzept der Lemmas als sprachliche Repräsentationsform bei der Konzeption des Stimulusmaterials und der Interpretation der Ergebnisse der durchgeführten Experimente berücksichtigt<sup>4</sup>. Ein Grund dafür liegt in der großen Nähe dieser Modelle zu neurophysiologischen Gesetzmäßigkeiten. Die Tatsache, dass sich mit computergestützten Simulationen, die auf den vorgestellten Modellen basieren, die Verarbeitung von Sprache relativ gut simulieren lässt, kann als

<sup>4</sup> Obwohl die Modelle des Lemma-Abrufs ursprünglich als Modelle der Sprachproduktion gedacht waren, wird von den Autoren vermutet, dass auch bei der Perzeption von Sprache auf Lemmas zugegriffen wird: „In fact, we will bypass this issue here by assuming that all production lemmas are perceptual lemmas; the perceptual and production networks coincide from the lemma level upwards.“ (Levelt WJ, Roelofs A, Meyer AS (1999) A theory of lexical access in speech production. Behav Brain Sci 22: 1-38, S. 7).

weiterer Hinweis auf die Richtigkeit der Grundannahmen gewertet werden (Kochendörfer 1997; Wickens and Arbutnott 1993; Roelofs 1997; Thomas et al. 2001; Kohonen 1989, McClelland & Rumelhart 1986).

## **2.2 Methoden der funktionellen Darstellung des Gehirns**

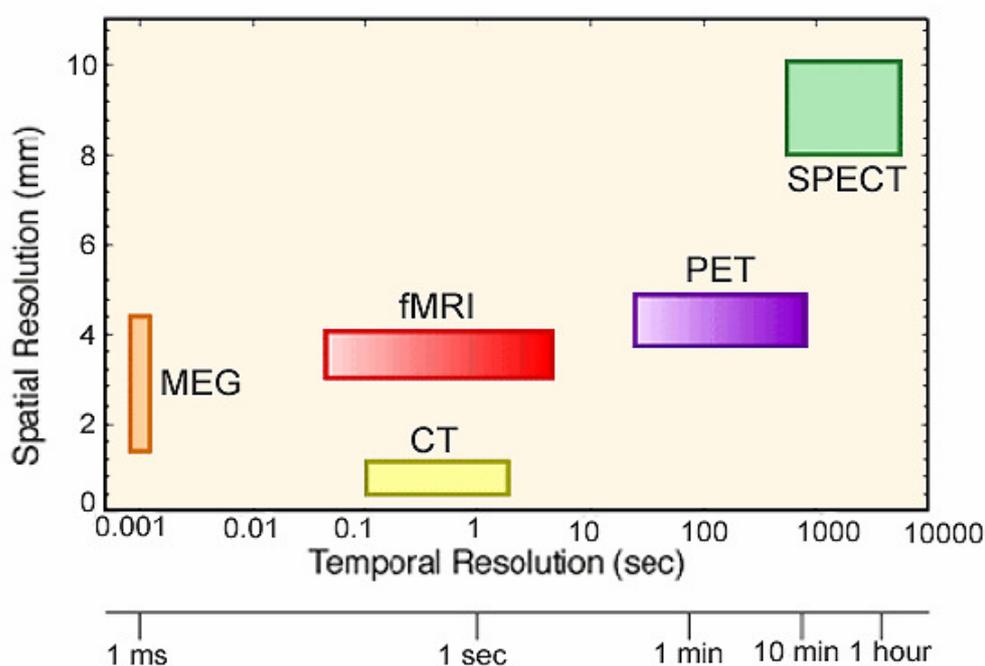
Es existieren verschiedene Verfahren, mit denen hirneigene Aktivitäten während der Bearbeitung kognitiver Aufgaben dargestellt werden können. Diese Verfahren werden als funktionelle Messverfahren bezeichnet. Sie können in hämodynamische und elektrophysiologische Verfahren unterteilt werden. Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Gruppen liegt darin, dass es sich bei den Verfahren, die auf hämodynamischen Maßen basieren, um indirekte Messverfahren handelt, wogegen elektrophysiologische Verfahren direkte Messverfahren sind. Bei den indirekten Verfahren werden physiologische Folgezustände gemessen, die aus einer Nervenzellaktivierung resultieren. Direkte Verfahren messen dagegen die neuroelektrische bzw. neuro-magnetische Aktivität, die unmittelbar durch die Nervenzellaktivierung entsteht. Unabhängig von diesen Unterschieden gilt für all diese Verfahren, dass sie nur ein vereinfachtes Abbild der neuronalen Aktivität liefern können.

### **2.2.1 Bildgebende Verfahren**

Zu den bildgebenden Verfahren, die auf hämodynamischen Parametern basieren, zählen als wichtigste Vertreter die Positronenemissionstomographie (PET) und die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT). Da die Positronenemissionstomographie aufgrund ihrer relativ geringen zeitlichen Auflösung und der hohen Strahlenbelastung in den letzten Jahren im Bereich der Neurowissenschaften weitgehend von der Kernspintomographie verdrängt wurde, wird im Folgenden nur Letztere näher erläutert.

Das Prinzip der Kernspintomographie ist die Kernspinresonanz. Dies bedeutet - vereinfacht gesagt -, dass die Protonen im Gewebe durch ein von außen wirkendes Magnetfeld ausgelenkt werden können und in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren auf eine bestimmte Art und Weise in ihre

Ausgangslage zurückkehren, sobald der Magnetfeldeinfluss erlischt. Bei den Bestandteilen des Hämoglobins wird dieses Relaxationsverhalten durch den Oxygenierungsgrad beeinflusst. Dieser Unterschied bildet die Grundlage des sogenannten BOLD (*blood oxygen level dependent*)-Signals, auf dem die funktionelle Kernspintomographie basiert. Das BOLD-Signal ist somit ein indirektes Maß für den Sauerstoffverbrauch und damit die Aktivität in einer bestimmten Hirnregion.



**Abbildung 4** Zeitliches und räumliches Auflösungsvermögen funktioneller Messverfahren

Die funktionelle Magnetresonanztomographie hat eine sehr gute räumliche Auflösung mit der Möglichkeit zur Lokalisation von Aktivierungen im Millimeterbereich (s. Abbildung 4). Problematisch ist dagegen, dass bei dieser Technik die verschiedenen Facetten neuronaler Aktivität (wie exzitatorische und inhibitorische synaptische Aktivität, Aktionspotentiale und unterschwellige Erregungen) nicht getrennt in der metabolischen Antwort reflektiert werden, sondern in eine Dimension des Energieverbrauchs übertragen werden (Jüptner and Weiller 1995; Logothetis et al. 2001). Dadurch ist nur bedingt nachvollziehbar, welche neuronalen Aktivitäten dem Energieverbrauch im Detail zugrunde liegen. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass

schnell aufeinander folgende Verarbeitungsschritte schlecht getrennt dargestellt werden können. Dies ist durch die Trägheit der hämodynamischen Antworten bedingt. Die zeitliche Auflösung des Verfahrens ist daher relativ gering.

### **2.2.2 Elektrophysiologische Verfahren**

Zu den wichtigsten elektrophysiologischen Messverfahren zählen die Elektroenzephalographie (EEG) und die Magnetoenzephalographie (MEG). Grundlage des Signals ist in beiden Fällen die Summation postsynaptischer Aktivitäten von synchron feuernenden Nervenzellen (s. auch Kapitel 5). Diese Aktivitäten, die eine Bewegung elektrisch geladener Teilchen und damit einen Stromfluss darstellen, können auf der Kopfoberfläche als Potentialverschiebungen (im EEG) oder als Änderungen des magnetischen Feldes (im MEG) detektiert werden. Da die Aktivitäten vergleichsweise schwach sind, ist allerdings eine Mittelwertbildung über eine hinreichend große Anzahl von vergleichbaren Ereignissen nötig, um die ereigniskorrelierten Aktivitäten von der sie umgebenden Hintergrundaktivität zu trennen. Erst durch diesen Schritt wird eine detaillierte Analyse der auf Reize evozierten neuronalen Antworten möglich.

Die zeitliche Auflösung, die mit elektrophysiologischen Verfahren erreicht werden kann, liegt im Millisekundenbereich (s. Abbildung 4). Die räumliche Zuordnung der gemessenen Aktivität zu kortikalen Strukturen gestaltet sich bei den elektrophysiologischen Verfahren dagegen deutlich schwieriger als bei den hämodynamischen Verfahren. Nach einer Untersuchung von Cohen et al. (1990) können mit der Magnetoenzephalographie zwar vorgegebene Aktivitätsquellen mit einer mittleren Abweichung von 8 mm lokalisiert werden - in anderen Untersuchungen wurde sogar eine räumliche Genauigkeit von bis zu 3mm erzielt - diese Ergebnisse setzen allerdings ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis sowie eine einfache Quellenkonfiguration voraus (Yamamoto et al. 1988; Gharib et al. 1995; Leahy et al. 1998). Die räumliche Zuordnung von komplexen Quellenkonfigurationen zu neuroanatomischen Strukturen ist dagegen aufgrund des inversen Problems schwierig (s. dazu auch Kapitel 5).

### 2.2.3 Zusammenfassung

Alle heute zur Verfügung stehenden funktionellen Messverfahren haben ihre Stärken und Schwächen. Für die Auswahl eines Verfahrens kommt es daher maßgeblich auf die kognitive Funktion an, die untersucht werden soll, sowie auf das Modell, das bezüglich der neuronalen Implementierung dieser Funktion zugrunde gelegt wird. Weiter ist entscheidend, ob das zeitliche oder das räumliche Muster der Verarbeitung im Mittelpunkt des Interesses steht.

In der vorliegenden Arbeit soll die Verarbeitung von Sprache untersucht werden. Nach heutigem Forschungsstand wird davon ausgegangen, dass bei der Perzeption von Sprache verschiedene Verarbeitungsschritte in schneller zeitlicher Abfolge ablaufen. Ein für diesen Zweck geeignetes Messverfahren sollte daher eine hohe zeitliche Auflösung besitzen. Zugleich soll das in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Messverfahren für einen zukünftigen Einsatz im Rahmen der Neuronavigation geeignet sein. Für diesen Anwendungsbereich sind gute räumliche Darstellungsmöglichkeiten unabdingbar. Es wäre daher ein Messverfahren optimal, das sowohl die zeitliche als auch die räumliche Dimension der Verarbeitung von Sprache detailliert erfassen kann. Ein Verfahren, das beide Voraussetzungen zur vollen Zufriedenheit erfüllt, steht im Moment nicht zur Verfügung. Unter den vorhandenen Messtechniken sind das MEG und das fMRT die vielversprechendsten Kandidaten für einen Einsatz im Rahmen der funktionellen Neuronavigation.

Im direkten Vergleich zwischen diesen beiden Messverfahren bietet die Magnetoenzephalographie für einen klinischen Einsatz den Vorteil, dass sie im Gegensatz zur funktionellen Kernspintomographie vollkommen nicht-invasiv ist, da ausschließlich Aktivitäten von der Kopfoberfläche abgeleitet werden. Zudem werden die Patienten während einer MEG-Messung nicht durch räumliche Enge oder Lärm belastet, wie es im MRT der Fall ist. Eine Untersuchung im MEG ist somit für die Patienten schonender. Ferner ist dieses Messverfahren auch für solche Patienten geeignet, die eine Kontraindikation für eine Untersuchung im Kernspintomographen aufweisen (Herzschrittmacher, Gefäßclips etc.). Neben diesen Aspekten der praktischen Anwendung fallen bei

fMRT-Untersuchungen außerdem einige messtechnisch bedingte Unsicherheitsfaktoren ins Gewicht, die beim MEG eine untergeordnete Rolle spielen. So setzt sich das BOLD-Signal neben dem Signal aus dem Gewebe auch aus einer intravaskulären Komponente zusammen (Roberts et al. 2000; Logothetis et al. 2001). Eine pathologische Gefäßarchitektur, wie sie häufig im Falle eines Gehirntumors vorliegt, kann daher die räumliche Genauigkeit einer fMRT-Messung deutlich reduzieren (Inoue et al. 1999). Zusätzlich kann die Ödembildung in der Tumorumgebung zu einer Störung des Messsignals führen. Insgesamt scheint die Magnetoenzephalographie angesichts ihrer hohen zeitlichen Sensitivität, der schonenden Anwendbarkeit bei Patienten und der geringen Anfälligkeit für die genannten Störfaktoren dem gesuchten Profil für ein Verfahren zur Darstellung sprachgebundener Aktivitäten im Rahmen der funktionellen Neuronavigation relativ nahe zu kommen. Ein weiterer Punkt, der für den Einsatz dieser Technik gerade bei der Untersuchung komplexer kognitiver Prozesse wie die Verarbeitung von Sprache spricht, ist die Tatsache, dass diese Prozesse mit hoher Wahrscheinlichkeit in ebenso komplexen neuronalen Netzwerken repräsentiert sind. Eine Lokalisation von umschriebenen Aktivitätszentren, wie sie in fMRT-Messungen erfolgt, wird dieser Komplexität möglicherweise nicht gerecht. Im Gegensatz dazu ermöglicht es die Technik der Magnetoenzephalographie, das raumzeitliche Aktivierungsmuster dynamisch darzustellen. Die Schwachstelle dieses Verfahrens bleibt allerdings die eingeschränkte räumliche Auflösung. Dennoch belegen neuere Studien, dass sprachrelevante Gebiete mit dem MEG reliabel und valide lokalisiert werden können (Billingsley-Marshall et al. 2004). Zudem bieten neue Auswertverfahren und eine Kombination des MEG mit anderen funktionellen Messverfahren vielversprechende Möglichkeiten, die räumlichen Darstellungsmöglichkeiten in Zukunft zu verbessern (Ahlfors and Simpson 2004; Im et al. 2005).

### 3 Neuronale Korrelate der Sprachverarbeitung

In den letzten 20 Jahren wurden zahlreiche Studien zur Lokalisation von sprachlichen Verarbeitungsprozessen im Gehirn publiziert. In dem Großteil dieser Studien wurden die Positronenemissionstomographie und die funktionelle Magnetresonanztomographie eingesetzt. Einige der Studien werden im Folgenden vorgestellt. Aufgrund der großen Heterogenität der Studien und der teilweise unübersichtlichen Datenlage, werden sich die folgenden Ausführungen auf die Gehirnareale konzentrieren, zu denen konsistente Daten vorliegen. Dies trifft v. a. auf den frontalen und den temporalen Kortex zu (Demonet and Thierry 2001; Bookheimer 2002, s. Indefrey 2003 für einen Überblick). Neben diesen Arealen ist eine Vielzahl weiterer Areale an der Verarbeitung von Sprache beteiligt (s. Demonet et al. 2005 für einen Überblick). Eine vollständige Diskussion würde allerdings den Rahmen der Arbeit sprengen.

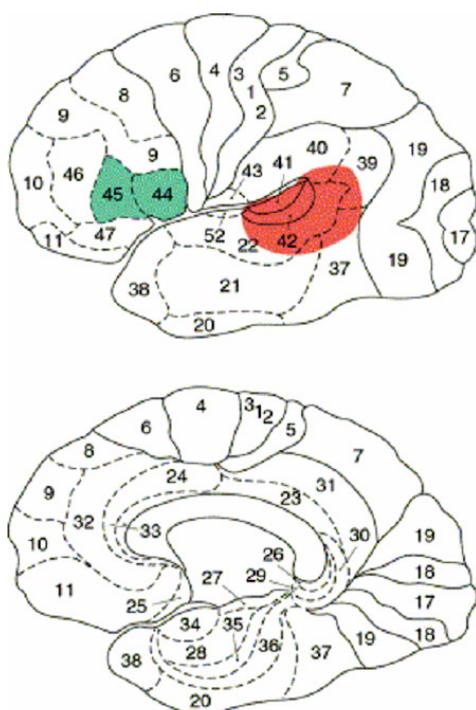
#### 3.1 Die „visual word form area“

Die erste kortikale Verarbeitung eines jeden visuellen Stimulus findet im okzipitalen Kortex statt. Im assoziativen visuellen Kortex und benachbarten Gebieten sind aber bereits Unterschiede zwischen der Verarbeitung von sprachlichem und der Verarbeitung von nichtsprachlichem visuellem Material feststellbar. So konnte gezeigt werden, dass der mediale extrastriale Kortex der linken Hemisphäre durch Wörter und Pseudowörter, nicht aber durch Buchstabenketten, Symbole oder ein Fixationskreuz aktiviert wird (Petersen et al. 1988; Posner et al. 1988; Petersen et al. 1990). Da dieses Areal darüber hinaus nur während visueller, dagegen aber nicht während auditiver Stimulation aktiviert war, wurde es von den Autoren als *Visual word form area* (VWFA) bezeichnet und mit der automatischen Verarbeitung von Wortschriftbildern in Zusammenhang gebracht (Petersen et al. 1988; Dehaene et al. 2002; Fiebach et al. 2002). Die Tatsache, dass Pseudowörter in diesem Areal eine vergleichbare Aktivierung wie Wörter auslösen (Petersen et al. 1990), belegt dabei, dass es sich um eine Form der prälexikalischen Verarbeitung, d.h. eine

Verarbeitung vor dem Zugriff auf den Lexikoneintrag, handelt. Diese Ergebnisse konnten seither in zahlreichen Studien repliziert und spezifiziert werden. So beschrieben James et al. (2005), dass sich die VWFA im linken Gyrus fusiformis befindet. Weiter belegen ihre Experimente, dass ein Areal, das sich posterior von der VWFA befindet, für die Verarbeitung von Buchstabenketten relevant ist, wohingegen ein Areal, das sich anterior davon befindet, für die Verarbeitung von Einzelbuchstaben relevant ist. In anderen Studien konnten weitere kortikale Areale identifiziert werden, die für die prälexikalische Verarbeitung von Buchstabenketten relevant sind. Diese liegen alle im Bereich des okzipitotemporalen Kortex. Es handelt sich dabei u. a. um Anteile des lateralen okzipitotemporalen Kortex (Posner et al. 1988).

### **3.2 Der frontale Kortex**

Eines der beiden klassischen Sprachzentren wird seit den Untersuchungen von Broca (1861) im frontalen Kortex der sprachdominanten Hemisphäre vermutet. Seither war dieses Areal häufig im Fokus hirnpathologischer und funktionell-bildgebender Untersuchungen. Diese Untersuchungen erbrachten u. a., dass der frontale Kortex eine große strukturelle und funktionelle Inhomogenität aufweist. So konnten Deacon (1992b) anhand von Tierstudien zeigen, dass innerhalb des frontalen Kortex verschiedene Module existieren, die bestimmte Faserprojektionen zu anderen Hirnarealen besitzen und bestimmte Funktionen bei der Verarbeitung von Sprache innehaben. Auch beim Menschen unterscheiden sich einzelne Bereiche innerhalb des frontalen Kortex strukturell und funktionell voneinander (Amunts et al. 1999). Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über die funktionelle Differenzierung gegeben werden, wobei sich auf die Funktionen konzentriert wird, die direkt mit der Verarbeitung von Sprache in Zusammenhang stehen. Für eine anatomische Groborientierung werden die Begriffe *Prämotorischer Kortex* (BA 6), *Präfrontaler Kortex* (BA 10, 46, 11, 47) und *Broca-Areal* (BA 44, 45) sowie die Einteilung der kortikalen Oberfläche in die Brodmann-Areale (BA) verwendet (s. Abbildung 5).



**Abbildung 5** Die zytoarchitektonischen Rindenfelder nach Brodmann.

In grüner Farbe ist das sogenannte Broca-Areal, in roter Farbe das Wernicke-Areal dargestellt (hier inklusive der auditorischen Verarbeitungsgebiete).

### 3.2.1 Das Broca-Areal

Aufgrund der Symptomatik von Patienten mit einer sogenannten Broca-Aphasie, die u. a. eine deutliche Sprechhemmung zeigen, wurde schon früh eine Beteiligung der Broca-Region an der Artikulation vermutet. Die Tatsache, dass durch eine gezielte elektrokorticale Stimulation des Broca-Areals eine Störung expressiver Sprachfunktionen erzeugt werden kann, unterstützt diese Annahme (Schäffler et al. 1993). In mehreren Studien mit funktionellbildgebenden Verfahren konnte zudem gezeigt werden, dass das Broca-Areal neben der offenen Artikulation (Blank et al. 2002; Price et al. 2006) auch während der sogenannten inneren Artikulation, d.h. einem Sprechen ohne hörbare Lautproduktion, aktiviert ist (Petersen et al. 1988; Wise et al. 1991a; Warburton et al. 1996). Es gelang sogar, im Gehirn nichtmenschlicher Primaten spezialisierte Nervenzellen zu identifizieren, die das neuronale Korrelat dieser inneren Artikulation darstellen. Die Tatsache, dass sich diese Neurone bei den

Affen in dem zur Broca-Region des Menschen homologen Areal befinden (Gallese et al. 1996), kann als weiterer Hinweis auf die zentrale Rolle der Broca-Region für die Artikulation gewertet werden <sup>5</sup>.

Neben einer Beteiligung der Broca-Region an der Artikulation wird auch eine Beteiligung dieses Areals an der Verarbeitung phonologischer Informationen diskutiert. Unterstützung für diese Annahme liefern u. a. die Forschungsergebnisse von Démonet et al. (1992). In ihrer Studie sollten Probanden in Pseudowörtern, die sie hörten, nach bestimmten Phonemen suchen. Während der Bearbeitung dieser Aufgabe waren u. a. Aktivierungen in BA 44 und 45 messbar. Auch in anderen Studien, in denen Wörter auf das Vorhandensein bestimmter Laute zu überprüfen waren, oder Stimuli hinsichtlich ihrer phonetischen Struktur bewertet werden sollten, zeigte sich eine gesteigerte Aktivität im Broca-Areal (Sergent et al. 1992; Zatorre et al. 1992; 1996; Katzir et al. 2005). Metaanalysen bestätigen ebenfalls, dass in der BA 44 und im Bereich des Übergangs der BA 44 zur BA 6 eine phonologische Verarbeitung stattfindet (Démonet et al. 1996; Bookheimer 2002). Darüber hinaus existieren Studien, die Hinweise darauf liefern, dass im IFG eine Transferierung von geschriebener Sprache in ihre phonologische Form, eine sogenannte *Graphem-Phonem-Konvertierung*, erfolgt (Fiez et al. 1999; Hagoort et al. 1999; Fiebach et al. 2002). So waren beispielsweise in Experimenten, in denen Probanden entscheiden sollten, ob sich visuell dargebotene Stimuli reimen, Aktivitäten in den BA 44 und 45 messbar (Zatorre et al. 1992; Paulesu et al. 1993; Shaywitz et al. 1995). Da diese Aufgaben eine Transformierung der visuellen Information in eine lautliche notwendig machen, wurden diese Aktivierungen als Korrelate der *Graphem-Phonem-Konvertierung* interpretiert.

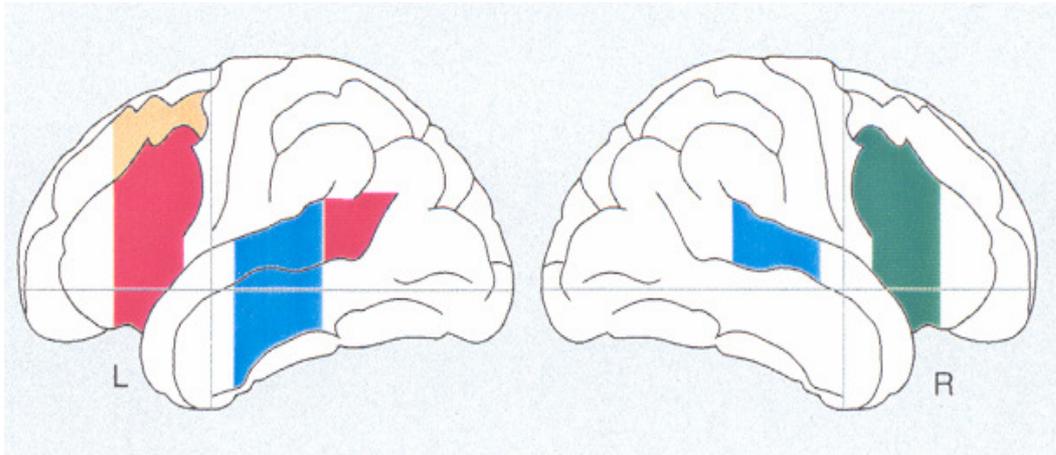
Zusätzlich waren das Broca-Areal und benachbarte Strukturen in Experimenten aktiviert, in denen Probanden Verben generieren oder verarbeiten sollten (Petersen et al. 1988; Wise et al. 1991a; Buckner et al. 1995; Warburton et al.

---

<sup>5</sup> Die innere Artikulation spielt auch im Rahmen der *Motor-Theorie der Sprache* eine wichtige Rolle. Diese Theorie postuliert, dass Gehörtes und Gelesenes zuerst intern artikuliert wird, bevor es weiterverarbeitet wird (Liberman 1957, Liberman & Mattingly 1985).

1996). Als eine mögliche Erklärung für diese Aktivierungen wurde eine starke Kopplung der Verben an motorische Assoziationen angegeben (s. Pulvermüller 1999 für einen Überblick). Diese Annahme ist gut mit den Ergebnissen von Martin et al. (1995) vereinbar, die belegen, dass frontale Areale während der Verarbeitung von Wörtern, die Aktionen oder Werkzeuge bezeichnen, stark aktiviert sind, dagegen aber nicht während der Verarbeitung von Wörtern, die Farben bezeichnen. Inwieweit das Broca-Areal selbst in diesem Zusammenhang eine Rolle spielt, oder ob die gemessenen Aktivierungen v. a. durch die Nähe des Gebietes zu motorischen und prämotorischen Gebieten bedingt sind, kann anhand dieser Ergebnisse allerdings nicht eindeutig beantwortet werden.

Als eine weitere Funktion der Broca-Region wird die Verarbeitung von grammatikalischen und syntaktischen Informationen diskutiert (s. Abbildung 6). So konnten Just et al. (1996) in einer fMRT-Studie zeigen, dass die Menge der in BA 44 und 45 gelegenen aktivierten Voxel mit zunehmender Satzkomplexität ansteigt. Auch in einer PET-Studie wurde in diesen Regionen während der Verarbeitung von komplexen Sätzen eine höhere Aktivität gemessen als während der Verarbeitung von weniger komplexen Satzkonstruktionen (Stromswold et al. 1996). In beiden Studien war allerdings nicht eindeutig zu entscheiden, ob diese Ergebnisse durch eine komplexere Syntaxanalyse oder eine gesteigerte Gedächtnisbelastung hervorgerufen wurden. Da auch Belege für eine direkte Beteiligung der Broca-Region an der phonologischen Schleife des Arbeitsgedächtnisses vorliegen (Paulesu et al. 1993; Fiez et al. 1996; Gruber and von Cramon 2001; Gruber and von Cramon 2003), und eine komplexere Syntaxanalyse wahrscheinlich mit einer gesteigerten Aktivierung des Arbeitsgedächtnisses einhergeht, kann von einer Kombination aus beiden Faktoren ausgegangen werden (Stromswold et al. 1996; Fiebach et al. 2001). Allerdings scheint es innerhalb des Broca-Areals kleine Areale zu geben, die für die syntaktische Analyse in besonderem Maße relevant zu sein scheinen. Ein solcher Bereich konnte im inferioren Anteil der BA 44 isoliert werden (Dapretto and Bookheimer 1999; Friederici et al. 2000a; s. Indefrey 2003 für einen Überblick).



**Abbildung 6** Die Beteiligung kortikaler Areale an der Satzverarbeitung

Die Areale, in denen reproduzierbare und modalitätsunabhängige Aktivierungen während der Satzverarbeitung messbar waren, sind in roter Farbe dargestellt. Die Areale, die zusätzlich während des Hörens von Sätzen aktiviert waren, sind blau dargestellt. Die Regionen, die zusätzlich bei komplexen Sätzen aktiviert waren, sind grün dargestellt, und die Regionen, die zusätzlich bei der Verarbeitung geschriebener Sätze aktiviert waren, sind gelb dargestellt. (Aus Indefrey 2001a)

### 3.2.2 Der Präfrontale Kortex

Die Präfrontalregion hat in der Evolution eine deutliche Vergrößerung erfahren (s. Duus 1995), was dazu führte, dass in der Region der Sitz intellektueller Fähigkeiten und der Persönlichkeit vermutet wurde. Zudem zeigte sich, dass dieses Gebiet an der Verarbeitung von Sprache beteiligt ist.

In mehreren PET- und fMRT-Studien war eine Aktivierung frontaler Kortexvolumina messbar, wenn die Verarbeitung von Wörtern mit der Verarbeitung von Tönen verglichen wurde. Diese Ergebnisse wurden dahingehend interpretiert, dass im präfrontalen Kortex eine semantische Analyse von Wörtern stattfindet (Demonet et al. 1992; Binder et al. 1997). Unterstützung für diese Annahme lieferten Experimente, in denen Wörter semantisch kategorisiert werden sollten. In vielen dieser Studien zeigten sich ebenfalls reproduzierbare Aktivitäten in Teilen des PFC (Petersen et al. 1988; Posner et al. 1988; 1990; Kapur et al. 1994; Poldrack et al. 1999). Demb et al. (1995) konnten darüber hinaus eine positive Korrelation zwischen der Stärke der Aktivierung im PFC und der Tiefe der semantischen Verarbeitung

demonstrieren. Die Vermutung, dass im PFC eine semantische Verarbeitung stattfindet, wurde in den letzten Jahren durch zahlreiche weitere Forschungsergebnisse gestützt (Wagner et al. 2000; 2001).

Neben der Verarbeitung semantischer Informationen wird die Präfrontalregion vor allem als Sitz von Aufmerksamkeits-, Kontroll- und Planungsfunktionen diskutiert (Jonides et al. 1993; Milham et al. 2001). Diese Funktionen sind in besonderem Maße auch für die Verarbeitung von Sprache relevant und in Folge dessen häufig nur schwierig von der eigentlichen linguistischen Verarbeitung zu trennen. Als Beispiel sei eine Untersuchung von (Wildgruber et al. 1999) genannt, in der das Reihensprechen von Monatsnamen keine Aktivierung in der Präfrontalregion erzeugte, das Aufsagen der Monatsnamen in umgekehrter Reihenfolge dagegen aber zu einer deutlichen Aktivierung der BAs 9 und 46 führte. In einer anderen Studie zeigte sich, dass Aktivierungen, die während der Verarbeitung sprachlicher Stimuli im PFC auftraten, alleine durch das häufige Wiederholen der Stimuli zum Verschwinden gebracht werden konnten (Raichle 1994). Die Ergebnisse dieser Studien können als Hinweis darauf gewertet werden, dass der PFC mit Kontrollfunktionen in Zusammenhang steht und dass diese Kontrollfunktionen eine zunehmendere Bedeutung erlangen, je komplexer der Sprachverarbeitungsprozess ist. Weitere Prozesse, die wahrscheinlich vom PFC aus gesteuert werden, sind Prozesse der Selektion, des Wiedererkennens und der Fehlerdetektion (Indefrey et al. 2001b). Auch diese Funktionen spielen im Rahmen der Sprachverarbeitung eine Rolle. Da in der hier vorgestellten Literaturübersicht allerdings vor allem die Funktionen diskutiert werden sollen, die direkt mit der Sprachverarbeitung auf linguistischer Ebene in Verbindung stehen, werden diese Funktionen nicht näher erläutert.

### **3.3 Der Temporale Kortex**

Zusätzlich zu den beschriebenen Aktivitäten in frontalen Arealen waren in zahlreichen Studien zur Sprachverarbeitung ebenfalls Aktivierungen in temporalen Hirnbereichen messbar. Ähnlich wie beim frontalen Kortex, führte

dies auch beim temporalen Kortex dazu, dass dieser in funktionell unterscheidbare Subregionen aufgeteilt wurde. Auf neuroanatomischer Ebene wird häufig eine Einteilung der Temporalregion in den auditorischen Kortex und dessen Assoziationsgebiete (BA 41, 42, Teile der BA 22), den superioren temporalen Gyrus (STG) mit dem eigentlichen Wernicke-Areal (Teile der BAs 22, 39 und 40), den mittleren temporalen Gyrus (MTG) (BA 21, 37) und den inferioren temporalen Gyrus (ITG) (BA 20, inferiore Anteile von BA 37) vorgenommen. Für die Sprachverarbeitung scheinen v. a. des Wernicke-Areal und der mittlere temporale Gyrus relevant zu sein.

### **3.3.1 Das Wernicke-Areal**

Das Wernicke- Areal ist dem primären auditorischen Kortex und dessen Assoziationsgebieten direkt benachbart. Ein Ziel der Erforschung des temporalen Kortex mit bildgebenden Verfahren war es daher zu trennen, wo in diesem Gebiet akustische Reize verarbeitet werden, wo sich die Verarbeitung von Sprachlauten davon abgrenzen lässt, und wo die eigentliche linguistische Verarbeitung erfolgt.

Ein erster Schritt zur Beantwortung dieser Fragen besteht darin, Unterschiede zwischen der Verarbeitung von sprachlichen und von nicht-sprachlichen auditiven Reizen zu identifizieren. Dies versuchten beispielsweise Démonet et al. (1992), indem sie Aktivierungen, die während der Verarbeitung von Phonemen auftraten, mit den Aktivierungen verglichen, die während der Verarbeitung von Tönen auftraten. Dabei zeigte sich, dass die auditorischen Assoziationsgebiete im STG beider Hemisphären und der anteriore Anteil des Wernicke-Gebietes an der Verarbeitung von Phonemen beteiligt sind (s. auch Demonet et al. 1994). Die Frage, ob die gemessenen Unterschiede zwischen Phonemen und Tönen durch den sprachlichen Charakter der Phoneme oder ihre physikalische Komplexität bedingt sind, konnte allerdings mit dieser Studie nicht eindeutig beantwortet werden. Um den Einfluss des Faktors „Sprachlichkeit“ unabhängig von dem Faktor „physikalische Komplexität“ untersuchen zu können, verwendeten Binder et al. (1996) Wörter und

Tonsequenzen, die in ihren Frequenzen gleichermaßen variierten. Die Kontrastierung der beiden Bedingungen erbrachte, dass der STG vergleichbar auf komplexe linguistische und nichtlinguistische auditive Stimuli reagiert. Dies belegen auch andere Studien, in denen die Verarbeitung von Wörtern mit der Verarbeitung von Non-Wörtern oder veränderten Sprachlauten verglichen wurde (Wise et al. 1991b; Binder et al. 1997; Binder et al. 2000). Dagegen war in der Studie von Binder (1996) im Bereich des STS, des MTG, des ITG sowie des Gyrus angularis und des lateralen Frontallappens der linken Hemisphäre eine Präferenz für die Verarbeitung von Wörtern festzustellen. Es wurde daher die These formuliert, dass große Teile des STG auf die physikalische Komplexität des Stimulusmaterials und weniger auf linguistische Inhalte reagieren, wogegen der STS, der posteriore STG, der Gyrus angularis, der MTG und der ITS an der linguistischen Verarbeitung beteiligt sind.

Diese Annahmen werden durch die Ergebnisse von Démonet (1992) gestützt. In ihren Experimenten verglichen die Autoren u. a. die Verarbeitung von Wörtern mit der Verarbeitung von phonologisch korrekten Pseudowörtern. Der Vergleich erbrachte, dass Wörter im Gegensatz zu Pseudowörtern Aktivierungen in BA 39 und BA 40 sowie in einem kleinen Anteil des inferioren temporalen Kortex der linken Hemisphäre hervorrufen. Da sich Wörter und Pseudowörter hinsichtlich ihrer phonologischen Struktur sehr ähnlich sind, konnten diese Aktivierungen nicht durch eine phonologische Verarbeitung bedingt sein und wurden daher als Korrelat einer höheren linguistischen Verarbeitung gewertet. Dies legen auch die Ergebnisse einer Studie nahe, in der in den posterioren Anteilen des STS in beiden Hemisphären Aktivierungen messbar waren, wenn Probanden entscheiden sollten, ob Verb-Nomen-Paare semantisch zusammenpassen (Warburton et al. 1996). Auch während der Produktion von Verben zeigten sich in mehreren Studien Aktivierungen im Bereich des Wernicke-Areals (Wise et al. 1991a; Snyder et al. 1995; Warburton et al. 1996). Aus diesen und ähnlichen Ergebnissen wurde abgeleitet, dass im posterioren Temporallappen und im Bereich des STS semantische Verarbeitungsprozesse stattfinden.

Zusätzlich zu der Beteiligung an phonologischen und semantischen Verarbeitungsprozessen wird diskutiert, dass der temporale Kortex auch bei der Verarbeitung von Sätzen eine wichtige Rolle spielt. Kuperberg et al. (2000) verglichen die Verarbeitung von auditiv präsentierten Sätzen mit der Verarbeitung von Ketten aus zufällig zusammengestellten Wörtern. Bei den Sätzen waren im Vergleich zu den Wort-Ketten der rechte STG und der linke MTG aktiviert. In der gleichen Studie wurden auch Unterschiede zwischen der Verarbeitung von verschiedenen Typen fehlerhafter Sätze untersucht, die entweder semantische, syntaktische oder pragmatische Verstöße enthielten. Eine Aktivierung des linken STG zeigte sich nur bei den Sätzen mit Verletzungen auf pragmatischer Ebene. Die Sätze mit semantischen Verletzungen aktivierten dagegen vorwiegend den STG der rechten Hemisphäre und beide MTG. Die syntaktisch inkorrekten Sätze erzeugten in dieser Studie keine Aktivierung im Bereich des STG. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen, die keine Hinweise auf eine Beteiligung des STG an syntaktischen Analyseprozessen liefern, belegen allerdings andere Studien, dass der linke STG für die Analyse komplexer syntaktischer Strukturen relevant ist <sup>6</sup> (Just et al. 1996; Dapretto and Bookheimer 1999; Friederici et al. 2003b). Diese Frage wird in zukünftigen Studien beantwortet werden müssen.

### 3.3.2 Der Mittlere Temporale Gyrus (MTG)

Zahlreiche Studien belegen Aktivierungen des MTG während der Verarbeitung

---

<sup>6</sup> Die unterschiedlichen Ergebnisse könnten durch Unterschiede in dem verwendeten Stimulusmaterial bedingt sein. So verwendeten Kuperberg et al. (2000) eine *subcategorisation-violation* (ein intransitives Verb wird mit einem direkten Objekt verbunden) als syntaktischen Verstoß. Die anderen genannten Studien arbeiteten dagegen mit Modulationen auf der Ebene der Phrasenstruktur. Da die Subkategorisierungsinformationen möglicherweise auf eine andere Art und Weise abgerufen werden als Informationen, die für die strukturelle Analyse eines Satzes benötigt werden, könnte dies eine Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse sein. Bezieht man zudem die Modalität der Stimulation in die Betrachtungen mit ein, zeigt sich, dass die mittleren Abschnitte der beiden STG und des linken MTG nur bei auditiver Satzpräsentation und nicht bei visueller Stimulation aktiviert waren. Es liegt daher nahe, dass diese Areale keine unmittelbare Rolle bei der Satzverarbeitung spielen. Nur im hinteren Anteil des STG konnten in einer Metaanalyse reliable, modalitätsunabhängige Aktivierungen während der Satzperzeption festgestellt werden (s. Indefrey 2003).

von Wörtern. In einer dieser Studien verglichen beispielsweise Binder et al. (1997) die Verarbeitung von Wörtern, die semantisch kategorisiert werden sollten, mit der Verarbeitung von Tonsequenzen. Sie fanden heraus, dass Wörter im Gegensatz zu Tönen den MTG, den ITG (BA 21, 37), den Gyrus fusiformis und den Gyrus angularis der linken Hemisphäre aktivieren. Auch die Ergebnisse von Crinion et al. (2003) weisen darauf hin, dass der MTG eine wichtige Funktion bei der Verarbeitung von Sprache innehat. Die Autoren verglichen die Verarbeitung von gehörten Erzählungen mit der Verarbeitung von rückwärts abgespielten Erzählungen. Die Kontrastierung der beiden Bedingungen erbrachte Aktivierungsunterschiede im MTG mit Betonung der linken Hemisphäre. Da diese Unterschiede nicht durch physikalische Stimuluscharakteristika bedingt sein konnten, wurde sie mit der semantischen Verarbeitung in Verbindung gebracht.

In einigen Studien wurde versucht, die genaue Anordnung von Lexikoneinträgen innerhalb des temporalen Kortex darzustellen (s. Caramazza, 1990 und Bookheimer 2002 für einen Überblick). So beschrieben beispielsweise Howard et al. (1992) die Lokalisation eines Lexikons für gesprochene Wörter und eines Lexikons für geschriebene Wörter. Ersteres sollte im mittleren STG und dem MTG der linken Hemisphäre lokalisiert sein, wogegen Letzteres im posterioren Anteil des MTG vermutet wurde. Martin und Chao (2001) fanden Hinweise darauf, dass im posterioren Anteil des temporalen Kortex kategorielle Informationen allgemein verarbeitet werden, wogegen in anterioren Anteilen spezifische Mitglieder solcher Kategorien analysiert werden. Andere Autoren unterteilten die Lexikoneinträge nach der Art ihrer Assoziationen und fanden Hinweise darauf, dass der mittlere temporale Gyrus Lexikoneinträge von Wörtern beherbergt, die mit motorischen Tätigkeiten assoziiert sind (s. Bookheimer 2000 für einen Überblick). Weitere Unterstützung für diese Annahme lieferten Studien, die Aktivitäten in BA 21, 20 und 37 bei der Verarbeitung von Wörtern, die Werkzeuge bezeichnen (Damasio et al. 1996; Chao et al. 1999; Perani et al. 1999) und während der Generierung von Verben, die mit einer manuellen Tätigkeit assoziiert sind (Martin et al. 1995; Snyder et al. 1995), belegen. In anderen Studien wurde demonstriert, dass sich

die Anordnung von Lexikoneinträgen danach richtet, ob die Einträge künstliche oder natürliche Objekte bezeichnen (Moore and Price 1999). Ob die unterschiedlichen Vorstellungen einer festgeschriebenen Anordnung von Lexikoneinträgen in umschriebenen Arealen des temporalen Kortex der Realität entsprechen, muss aufgrund der uneinheitlichen Ergebnisse zum jetzigen Zeitpunkt allerdings offen bleiben <sup>7</sup>.

### 3.4 Zusammenfassung

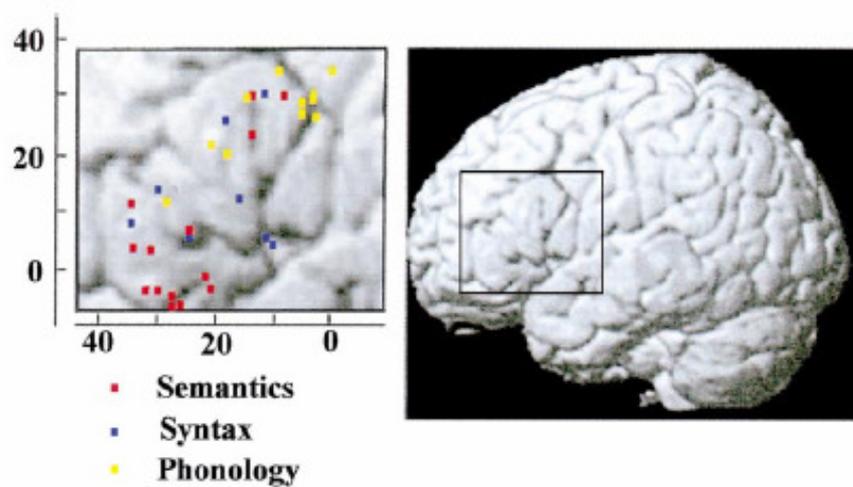
Die publizierte Literatur deutet darauf hin, dass sprachspezifische Funktionen überwiegend im frontalen und temporalen Kortex der linken Hemisphäre lokalisiert sind. Es wird angenommen, dass der posteriore IFG in beiden Hemisphären mit der Artikulation in Zusammenhang steht und dass die posterioren Anteile des Broca-Gebietes für die phonologisch-phonematische Analyse von Sprachlauten relevant sind. Zudem belegen Studien, dass eine syntaktische Verarbeitung in BA 45 und Anteilen der BA 44 stattfindet. Die mehr anterior gelegenen frontalen Gebiete (pars orbitalis, BA 47 und Teile der BA 10) scheinen dagegen ein Ort der semantischen Verarbeitung zu sein (s. Abbildung 7). Akustisch-phonetische Analysen erfolgen neben frontalen Gebieten auch im superioren temporalen Kortex beider Hemisphären. Im Gegensatz dazu scheint der MTG des Temporallappens an der Speicherung und dem Abruf von Lexikoneinträgen beteiligt zu sein. Eine syntaktische Verarbeitung wird im Wernicke-Areal sowie im Bereich des STG der linken Hemisphäre vermutet.

Frontale und temporale Areale haben somit zahlreiche wichtige Funktionen im Rahmen der Sprachverarbeitung inne. Darüber hinaus gibt es Belege dafür, dass diese Areale in einer engen Verbindung zueinander stehen. Auf neuroanatomischer Ebene sind starke Faserverbindungen (der sogenannte

---

<sup>7</sup> Ein weiteres Ergebnis der genannten Arbeiten war, dass für die Aktivierung bestimmter Lexikoneinträge neben ihrer Zugehörigkeit zu einer semantischen Kategorie auch die Fragestellung, die im Zusammenhang mit ihrer Auswahl gestellt wird, eine Rolle spielt. Zudem zeigte sich, dass die genaue Anordnung der Einzeleinträge individuell verschieden ist (Damasio, 1996).

fasciculus arcuatus) das Korrelat dieser Verbindung (s. Duus 1995). Darüber hinaus liefern Studien, in denen beispielsweise ein inhibitorischer Einfluss der Frontalregion auf temporale Areale nachgewiesen werden konnte (Frith et al. 1991), Hinweise auf eine enge funktionelle Kopplung zwischen dem frontalen und dem temporalen Kortex. Von einigen Autoren wird daher angenommen, dass diese Bereiche zu einem Netzwerk gehören, in dem Sprache verarbeitet wird (Pulvermüller 1999).



**Abbildung 7** Die Sprachverarbeitung im inferioren frontalen Gyrus der linken Hemisphäre

Aktivierungen, die mit der semantischen Verarbeitung in Zusammenhang stehen, sind in rot dargestellt. Aktivierungen, die mit der syntaktischen Verarbeitung in Zusammenhang stehen, sind blau, und Aktivierungen, die mit der phonologischen Verarbeitung in Zusammenhang stehen, sind gelb. (Aus Bookheimer 2002)

Aus der Konzentration auf perisylvische Areale in der vorgestellten Literaturübersicht soll jedoch nicht der Eindruck entstehen, dass ausschließlich diese Areale für die Sprachverarbeitung relevant sind. Aus funktionellen Untersuchungen weiß man, dass eine Vielzahl weiterer Areale an der Verarbeitung von Sprache beteiligt ist. Dazu zählen der linke inferiore Gyrus temporalis und das Kleinhirn (Damasio et al. 1996; Gabrieli et al. 1998; Wildgruber et al. 1999; Kuperberg et al. 2000; Demonet and Thierry 2001). Zudem wurden in mehreren Studien Aktivierungen in der rechten Hemisphäre beschrieben (Demonet et al. 1992; Just et al. 1996). Die genaue Rolle dieser Aktivierungen wird in zukünftigen Studien geklärt werden müssen.

## 4 Der Zeitverlauf der Sprachverarbeitung

Neben der Frage, welche neuronalen Strukturen an der Verarbeitung von Sprache beteiligt sind, wurde ebenfalls erforscht, mit welcher zeitlichen Dynamik diese Verarbeitung abläuft. Im nächsten Abschnitt werden einige Ergebnisse aus Studien zur Sprachverarbeitung vorgestellt, in denen der zeitliche Aspekt im Mittelpunkt stand.

### 4.1 EEG-Komponenten

Die Verarbeitung von Sprache ist ein schneller Prozess. So werden beispielsweise beim Sprechen ca. 10 Phoneme pro Sekunde geäußert (Flanagan 1965). Aufgrund ihrer hohen zeitlichen Auflösung sind elektro-physiologische Verfahren in hohem Maße für die Darstellung derart schneller Prozesse geeignet. Ein wichtiges Ziel der Erforschung von Sprache mit diesen Messverfahren besteht in der Identifikation von Komponenten, die umschriebene Verarbeitungsschritte abbilden<sup>8</sup>.

In der Literatur sind bisher zahlreiche Komponenten der sensorischen (sog. exogene Komponenten) und der sich daran anschließenden kognitiven Verarbeitung (sog. endogene Komponenten) von Sprache beschrieben worden. Komponenten, die mit der visuellen und prälexikalischen Verarbeitung von sprachlichem Material assoziiert sind, sind die P150 und die N200. Unter den Komponenten, die mit der linguistischen Verarbeitung von Sprache in Verbindung gebracht werden, sind v. a. die N280, die N400, die LAN und die P600 zu nennen<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Als Komponente wird eine Änderung des elektrischen oder magnetischen Feldes bezeichnet, die durch drei Parameter definiert ist: Ihre Latenz, ihre Polarität und ihre Topographie. Nimmt man an, dass eine Komponente einen bestimmten Analyseprozess widerspiegelt, so ist zudem zu postulieren, dass sie durch gezielte Manipulation des Stimulusmaterials modulierbar sein sollte.

<sup>9</sup> Obwohl diese Komponenten bereits seit mehr als 20 Jahren erforscht werden, und sie zuverlässig mit bestimmten Sprachverarbeitungsschritten in Verbindung gebracht werden können, kann bis heute nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass sie sprachspezifisch sind.

#### 4.1.1 N200 / N2b

Es wird angenommen, dass während des Lesens von Wörtern in den ersten 200 ms nach Stimuluspräsentation visuoperzeptive und prälexikalische Verarbeitungsprozesse ablaufen. Die prälexikalische Verarbeitung wird dabei mit einer negativen Komponente mit einer maximalen Auslenkung bei 200 ms, der sogenannten N200, in Zusammenhang gebracht. In einer Studie von Nobre et al. (1994) konnte mittels der Technik der direkten elektrokortikalen Ableitung gezeigt werden, dass diese negative Potentialverschiebung nur durch Wörter und Non-Wörter, nicht aber durch andere visuelle Stimuli wie Gesichter oder Bilder evoziert wird. Die neuronalen Generatoren dieser Komponente wurden im posterioren Gyrus fusiformis lokalisiert. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die N200 nicht auf das Vorhandensein semantischer Inhalte reagiert. Sie wurde daher als Korrelat der prälexikalischen Verarbeitung von Buchstabenketten interpretiert. In diese Richtung weisen auch die Ergebnisse einer Studie von Van Petten und Kutas (1990), in der gezeigt werden konnte, dass die N200 mit der Verarbeitung der Länge visuell präsentierter Wörter in Zusammenhang steht.

Neben der N200, die in inferior-temporalen und parietalen Gebieten auftritt, wurde in anderen Studien das Auftreten von negativen Potentialverschiebungen mit einem Maximum bei 200 ms p. s. in frontalen Kortexarealen während der Verarbeitung von Sprache beschrieben. So berichteten Connolly et al. (1990) über eine frontozentral lokalisierte N200, die während der Verarbeitung von gesprochenen Sätzen auf kontextuelle Einflüsse reagiert. Lange et al. (1998) beschrieben zudem eine Negativierung, die nach 200 ms im medialen präfrontalen Kortex auftritt, wenn Stimuli unter dem Gesichtspunkt ihrer Relevanz zur Lösung einer Aufgabe analysiert und einer möglichen Antwortreaktion zugeordnet werden sollen. Von einigen Autoren wird angenommen, dass diese Komponente eine Aufmerksamkeitszuwendung in Richtung relevanter Reize reflektiert und sie wurde daher in Abgrenzung zur N200 als N2b bezeichnet (Näätänen 1983). Diese Komponente scheint nur indirekt mit der Sprachverarbeitung in Zusammenhang zu stehen.

#### 4.1.2 P150 / P200

Zusätzlich zu den genannten Negativierungen, die während der Verarbeitung von sprachlichem Material im Zeitbereich um 200 ms p. s. messbar sind, wurden in anderen Studien Positivierungen mit einem Maximum bei 200 ms beschrieben. Diese Komponenten wurden zum Teil ebenfalls mit Prozessen der visuellen Verarbeitung in Zusammenhang gebracht, konnten in einigen Studien aber auch bei nicht-visueller Stimulation beobachtet werden und wurden daher als Korrelate höher-sprachlicher Verarbeitungsprozesse interpretiert.

Schendan et al. (1998) beschrieben eine Positivierung mit einem Peak bei 150 ms nach Stimuluspräsentation, die für wortähnliche Stimuli und Gesichter eine höhere Amplitude aufwies als für Objektstimuli. Sie hatte ihre maximale Ausprägung an zentralen Elektroden und wurde als P150 bezeichnet. Von den Autoren wurde angenommen, dass diese Komponente ein Korrelat der Verarbeitung von statistischen Regularitäten des visuellen Inputs darstellt. Im Gegensatz dazu beschrieben Abdullaev und Posner (1997) zwei EEG-Komponenten, die während der Produktion von Verben nach 200 ms auftreten. Die erste dieser beiden Komponente war eine Positivierung mit einem Maximum bei 170 ms, die am stärksten an Elektroden über der frontalen Mittellinie ausgeprägt war. Die zweite Komponente war ebenfalls eine Positivierung. Sie trat mit einer Latenz von 250 ms über dem linken frontalen Kortex auf. Diese Komponente hatte eine längere Latenz, wenn eine ungewöhnliche Nutzungsmöglichkeit für ein Objekt genannt werden sollte, als wenn ein gewöhnlicher Gebrauch genannt werden sollte. Sie wurde daher mit der Verarbeitung von Verben in Verbindung gebracht. Auch Preissl et al. (1995) beschrieben während der Verarbeitung von Verben das Auftreten einer Positivierung im Zeitbereich um 200 ms über frontozentralen Arealen. Diese Welle wurde während der Verarbeitung von Nomina nicht in einer vergleichbaren Stärke evoziert. Als Erklärung für den Unterschied zwischen den beiden Wortklassen wurde die im Vergleich zu den Nomina stärkere Kopplung der Verben an motorische Assoziationen angegeben.

### 4.1.3 ELAN / N280 / LPN

Auch während der Verarbeitung von Sätzen konnten Komponenten identifiziert werden, die bereits im Zeitbereich um 200 ms nach Stimuluspräsentation auftreten. In diesem Zusammenhang ist v. a. die ELAN (*Early left anterior negativity*) zu nennen, die im Zeitbereich zwischen 150 und 250 ms p. s. während der Verarbeitung syntaktisch fehlerhafter Sätze in anterioren Gebieten der linken Hemisphäre evoziert wird (Neville et al. 1991, Friederici 1995, 1996; Hahne and Friederici 1999). Sie wird als Korrelat früher, automatisch ablaufender Parsing-Operationen verstanden, bei denen auf Basis von Informationen über die Wortkategorie eines Wortes eine erste syntaktische Struktur aufgebaut wird (Friederici 2002).

Unter den ereigniskorrelierten Potentialen, die mit der Verarbeitung von sprachlichem Material in Zusammenhang stehen, und die nach 200 ms auftreten, ist weiter die von Neville et al. (1992) beschriebene N280 zu nennen. Es handelt sich dabei um eine frontale Negativierung, die durch Funktionswörter, nicht aber durch inhaltstragende Wörter evoziert wird. King und Kutas (2002) konnten in weiteren Untersuchungen demonstrieren, dass die N280 durch lexikalische Faktoren wie der Wortlänge und Frequenz beeinflusst wird und auch bei Wörtern der offenen Klasse zu finden ist. Nach ihren Erkenntnissen beeinflussen sowohl die Wortklasse, der ein Wort angehört, als auch die Faktoren Wortlänge und Frequenz die Latenz dieser Komponente. Dabei evozieren kurze, hochfrequente Funktionswörter eine N280 bereits bei 270 ms., längere, niedrigfrequente Funktionswörter erzeugen sie erst bei 300 ms und bei Wörtern der offenen Klasse ist sie erst bei 315 ms messbar. Da sich eine größere Latenz der N280 auch bei ungeübten Lesern und Zweitspracherwerbern beobachten lässt (Neville et al. 1992, 1993), wurde die Komponente von King und Kutas (2002) mit Aspekten der lexikalischen Verarbeitung in Verbindung gebracht und als *Lexical Processing Negativity* (LPN) bezeichnet.

#### 4.1.4 P400 / N400 / LAN

Weitere Potentialverschiebungen, die mit der Sprachverarbeitung in Verbindung stehen, treten mit einer Latenz von ca. 400 ms nach Stimuluspräsentation auf. Von Nobre (1994) wurde eine Positivierung mit einer Latenz von 400 ms beschrieben, die in ihren Experimenten nur durch Wörter, dagegen aber nicht durch Buchstabenketten, Funktionswörter und andere visuelle Stimuli erzeugt wurde. Sie trat im Bereich des anterioren Gyrus fusiformis auf. In weiteren Experimenten konnte gezeigt werden, dass semantisches Priming und Kontexteffekte die Ausprägung dieser ursprünglich als P400 bezeichneten Welle verringern. Die Komponente wurde daher von den Autoren als Korrelat einer Aktivierung des sogenannten *word concept* interpretiert.

Eine weit bekanntere Komponente, die ebenfalls ihre maximale Auslenkung im Zeitbereich um 400 ms nach Stimuluspräsentation hat, ist die N400. Sie wurde erstmals von Kutas und Hillyard im Jahr 1980 beschrieben. In ihren Experimenten wurde sie durch semantisch inkongruente Wörter am Ende eines Satzes über zentro-parietalen Gebieten evoziert. Dabei zeigte sich eine Korrelation der Amplitude der Komponente mit dem Grad der semantischen Abweichung des Zielwortes: Je stärker die Abweichung war, desto größer war die Amplitude der N400. Die N400 wurde seit ihrer Erstbeschreibung in zahlreichen weiteren Studien untersucht (Kutas et al. 1988; Van Petten and Kutas 1990; Hinojosa et al. 2001). In diesen Studien konnte u. a. demonstriert werden, dass die N400 auch während der Verarbeitung von semantisch unverbundenen Wortpaaren (Holcomb 1988; Nobre and McCarthy 1995), von nicht zu einem semantischen Kontext passenden Bildern (Barrett and Rugg 1990) und Geräuschen (Van Petten and Rieffers 1995) sowie während der Verarbeitung von semantisch abweichenden Stimuli in einer Zeichensprache (Neville et al. 1997) oder einer musikalischen Sequenz (Besson 1995) generiert wird. Dagegen wird die N400 nicht durch geometrische Formen oder unaussprechliche Non-Wörter hervorgerufen (Smith and Halgren 1987; Van Petten and Senkfor 1996). Aus diesen Ergebnissen wurde geschlossen, dass die N400 die Verarbeitung semantischer Inhalte bzw. die Integration von

Informationen auf semantisch-thematischer Ebene reflektiert (Garnsey et al. 1989; Friederici 1995; Osterhout & Holcomb 1992; Osterhout & Mobley 1995; McKinnon & Osterhout 1996; Neville et al. 1991).

In weiteren Studien wurde die Modulierbarkeit der N400 durch kontextuelle Einflüsse untersucht. Dabei wurde berichtet, dass die Amplitude der N400 geringer ausfällt, wenn ein Wort in einem Kontext steht, als wenn es als Einzelwort verarbeitet wird (Kutas and Hillyard 1983). Der Einfluss des Kontextes zeigte sich auch in der Beobachtung, dass die Amplitude der N400 bei Wörtern, die in einem sinnvollen Kontext stehen, deutlich geringer ausfällt als bei Wörtern, die in einem bedeutungslosen Kontext stehen (Van Petten and Kutas 1991). Zusätzlich stellte man fest, dass die Amplitude der N400 im Verlauf eines Satzes und damit mit Zunahme der kontextuellen Information sukzessive abnimmt (Kutas et al. 1988; Kutas and Van Petten 1990).

Derartige Kontexteffekte sind allerdings nicht ausschließlich bei linguistischem Material zu beobachten, sondern sind auch für abweichende Elemente in nicht-linguistischen Kontexten wie Buchstaben- oder Zahlenfolgen nachweisbar (Polich et al. 1985). Aus diesen Ergebnissen wurde der Schluss gezogen, dass die N400 allgemein mit dem Auftreten von unerwarteten Informationen in einem Kontext in Zusammenhang steht. Diese Annahme wird durch Studien gestützt, die belegen, dass die Amplitude der N400 antiproportional zu der Vorhersagewahrscheinlichkeit des Auftretens eines Wortes an einer bestimmten Satzposition ist. Dabei gilt, je höher die Auftretenswahrscheinlichkeit des Wortes ist, desto geringer ist die von ihm ausgelöste N400 (Kutas and Hillyard 1980; 1984a; Kutas et al. 1984b). In eine ähnliche Richtung weisen die Ergebnisse von Friederici (1995). Die Autorin konnte zeigen, dass das letzte Wort eines Satzes, wenn es semantisch stark mit dem bisher Gesagten assoziiert ist, eine N400 mit niedrigerer Amplitude auslöst, als wenn es zwar passend, aber sehr allgemein ist. Auch bei Wörtern, die außerhalb eines Kontextes stehen, spielt die Vorhersagbarkeit ihres Auftretens für die Amplitude der von ihnen erzeugten N400 eine große Rolle. Wenn kein Kontext vorhanden ist, wird diese Vorhersagbarkeit durch die allgemeine Gebrauchsfrequenz des

Wortes bestimmt. Es konnte eine deutliche Korrelation zwischen der allgemeinen Gebrauchsfrequenz von Wörtern und der Amplitude der von ihnen erzeugten N400 festgestellt werden. Dabei gilt, dass die Amplitude der N400 umso größer ausfällt, je geringer die Gebrauchsfrequenz des entsprechenden Wortes ist (Van Petten and Kutas 1990).

Die bisher beschriebene zentroparietal lokalisierte N400, die auf die Erwartbarkeit von Stimuli bzw. ihre Abweichung in semantischen Kontexten reagiert, scheint von einer weiteren Negativierung abgrenzbar zu sein, die im Zeitbereich zwischen 250-400 ms bei syntaktischen Verstößen in frontalen Gebieten auftritt. So konnten Osterhout und Holcomb (1992) bei der Verarbeitung von Sätzen mit Phrasenstrukturverletzungen eine Negativierung im Zeitbereich um 400 ms nach Stimuluspräsentation über linken anterioren Gebieten messen. Eine vergleichbare Negativierung wurde auch in zahlreichen weiteren Studien beobachtet (Friederici et al. 1996; Hagoort 2003; Rösler et al. 1998, s. Indefrey 2003 für einen Überblick). Sie wird als *left anterior negativity* (LAN) bezeichnet und mit der Verarbeitung von Verstößen auf syntaktischer Ebene in Verbindung gebracht.

#### **4.1.5 P600 / SPS**

Neville (1991) und Osterhout (1992) beschrieben in Experimenten, in denen die Verarbeitung von syntaktischen Fehlern untersucht wurde, erstmals das Auftreten einer späten Positivierung mit einer maximalen Auslenkung bei 600 ms. Diese Komponente wurde als P600 bezeichnet<sup>10</sup> und war am stärksten über frontozentralen Gebieten der rechten Hemisphäre ausgeprägt.

Die P600 wurde seit ihrer Erstbeschreibung intensiv erforscht. Dabei zeigte sich, dass sie durch Phrasenstrukturverletzungen (Osterhout & Holcomb 1992; Hagoort et al. 1993; Hahne and Friederici 1999), Subkategorisierungsfehler (Osterhout et al. 1997), *Agreement-violations* (Hagoort et al. 1993, Osterhout & Mobley 1995) und durch Subjazen-Verletzungen (Neville et al. 1991) evoziert

---

<sup>10</sup> Die Komponente wurde von Hagoort (1993) auch als *syntactic positive shift* (SPS) bezeichnet.

wird, und dies sowohl bei visueller als auch bei auditiver Stimulation. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die P600 mit der Analyse komplexer syntaktischer Informationen sowie der Verarbeitung von syntaktischen Fehlern in Verbindung gebracht (Frisch et al. 2002; Osterhout & Holcomb 1992, Hagoort et al. 1993; Kaan et al. 2000) <sup>11</sup>.

#### 4.1.6 Zusammenfassung

Die visuoperzeptive und die prälexikalische Verarbeitung visuell präsentierter sprachlicher Stimuli erfolgt nach heutigem Wissenstand in den ersten 200 ms nach Stimuluspräsentation. Darauf folgen lexikalische und postlexikalische Verarbeitungsschritte. Zu den wichtigsten Komponenten dieser Verarbeitungsschritte zählen die N400, die LAN und die P600. Die N400 wird dabei mit der Integration semantischer Inhalte bzw. der Verarbeitung unerwarteter Informationen in Verbindung gebracht, wogegen die LAN und P600 als Korrelate syntaktischer Verarbeitungsprozesse angesehen werden.

Von einigen Autoren wurde versucht, die beschriebenen Komponenten in ein Gesamtmodell der Sprachperzeption zu integrieren. Als Beispiel für ein solches Modell sei das Drei-Phasen-Modell der syntaktischen Analyse von Friederici (Friederici et al. 1996, 2002, 2003a) genannt. In dieses Modell, das in Anlehnung an serielle Satzverarbeitungsmodelle formuliert wurde, gehen sowohl die ELAN als auch die LAN/N400 und die P600 als elektro-physiologische Marker ein. Dem Modell zufolge beginnt die Analyse eines Satzes mit einem weitgehend automatisch ablaufenden syntaktischen Parsing auf Basis von Wortkategorie-Informationen. Als elektro-physiologisches Korrelat dieses Prozesses wird die ELAN angesehen. Die zweite Stufe der Analyse

---

<sup>11</sup> Obwohl weitgehende Einigkeit über die Prozesse besteht, die der P600 zugrunde liegen, konnten die neuronalen Generatoren dieser Komponente bisher nicht eindeutig lokalisiert werden. Ihre maximale Ausprägung wurde in zahlreichen Studien über zentroparietalen oder posterioren Arealen des Kortex beschrieben. Oft war die P600 allerdings über weiten Teilen des Kortex ableitbar. Einigen Untersuchungen zufolge scheint die durch syntaktische Verstöße evozierte P600 weiter posterior lokalisiert zu sein als die P600, die im Zusammenhang mit der Verarbeitung syntaktischer Komplexität oder syntaktischer Ambiguitäten auftritt (Hagoort, 2003). Von einigen Autoren wird daher angenommen, dass es sich um verschiedene Komponenten handeln könnte, die unterschiedliche Aspekte der syntaktischen Verarbeitung reflektieren (Friederici et al. 2001).

beinhaltet die Integration lexiko-semantischer und morpho-syntaktischer Informationen. Diese Prozesse werden durch die LAN und N400 markiert. Die dritte Stufe besteht in einer abschließenden Integration aller Informationen bzw. einer syntaktischen Reanalyse, falls Fehler festgestellt wurden. Dieser Schritt wird in der P600 abgebildet. Ob dieses Modell der psychologischen Realität der Sprachverarbeitung entspricht, wird in weiteren Studien untersucht werden müssen.

## **4.2 MEG-Korrelate**

Im letzten Jahrzehnt wurde zunehmend auch die MEG-Technik für die Erforschung von Prozessen der Sprachverarbeitung eingesetzt. Analog zum EEG können auch mit dem MEG Komponenten identifiziert werden, die bestimmte Teilprozesse der Verarbeitung abbilden. Diese Komponenten sind allerdings noch nicht in dem Maße reproduzierbar belegt, wie es für die EEG-Komponenten der Fall ist. Daher werden sie im Folgenden immer in direktem Bezug zu dem aktuellen Forschungsstand, wie er in den beiden vorherigen Kapiteln dargelegt wurde, betrachtet. Bei der Magnetoenzephalographie ist es zudem möglich, die sogenannte induzierte Aktivität, welche Informationen über die Aktivität in einzelnen Frequenzbereichen enthält, zu analysieren (s. Kapitel 5). Auch diese Ergebnisse sollen kurz dargestellt werden.

### **4.2.1 Die evozierte Aktivität**

In den letzten Jahren konnten in MEG-Experimenten mehrere Komponenten der biomagnetischen Aktivität identifiziert werden, die mit der Sprachverarbeitung in Zusammenhang stehen. Die zuverlässigsten Ergebnisse liegen für die M180, die M350 und die N400m vor.

#### **4.2.1.1 Die prälexikalische Verarbeitung**

Wie bereits dargestellt, erbrachten zahlreiche EEG-Studien Hinweise darauf, dass die prälexikalische Verarbeitung von gelesenen Material innerhalb der ersten 200 ms nach Stimuluspräsentation erfolgt. Diese Verarbeitung findet

nach heutigem Wissenstand vorwiegend in medialen extrastriatalen und basalen temporookzipitalen Gebieten statt (Petersen et al. 1988; Posner et al. 1988, 1990; Nobre et al. 1994; Fiebach et al. 2002; James et al. 2005).

Vergleichbare Ergebnisse erbrachten auch MEG-Studien. So untersuchten Tarkiainen et al. (1999) die Verarbeitung von Letter-Strings, Wörtern, wortähnlichen Stimuli und geometrischen Symbolen unterschiedlicher Länge. Das Ergebnis dieser Studie war, dass im Zeitbereich um 180 ms nach Stimuluspräsentation im inferioren okzipitotemporalen Kortex beider Hemisphären eine spezifische Verarbeitung von visuellen Stimuli stattfindet, die Buchstaben oder buchstabenähnliche Zeichen enthalten. Als Grundlage für die gemessenen Aktivitäten wurden von den Autoren Prozesse angenommen, bei denen der visuelle Input komplex gefiltert und anschließend mit der sprachlichen Verarbeitungsdomäne verbunden wird. Auch Simos et al. (2002) beschrieben, dass die Verarbeitung von visuell präsentierten Wörtern, Pseudohomophonen und Pseudowörtern zu einer linksbetonten Aktivierung der basalen temporalen Kortizes im Zeitbereich um 200 ms führt. Bereits in einer früheren Arbeit der Autoren hatte sich während der Verarbeitung von visuell präsentierten Wörtern eine linksbetonte Aktivierung dieser Gebiete im besagten Zeitfenster gezeigt (Simos et al. 1998). Die Tatsache, dass während der Verarbeitung von auditorisch präsentierten Wörtern keine vergleichbaren Aktivitäten messbar waren, stützt zudem die Annahme, dass die Aktivitäten um 200 ms mit der Verarbeitung von wortähnlichen, visuellen Stimuli in Zusammenhang stehen. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse weiterer MEG-Studien untermauert (Papanicolaou et al. 1999; Kober et al. 2001). So beschrieben auch Eulitz et al. (2000) eine Komponente der evozierten biomagnetischen Aktivität, die mit einer Latenz von 180 ms auftritt, und eine Präferenz für visuell präsentierte wortähnliche Stimuli aufweist. Diese Komponente hatte in ihren Experimenten eine deutlich höhere Amplitude bei der Verarbeitung von *False Fonts* (Ketten aus verdrehten Buchstaben) und Wörtern als bei der Verarbeitung von Mustern und Punkten und war am stärksten über temporookzipitalen Gebieten ausgeprägt. Da sie im Zeitbereich um 180 ms nach Stimuluspräsentation auftrat, wurde sie als M180 bezeichnet.

Neben der Verarbeitung geschriebener Sprache wurde in anderen Studien die Verarbeitung gesprochener Sprache untersucht. Dabei wurden Hinweise auf eine frühe spezifische Verarbeitung von Sprachlauten gefunden. Näätänen et al. (1997) untersuchten die Modulation der sogenannten *Mismatch-Negativity* (MMN) während der Verarbeitung von korrekten (zur Muttersprache gehörenden) und abweichenden (nicht in der Muttersprache auftretenden) Phonemen. In ihren Experimenten zeigten sich bereits im Zeitbereich zwischen 100 und 150 ms post Stimulus erste Unterschiede. Diese wurden von den Autoren mit einer Aktivierung sprachspezifischer auditiver Gedächtnisspuren in Zusammenhang gebracht. Auch Palva et al. (2002) verglichen in ihren Experimenten die Verarbeitung von Sprach- und Nichtsprachlauten. Dabei fanden sie im Gamma-Band der evozierten Aktivität Anzeichen für eine sehr frühe spezifische Verarbeitung von Sprachlauten im Zeitbereich zwischen 40-60 ms im Bereich des auditorischen Kortex.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der MEG-Studien zur prälexikalischen Verarbeitung von sprachlichem und sprachverwandtem Material eine hohe Übereinstimmung zu den Ergebnissen aus Untersuchungen mit anderen funktionell-bildgebenden Verfahren. Diese Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: 200 ms nach Stimuluspräsentation findet eine Abspaltung der Verarbeitung buchstabenähnlicher Zeichen von der Verarbeitung anderer visueller Zeichen statt. Die spezifische Verarbeitung sprachverwandter Zeichen findet im temporookzipitalen Kortex und im basalen Temporallappen mit Betonung der linken Hemisphäre statt. Die spezifische Verarbeitung von Sprachlauten spaltet sich bereits 40 ms p. s. von der Verarbeitung nichtsprachlicher Laute im Bereich des auditorischen Kortex ab.

#### **4.2.1.2 Die sprachspezifische Verarbeitung**

Zahlreiche Studien, die in den letzten Jahren mit der Technik der Magnetoenzephalographie durchgeführt wurden, hatten das Ziel, die sprachspezifische Verarbeitung von der nichtsprachlichen Verarbeitung zu trennen. In einer Studie von Papanicolaou et al. (1999) wurde zu diesem Zweck die Verarbeitung von visuell und auditiv präsentierten Wörtern mit der

Verarbeitung von Gesichtern und Tönen verglichen. Dabei zeigten sich bei den Wörtern stärkere Aktivitäten im posterioren lateralen Temporallappen, dem medialen temporalen Gyrus, dem Gyrus supramarginalis und dem Gyrus angularis mit Betonung der linken Hemisphäre. Bei den visuell präsentierten Wörtern war der Hauptfokus der Aktivierung im posterioren temporalen Kortex der linken Hemisphäre lokalisiert, wogegen bei den auditiv präsentierten Wörtern große Bereiche des Temporallappens aktiviert waren. Ähnlich Aktivitäten konnten auch Simos et al. (1998) bei der Stimulation mit auditiv und visuell dargebotenen Wörtern im Vergleich zu Gesichtern messen. Modalitätsunabhängige Aktivitäten traten in ihren Experimenten bei den beiden Wortbedingungen in posterioren temporoparietalen Gebieten und dem posterioren Teil des mittleren temporalen Gyrus in beiden Hemisphären auf.

Neben dem Vergleich einer sprachlichen mit einer nichtsprachlichen Stimulationsbedingung wurden weitere Paradigmen eingesetzt, um Korrelate der sprachspezifischen Verarbeitung nachzuweisen. Sekiguchi et al. (2001) verwendeten ein Wiederholungs-Paradigma mit Wörtern und Non-Wörtern, um zu überprüfen, inwieweit im linken perisylvischen Kortex eine sprachspezifische Verarbeitung erfolgt. Die Grundannahmen waren dabei Folgende: Bei der Verarbeitung von Wörtern wird eine Wort-Repräsentation aktiviert. Diese ist im Falle einer Wiederholung der Wörter bereits voraktiviert und löst daher bei allen weiteren Präsentationen eine geringere biomagnetische Antwort als bei der Erstpräsentation aus. Für die Non-Wörter existieren keine entsprechenden Repräsentationen. Der Grad der kortikalen Aktivierung sollte daher bei jeder Wiederholung der Non-Wörter mit dem Grad der Aktivierung bei der Erstpräsentation vergleichbar sein. Die Autoren konnten in guter Übereinstimmung mit diesen Hypothesen zeigen, dass die magnetische Aktivität im posterioren Anteil des STG und in temporoparietalen Gebieten der linken Hemisphäre durch eine Wiederholung der Wörter reduziert wird, nicht aber durch eine Wiederholung der Non-Wörter. Dieser Effekt war im Zeitbereich zwischen 330-500 ms messbar. Die Autoren zogen daraus den Schluss, dass in den genannten kortikalen Gebieten die lexikalischen Repräsentationen von Wörtern ihren Sitz haben.

### 4.2.1.3 Semantik

In Experimenten mit bildgebenden Verfahren haben sich vor allem zwei Gebiete des Kortex als in hohem Maße relevant für die Verarbeitung semantischer Inhalte herausgestellt. Es handelt sich dabei um die BA 47 und den mittleren temporalen Gyrus der linken Hemisphäre (s. oben). Aus EEG-Studien ist zudem bekannt, dass die Verarbeitung lexiko-semantischer Inhalte im Zeitbereich zwischen 250 und 500 ms nach Stimuluspräsentation erfolgt. Ein Korrelat dieser Verarbeitung ist die N400. Auch mit dem MEG konnten Korrelate der semantischen Verarbeitung identifiziert werden.

Simos et al. (2002) verglichen die Aktivitäten während des lauten Lesens von Wörtern, Pseudohomophonen und Pseudowörtern<sup>12</sup>. Sie konnten während des lauten Lesens von Wörtern und Pseudohomophonen ab ca. 300 ms nach Stimuluspräsentation biomagnetische Aktivitäten im MTG messen, die während des Lesens von bedeutungslosen Pseudowörtern nicht auftraten. Die Aktivität im MTG wurde daher von den Autoren als Korrelat eines *whole-word-processing* bzw. einer automatischen lexiko-semantischen Analyse verstanden. In einer weiteren MEG-Studie untersuchten Walla et al. (2001) die Unterschiede zwischen dem oberflächlichen (perzeptuellen) und tiefen (semantischen) Enkodieren von Wörtern. Die Hauptunterschiede zwischen diesen beiden Verarbeitungsformen zeigten sich im Zeitbereich zwischen 200 und 550 ms nach Stimuluspräsentation. In diesem Zeitintervall wiesen der linke superiore temporale und der parietale Kortex eine signifikant höhere Aktivität während des Abrufs semantisch enkodierter Wörter als während des Abrufs perzeptuell enkodierter Wörter auf. Wesentlich schwächere Unterschiede waren in diesem Zeitfenster auch über linken und rechten frontalen Sensoren messbar. Diese Aktivierungen wurden von den Autoren als Zeichen für eine Beteiligung des PFC an der Suche nach assoziierten Informationen in der semantischen Enkodierbedingung interpretiert.

Suzuki et al. (2001) untersuchten die Verarbeitung von semantisch

---

<sup>12</sup> Pseudohomophone sind Wörter, welche die gleiche Aussprache, aber eine andere Bedeutung haben.

verbundenen und semantisch unverbundenen Kategorie-Nomen-Paaren (z. B. Möbel-Stuhl). In einem Lerndurchgang sollten die Probanden verschiedene Wortpaare lernen. In der anschließenden Testung sollten sie angeben, ob die Wortpaare semantisch zusammenpassen. Dabei wurden ihnen nicht nur die aus dem Lerndurchgang bekannten Paare präsentiert, sondern auch neue Paare sowie neue Zusammenstellungen aus Elementen bekannter Paare. Es ergaben sich somit 6 Typen von Wortpaaren, von denen je drei semantisch verbunden und drei semantisch unverbunden waren. Für die aus der Lernbedingung bekannten semantisch unverbundenen Paare zeigte sich im Zeitbereich zwischen 300-500 ms im Vergleich zu den semantisch verbundenen Paaren eine stärkere Aktivierung im linken frontotemporalen Kortex. Interessanterweise zeigten darüber hinaus auch die neuen Kombinationen eine stärkere Aktivität in diesem Gebiet. Dabei war es irrelevant, ob die neu kombinierten Paare semantisch verbunden oder semantisch unverbunden waren. Da sowohl semantische Inkongruität als auch der Unterschied zwischen der Lern- und der Testbedingung zu einer Aktivierung des linksseitigen frontotemporalen Kortex im Zeitbereich zwischen 300-500 ms führten, schlossen die Autoren, dass es sich bei den gemessenen Aktivitäten um eine Reaktion handelt, die sowohl auf unerwartete Wörter in einem semantischen Kontext als auch auf unerwartete Wörter in einem episodischen Kontext erfolgt.

Biomagnetische Aktivitäten, die durch die Faktoren Erwartbarkeit und semantische Inkongruenz moduliert werden, wurden auch von Helenius et al. (1998) erforscht. Die Autoren verwendeten in ihren Experimenten semantisch passende, unerwartete und semantisch abweichende Wörter, die jeweils als letztes Wort in einem visuell präsentierten Satz erschienen. Die semantisch unpassenden und die unerwarteten Wörter lösten im Gegensatz zu den semantisch passenden Wörtern nach ca. 250 ms eine Aktivierung des STG der linken Hemisphäre aus. Daraus wurde abgeleitet, dass in diesem Gebiet eine Analyse der Wortbedeutung erfolgt. Bei 350 ms spaltete sich zusätzlich die Verarbeitung der unerwarteten von der Verarbeitung der semantisch unpassenden Wörter ab. Dieser Zeitpunkt wurde daher von den Autoren als

Grenze zwischen der Verarbeitung einzelner Wörter und der Verarbeitung der Bedeutung des ganzen Satzes interpretiert.

Die Ergebnisse der genannten Studien, die belegen, dass Wörter im Zeitbereich zwischen 250-500 ms nach Gesichtspunkten ihrer Erwartbarkeit und ihrer Integrationsfähigkeit in einen semantischen Kontext bewertet werden, steht in Einklang mit der Datenlage aus der EEG-Forschung. Da in der EEG-Literatur die N400 als Korrelat dieser Verarbeitungsprozesse gilt, lag es nahe, nach einem biomagnetischen Äquivalent dieser Komponente zu suchen. Es standen zwei Kandidaten aus der MEG-Literatur zur Diskussion: die N400m und die M350 (Embick et al. 2001; Halgren et al. 2002). Pylkkänen et al. (2002) konnten allerdings zeigen, dass die M350 lexikalische Prozesse reflektiert, wogegen die N400m postlexikalische Prozesse reflektiert. Somit kommt v. a. die N400m als biomagnetisches Äquivalent der N400 in Frage. Träfe dies zu, sollte diese Komponente in vergleichbarer Weise wie die N400 durch den Kontext und die Wortfrequenz modulierbar sein. Dies bestätigten die Experimente von Halgren et al. (2002). In ihren Experimenten wurde u. a. die Verarbeitung von semantisch passenden mit der Verarbeitung von semantisch unpassenden Wörtern in Sätzen verglichen. Die Hauptunterschiede zwischen diesen beiden Bedingungen waren im Zeitbereich um 400 ms nach Stimuluspräsentation in der Region um den STS der linken Hemisphäre messbar. Dabei erzeugten die semantisch unpassenden Wörter eine stärkere magnetische Aktivität als die semantisch passenden Wörter<sup>13</sup>. Der Effekt wies somit große Ähnlichkeiten zu einer N400 auf. Im Unterschied zu der klassischen N400 war der mit der Magnetoenzephalographie gemessene Effekt allerdings nicht räumlich und zeitlich eng umschrieben, sondern es zeigte sich ein Wandern von Aktivitäten über verschiedene Hirnbereiche. So waren die stärkeren Aktivitäten, die sich bei den semantisch inkongruenten im Vergleich zu den kongruenten Wörtern zeigten, zuerst 250 ms nach Stimuluspräsentation im Wernicke-Gebiet messbar, breiteten sich dann in Richtung linksseitiger

---

<sup>13</sup> Das Auftreten des Effektes im STS stimmt mit der Lokalisation des Generators der N400m überein, wie sie von Helenius et al. (1998) angegeben wurde.

anterioren temporalen Gebiete aus, und erreichten nach 370 ms den linken frontalen Kortex. Danach waren weite Teile des frontalen und temporalen Gyrus der linken Hemisphäre aktiviert. Angesichts dieser Daten sprachen die Autoren von einem „N400-Prozess“. Ob dieses komplexe raumzeitliche Aktivierungsmuster der N400 entspricht, muss allerdings zum jetzigen Zeitpunkt offen bleiben.

#### 4.2.1.4 Grammatik und Syntax

Nach heutigem Wissensstand wird davon ausgegangen, dass die Analyse der grammatischen und syntaktischen Struktur von Sprache vor allem in frontalen und superioren temporalen Gebieten der linken Hemisphäre stattfindet. Es existieren verschiedene Modelle, welche die zeitliche Struktur dieser Verarbeitung beschreiben. In der EEG-Literatur werden v. a. die ELAN als Korrelat früher und die P600 als Korrelat später syntaktischer Parsingprozesse genannt. Untersuchungen mit dem MEG erbrachten ähnliche Ergebnisse.

Härle et al. (2002) verwendeten in ihren Experimenten Bilder von Objekten und stellten den Probanden eine semantische und eine grammatikalische Aufgabe. In einer Aufgabe sollten sie entscheiden, ob die Objekte natürlich oder künstlich sind und in einer zweiten Aufgabe, ob ihr Genus weiblich oder männlich ist. Als Ergebnis zeigte sich, dass während der Bearbeitung der grammatikalischen Aufgabe im Vergleich zu der semantischen Aufgabe eine stärkere magnetische Aktivität im Zeitbereich zwischen 150-275 ms nach Stimuluspräsentation über linken frontotemporalen Bereichen auftritt. Dagegen erzeugte die Bearbeitung der semantischen Aufgabe eine höhere Aktivität im rechten frontal Kortex zwischen 150-225 ms. Daraus wurde gefolgert, dass Prozesse der grammatikalischen Verarbeitung im Zeitfenster zwischen 150-275 ms in anterioren Gebieten der linken Hemisphäre ablaufen.

Auch Shtyrov et al. (2003) untersuchten die Verarbeitung von grammatikalischen Informationen. Sie beobachteten die Modulation der *Mismatch-Negativity* (MMN) während der Verarbeitung von finnischen Phrasen. Diese Phrasen waren entweder syntaktisch korrekt oder inkorrekt, wobei die Inkorrektheit durch die Änderung eines Phonems hervorgerufen wurde

(Kongruenz-Fehler). Den Versuchspersonen wurde keine explizite Aufgabe gestellt. Die fehlerhaften Stimuli erzeugten nach 210 ms eine stärkere MMN als die korrekten Stimuli. Dieser Effekt war vor allem im linken superioren temporalen Kortex messbar, woraus die Autoren den Schluss zogen, dass dieser Bereich für eine automatisch ablaufende grammatikalische Analyse relevant sei. Ob die in diesem Fall gemessenen Aktivierungen spezifisch für die Verarbeitung grammatikalischer Informationen sind, wird allerdings in weiteren Studien überprüft werden müssen.

Dhond et al. (2003) untersuchten ebenfalls die Verarbeitung von grammatikalischen Informationen im MEG. In ihrem Experiment sollten die Probanden die Vergangenheitsform von visuell präsentierten Verben bilden und angeben, ob es sich um eine reguläre oder irreguläre Flexion handelt. Während die Probanden beide Verbgruppen analysierten, zeigte sich eine Erregungsausbreitung von okzipital über temporal nach frontal mit Schwerpunkt in der linken Hemisphäre. Unterschiede zwischen den Bedingungen waren erst nach 300 ms feststellbar. Mit einer Latenz von 340 ms zeigte sich eine stärkere Aktivität im linken okzipitotemporalen Kortex für die irregulären Verben, um 470 ms eine höhere Aktivität in linken frontalen Bereichen (Broca-Areal) für die regulären Verben, und um 570 ms eine höhere Aktivität im dorsolateralen präfrontalen Kortex der rechten Hemisphäre für die irregulären Verben.

Neben grammatikalischen Aufgaben auf Einzelwortebene wurde auch die Verarbeitung von ganzen Sätzen im MEG erforscht. So untersuchten Knösche et al. (1999) die Verarbeitung von auditiv präsentierten Sätzen, die entweder korrekt oder syntaktisch fehlerhaft waren. Als syntaktische Verletzung verwendeten sie einen *word category error* (z. B. „Die Gans wurde im gefüttert.“). Bei der Betrachtung der Amplituden der ereigniskorrelierten magnetischen Aktivitäten zeigten sich drei Komponenten, die bei den inkorrekten Sätzen im Vergleich zu den korrekten Sätzen eine höhere Amplitude und eine Latenzverzögerung aufwiesen. Die Komponenten wurden als M1 (um 140 ms), M2 (um 200 ms) und M4 (250-600 ms) bezeichnet. Mithilfe einer Methode, die sich *Brain Surface Current Density Mapping* nennt,

konnte die Lokalisation der neuronalen Quellen dieser Komponenten beschrieben werden. Die Quellen der M1 und der M2 wurden in frontalen und temporalen Gebieten in beiden Hemisphären lokalisiert. Für die M4 wurden die Quellen in frontalen und temporalen Arealen der rechten Hemisphäre angegeben. Ähnliche Satzkonstruktionen wie sie in der Studie von Knösche et al. (1999) verwendet wurden, setzten auch Friederici et al. (2000b) ein. In Übereinstimmung zu der Vorgängerstudie war auch in dieser Studie eine Komponente mit einer Latenz von 140 ms messbar, deren Amplitude deutlich höher bei den inkorrekten als bei den korrekten Sätzen ausfiel. Die Quellen dieser Komponente wurden in temporalen und frontalen Arealen lokalisiert. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Knösche lag in dieser Studie der Schwerpunkt der Aktivierung allerdings bei einem Großteil der Versuchspersonen in der linken Hemisphäre.

#### **4.2.2 Die induzierte Aktivität**

Neben der Möglichkeit, ereigniskorrelierte Aktivitäten zu beschreiben, gibt es bei elektrophysiologischen Messverfahren auch die Möglichkeit, einzelne Frequenzbänder getrennt zu analysieren. Dies kann im Rahmen der Analyse der sogenannten induzierten Aktivität geschehen (s. dazu auch Kapitel 5). Da die Datenlage aus der MEG-Forschung zur induzierten Aktivität bei der Sprachverarbeitung uneinheitlich ist, sollen an dieser Stelle allerdings nur wenige Beispiele genannt werden.

Bei der Analyse der Aktivitäten in einzelnen Frequenzbändern haben sich vor allem die Frequenzen aus dem Gamma-Spektrum (>25 Hz) als für die Sprachverarbeitung relevant herausgestellt (Pulvermüller et al. 1996). So konnten in mehreren Studien im Frequenzbereich um 60 Hz spezifische Reaktionen auf Wörter belegt werden (Eulitz et al. 1996, 2000; Xiang et al. 2001). Neben der Verarbeitung von Wörtern zeigten sich auch während der Verarbeitung von korrekten und inkorrekten Sätzen Aktivitätsunterschiede in der induzierten Aktivität. So konnte gezeigt werden, dass sich im Frequenzbereich zwischen 2 und 10 Hz Effekte der syntaktischen Verarbeitung nachweisen lassen (Friederici et al. 2000b).

### 4.2.3 Zusammenfassung

Insgesamt gibt es zahlreiche Übereinstimmungen der Ergebnisse aus MEG-Studien zur Sprachperzeption zu den Ergebnissen aus Studien, in denen andere bildgebende Verfahren Anwendung fanden. So konnten mit der M180, der M350 und der N400m mehrere Komponenten der biomagnetischen Aktivität reproduzierbar belegt werden, die mit der Verarbeitung von sprachlichem Material in Verbindung stehen. Einige dieser Komponenten zeigen große Ähnlichkeiten zu bekannten Komponenten aus der EEG-Literatur. Dies betrifft vor allem die N400m und die Komponenten der prälexikalischen Verarbeitung. Im Gegensatz dazu konnten die in der EEG-Literatur beschriebenen Komponenten ELAN und P600 bisher in MEG-Experimenten nicht eindeutig reproduziert werden.

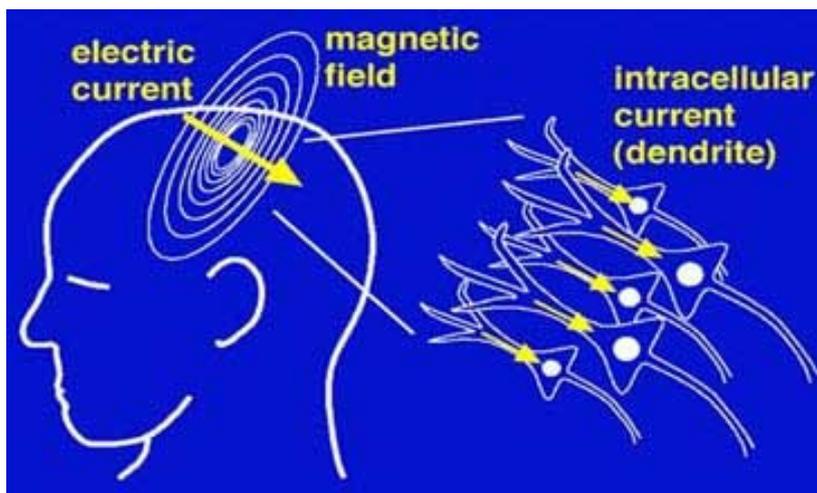
Hinsichtlich der Zuordnung sprachlicher Verarbeitungsschritte zu umschriebenen kortikalen Strukturen gibt es ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus Studien, in denen die Technik der Magnetoenzephalographie eingesetzt wurde, zu den Ergebnissen aus Studien, in denen hämodynamische Messverfahren eingesetzt wurden. Diese Übereinstimmungen betreffen allerdings v. a. die MEG-Studien, in denen äquivalente Stromdipole (ECDs) lokalisiert wurden. Wurden dagegen Algorithmen zur Auswertung des Signals eingesetzt, die eine dynamische Darstellung der Aktivierungen erlauben, zeigte sich, dass bereits bei einfachen sprachlichen Aufgaben ausgedehnte Bereiche des Kortex aktiviert sind. Darüber hinaus wurde wiederholt ein Wandern von Aktivitäten über weite Gebiete des Kortex beschrieben (Salmelin et al. 1994; Lounasmaa et al. 1996; Kober et al. 2001; Dhond et al. 2003). Da die Verarbeitung von Sprache ein komplexer und schneller Prozess ist, wäre es möglich, dass diese dynamischen Muster die Realität zutreffender abbilden als statische Darstellungen (s. auch Kober et al. 2001; Härle et al. 2002; Billingsley-Marshall et al. 2004). Dies wird in weiteren Studien überprüft werden müssen.

## 5 Die Technik der Magnetoenzephalographie

Die Technik der Magnetoenzephalographie wurde erstmals im Jahre 1972 von David Cohen eingesetzt. Die Basis des MEG-Signals bilden exzitatorische elektrische Potentiale an Synapsen (EPSPs), aus denen intrazelluläre Ströme in den apikalen Dendriten kortikaler Pyramidenzellen resultieren (s. Abbildung 8) (s. Hämäläinen et al. 1993; Cohen et al. 2003; Del Gratta et al. 2001; Baillet et al. 2001 für einen Überblick). Diese elektrischen Ströme erzeugen Magnetfelder, die außerhalb des Kopfes mithilfe von hochempfindlichen Sensoren detektiert werden können. Dabei gilt, dass ca. 10.000-100.000 Synapsen simultan aktiv sein müssen, um ein mit dem MEG messbares Signal zu erhalten (Wikswow et al. 1989). Die durch eine kortikale Aktivierung erzeugten Magnetfelder bewegen sich dabei in einer Größenordnung von 50-200 fT, was um ein Vielfaches geringer ist als die Stärke des Erdmagnetfeldes. Diese Tatsache macht die Verwendung hochsensitiver Detektoren, eine Abschirmung von Außeneinflüssen, und eine potente Verstärkung des Ursprungssignals nötig. Für die Messung und Verstärkung der magnetischen Felder werden Gradiometer und sogenannte *superconducting quantum interference devices* (SQUIDS) eingesetzt. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, benötigen Letztere eine Temperatur von 4°K, die durch eine Kühlung mit flüssigem Helium gewährleistet wird. Die Abschirmung von Außeneinflüssen wird durch die Messung in einem speziell abgeschirmten Raum sichergestellt.

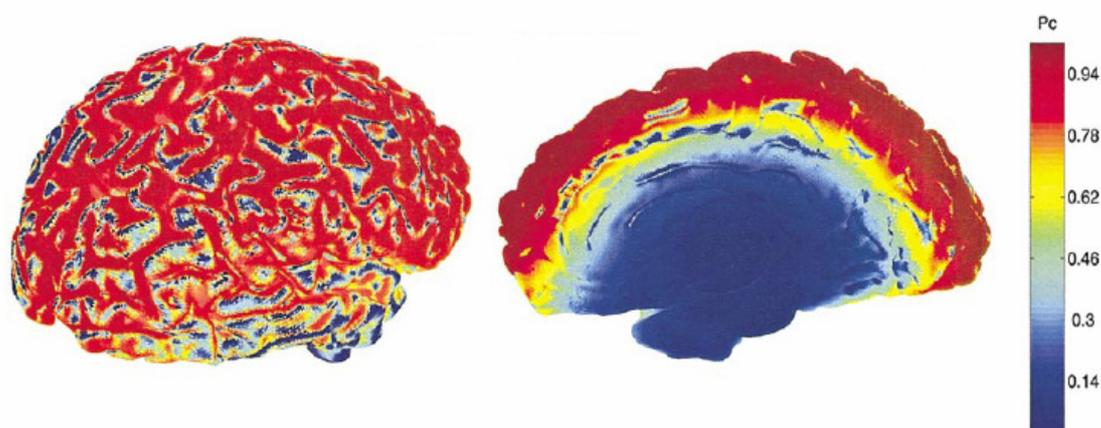
Die Magnetfelder, die mit der Technik der Magnetoenzephalographie gemessen werden können, gehen vorwiegend von tangential zur Kortexoberfläche verlaufenden elektrischen Strömen aus. Aus diesem Grund ging man bisher davon aus, dass mit diesem Messverfahren vorwiegend Aktivitäten, die ihre Quellen in den Sulci des Gehirns haben, detektiert werden können. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich ca. 2/3 der gesamten Kortexoberfläche in den Sulci des Gehirns befinden (Zilles 1990, Armstrong 1995), hieße das, dass die Magnetoenzephalographie für ca. 1/3 der kortikalen Aktivitäten blind wäre. Diese Annahme musste in den letzten Jahren korrigiert werden. So belegen neuere Forschungsergebnisse, dass die MEG-Technik

auch für den Großteil der Aktivitäten, die ihren Ursprung in den Gyri des Gehirns haben, sensitiv ist. Dies ist durch die Tatsache bedingt, dass auch im Bereich der Gyri ein Teil der elektrophysiologischen Aktivität nicht von streng radial ausgerichteten Dipolen ausgeht (Leahy et al. 1998; Hillebrand and Barnes 2002). Radiale Dipole spielen sogar nur bei ca. 5 % der kortikalen Oberfläche eine Rolle (Hillebrand and Barnes 2002). Berücksichtigt man diese Tatsache, ist die Magnetoenzephalographie nur für einen sehr kleinen Teil des gyralen Aspektes blind. Eine Beschränkung des Verfahrens zeigt sich allerdings, wenn die Quellen der elektromagnetischen Aktivität in der Tiefe liegen. So können Quellen, die mehr als 6,5 cm von einem Sensor entfernt sind, nicht mehr zuverlässig detektiert werden (s. Abbildung 9). Subkortikale Strukturen können folglich mit der Technik der Magnetoenzephalographie nicht erfasst werden.



**Abbildung 8** Die Quellen des MEG-Signals.

Die Abbildung zeigt die intrazellulären Ströme in den Dendriten von Pyramidenzellen, welche die Quelle für das mit der Magnetoenzephalographie messbare Magnetfeld darstellen. (Aus CTF Systems Inc., MEG Introduction, [www.ctf.com](http://www.ctf.com))



**Abbildung 9** Die Bereiche des Gehirns, die mit der MEG-Technik erfasst werden können

Die Abbildung zeigt die Wahrscheinlichkeiten, mit denen Quellen an der kortikalen Oberfläche und in tieferen Gebieten des Gehirns mit der Technik der Magnetoenzephalographie detektiert werden können ( $P_c$  = Prozent). Kortikale Quellen können mit hoher Wahrscheinlichkeit detektiert werden, wohingegen Aktivitätsquellen, die in tieferen Bereichen des Kortex bzw. subkortikal liegen, nicht mehr zuverlässig detektiert werden können. (Aus Hillebrand & Barnes 2002)

## 5.1 Die evozierte und die induzierte Aktivität

Biomagnetische Aktivitäten können als evozierte und als induzierte Aktivitäten beschrieben werden (s. Pfurtscheller and Lopes da Silva 1999 für einen Überblick). Beide Aktivitäten basieren auf unterschiedlichen neurophysiologischen Prozessen und sind somit nicht direkt miteinander vergleichbar (Eulitz et al. 2000).

Die evozierte magnetische Aktivität wird in Form von ereigniskorrelierten Antworten oder Komponenten beschrieben. Es handelt sich dabei um Änderungen des magnetischen Feldes, die wiederholbar, in invarianter zeitlicher Relation zu einem definierten Ereignis auftreten. Als neurophysiologische Grundlage der ereigniskorrelierten biomagnetischen Aktivität werden Änderungen in der afferenten Aktivität von kortikalen Neuronen angenommen (Pfurtscheller and Lopes da Silva 1999). Für die Darstellung dieser Aktivität sind mehrere Analyseschritte notwendig, die u. a. das Ziel haben, die interessierenden Antworten von der sie umgebenden Rausch-

aktivität zu separieren. Dies geschieht durch eine Mittelung über eine genügend große Anzahl von Reaktionen auf vergleichbare Reize. Durch dieses Vorgehen werden Aktivitäten, die phasenverschoben sind - das betrifft vorwiegend die unsystematische Hintergrundaktivität - aus dem Endergebnis herausgerechnet. Die evozierte Aktivität ist folglich *time-locked* und *phase-locked*, d.h. sie zeigt die phasensynchrone Aktivität in einem zeitlichen Zusammenhang zu einem bestimmten Stimulationseignis an. Auf diese Weise können Komponenten definiert werden, die durch ihre zeitliche Latenz zu einem Stimulationseignis, ihre Ausrichtung und ihre Lokalisation definiert sind.

Während sich bei der evozierten Aktivität verschiedene Frequenzen überlagern, werden die einzelnen Frequenzbänder bei der induzierten Aktivität aufgeschlüsselt dargestellt. Dies geschieht, indem die Rohdaten einer Fourier-Transformation unterzogen werden. Durch dieses mathematische Verfahren können Frequenzbänder getrennt und phasenunabhängig betrachtet werden. Die resultierende Aktivität ist *time-locked*, aber nicht *phase-locked*, das heißt, es besteht ein zeitlicher Zusammenhang zum auslösenden Reiz, die Frequenzbänder sind aber nicht in Phase. Durch diese Vorgehensweise kann die Entwicklung der Gesamtaktivität in einem bestimmten Frequenzband in ihrer zeitlichen Beziehung zu einem Ereignis untersucht werden. Dabei wird angenommen, dass Änderungen in der Gesamtaktivität in einem Frequenzband durch Synchronisierungs- bzw. Desynchronisierungsprozesse bedingt sind (Pfurtscheller and Lopes da Silva 1999). Ein Anstieg der Gesamtaktivität wird als Folge einer Synchronisierung von Neuronenpopulationen, ein Sinken der Gesamtaktivität als Folge einer Desynchronisierung interpretiert <sup>14</sup>. Diese Prozesse basieren wahrscheinlich auf einer Änderung in der Interaktion zwischen Neuronen und Interneuronen.

---

<sup>14</sup> Eine zunehmende Synchronisierung von Neuronen kann zu einer messbaren Amplitudenerhöhung in der induzierten Aktivität führen. Eine Amplitudenerhöhung kann allerdings auch Folge einer Zunahme der Anzahl aktivierter Neurone oder anderer Prozesse sein, weshalb eine solche Energieänderung nicht automatisch mit Synchronisierungsphänomenen gleichgesetzt werden darf. Ähnliches gilt für die Desynchronisierung.

## 5.2 Methoden der Quellenlokalisierung

Neben der Aufzeichnung des Zeitverlaufes von Magnetfeldänderungen ist es oftmals gleichermaßen von Interesse, die Quellen der gemessenen Aktivität im Gehirn zu lokalisieren. Für diesen Zweck existiert eine Vielzahl verschiedener Methoden, die wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

Für eine Lokalisation der einem biomagnetischen Signal zugrunde liegenden neuronalen Generatoren wird häufig das mathematische Verfahren der inversen Rekonstruktion angewandt. Eine Möglichkeit einer solchen Berechnung besteht darin, Stromdipole, sogenannte *equivalent current dipoles* (ECDs), als Generatoren des MEG-Signals anzunehmen. Diese repräsentieren synaptische Ströme an den Dendriten von Nervenzellen. In einem nächsten Schritt wird versucht, Quellenkonfigurationen für diese Dipole zu finden, die das gemessene magnetische Feld mit einer möglichst geringen Fehlerwahrscheinlichkeit erklären können (für einen Überblick s. Hämäläinen 1993). Dies ist der inverse Schritt. Die Tatsache, dass inverse Berechnungen eine infinite Anzahl von Lösungen haben, wird dabei als *inverses Problem* bezeichnet. Je komplexer die zu lokalisierende Aktivität, desto mehr fällt das inverse Problem ins Gewicht.

Es existieren verschiedene Ansätze zur Lösung dieses Problems. Um die Anzahl der Lösungen einzugrenzen, können Zusatzinformationen aus der Neuroanatomie und Physiologie sowie Annahmen zur maximalen Stärke und Ausdehnung von Quellen herangezogen werden (Scherg and Von Cramon 1985; Scherg and Berg 1991). Eine Verbesserung der Ergebnisse der Dipollokalisierung kann auch dadurch erreicht werden, dass Ortsdaten aus Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren als Ausgangspunkte (*seed points*) für die Dipollokalisierung verwendet werden (Dale et al. 2000; Dale and Halgren 2001; Ahlfors and Simpson 2004). Eine andere Möglichkeit besteht in der Betrachtung möglichst kleiner Zeitintervalle. So können Schritt für Schritt eine überschaubare Anzahl von ECDs lokalisiert werden. Andere Autoren favorisieren eine Methode, bei der von bekannten Quellen (z. B. in somatosensorischen Gebieten) ausgegangen wird und die Effekte dieser Quellen

zuerst schrittweise eliminiert werden, bevor neue Quellen identifiziert werden (Uusitalo and Ilmoniemi 1997).

Wie mehrere Studien belegen, können mit der Methode der Dipollokalisierung Aktivitätsquellen bei gutem Ausgangssignal mit einer Genauigkeit zwischen 1,5 mm und 8 mm lokalisiert werden (Yamamoto et al. 1988; Cohen et al. 1990; Gharib et al. 1995; Leahy et al. 1998). Eine präzise Lokalisation gelingt zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass das magnetische Feld durch eine relativ begrenzte Anzahl von Dipolen erzeugt wird. Bei mehr als 2-3 Dipolen werden die inversen Berechnungen instabil. Die Lokalisation mehrerer, aktiver neuronaler Quellen, wie sie bei der Bearbeitung komplexer kognitiver Aufgaben nötig wird, ist mit den gängigen Dipol-Lokalisationsmodellen daher nur schlecht möglich. Aus diesem Grund wird an alternativen Verfahren gearbeitet.

Eine Vorgehensweise zur Quellenlokalisierung, die ohne a priori-Annahmen auskommt, ist die Berechnung der *minimum current estimates* (MCE). Dabei wird die Gesamtsumme des Stroms als so klein wie möglich angenommen (s. Hämäläinen et al. 1993). Die kontinuierliche Ausbreitung der Erregung über die gesamte Hirnoberfläche kann zudem als *continuous current estimates* betrachtet werden (Liu et al. 1998). Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes besteht in der Erstellung sogenannter *dynamic statistical parametric maps* (Dale et al. 2000). Daneben existieren zahlreiche weitere Ansätze, die das Ziel haben, die Lokalisationsleistung der Magnetoenzephalographie zu verbessern (Yamamoto et al. 1988; Hauk 2004; Auranen et al. 2005; Knösche et al. 1997; Del Gratta et al. 2001; Cabrera et al. 1995). Die einzelnen Verfahren können hier allerdings nicht im Detail diskutiert werden.

### **5.3 Vergleichbarkeit mit anderen Techniken**

Da die bildgebenden Verfahren MEG, EEG und fMRT auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhen, stellt sich die Frage nach der Vergleichbarkeit der mit diesen Messverfahren erbrachten Ergebnisse. Logothetis et al. (2001) konnten zeigen, dass das BOLD-Signal, das die Grundlage der funktionellen

Kernspintomographie darstellt, einen Anstieg neuronaler Aktivität reflektiert. Da solch ein Anstieg neuronaler Aktivität auch die Grundlage der Signale darstellt, die mit elektrophysiologischen Verfahren gemessen werden, könnte man eine gewisse Übereinstimmung der Ergebnisse erwarten. Um dies zu überprüfen, wurden mehrere Studien durchgeführt.

Stippich et al. (1998) untersuchten eine Gruppe von Probanden mit dem Magnetoenzephalographie und der funktionellen Magnetresonanztomographie, wobei sie identische motorische, somatosensorische und auditive Stimulationsparadigmen verwendeten. Das Ergebnis dieser Studie war, dass die mit beiden Techniken lokalisierten Quellen um bis zu 14mm voneinander abwichen. Die Autoren kamen daher zu dem Schluss, dass der BOLD-Kontrast und die biomagnetische Aktivität nicht direkt miteinander vergleichbar seien <sup>15</sup>. Singh et al. (2002) verglichen ebenfalls die Lokalisationsleistung der Magnetoenzephalographie mit der der funktionellen Kernspintomographie. Sie verwendeten einen *Letter-Fluency-Test* und eine visuelle Aufgabe. Für die Auswertung des MEG-Signals wurde die Methode der *Synthetic Aperture Magnetometry* (SAM) eingesetzt. In dieser Studie stimmten die mit der Magnetoenzephalographie identifizierten Aktivitätsquellen weitgehend mit den Aktivierungen, die kernspintomographisch gemessen worden waren, überein. Allerdings zeigten sich in einigen Arealen nur während der MEG-Messung, in anderen nur während der fMRT-Messung Aktivierungen <sup>16</sup>. Dieses Ergebnis wurde mit der unterschiedlichen Sensitivität der beiden Messmethoden begründet.

Zusammenfassend zeigen die genannten Studien, dass zum jetzigen Zeitpunkt eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen, die mit der Technik der Magnetoenzephalographie und mit hämodynamischen Verfahren erbracht werden, nur für eine grobe topographische Zuordnung gegeben ist. Insgesamt sollte gelten, dass *„Regions of BOLD-changes do not necessarily correspond*

---

<sup>15</sup> Eine Quelle für die Ungenauigkeit der Messung könnte in dieser Studie auch sein, dass ein MEG-System mit relativ wenigen Sensoren (2 x 37) verwendet wurde.

<sup>16</sup> Ähnliche Ergebnisse erbrachte der Vergleich zwischen der MEG und der PET (Eulitz et al. 1994).

*one-to-one with regions of electrical neural activity.*" (s. Baillet et al. 2001, S. 15). Besser als die Vergleichbarkeit der Magnetoenzephalographie mit hämodynamischen Verfahren ist dagegen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus MEG-Studien mit den Daten aus der intraoperativen Stimulation und der elektrokortikalen Ableitung (Papanicolaou et al. 1999; Simos et al. 1999; Billingsley-Marshall et al. 2004). Ähnliches gilt für die Vergleichbarkeit der MEG-Daten mit den Ergebnissen aus EEG-Experimenten.

## 6 Die durchgeführten Experimente

Im experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit wurde die Verarbeitung sprachlicher Informationen in mehreren Experimenten im MEG untersucht. Das verwendete Stimulationsparadigma enthielt fünf verschiedene Experimente. Darunter befanden sich drei Experimente, in denen sprachliches Material präsentiert wurde, und zwei Experimente, in denen nichtsprachliches Material bearbeitet werden sollte (Tabelle 1). In zwei der sprachlichen Experimente wurden Einzelwörter präsentiert, in dem dritten Experiment Sätze. In den nichtsprachlichen Experimenten wurden Non-Wörter oder Ketten aus Symbolen präsentiert. Diese Experimente sind als Kontrollbedingungen zu verstehen, um die perzeptuelle und prälexikalische Verarbeitung von der linguistischen trennen zu können. Um Unterschiede in der Verarbeitung von sprachlichem und nicht-sprachlichem Material, in der Verarbeitung von verschiedenen Wortklassen sowie zwischen korrekten und fehlerhaften semantischen und syntaktischen Strukturen darstellen zu können, wurden die neuronalen Antworten, die in den verschiedenen experimentellen Bedingungen evoziert wurden, miteinander verglichen. Einen Überblick über diese Vergleiche liefert Tabelle 2.

### 6.1 Die Auswahl der Stimuli

Aufgrund der Komplexität der menschlichen Sprache kommt der Auswahl des Stimulusmaterials in Experimenten zur Sprachperzeption eine herausragende Bedeutung zu. Die Parameter, die in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt wurden, werden im Folgenden kurz erläutert.

Bei der Auswertung des MEG-Signals ist eine Mittelwertbildung über eine bestimmte Anzahl vergleichbarer Items notwendig, um ein rauschfreies Signal zu erhalten. Für die experimentelle Untersuchung von Sprache gilt, dass pro Bedingung mindestens 25 Trials vorhanden sein sollten, über die gemittelt wird (Brown und Hagoort 1999).

Experiment	Stimuli	Prozesse
<b>U1: Kategorisierung</b>		
Vorgabe: Stimuli: Aufgabe:	Oberbegriff Nomina Gehört der Begriff zu der vorgegebenen Kategorie? →ja/nein Antwort	visuelle Verarbeitung/Lesen semant. Verarbeitung schnelles Entscheiden
<b>U2: Use Monitoring</b>		
Vorgabe: Stimuli: Aufgabe:	Nomen Verben Kann das Verb mit dem Nomen sinnvoll gekoppelt werden? →ja/nein Antwort	visuelle Verarbeitung/Lesen semant. Verarbeitung schnelles Entscheiden
<b>U3: Suche nach einem Target in Non-Wörtern</b>		
Vorgabe: Stimuli: Aufgabe:	Target (Buchstabenpaar) Non-Wörter Ist das Target enthalten? →ja/nein Antwort	visuelle Verarbeitung Buchstabenverarbeitung Suchprozess schnelles Entscheiden
<b>U4: korrekte vs. inkorrekte Sätze</b>		
Stimuli: Aufgabe:	Sätze Ist der Satz korrekt? →ja/nein Antwort	visuelle Verarbeitung/Lesen semant. Verarbeitung syntakt. Verarbeitung schnelles Entscheiden
<b>U5: Suche nach einem Target in Symbolketten</b>		
Vorgabe: Stimuli: Aufgabe:	Target (Symbolpaar) Ketten aus Symbolen Ist das Target enthalten? →ja/nein Antwort	visuelle Verarbeitung Symbolverarbeitung Suchprozess schnelles Entscheiden

**Tabelle 1** Die durchgeführten Experimente

Da Studien belegen, dass die Wiederholung von Stimuli zu einem Rückgang der Aktivitäten führen kann (van Turenout et al. 2000; Sekiguchi et al. 2001; Penney et al. 2003), ist dabei der Verwendung verschiedener Stimuli der Vorzug vor einer Wiederholung identischer Stimuli zu geben. Die Verwendung unterschiedlicher Stimuli hat den weiteren Vorteil, dass sprachliche Verarbeitungsschritte nicht von Rekognitionseffekten überlagert werden Dies

erfordert allerdings eine größtmögliche Ähnlichkeit der Einzelstimuli untereinander und macht eine strenge Kontrolle perceptionsrelevanter Stimuluscharakteristika unabdingbar. Zu den wichtigsten Parametern zählen in diesem Zusammenhang die Worthäufigkeit, die Wortlänge, der *Uniqueness Point* (UP), die Verknüpfung der Wörter mit verschiedenen Typen von Assoziationen sowie ihr Erwerbszeitpunkt.

### 6.1.1 Wortlänge und Uniqueness-Point

Die Wortlänge spielt als Perzeptionsparameter beim Lesen eine wichtige Rolle. Sowohl in fMRT- als auch in EEG-Experimenten konnten spezifische Korrelate der visuoperzeptiven Verarbeitung der Wortlänge identifiziert werden (Kutas and Van Petten 1990; Nobre et al. 1994). Neben der Wortlänge, die als Anzahl der Buchstaben eines Wortes definiert ist, existiert ein weiterer Parameter, der die Verarbeitung eines Wortes maßgeblich beeinflusst. Es handelt sich dabei um einen diakritischen „Erkennungspunkt“ im Wort, den sogenannten Uniqueness Point (UP) (Marslen-Wilson und Welsh 1978; Grosjean 1980; Marslen-Wilson 1987, 1995). Es wird davon ausgegangen, dass während des Lesens eines Wortes zunächst alle Wörter miteinander konkurrieren, die den gleichen Wortbeginn aufweisen. Die konkurrierenden Wörter gehören zu der gleichen sogenannten "*Word-initial cohort*" (s. Marslen-Wilson 1987). Ihr Einfluss zeigte sich beispielsweise in Experimenten, in denen eine lexikalische Entscheidung getroffen werden sollte. Hatten Distraktoren den gleichen Wortanfang, so beeinflussten sie signifikant die Fehlerraten und Reaktionszeiten bei den Zielwörtern (Marslen-Wilson 1995). Der UP ist als der Punkt definiert, an dem ein Zielwort sicher von diesen Konkurrenten mit gleichem Wortbeginn abgrenzbar ist. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Punkt ein guter Prädiktor für die Latenz elektrophysiologischer Komponenten ist (Kotz et al. 1993).

Diesem Sachverhalt entsprechend, wurden bei jedem Stimuluswort, das in den durchgeführten Experimenten präsentiert wurde, sowohl die Wortlänge als auch der UP kontrolliert. Um die Stelle im Wort festzulegen, an der ein Wort sicher von seinen Konkurrenten abgrenzbar ist, wurde der Buchstabe bestimmt,

ab dem das Wort eindeutig identifiziert werden kann. Da den Probanden vor jedem Testdurchgang gesagt wurde, dass die folgende Wortliste entweder nur Nomina oder nur Verben enthalten würde, wurden für die Feststellung des UP ausschließlich Kompetitoren aus der gleichen Wortklasse berücksichtigt. Der Uniqueness Point lag bei den Stimuli in Experiment 1 zwischen dem 3. und 6. Buchstaben und bei den Stimuli in Experiment 2 zwischen dem 3. und 7. Buchstaben. In Experiment 1 hatten die Wörter eine Länge zwischen vier und acht Buchstaben, in Experiment 2 zwischen fünf und zehn Buchstaben. In den Experimenten U3 und U5 wurden Non-Wörter bzw. Symbolketten präsentiert. Für diese ist naturgemäß kein UP bestimmbar. Die Stimuli in diesen Aufgaben enthielten jeweils 6 Zeichen. In Experiment 4 wurde ein Zielwort aus 5 Buchstaben präsentiert.

### **6.1.2 Die Worthäufigkeit**

In Experimenten zur Sprachperzeption kommt der Gebrauchshäufigkeit der Stimuluswörter ebenfalls eine große Bedeutung zu. Sowohl der lexikalische Zugriff auf ein Wort als auch der Prozess der Abgrenzung eines Wortes von seinen lexikalischen Kompetitoren sind stark von diesem Parameter abhängig. Untersuchungen von Frequenzeffekten haben gezeigt, dass Wörter mit niedriger Frequenz mehr sensorischen Input und mehr Zeit zur Verarbeitung benötigen als hochfrequente Wörter (Grosjean 1980; Just and Carpenter 1980; Tyler 1984; Marslen-Wilson 1987), und sie aufseiten der Produktion häufiger dem Wort vorangehende gefüllte Pausen aufweisen (Levelt 1983; Maclay 1959; Martin 1968) sowie in größerer Anzahl von Fehlern betroffen sind (Dell 1990; Stemberger 1984; Stemberger and MacWhinney 1986). Daraus ergibt sich für eine experimentelle Testung die Forderung, dass alle Stimuli, über die pro Bedingung gemittelt werden soll, sowie alle Stimuli in Bedingungen, die miteinander verglichen werden sollen, eine vergleichbare Worthäufigkeit aufweisen sollten.

Vergleich	Stimuli 1	Stimuli 2	Prozesse
U1 vs. U3	Nomina	Non-Wörter	sprachliche vs. nichtsprachliche Verarbeitung
U2 vs. U3	Verben	Non-Wörter	sprachliche vs. nichtsprachliche Verarbeitung
U1 vs. U2	Nomina	Verben	wortklassenspezifische Verarbeitung von Nomina vs. Verben
U1 passend vs. unpassend	semant. passende Nomina	semant. unpassende Nomina	semant. Verarbeitung von Nomina
U2 passend vs. unpassend	semant. passende Verben	semant. unpassende Verben	semant. Verarbeitung von Verben
U4 korrekt vs. unkorrekt	syntaktisch korrekte Sätze	syntaktisch inkorrekte Sätze	syntaktische Verarbeitung

**Tabelle 2** Die Vergleiche zwischen Bedingungen

Die Gebrauchshäufigkeit von Wörtern wird anhand eines großen Korpus bestimmt und in Häufigkeitswörterbüchern veröffentlicht. Da gezeigt werden konnte, dass die Frequenz, mit der ein Wort gesprochen wird, entscheidender für seine Abrufbarkeit ist als die Frequenz, mit der das Wort gelesen wird (Howes 1954), wurde eine Worthäufigkeitsstatistik der gesprochenen Umgangssprache als Quelle für die Gebrauchsfrequenzen der Stimuluswörter herangezogen (Ruoff 1981). Da die verwendete Worthäufigkeitsstatistik im alemannischen Sprachraum erstellt wurde - also dem Sprachraum, aus dem die überwiegende Anzahl der Probanden dieser Untersuchung stammt – war zudem eine Berücksichtigung regionaler Besonderheiten des Sprachgebrauchs gewährleistet. Die Mittelwerte der absoluten Worthäufigkeiten der Nomina und Verben, die in den Experimenten U1 und U2 präsentiert wurden, sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Stimuli	semant. passend	semant. unpassend
Nomina	10.6	10.5
Verben	10.6	11.7

**Tabelle 3** Mittelwerte der Worthäufigkeiten der semantisch passenden und semantisch unpassenden Nomina und Verben in den Experimenten U1 und U2

Die Werte beziehen sich auf die absolute Auftretenshäufigkeit in einem Korpus von 500.000 Wörtern (nach Ruoff 1981).

### 6.1.3 Der Erwerbszeitpunkt

Die Abrufbarkeit eines Lexikoneintrages bzw. Lemmas kann neben der Häufigkeit seiner Aktivierungen auch von dem Zeitpunkt seiner Etablierung beeinflusst sein. In fMRT-Experimenten konnte gezeigt werden, dass früh erlernte Wörter im Gehirn an anderen Stellen repräsentiert sind als spät erlernte Wörter (Fiebach et al. 2003). Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit auch der Zeitpunkt des Erwerbs der Wörter bei der Zusammenstellung des Stimulusmaterials mitberücksichtigt. Die Stimuli wurden so zusammengestellt, dass jeweils die Hälfte der semantisch passenden und unpassenden Stimuli in den Experimenten U1 und U2 bereits in der Sprache von Kindern im 1.Schuljahr auftritt, wogegen die andere Hälfte erst nach dem 1.Schuljahr erlernt wird. Als Quelle diente die Worthäufigkeitsstatistik von Pregel (1987) zur gesprochenen Sprache im Grundschulalter.

## 6.2 Die Experimente

### 6.2.1 Experiment 1: Kategorisierung von Nomina

In diesem Experiment sollten die neuronalen Antworten gemessen werden, die mit der Verarbeitung von Nomina in Zusammenhang stehen. Das Hauptinteresse lag in der Identifikation von Korrelaten des Abrufs lexikalischer Einträge und der Verarbeitung semantischer Inhalte. Das Experiment basiert auf der Annahme, dass bei Wörtern lexikalische Repräsentationsformen existieren, sowie auf dem Konzept der paradigmatischen Assoziationen als einem Strukturprinzip des Lexikons.

Von Levelt (Levelt 1983; Levelt and Wheeldon 1994, Levelt 1989) wird für die Sprachproduktion angenommen, dass der Zugriff auf die Bedeutung eines Wortes über die Selektion eines Lemmas erfolgt. Auch während der Sprachperzeption ist ein Zugriff auf diese Einträge anzunehmen (Levelt 1989). Die Beziehung der einzelnen Einträge zueinander ist nach dem Modell von Levelt u. a. durch assoziative Beziehungen determiniert (Levelt 1989). Es gibt zahlreiche experimentelle Belege für die Existenz derartiger Verknüpfungen. So lässt sich in Erinnerungsexperimenten beobachten, dass bei der Wiedergabe einer zufällig zusammengestellten Wortliste Wörter, die miteinander assoziiert sind, zu Clustern zusammengefasst werden (Jenkins & Russel 1952). Die Tatsache, dass die Assoziationen in verschiedenen Sprachen in einem hohen Maß miteinander vergleichbar sind, wird als weiterer Hinweis auf die Gültigkeit dieses Strukturprinzips gewertet (Russel & Meseck 1959). Die neurobiologische Basis assoziativer Verknüpfungen liegt wahrscheinlich in der häufigen gemeinsamen Aktivierung lexikalischer Einträge (Hebb 1949). Im Falle des Gebrauchs einer Sprache kann eine solche gemeinsame Aktivierung auf verschiedene Weise zustande kommen. Ein Typ von Assoziationen sind die sogenannten paradigmatischen Assoziationen. Es handelt sich dabei um Wörter, die in einem Satzrahmen als Alternativen an derselben Stelle stehen können und daher häufig gemeinsam antizipatorisch aktiviert werden. Assoziationen dieses Typs gehören der gleichen Wortklasse an. Einen guten Hinweis auf die Existenz dieses Assoziationstyps liefert die Tatsache, dass

Erwachsene beim freien Assoziieren fast ausschließlich Assoziationen dieses Typs nennen (s. Hörmann 1977). Die Tatsache, dass die meisten spontanen Sprachfehler im Sinne von Substitutionen ebenfalls Relationen dieses Typs reflektieren (Levelt 1983), kann zudem in Anlehnung an die Modelle von Levelt (1989) und Roelofs (1992) als Hinweis darauf gewertet werden, dass es während des Abrufs eines Lemmas automatisch zu einer Mitaktivierung der paradigmatisch assoziierten Wörter kommt.

Aus diesem Grund stammten die semantisch passenden Wörter, die in diesem Experiment innerhalb eines Blocks dargeboten wurden, alle aus einem paradigmatischen lexikalischen Feld<sup>17</sup>. Es ist anzunehmen, dass diese Stimuli vergleichbare paradigmatische Assoziationen aktivieren. Daneben ist es für eine Quellenlokalisierung mit der Technik der Magnetoenzephalographie von Vorteil, wenn die verknüpften Einträge im Gehirn in räumlicher Nähe zueinander abgespeichert sind. Aus diesem Grund wurden für das vorliegende Experiment Wörter ausgewählt, für die es starke Hinweise auf eine umschriebene räumliche Anordnung gibt. Diese Voraussetzung erfüllen Nomina, die Objekte bezeichnen (Damasio et al. 1996; Moore and Price 1999; Perani et al. 1999). Da es zudem Hinweise darauf gibt, dass die Verarbeitungstiefe der Wörter einen Einfluss auf die neuronale Antwort hat (Walla et al. 2001), wurde den Probanden eine explizite semantische Aufgabe gestellt. Diese bestand darin, festzustellen, ob die Wortlisten-Stimuli zu der vorgegebenen semantischen Kategorie gehören und entsprechend eine Taste zu drücken. Die Nomina konnten entweder semantisch zu der vorgegebenen Kategorie passen (z. B. Kleidungsstück - Hose) oder nicht (z. B. Kleidungsstück - Tasse).

---

<sup>17</sup> Definition: „Ein paradigmatisches lexikalisches Feld ist eine Menge von Wörtern (Ausdrücken) mit ähnlicher Bedeutung. Die Wörter gehören zur selben grammatikalischen Kategorie und können füreinander in Sätze eingesetzt (substituiert) werden, ohne dass sich deren Bedeutung dadurch wesentlich ändert. Das Feld kann oft durch einen einzigen Begriff der betreffenden Sprache charakterisiert werden.“ Aus: Wunderlich D., Arbeitsbuch Semantik, Athenaeum Verlag, Bodenheim 1980, S. 35.

**Material:**

In dem Experiment wurden insgesamt 64 Wörter präsentiert, die in 4 Blöcken zu je 16 Stimuli angeordnet waren. Jeder Block wurde durch eine neue Vorgabe (Oberbegriff) eingeleitet und setzte sich aus der gleichen Anzahl semantisch passender und semantisch unpassender Nomina zusammen. Insgesamt wurden somit 32 semantisch passende und 32 semantisch unpassende Wörter dargeboten. Die Vorgabe wurde in gelber Schrift für 200 ms präsentiert. Nach einer Pause von 1000 ms erschien das erste Wort auf dem Bildschirm. Jedes Stimuluswort wurde für 400 ms dargeboten, gefolgt von einem Fixationskreuz. Das Interstimulusintervall war randomisiert und hatte eine Länge zwischen 1500 und 1750 ms. Zwischen den Blöcken erschien ein Fixationskreuz auf dem Bildschirm.

Bei den verwendeten Stimuli handelte es sich um konkrete Nomina, die unbelebte Objekte bezeichneten. Sie stellten Gegenstände des täglichen Lebens dar, die gut visuell vorstellbar sind und keine starken aktionsbezogenen Assoziationen aufweisen. Die verwendeten Oberbegriffe waren Kleidungsstücke, Möbelstücke und Behälter. Die Testwörter enthielten maximal zwei Silben, hatten eine Wortlänge von vier bis acht Buchstaben und ihr Uniqueness Point lag zwischen dem 3. und 6. Buchstaben. Komposita und Wörter mit Präfixen wurden ausgeschlossen. Ebenfalls ausgeschlossen wurden Wörter, die Teil-Ganzes Beziehungen ausdrücken. Unter den einzelnen Blöcken wurden keine Überschneidungen zugelassen, so dass jedes Wort innerhalb des Experimentes nur einmal präsentiert wurde. Die Reihenfolge der Einzelstimuli wurde für jeden Block randomisiert, wobei nicht mehr als drei semantisch passende oder unpassende Wörter aufeinander folgen durften. Die Stimuli wurden so zusammengestellt, dass es innerhalb der Blöcke zu jedem semantisch passenden Wort ein frequenzangepasstes semantisch unpassendes Wort gab. Alle Wörter wiesen eine Auftretenshäufigkeit von <80 pro 500.000 Wörtern auf (s. Ruoff 1981). Die durchschnittliche Worthäufigkeit der semantisch passenden Nomina betrug 10.6, die der semantisch unpassenden Nomina 10.5 (s. Tabelle 3). Jeweils die Hälfte der semantisch passenden und unpassenden Wörter wird im Rahmen des Spracherwerbs früh

erlernt, die andere Hälfte später (s. oben). Alle 64 Stimuli wurden zu einem späteren Zeitpunkt der Messsitzung in einem Wiederholungsdurchgang in neu randomisierter Reihenfolge erneut dargeboten. Diese Darbietung war als Reserve gedacht, um die Anzahl der auswertbaren Stimuli erhöhen zu können, falls dies nötig werden sollte.

### 6.2.2 Experiment 2: Use Monitoring

Ziel dieses Experimentes war die Darstellung von hirneigenen Aktivitäten, die während der Verarbeitung von Verben evoziert werden. Auch bezüglich der mentalen Repräsentation von Verben kann von einer Repräsentation in Lemmas und von Assoziationen als einer Möglichkeit ihrer Verknüpfung mit anderen Lexikoneinträgen ausgegangen werden. Im Gegensatz zu den Nomina werden die assoziativen Verknüpfungen bei Verben allerdings vorwiegend auf syntagmatischer Ebene angenommen. Syntagmatische Assoziationen können annäherungsweise als Ausschnitt aus einem häufig gesprochenen Satz der natürlichen Sprache bzw. als situationsbezogene Kopplung von Wörtern beschrieben werden. Diese Art der Verknüpfung stellt eines der Grundprinzipien des Spracherwerbs dar (Slobin 1985). Möglicherweise erklärt dies, warum Kinder im Gegensatz zu Erwachsenen vorwiegend syntagmatische Assoziationen äußern. Als besonders wichtige Relationen dieses Typs gelten die sogenannten *Agens-Patiens Relationen*<sup>18</sup>. Dies sind kurze Sätze der Form „Subjekt-Verb-Objekt“. Da diese als relativ stabil gelten, wurde dieser Typ von Assoziationen auch diesem Experiment zugrunde gelegt. Im dem Experiment wurden Nomina, welche die thematische Rolle des *Patiens* innehaben, als Vorgabe gewählt. Die Verben repräsentierten eine Aktion, die auf das *Patiens* einwirken kann (z. B. Vorgabe: Auto, Verb: waschen). Diese Aktion konnte semantisch passend (z. B. Auto - waschen) oder semantisch unpassend (z. B. Auto - reiten) sein. Semantisch passende Kombinationen zwischen Nomina und Verben wurden dem Mannheimer Corpus 1 und 2 zur geschriebenen

---

<sup>18</sup> „... there is some evidence of attention to agent-patient relations in early fixed word order schemas.“ Aus Slobin, *The crosslinguistic study of language acquisition*, Volume 2, *Theoretical Issues*, Hillsdale New Jersey 1985, S. 1170.

Sprache sowie dem Freiburger Corpus zur gesprochenen Sprache entnommen. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die Verben daraufhin zu bewerten, ob man die durch sie repräsentierte Tätigkeit mit dem Vorgabe-Objekt durchführen kann und entsprechend eine Taste zu drücken.

**Material:**

Analog zum ersten Experiment wurden auch in diesem Experiment 64 Stimuli in 4 Blöcken zu je 16 Stimuli präsentiert. Jeder Block wurde von einer neuen Vorgabe (Nomen) eingeleitet. Die Wortlisten bestanden jeweils aus der gleichen Anzahl semantisch passender und semantisch unpassender Verben. Damit ergaben sich, analog zu dem Experiment U1, insgesamt 32 semantisch passende und 32 semantisch unpassende Wörter. Die weiteren Stimulationsparameter entsprachen denen des ersten Experimentes (s. dort).

Die verwendeten Verben waren konkrete Vorgangs-Verben, die stark mit motorischen Tätigkeiten verknüpft sind. Alle Verben waren transitiv und konnten in der Form: <Verb + Substantiv im Akkusativ> stehen. Die Angaben zur Valenz der Verben wurden dem „Wörterbuch zur Valenz und Distribution deutscher Verben“ von Helbig (1983) und dem Valenzlexikon deutscher Verben von Engel (1978) entnommen. Die Stimuluswörter hatten maximal zwei Silben, eine Länge von fünf bis zehn Buchstaben und ihr Uniqueness Point lag zwischen dem 3. und 7. Buchstaben. Komposita und Wörter mit Präfixen wurden ausgeschlossen. Jedes Wort trat innerhalb des Experimentes nur einmal auf. Die Reihenfolge der Einzelstimuli pro Block war randomisiert, wobei nicht mehr als drei Wörter, welche die gleiche Reaktion erforderten, aufeinander folgen durften. Die Worthäufigkeiten der semantisch passenden und unpassenden Verben waren paarweise aufeinander abgestimmt. Die durchschnittliche Worthäufigkeit der semantisch passenden Verben betrug 10.6, die der semantisch unpassenden Verben 11.7 (s. Tabelle 3). Jeweils die Hälfte der semantisch passenden und unpassenden Stimuli wird im Spracherwerb früh erlernt, die andere Hälfte wird später erlernt (s. oben).

### 6.2.3 Experiment 3: Non-Wörter

Dieses Experiment diente als nichtsprachliche Kontrollbedingung zu den Experimenten U1 und U2. Durch ein vergleichbares Stimulationsdesign wie in den ersten beiden Experimenten sollten Prozesse der visuellen Verarbeitung des Stimulusmaterials, der motorischen Aktion in Form des Tastendrucks sowie nicht-linguistische Prozesse wie die Aufmerksamkeitszuwendung oder Prozesse der Entscheidungsfindung in einem vergleichbaren Maße wie in den Experimenten U1 und U2 aktiviert werden. Damit wird es möglich, durch einen direkten Vergleich der interessierenden Bedingung mit der Kontrollbedingung die Effekte dieser Prozesse zu eliminieren.

Als nichtsprachliche Stimuli wurden in diesem Experiment Non-Wörter dargeboten. Da Untersuchungen gezeigt haben, dass bei aussprechbaren Pseudowörtern Areale aktiviert werden, die mit der Sprachverarbeitung in Zusammenhang stehen (Petersen et al. 1990; Price et al. 1996; Jessen et al. 1999), wurden in dem Experiment nur Non-Wörter verwendet, die nicht den orthographischen bzw. phonetischen Regeln des Deutschen folgen. Die Aufgabenstellung bestand darin, die Teststimuli dahingehend zu untersuchen, ob sie ein vorgegebenes Buchstabenpaar (Target) enthalten.

#### **Material:**

In dem Experiment wurden ebenfalls insgesamt 64 Stimuli präsentiert. Es handelte sich um Non-Wörter, die jeweils aus 6 Buchstaben bestanden. Das gesuchte Konsonantenpaar konnte an jeder Position innerhalb der Non-Wörter auftreten. Die geforderte Entscheidung konnte somit, analog zu dem Uniqueness Point in den Experimenten U1 und U2, frühestens nach dem zweiten und spätestens nach dem 6. Buchstaben getroffen werden. Die Reihenfolge der Einzelstimuli wurde randomisiert, wobei nicht mehr als drei Non-Wörter, die das Target enthielten bzw. kein Target enthielten, aufeinander folgen durften. Insgesamt wurden 32 Stimuli dargeboten, die das Target enthielten und 32, die kein Target enthielten. Die übrigen Stimulationsparameter entsprachen denen des ersten Experimentes (s. dort).

#### 6.2.4 Experiment 4: Satzverarbeitung

In dem vierten Experiment wurde die Verarbeitung ganzer Sätze geprüft. Das Hauptinteresse lag in der Identifizierung von Korrelaten der Verarbeitung syntaktischer Strukturen bzw. von Fehlern in der Syntax. Die Darbietung ganzer Sätze ermöglicht darüber hinaus eine größere Nähe zur natürlichen Sprachsituation als die Darbietung von Einzelwörtern.

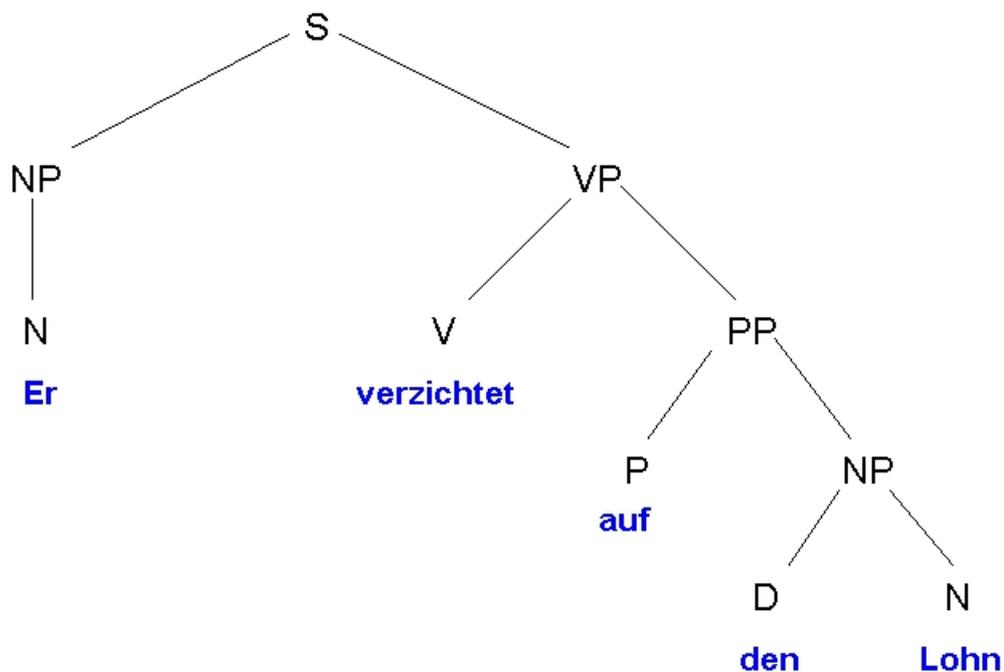
Der Vergleich fehlerhafte versus korrekte Sätze ist eine häufig angewandte Methode zur Darstellung von Prozessen der syntaktischen Verarbeitung. Eine Schwierigkeit, die sich immer bei der Untersuchung der Satzverarbeitung mit natürlichsprachlichen Sätzen zeigt, resultiert aus der Interaktion zwischen Syntax und Semantik. Wenn sich die fehlerhaften und die korrekten Sätze in einem Experiment in ihrer Bedeutung stark voneinander unterscheiden, kann es sein, dass syntaktische Verarbeitungsprozesse nicht mehr sauber von semantischen getrennt werden können. In der vorliegenden Arbeit wurden daher Sätze verwendet, deren Bedeutungen unter beiden Bedingungen möglichst wenig divergierten. Dies wurde dadurch gewährleistet, dass sich die inkorrekten Sätze nur durch eine zusätzliche Negation von den korrekten Sätzen unterschieden. In beiden Satztypen wurde zudem das gleiche Zielwort gemessen. Dies schließt Effekte aus, die aus einer unterschiedlichen perzeptuellen oder semantischen Verarbeitung der Zielwörter in den beiden Bedingungen resultieren.

Die in dem Experiment verwendeten inkorrekten Sätze enthielten eine Phrasenstrukturverletzung. Dieser Typ eines syntaktischen Verstoßes aktiviert eine übergeordnete Ebene, auf der die Syntax strukturiert ist, wohingegen z. B. Subkategorisierungsinformationen syntaktische Spezifikationen auf der Ebene des Lemmas betreffen (s. auch Hagoort 1993). Diese Ebene stand bereits in den ersten beiden Experimenten im Vordergrund und sollte bei den Sätzen nicht erneut untersucht werden. Die verwendete Phrasenstrukturverletzung bestand in der Position des Negationswortes „nicht“. Dieses stand in den inkorrekten Sätzen innerhalb einer Präpositionalphrase, was im Deutschen nicht möglich ist (s. DUDEN, Grammatik, § 1153). Sowohl in den korrekten als

auch in den inkorrekten Sätzen wurde die neuronale Antwort auf das Negationswort „nicht“ gemessen. Um zu verhindern, dass die Probanden immer eine Negation erwarten, wurden zudem Sätze ohne Verneinung als Füllersätze dargeboten. Die Aufgabe der Probanden bestand in allen Fällen darin zu entscheiden, ob die Sätze korrekt sind.

Beispiele der verwendeten Sätze (s. auch Abbildung 10):

- |     |  |              |
|-----|--|--------------|
| (1) | Er vertraut <b>nicht</b> auf das Glück.  | (korrekt)    |
| (2) | *Er vertraut auf <b>nicht</b> das Glück. | (inkorrekt)  |
| (3) | Er verzichtet auf den Lohn.              | (Füllersatz) |



**Abbildung 10** Phrasenstruktur eines Stimulussatzes

NP = Nominalphrase, N = Nomen, VP = Verbalphrase, Verarbeitung = Verb, PP = Präpositionalphrase, P = Präposition, D = Determinans

### Material:

Es wurden 50 korrekte Sätze, 50 inkorrekte Sätze und 20 Füllersätze präsentiert. Die korrekten und inkorrekten Sätze waren bis auf die Stellung des Zielwortes identisch. In allen Testsätzen konnte erst mit der Perzeption des

Negationswortes „nicht“ die Entscheidung über die Korrektheit des Satzes gefällt werden. Die Sätze wurden randomisiert dargeboten und Wort für Wort präsentiert. Jedes Wort erschien für 400 ms auf dem Bildschirm, gefolgt von einem Fadenkreuz, das für die Dauer von 200 ms erschien.

Alle Sätze begannen mit einem Wort, das einen großgeschriebenen Anfangsbuchstaben hatte und endeten mit einem Punkt. Nach dessen Erscheinen sollte der Proband per Knopfdruck mitteilen, ob es sich um einen korrekten oder um einen fehlerhaften Satz gehandelt hat. Nach einem Intervall von 1500 ms Dauer, in dem ein Fixationskreuz erschien, folgte der nächste Satz. Nach 75 Sätzen gab es eine einminütige Pause, die dem Probanden auf dem Bildschirm angezeigt wurde. Die übrigen messtechnischen Parameter entsprachen denen der anderen Experimente.

#### **6.2.5 Experiment 5: Symbolketten**

Dieses Experiment diente als weitere nichtsprachliche Kontrollbedingung zu den Experimenten U1 und U2. Analog zu dem Experiment mit den Non-Wörtern sollte in den Symbolketten eine bestimmte Symbolkombination als Target gesucht werden. Da es sich hierbei um die Verarbeitung von nichtsprachlichen Zeichen handelt, kann angenommen werden, dass dabei keine linguistische Verarbeitung, sondern lediglich eine Verarbeitung visueller Informationen in Kombination mit der Suche nach dem Zielreiz erfolgt. Die Symbolketten enthielten jeweils sechs Zeichen. Aufbau und Durchführung des Experimentes waren analog zu Experiment 3 (s. dort).

## **6.3 Die Durchführung**

### **6.3.1 Die Probanden**

Es wurde eine Vortest mit zwei Studenten durchgeführt, um den zeitlichen Aufwand und den Schwierigkeitsgrad der einzelnen Aufgaben zu überprüfen. Die Probanden gaben an, dass die Aufgabenstellungen verständlich seien und sich die Aufgaben gut bearbeiten ließen. An der eigentlichen Studie nahmen 16 Probanden im Alter von 22 bis 38 Jahren teil, davon 8 Frauen und 8 Männer. Es handelte sich um Studenten und Mitarbeiter der Universität. Die Probanden wurden vor der Untersuchung eingehend aufgeklärt. Sie nahmen freiwillig an der Studie teil und gaben ihr schriftliches Einverständnis. Die Ethikkommission der Universität Tübingen wurde angerufen und gab ihre Erlaubnis zu der experimentellen Testung. Die Versuchspersonen erhielten als Aufwandsentschädigung 10 € pro Stunde. Es wurden ausschließlich Rechtshänder (überprüft mit dem Edinburgh-Handedness-Test) und deutsche Muttersprachler als Probanden zugelassen. Die Probanden durften keine Fehlsichtigkeit aufweisen und keine magnetischen oder elektrischen Implantate im Körper haben. Neurologische und psychiatrische Erkrankungen stellten ebenfalls Ausschlussgründe dar.

### **6.3.2 Die Messung**

Vor dem Beginn der Messungen wurde für jeden der 16 Probanden in einem Messprotokoll die Reihenfolge der Experimente und die Reaktionshand festgelegt. Für die Hälfte der Versuchspersonen war die rechte Hand, für die andere Hälfte die linke Hand als Reaktionshand für den Tastendruck vorgesehen. Die Reihenfolge der Teilerperimente wurde über die Gruppe systematisch variiert. Jede Messung begann mit einem nichtsprachlichen Experiment (U3 oder U5). Danach wechselten sich jeweils ein sprachliches (U1, U2) und ein nichtsprachliches Experiment (U3, U5) ab. Nach dem ersten Durchlauf der vier Experimente, in denen Einzelwörter präsentiert wurden, folgte das Experiment U4, in dem Sätze dargeboten wurden. Darauf folgten die Wiederholungsdurchgänge der Experimente U1, U2, U3 und U5. Damit ergab

sich beispielsweise folgendes Messprotokoll: U3-U1-U5-U2-U4-U3r-U1r-U5r-U2r RECHTS (r steht für repetition). Im ersten Durchgang ging jeweils ein kurzer Übungsdurchgang dem eigentlichen Experiment voran, in dem andere Stimuli als in dem folgenden Experiment verwendet wurden. Innerhalb der Blöcke waren die Stimuli randomisiert. Es gab keine Wiederholungen von Stimuli innerhalb der Blöcke und keine Überschneidungen zwischen den Blöcken.

Während der Messung saßen die Probanden aufrecht in einem abgedunkelten, magnetisch abgeschirmten Raum (s. Abbildung 11). Für die Experimente U1, U2, U3 und U5 sind jeweils 5 Minuten und für das Experiment U4 ca. 15 Minuten reine Messzeit anzusetzen. Inklusive aller Vorbereitungen dauerte eine Messsitzung insgesamt ca. 1 ½ Stunden. Die Stimuli wurden zentral auf einen 100 x 60 cm großen Bildschirm in 92 cm Distanz zum Probanden als hellgraue Schrift (bzw. gelbe Schrift bei den Vorgaben) auf dunkelgrauem Grund mit einer Auflösung von 800 x 600 projiziert. Der vertikale visuelle Winkel betrug ca. 1°, der horizontale Winkel ca. 3°.

Vor jedem Messdurchgang wurde den Probanden die Aufgabenstellung genau erklärt und ein Übungsdurchgang durchgeführt. Die Probanden bekamen die Instruktion, während des Experiments jedes Wort bezüglich der Aufgabenstellung zu bewerten. Es wurden zwei Tasten auf Höhe der linken oder rechten Hand der Probanden angebracht und sie sollten mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der jeweiligen Hand die entsprechende Antwort geben. Die Probanden wurden instruiert, so schnell und so richtig wie möglich zu antworten.



**Abbildung 11** Der Messraum

Die Abbildung zeigt eine Versuchsperson in der abgeschirmten MEG-Kammer eines modernen MEG-Systems (hier CTF Systems). Auf dem Bild oben rechts sind einige Gradiometer innerhalb des sogenannten Dewar-Helmes abgebildet, in dem sich der Kopf der Versuchsperson befindet. Aus Cohen et al. 2003.

Die magnetischen Felder wurden mit einem 151-Kanal MEG Ganzkopfsystem (VSM MedTech, Canada) abgeleitet. Mittels dreier Marker, die am Nasion und präaurikulär angebracht waren, wurde vor und nach jedem Block eine Kopflokalisation durchgeführt. Die Aufzeichnung jedes Trials begann 400 ms vor dem Erscheinen des Zielwortes und das MEG-Signal wurde kontinuierlich über 1700 ms abgeleitet. Die Sampling-Rate betrug 625 Hz und die einkommenden Daten wurden mit einem Low-Pass Filter von 200 Hz und einem High-Pass Filter von 0.625 Hz gefiltert.

## 6.4 Die Auswertung

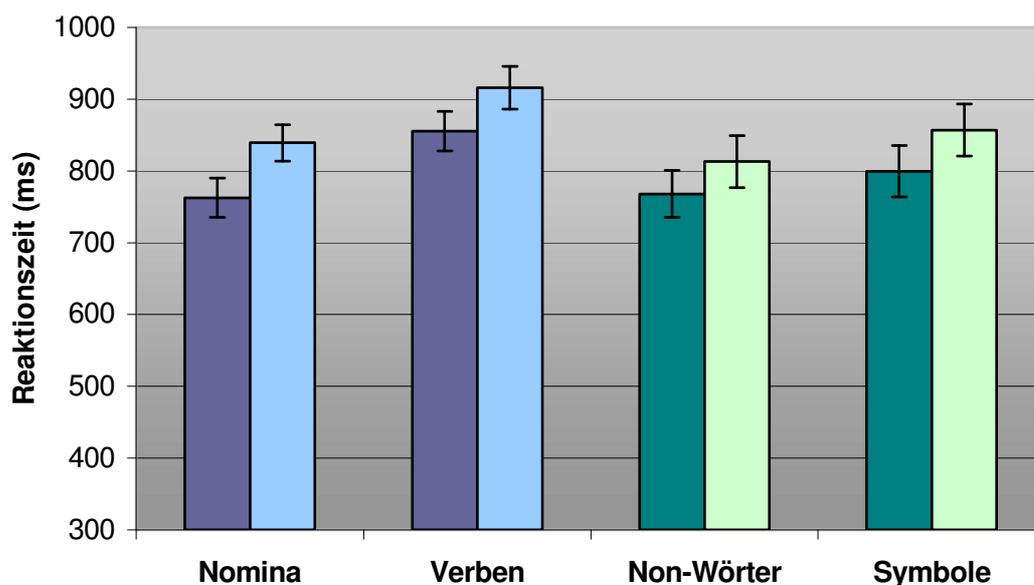
Bei der Berechnung der evozierten Aktivitäten wurde bei den Experimenten U1, U2, U3, und U5 der Zeitraum von -200 ms bis +800 ms betrachtet, bei den Sätzen (U4) der Zeitraum von -150 ms bis +800 ms. Die Daten wurden off-line mittels eines Low-Pass Filters von 40 Hz und eines High-Pass Filters von 1 Hz gefiltert. Um Artefakte durch Augenbewegungen und Blinzeln zu eliminieren, wurden alle Trials, bei denen an frontalen Elektroden Aktivitäten von  $>1.0$  pT auftraten, aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Ferner wurde eine Offset-Korrektur durchgeführt. Bei den einzelnen Probanden wurden die MEG-Signale jeweils über alle Trials in den verschiedenen Bedingungen gemittelt. Die Datensätze der 16 Versuchspersonen wurden dann getrennt für die jeweiligen Bedingungen zu neuen Datensätzen kombiniert und die Gruppennittelwerte berechnet. Die evozierten Aktivitäten wurden unter Abzug eines Prästimulus-Intervalls von 200 ms (U1, U2, U3, U5) bzw. 150 ms (U4) berechnet. Um die Aktivitäten in einer Bedingung mit der Aktivität während der Baseline-Periode oder die Aktivitäten zwischen zwei Bedingungen vergleichen zu können, wurden für alle 151 Sensoren *t*-Tests (für gepaarte Stichproben, zweiseitig) eingesetzt. Dabei wurden Unterschiede mit einem  $p < 0.002$  als signifikant gewertet. Für die Vergleiche zwischen Stimulusklassen wurden nur solche Trials herangezogen, in denen semantisch passende bzw. das Target enthaltende Stimuli präsentiert worden waren und die aus dem wiederholungsfreien ersten Durchgang stammten. Damit sollte verhindert werden, dass Aktivierungen, die mit dem Wiedererkennen von Stimuli oder mit der Verarbeitung von abweichenden Informationen in Verbindung stehen, bei diesen Vergleichen eine Rolle spielen. Für die Berechnung von Unterschieden zwischen den semantisch passenden und den semantisch unpassenden Stimuli wurden ebenfalls nur Trials aus dem wiederholungsfreien ersten Durchgang verwendet.

Die induzierte Aktivität wurde für den Zeitraum von -400 ms bis 500 ms unter Abzug der Baseline berechnet. Als signifikant galten auch hier Effekte mit einem Signifikanzlevel von  $p < 0.002$ .

## 7 Resultate

### 7.1 Verhaltensdaten

Gemittelt über alle 16 Probanden lag der Prozentsatz richtiger Antworten bei 90,7 % (falsche Antworten: 7,4%; fehlende Antworten: 1,9%<sup>19</sup>). In Abbildung 12 sind die Reaktionszeiten für die vier Experimente, in denen Einzelstimuli präsentiert wurden, dargestellt (Nomina semantisch passend: 763 ms  $\pm$  110 ms; Nomina semantisch unpassend: 839 ms  $\pm$  101 ms; Verben semantisch passend: 856 ms  $\pm$  111 ms; Verben semantisch unpassend: 916 ms  $\pm$  119 ms, Non-Wörter mit Target: 768 ms  $\pm$  130 ms; Non-Wörter ohne Target: 813 ms  $\pm$  144 ms; Symbole mit Target: 800 ms  $\pm$  144 ms; Symbole ohne Target: 857 ms  $\pm$  144 ms).



**Abbildung 12** Die mittleren Reaktionszeiten und Standardfehler für die vier Stimulusklassen

Die Reaktionszeiten sind gemittelt über alle 16 Versuchspersonen. Die dunkelblauen Balken stehen für die semantisch passenden Wörter, die hellblauen Balken für die semantisch unpassenden Wörter in den Experimenten U1 und U2. Die dunkelgrünen Balken stehen für die Stimuli, die das Target enthielten, die hellgrünen Balken für die Stimuli, die das Target nicht enthielten in den Experimenten U3 und U5.

<sup>19</sup> Bei zwei Probanden wurden im Experiment U4 die Trigger nicht aufgezeichnet. Diese Antworten gingen nicht in die Berechnung der Fehlerraten ein.

Bei den Sätzen sollte der Tastendruck nicht direkt auf das Zielwort, sondern erst nach dem Erscheinen des Punktes am Ende des Satzes erfolgen. Die mittleren Reaktionszeiten nach Präsentation des Zielwortes waren daher deutlich länger als in den anderen Experimenten. Sie betrugen für die korrekten Sätze  $1738 \text{ ms} \pm 323 \text{ ms}$  und für die inkorrekten Sätze  $2477 \text{ ms} \pm 226 \text{ ms}$  <sup>20</sup>.

Um genauere Aussagen über Unterschiede bei der Verarbeitung der einzelnen Stimulusklassen treffen zu können, wurde eine ANOVA (mit Messwiederholungsdesign) für den Faktor STIMULUSKLASSE mit den vier Stufen „Nomina“, „Verben“, „Non-Wörter“ und „Symbole“ durchgeführt <sup>21</sup>. Dabei zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor STIMULUSKLASSE ( $F_{(3,45)}=8,11$ ,  $p<0.005$ , Greenhouse-Geisser korrigiert). Post-Hoc Tests (Bonferroni-korrigiert) erbrachten, dass sich die Reaktionszeiten zwischen den Verben und den Nomina ( $p<0.0001$ ) sowie zwischen den Verben und den Non-Wörtern ( $p<0.05$ ) signifikant unterschieden. In untergeordneten ANOVAs wurden die vier Stimulusklassen getrennt weiter ausgewertet. Bei den Nomina und den Verben zeigte sich jeweils ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor SEMANTIK (mit den zwei Stufen „semantisch passend“ und „semantisch unpassend“) (Nomina:  $F_{(1,15)}=47,59$ ,  $p<0.0001$ ; Verben:  $F_{(1,15)}=14,97$ ,  $p<0.005$ ), wobei die Probanden bei den semantisch unpassenden Wörtern signifikant mehr Zeit benötigten. Zudem zeigte sich bei den Non-Wörtern und den Symbolen jeweils ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor TARGET (mit den zwei Stufen „Target enthalten“ und „Target nicht enthalten“) (Non-Wörter:  $F_{(1,15)}=4.68$ ,  $p<0.05$ ; Symbole:  $F_{(1,15)}=10.67$ ,  $p<0.01$ ). Hier waren die Reaktionszeiten bei den Stimuli, die kein Target enthielten, signifikant verlängert.

---

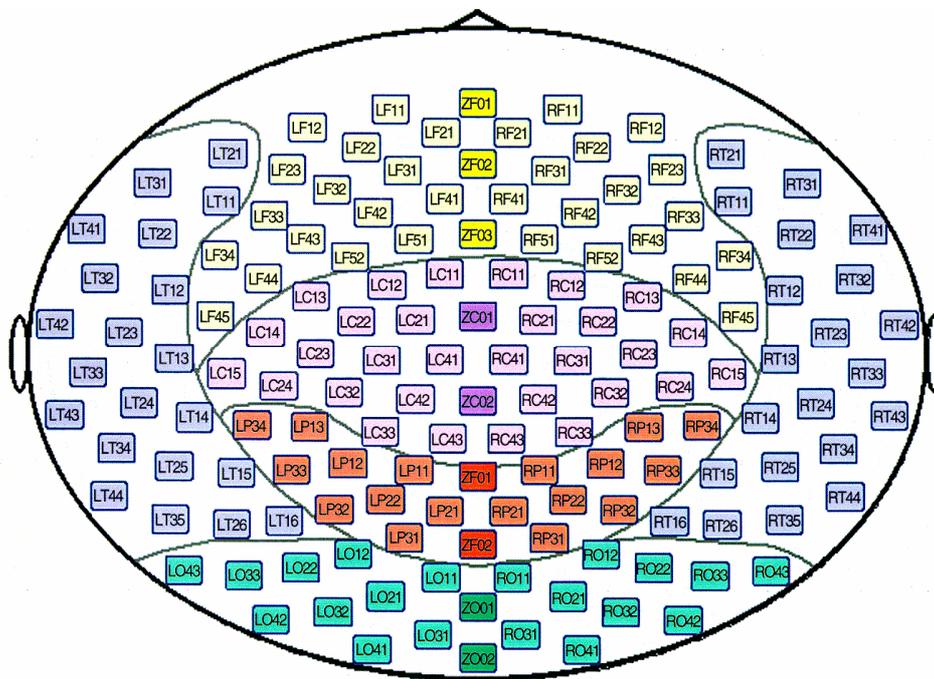
<sup>20</sup> Bei den korrekten Sätzen erschienen nach dem Zielwort zwei weitere Wörter bis zum Ende des Satzes, bei den inkorrekten Sätzen drei weitere Wörter. Zieht man bei den inkorrekten Sätzen die Zeit, die für die Präsentation des zusätzlichen Wortes hinzukam (600 ms), ab, so erhält man für die inkorrekten Sätze eine mittlere Reaktionszeit von  $1830 \text{ ms} \pm 220 \text{ ms}$ . Ausgehend von diesen Werten, unterscheiden sich die Reaktionszeiten bei den korrekten und den inkorrekten Sätzen nicht signifikant voneinander.

<sup>21</sup> Bei dieser Analyse wurden nur die semantisch passenden bzw. das Target enthaltenden Stimuli berücksichtigt.

## 7.2 Die evozierte magnetische Aktivität

### 7.2.1 Aktivität im Vergleich zur Baseline

Im folgenden Abschnitt werden die Aktivitäten beschrieben, die auf Ebene der Gruppendaten während der Verarbeitung der experimentellen Stimuli im Vergleich zur Baseline auftraten. Hierbei wird sich bei jeder Stimulusklasse nur auf die Stimuli bezogen, die semantisch zur Vorgabe passten bzw. die das gesuchte Target enthielten. Danach folgt die Beschreibung der signifikanten Unterschiede, die sich bei der Kontrastierung verschiedener Stimulationsbedingungen gegeneinander zeigten. Für alle Kontraste gilt, dass ausschließlich Unterschiede berichtet werden, die das statistische Kriterium von  $p < 0.002$  erfüllen. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Bezeichnungen „positiv“ und „negativ“ geben die Richtung des magnetischen Feldes an. Felder mit negativen Feldstärken sind in den Kopf hinein gerichtet, Felder mit positiven Feldstärken aus dem Kopf heraus. Die Anordnung der MEG-Sensoren ist in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13** Die Verteilung der 151 MEG-Sensoren

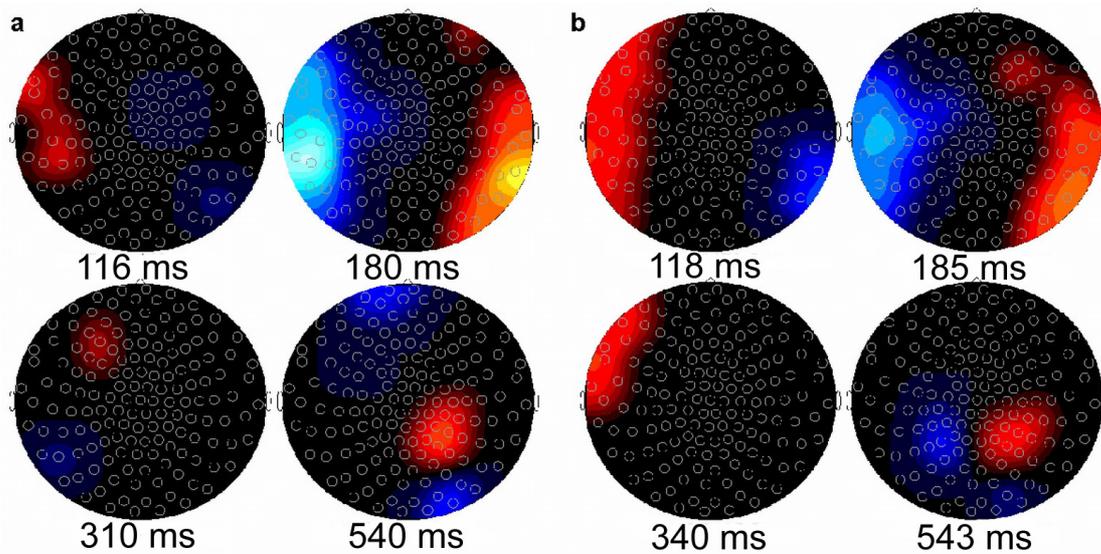
R=rechte Hemisphäre, L=linke Hemisphäre, F=frontal, T=temporal, C=zentral, O=okzipital, P=parietal.

***Nomina vs. Baseline:***

Im Zeitbereich zwischen 100 ms und 130 ms generierten die Nomina im Vergleich zur Baseline ein negatives magnetisches Feld über linken temporalen Gebieten sowie ein positives Feld über rechten okzipitotemporalen Gebieten. Im Zeitbereich zwischen 150 ms und 230 ms erzeugten die Nomina zudem ein positives magnetisches Feld im Bereich des linken temporalen Kortex sowie ein negatives Feld über dem rechten temporookzipitalen Kortex. Weiter erzeugten die Nomina im Vergleich zur Baseline zwischen 520 ms und 550 ms ein positives magnetisches Feld über okzipitalen Gebieten in der rechten Hemisphäre sowie ein negatives Feld über dem rechten parietalen Kortex (Abbildung 14).

***Verben vs. Baseline:***

Ähnlich wie bei den Nomina war während der Verarbeitung der Verben zwischen 100 ms und 130 ms an Sensoren über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre ein negatives magnetisches Feld im Vergleich zur Baseline messbar. Ab ca. 120 ms zeigte sich zudem ein positives Feld über temporookzipitalen Gebieten in der rechten Hemisphäre. Zwischen 150 und 220 ms waren im Vergleich zur Baseline temporale Areale in beiden Hemisphären aktiviert, wobei in der linken Hemisphäre positive und in der rechten Hemisphäre negative Feldstärken messbar waren. Die Verben erzeugten zusätzlich zwischen 180 und 190 ms ein negatives magnetisches Feld an Sensoren über frontalen Gebieten der rechten Hemisphäre. Zudem erzeugten sie zwischen 330 und 360 ms ein negatives Feld über anterioren temporalen Gebieten der linken Hemisphäre. Zwischen 520 und 550 ms zeigten sich bei der Verarbeitung der Verben im Vergleich zur Baseline weitere signifikante Unterschiede. Die Verben erzeugten in diesem Zeitintervall ein positives Feld über dem linken parietalen Kortex und ein negatives Feld über rechten parietalen Gebieten (Abbildung 14).

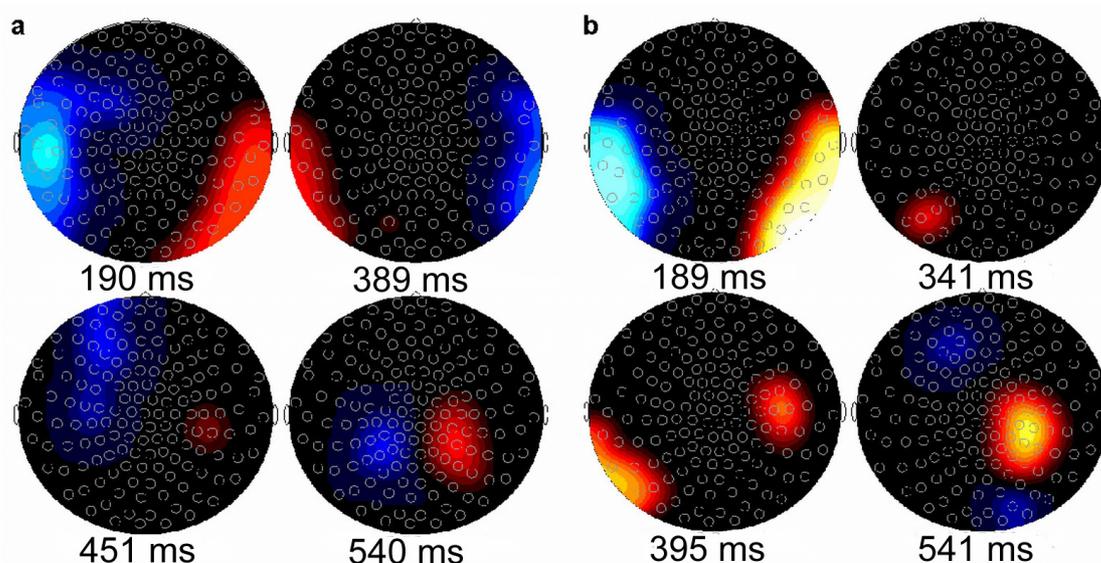


**Abbildung 14** Signifikante Unterschiede im Vergleich zur Baseline

a) Nomina vs. Baseline; b) Verben vs. Baseline. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Richtung des Feldes ist farblich kodiert (rot - in den Kopf hinein gerichtet, blau - aus dem Kopf heraus gerichtet).

### ***Non-Wörter vs. Baseline:***

Ab 150 ms generierten die Non-Wörter signifikante Veränderungen des magnetischen Feldes im Vergleich zur Baseline an Sensoren über temporalen und temporookzipitalen Gebieten in beiden Hemisphären. Diese ähnelten den Magnetfeldänderungen, die durch die Nomina und Verben erzeugt wurden, und bestanden in einem positiven magnetischen Feld über linken temporalen sowie einem negativen Feld über rechten temporookzipitalen Gebieten. Darüber hinaus generierten die Non-Wörter zwischen 360 und 420 ms signifikante Änderungen des magnetischen Feldes im Vergleich zur Baseline an Sensoren über temporookzipitalen Gebieten in beiden Hemisphären. Die Non-Wörter erzeugten ein negatives magnetisches Feld im Bereich des linken und ein positives Feld im Bereich des rechten temporookzipitalen Kortex. Im Zeitbereich zwischen 440 und 460 ms waren an Sensoren über linken frontalen Gebieten positive Feldstärken messbar. Zwischen 520 und 550 ms generierten die Non-Wörter ein positives Magnetfeld über linken parietalen und ein negatives Feld über rechten parietalen Arealen (Abbildung 15).



**Abbildung 15** Signifikante Unterschiede im Vergleich zur Baseline

a) Non-Wörter vs. Baseline; b) Symbole vs. Baseline. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Richtung des Feldes ist farblich kodiert (rot - in den Kopf hinein gerichtet, blau - aus dem Kopf heraus gerichtet).

### ***Symbole vs. Baseline:***

Zwischen 90 und 130 ms erzeugten die Symbole im Vergleich zur Baseline ein negatives magnetisches Feld über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre. Zwischen 150 ms und 230 ms waren zudem bilateral signifikante Änderungen des Magnetfeldes an temporalen und temporookzipitalen Sensoren während der Verarbeitung der Symbolketten im Vergleich zur Baseline messbar. Die Symbole erzeugten ein positives magnetisches Feld über linken und ein negatives Feld über rechten temporookzipitalen Gebieten. Zwischen 370 ms und 410 ms waren negative magnetische Felder über linken temporookzipitalen und rechten temporalen Gebieten messbar. Zwischen 520 und 550 ms zeigte sich bei der Symbolverarbeitung im Vergleich zur Baseline-Periode ein positives Feld über okzipitalen und ein negatives Feld über parietalen Arealen der rechten Hemisphäre (Abbildung 15).

## **7.2.2 Vergleiche zwischen Bedingungen**

Im Folgenden werden die Effekte beschrieben, die sich bei der Kontrastierung

verschiedener Stimulationsbedingungen gegeneinander zeigten. Es wird zuerst beschrieben, über welchen Hirnarealen diese Effekte messbar waren, gefolgt von detaillierten Angaben zu dem Verlauf der biomagnetischen Antworten an repräsentativen Sensoren.

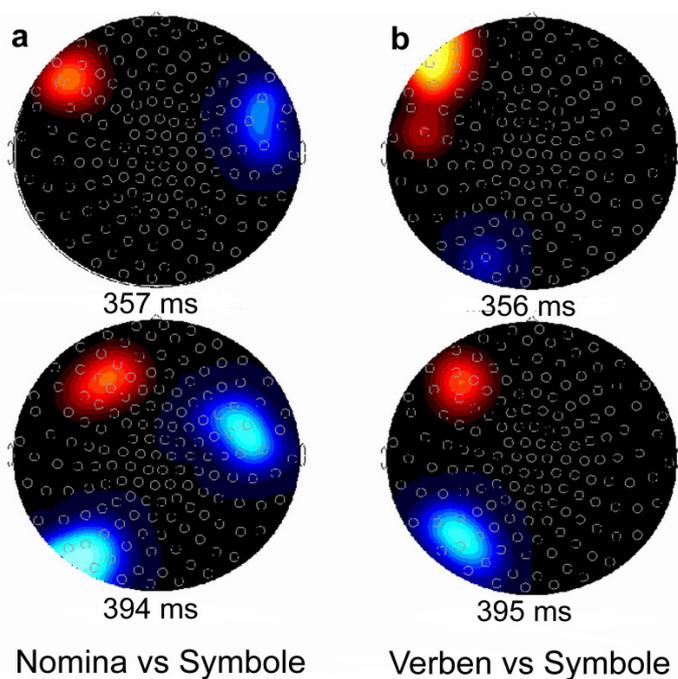
***Nomina vs. Symbole:***

Der Vergleich zwischen den magnetischen Aktivitäten, die von den Nomina und den Symbolen generiert wurden, erbrachte erste signifikante Unterschiede im Zeitbereich um 130 ms an Sensoren über temporoparietalen Gebieten der linken Hemisphäre. Weitere signifikante Unterschiede waren um 160 ms an linken temporalen Sensoren und an rechten okzipitotemporalen Sensoren messbar. Die ausgeprägtesten Unterschiede zwischen beiden Stimulusklassen zeigten sich aber im Zeitbereich zwischen 340 und 400 ms: Zwischen 340 und 360 ms waren signifikante Unterschiede an Sensoren über temporofrontalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar und zwischen 320 und 400 ms an Sensoren über temporalen Gebieten der rechten Hemisphäre. Zwischen 380 und 400 ms zeigten sich weitere Unterschiede an Sensoren über frontotemporalen Gebieten der linken Hemisphäre sowie im Zeitbereich um 400 ms an Sensoren über okzipitotemporalen Gebieten der linken Hemisphäre. Zusätzlich waren um 440 ms signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen an rechten temporookzipitalen, um 480 ms an linken parietalen und zwischen 480 und 590 ms an rechten okzipitalen Sensoren messbar (Abbildung 16).

***Verben vs. Symbole:***

Der Vergleich der Verben mit den Symbolen zeigte keine signifikanten Unterschiede in den ersten 200 ms nach Stimuluspräsentation. Erste Unterschiede traten 240 ms p. s. an Sensoren über parietalen Arealen der rechten Hemisphäre auf. Die stärksten Unterschiede zwischen den beiden Stimulusklassen zeigten sich im Zeitbereich zwischen 300 ms und 450 ms. Zwischen 330 und 360 ms war ein signifikanter Unterschied an Sensoren über temporofrontalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar, der um 350 ms maximal ausgeprägt war. Zusätzlich waren zwischen 380 und 410 ms

signifikante Unterschiede an Sensoren über frontotemporalen Gebieten und zwischen 350 und 450 ms an Sensoren über temporookzipitalen Gebieten der linken Hemisphäre mit einer maximalen Ausprägung bei 400 ms messbar. Im Zeitbereich um 440 ms waren weitere signifikante Unterschiede an Sensoren über rechten temporookzipitalen Arealen messbar (Abbildung 16).

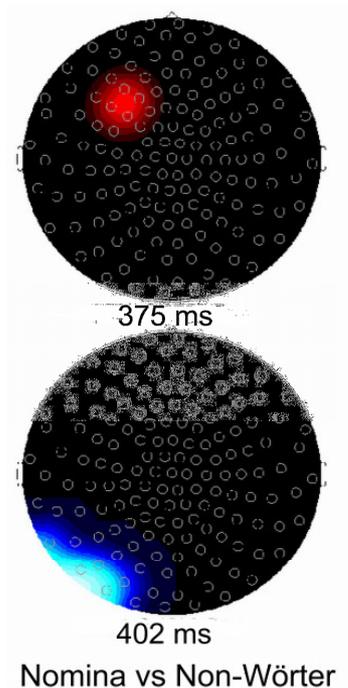


**Abbildung 16** Signifikante Unterschiede zwischen Nomina bzw. Verben und Symbolen

a) Nomina vs. Symbole b) Verben vs. Symbole. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Richtung des Feldes ist farblich kodiert (rot - in den Kopf hinein gerichtet, blau - aus dem Kopf heraus gerichtet).

### **Nomina vs. Non-Wörter:**

Erste signifikante Unterschiede zeigten sich bei dem Vergleich der von den Nomina und den Non-Wörtern erzeugten magnetischen Felder um 140 ms an Sensoren über temporookzipitalen Gebieten der rechten Hemisphäre. Im Zeitbereich um 370 ms traten weitere signifikante Unterschiede an Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre auf. Zwischen 380 und 410 ms waren zudem signifikante Unterschiede an Sensoren über linken temporookzipitalen Gebieten und zwischen 510 und 560 ms an Sensoren über okzipitalen Gebieten der rechten Hemisphäre messbar (Abbildung 17).



**Abbildung 17** Signifikante Unterschiede zwischen Nomina und Non-Wörtern

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Richtung des Feldes ist farblich kodiert (rot - in den Kopf hinein gerichtet, blau - aus dem Kopf heraus gerichtet).

### ***Verben vs. Non-Wörter:***

Zwischen 80-120 ms waren signifikante Unterschiede zwischen den magnetischen Aktivitäten, die durch die Verben und die Non-Wörter generiert wurden, über linken temporalen Gebieten messbar. Zusätzlich waren zwischen 100 und 140 ms signifikante Unterschiede über posterioren temporalen Gebieten der rechten Hemisphäre messbar. Weitere Effekte traten bei 240 ms an Sensoren über rechten und zwischen 260 und 280 ms an Sensoren über linken temporookzipitalen Gebieten auf. Zwischen 370 und 410 ms zeigten sich signifikante Unterschiede an Sensoren über linken frontalen Gebieten und zwischen 360 und 420 ms an Sensoren über okzipitotemporalen Gebieten in beiden Hemisphären. Um 600 ms zeigte sich ein weiterer Unterschied an Sensoren über temporookzipitalen Gebieten der rechten Hemisphäre.

***Non-Wörter vs. Symbole:***

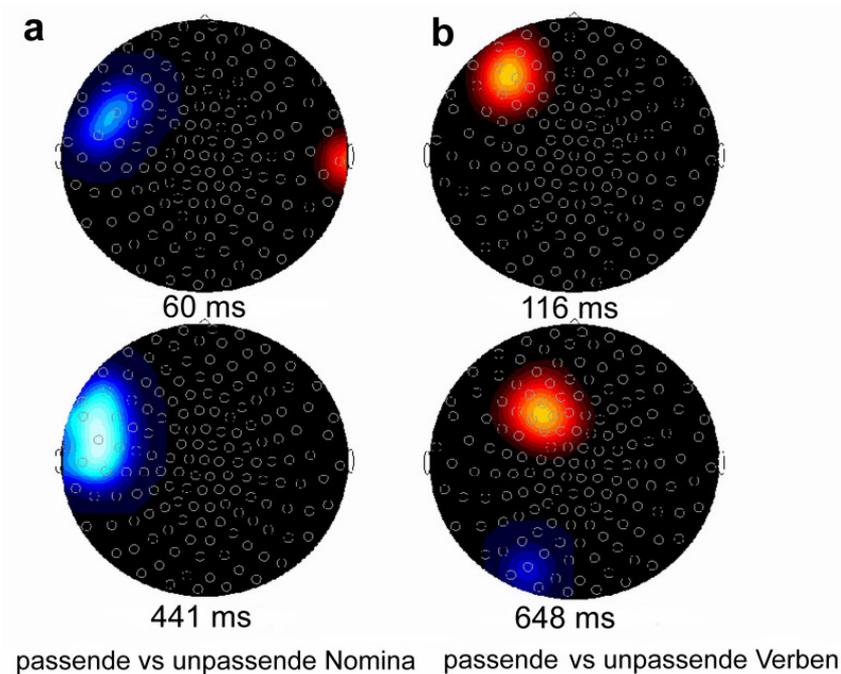
Insgesamt waren nur wenige signifikante Unterschiede zwischen diesen beiden Stimulusklassen messbar. Im Zeitbereich zwischen 330-350 ms waren signifikante Unterschiede an Sensoren über rechten temporalen Gebieten und zwischen 340 und 360 ms an Sensoren über temporofrontalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar.

***Semantisch passende vs. semantisch unpassende Nomina:***

Der statistische Vergleich der von den semantisch passenden und den semantisch unpassenden Nomina erzeugten magnetischen Aktivitäten erbrachte, dass sich diese erstmals im Zeitbereich zwischen 50 und 100 ms signifikant voneinander unterschieden. Dieser Effekt war an Sensoren über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre maximal ausgeprägt. Der stärkste Unterschied zwischen den beiden Bedingungen war allerdings im Zeitbereich zwischen 400 und 450 ms an Sensoren über dem temporalen Kortex der linken Hemisphäre messbar. Um 520 ms zeigte sich ein weiterer Unterschied an Sensoren über dem linken okzipitalen Kortex (Abbildung 18).

***Semantisch passende vs. semantisch unpassende Verben:***

Erste signifikante Unterschiede zwischen diesen beiden Bedingungen traten im Zeitbereich um 120 ms an Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre auf. Um 190 ms waren weitere signifikante Unterschiede an linken frontalen Sensoren messbar. Im Gegensatz zu den Nomina gab es dagegen im Zeitbereich um 400 ms keinen signifikanten Unterschied zwischen den Aktivitäten, die durch die semantisch passenden und die semantisch unpassenden Verben erzeugt wurden. Dagegen waren zwischen 630 und 660 ms signifikante Unterschiede an Sensoren über frontozentralen und okzipitalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar (Abbildung 18).

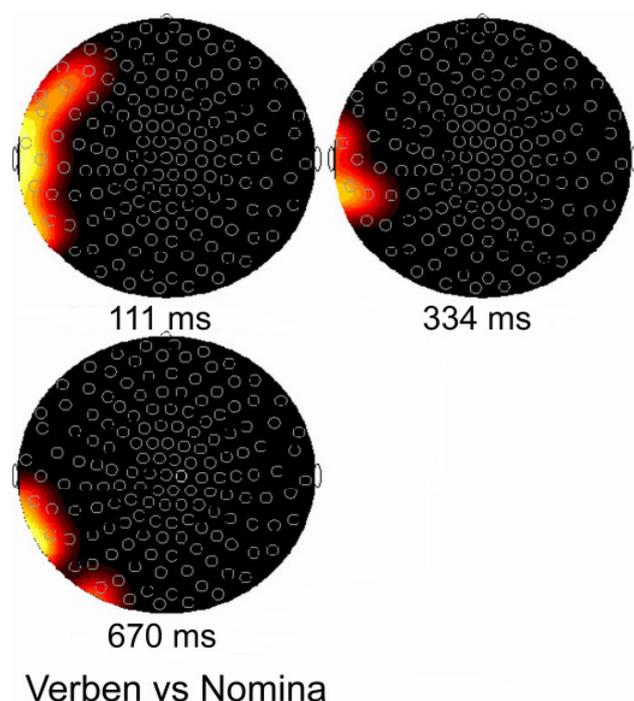


**Abbildung 18** Die semantische Verarbeitung

a) semantisch passende Nomina vs. semantisch unpassende Nomina; b) semantisch passende Verben vs. semantisch unpassende Verben. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Richtung des Feldes ist farblich kodiert (rot - in den Kopf hinein gerichtet, blau - aus dem Kopf heraus gerichtet).

### **Verben vs. Nomina:**

Signifikante Unterschiede zwischen Verben und Nomina zeigten sich vorwiegend in temporalen Gebieten. Erste Unterschiede waren zwischen 50 und 70 ms bilateral an temporalen Sensoren messbar. Zwischen 80 und 110 ms zeigten sich weitere signifikante Unterschiede an temporookzipitalen Sensoren und an Sensoren über anterioren temporalen Gebieten der linken Hemisphäre. Weitere signifikante Unterschiede traten im Zeitbereich um 330 ms nach Stimuluspräsentation im Temporallappen der linken Hemisphäre und um 470 ms an Sensoren über linken frontotemporalen Gebieten auf. Zwischen 510 und 540 ms zeigten sich zudem Unterschiede in okzipitotemporalen Gebieten der rechten Hemisphäre. Ein weiterer signifikanter Unterschied war bei 660 ms an Sensoren über inferioren temporalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar (Abbildung 19).

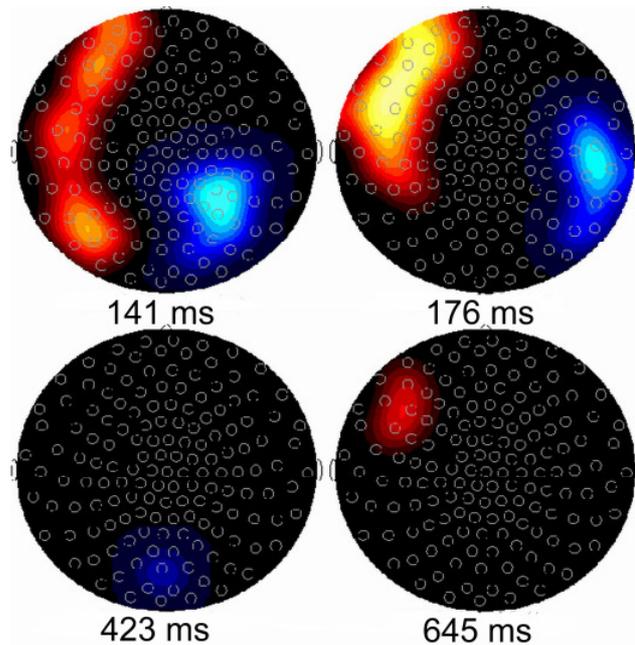


**Abbildung 19** Signifikante Unterschiede zwischen Verben und Nomina

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Richtung des Feldes ist farblich kodiert (rot - in den Kopf hinein gerichtet).

### ***Syntaktisch korrekte vs. syntaktisch inkorrekte Sätze:***

Im Zeitintervall zwischen 130 und 210 ms zeigten sich an Sensoren über frontotemporalen und temporalen Gebieten der linken, und schwächer auch der rechten Hemisphäre, signifikante Unterschiede zwischen der Verarbeitung von syntaktisch korrekten und syntaktisch inkorrekten Sätzen. Die Aktivitäten traten ab 130 ms an Sensoren über temporoparietalen Gebieten auf und breiteten sich bis ca. 210 ms in Richtung frontotemporaler Areale aus. Im Zeitbereich um 240 ms war ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Satztypen an Sensoren über temporofrontalen Gebieten der rechten Hemisphäre messbar. Im weiteren Verlauf traten signifikante Unterschiede zwischen 580 und 630 ms an Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre auf. Im Zeitbereich um 620 ms zeigten sich zudem an rechten temporalen und um 640 ms an linken frontotemporalen Sensoren Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen (Abbildung 20).



syntakt. korrekte vs syntakt. inkorrekte Sätze

**Abbildung 20** Signifikante Unterschiede zwischen korrekten und inkorrekten Sätzen

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Richtung des Feldes ist farblich kodiert (rot - in den Kopf hinein gerichtet, blau - aus dem Kopf heraus gerichtet).

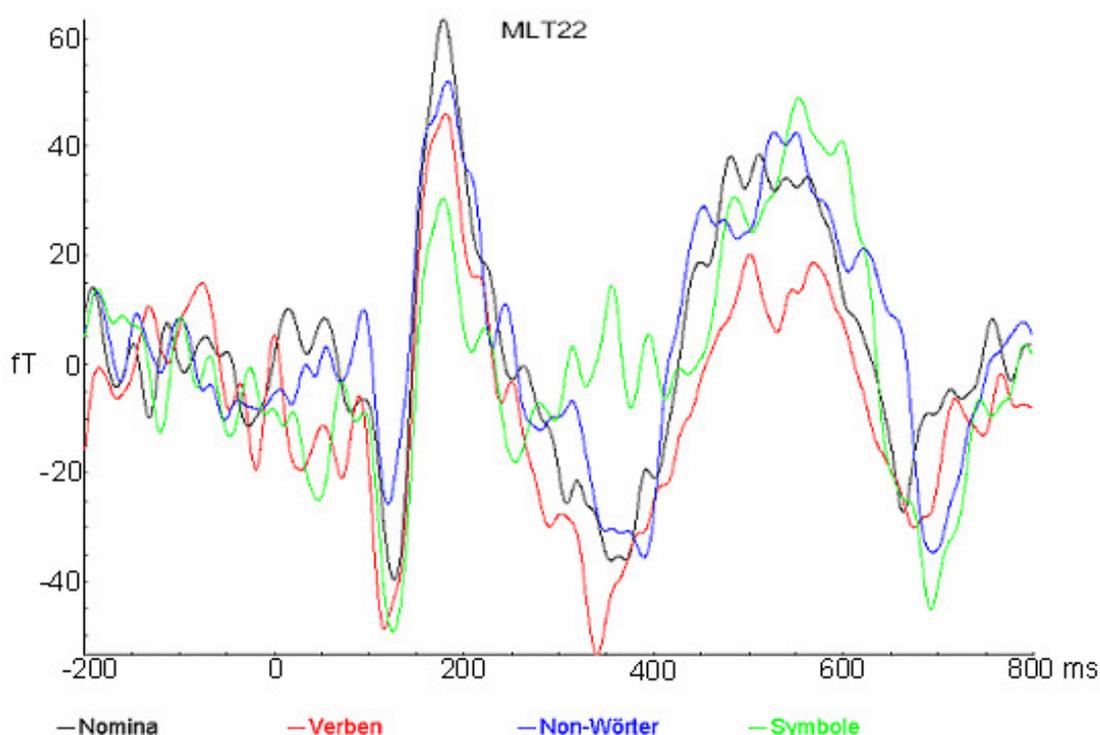
### 7.2.3 Zeitverlauf der Amplitude des magnetischen Feldes

Im folgenden Abschnitt werden die von den verschiedenen Stimuli erzeugten Amplituden des magnetischen Feldes im Detail beschrieben. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die Gruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimuluspräsentation angegeben und die Stärke des magnetischen Feldes ist in Femtotesla (fT) angegeben.

#### **Wörter und Non-Wörter vs. Symbole:**

Alle vier Stimulusklassen (Nomina, Verben, Non-Wörter, Symbole) erzeugten 100 ms nach Stimuluspräsentation an okzipitalen Sensoren eine negative Auslenkung des magnetischen Feldes, gefolgt von einer positiven Auslenkung mit einem Peak bei 200 ms. Erste Unterschiede zwischen den Stimulusklassen zeigten sich im Zeitbereich zwischen 160-180 ms. Zu diesem Zeitpunkt erzeugten die Nomina an Sensoren über linken temporalen Gebieten ein

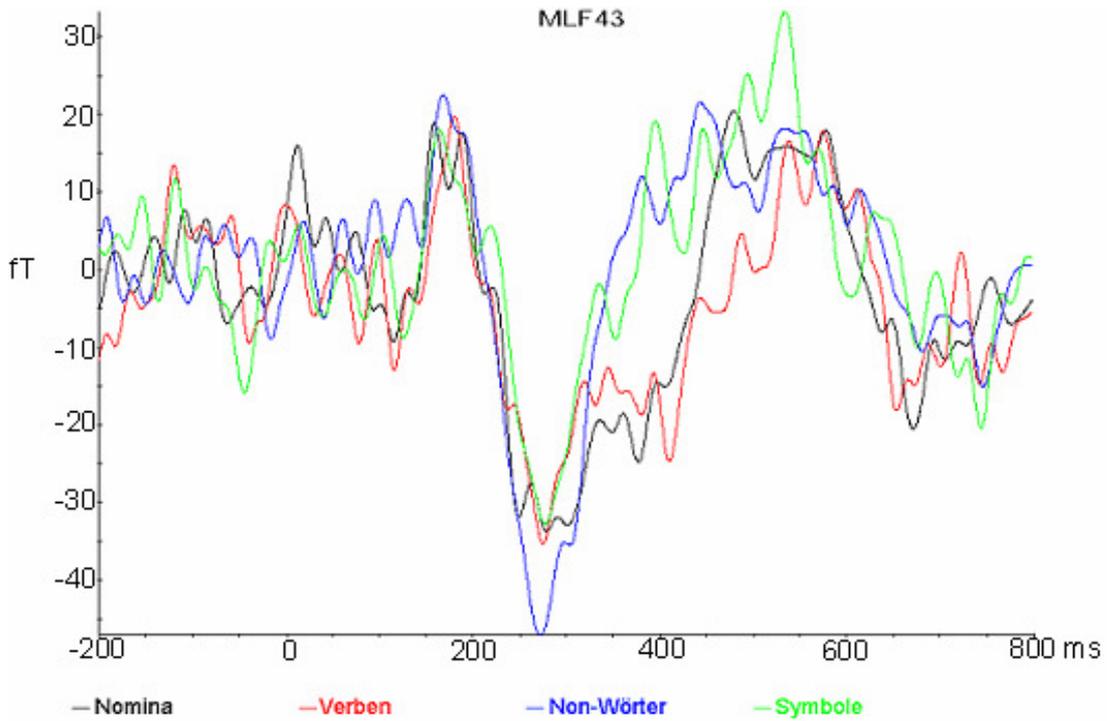
signifikant stärkeres magnetisches Feld als die Symbole (Abbildung 21). Weitere signifikante Unterschiede waren im Zeitbereich um 350 ms p. s. messbar. Zu diesem Zeitpunkt unterschieden sich die magnetischen Antworten, die von den Wörtern und den Non-Wörtern an Sensoren über temporalen und temporofrontalen Gebieten der linken Hemisphäre erzeugt wurden, signifikant von der Antwort, die von den Symbolen generiert wurde (Abbildung 21).



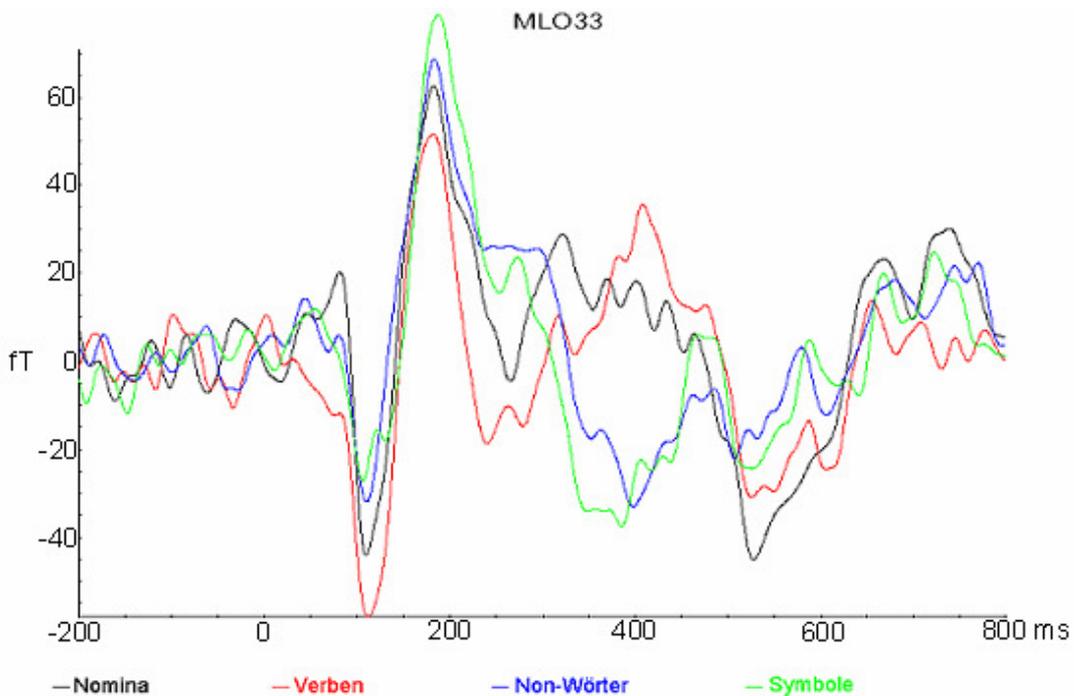
**Abbildung 21** Aktivierungszeitverlauf für die Nomina, Verben, Non-Wörter und Symbole an dem Sensor MLT22

### ***Nomina und Verben vs. Non-Wörter und Symbole:***

Zwischen 380 und 420 ms zeigten sich signifikante Unterschiede im direkten Vergleich der sprachlichen Stimuli mit den nichtsprachlichen Stimuli an Sensoren über dem frontotemporalen und dem okzipitotemporalen Kortex der linken Hemisphäre. Zwischen 350-450 ms generierten die Nomina und die Verben in frontotemporalen Gebieten einen negativeren Feldverlauf als die Symbole und die Non-Wörter (Abbildung 22). Dagegen generierten die nichtsprachlichen Stimuli im Gegensatz zu den Sprachstimuli bei 400 ms ein negatives magnetisches Feld in okzipitotemporalen Gebieten (Abbildung 23).



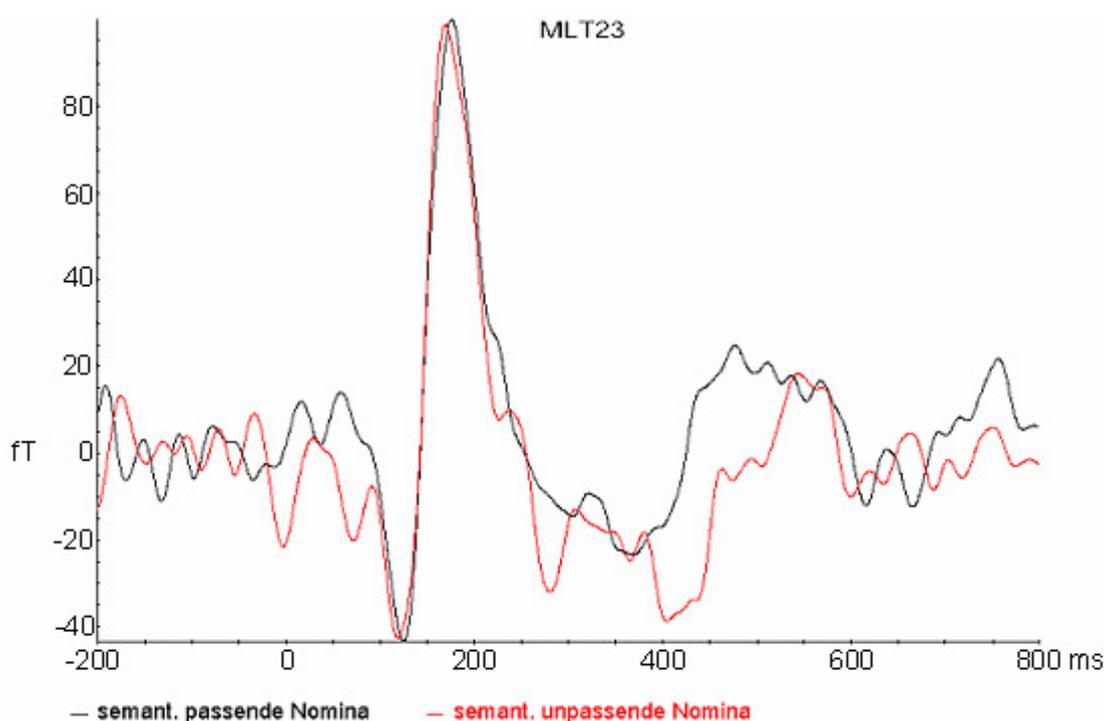
**Abbildung 22** Aktivierungszeitverlauf für die Nomina, Verben, Non-Wörter und Symbole an dem Sensor MLF43



**Abbildung 23** Aktivierungszeitverlauf für die Nomina, Verben, Non-Wörter und Symbole an dem Sensor MLO33

**Semantisch passende vs. semantisch unpassende Wörter:**

Im Zeitbereich um 400 ms erzeugten die semantisch unpassenden Nomina an Sensoren über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre im Vergleich zu den semantisch passenden Nomina eine stärkere negative Auslenkung des magnetischen Feldes mit einem Peak bei 420 ms (Abbildung 24). Die Unterschiede zwischen den semantisch passenden und den semantisch unpassenden Verben waren im Gegensatz dazu gering. An Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre erzeugten die semantisch unpassenden Verben zwischen 120-200 ms und zwischen 630-660 ms ein positiveres magnetisches Feld als die semantisch passenden Verben.



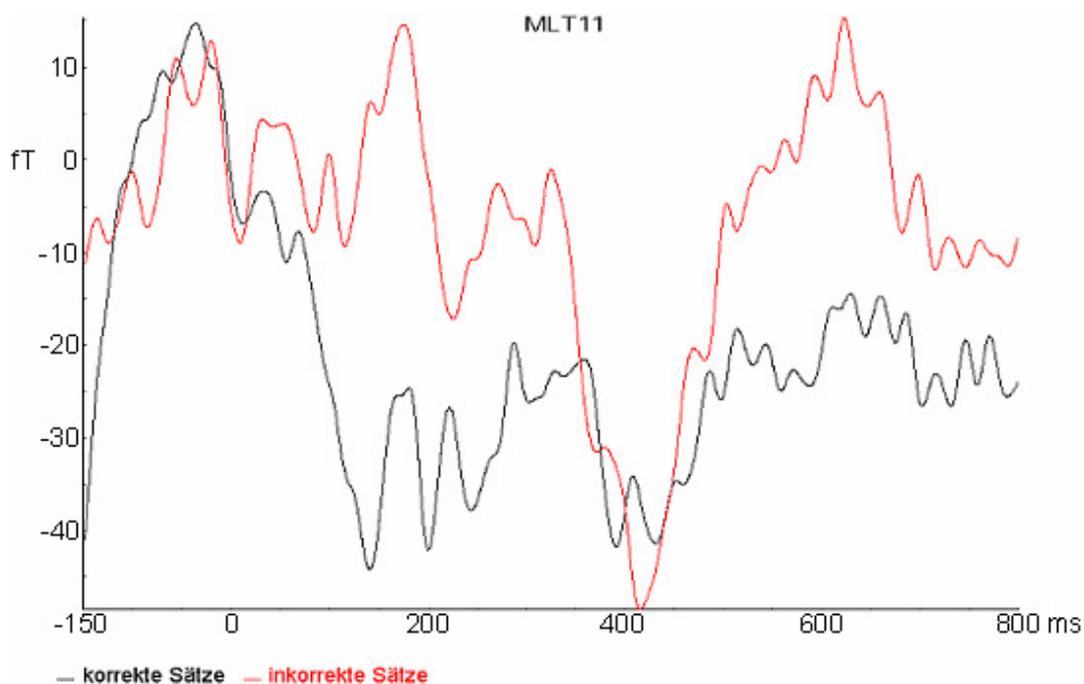
**Abbildung 24** Aktivierungszeitverlauf für die semantisch passenden und die semantisch unpassenden Nomina an dem Sensor MLT23

**Verben vs. Nomina:**

Die Unterschiede zwischen den Nomina und den Verben waren ebenfalls gering. Die Verben generierten an Sensoren über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre bei 110 ms, 340 ms und ab 660 ms ein negativeres magnetisches Feld als die Nomina.

**Syntaktisch korrekte vs. syntaktisch inkorrekte Sätze:**

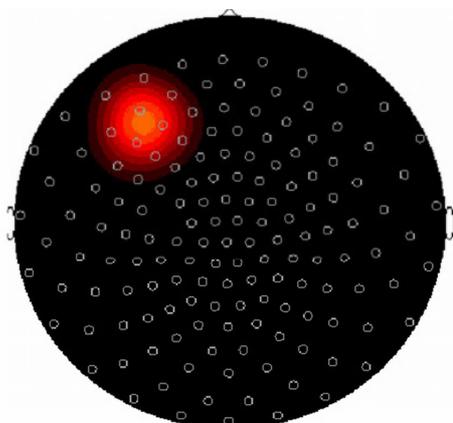
An Sensoren über frontalen und temporofrontalen Gebieten der linken Hemisphäre waren die von den inkorrekten Sätzen generierten magnetischen Felder positiver als die Felder, die von den korrekten Sätzen generiert wurden. Die deutlichsten Unterschiede waren im Zeitbereich zwischen 130-210 ms an Sensoren über dem frontotemporalen Kortex und im Zeitbereich um 600 ms an Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar. Zusätzlich waren zwischen 150 und 200 ms und zwischen 600 und 700 ms Unterschiede an Sensoren über temporalen Gebieten der rechten Hemisphäre messbar. Die inkorrekten Sätze erzeugten in diesem Zeitintervall einen negativeren Feldverlauf im Vergleich zu den korrekten Sätzen (Abbildung 25).



**Abbildung 25** Aktivierungszeitverlauf für die syntaktisch korrekten und die syntaktisch inkorrekten Sätze an dem Sensor MLT11

### 7.3 Die induzierte Aktivität

Im Vergleich der Nomina und Verben mit den Non-Wörtern konnten keine signifikanten Unterschiede in der induzierten Aktivität festgestellt werden. Im Vergleich der Nomina mit den Symbolen zeigte sich im 2-Hz-Band ein Unterschied an Sensoren über linken temporalen Gebieten und im Frequenzbereich um 75 Hz ein weiterer Unterschied an Sensoren über linken frontalen Gebieten. Im Vergleich der Verben mit den Symbolen zeigte sich ebenfalls im 2-Hz-Band ein Unterschied an Sensoren über dem temporalen Kortex und im Frequenzbereich um 100 Hz ein weiterer Unterschied an Sensoren über dem okzipitotemporalen Kortex der linken Hemisphäre. Bei den Sätzen zeigte sich in der Analyse der induzierten magnetischen Aktivität im Frequenzbereich zwischen 2-10 Hz ein signifikanter Unterschied zwischen der Verarbeitung der korrekten und der inkorrekten Sätze an Sensoren über frontalen Bereichen der linken Hemisphäre (Abbildung 26).



2 Hz

syntakt. korrekte vs. inkorrekte Sätze

**Abbildung 26** Signifikante Unterschiede im Frequenzband um 2Hz zwischen syntaktisch korrekten und syntaktisch inkorrekten Sätzen

## 8 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde ein experimentelles Stimulationsparadigma zur Identifikation von neuromagnetischen Korrelaten der Sprachverarbeitung an einer Gruppe gesunder Probanden getestet. In den durchgeführten Experimenten konnten spezifische neuronale Antworten identifiziert werden, welche die prälexikalische Verarbeitung, lexikalische Auswahlprozesse, den Zugriff auf den Lexikoneintrag sowie semantische und syntaktische Verarbeitungsprozesse reflektieren.

### 8.1 Die Prälexikalische Verarbeitung

Korrelate der prälexikalischen Verarbeitung wurden in den Daten durch Vergleiche zwischen der Verarbeitung von Wörtern und Non-Wörtern mit der Verarbeitung von Symbolen identifiziert. Erste signifikante Unterschiede zeigten sich dabei im Zeitbereich um 160 ms an Sensoren über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre. Die Nomina erzeugten in diesem Zeitbereich ein stärkeres magnetisches Feld als die Symbole. Auch die magnetischen Aktivitäten, die von den Verben und den Non-Wörter in diesem Zeitbereich generiert wurden, waren stärker als die Aktivität, welche die Symbole generierten. Zwischen der Verarbeitung von Wörtern und Non-Wörtern waren dagegen in dem genannten Zeitintervall keine signifikanten Unterschiede nachweisbar.

Diese Ergebnisse weisen eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer MEG-Studien auf. So beschrieben Eulitz et al. (2000) eine biomagnetische Komponente, die mit einer Latenz von 180 ms auftritt und eine signifikant höhere Amplitude bei der Verarbeitung von Wörtern und False Fonts (Stimuli aus verdrehten Buchstaben) als bei der Verarbeitung von nichtsprachlichen visuellen Stimuli aufweist. Zwischen der Verarbeitung von Wörtern und der Verarbeitung von False Fonts gab es dagegen keine signifikanten Unterschiede. Die gemessene Komponente hatte ihre stärkste Ausprägung in temporookzipitalen Gebieten und wurde von den Autoren als

M180 bezeichnet. Nach Interpretation der Autoren steht sie mit der Verarbeitung von sprachlichen und sprachverwandten Stimuli in Zusammenhang, ist dabei aber weder lexikalisch noch sprachspezifisch. Ähnliche Ergebnisse erbrachte auch die Studie von Tarkiainen et al. (1999). Die Autoren beschrieben, dass das Lesen von Wörtern, wortähnlichen Stimuli und Symbolen zu unterschiedlichen magnetischen Antworten in den ersten 180 ms nach Stimuluspräsentation führt. Die Amplitude der evozierten Antwort war bei der Verarbeitung von Letter Strings, Wörtern und wortähnlichen Stimuli größer als bei der Verarbeitung von geometrischen Symbolen. Die weitere Auswertung der Daten belegte einen signifikanten Unterschied zwischen der Verarbeitung von Wörtern und wortähnlichen Stimuli auf der einen Seite und der Verarbeitung von Symbolen auf der anderen Seite, dagegen aber keinen signifikanten Unterschied zwischen der Verarbeitung von Wörtern und wortähnlichen Stimuli. Die genannten Unterschiede waren am deutlichsten im inferioren okzipitotemporalen Kortex der linken Hemisphäre ausgeprägt. Die Autoren zogen aus den Ergebnissen den Schluss, dass in den ersten 180 ms nach Stimuluspräsentation Prozesse ablaufen, bei denen der visuelle Input komplex gefiltert wird. Nach Interpretation der Autoren ist dieser Filter als Interface zwischen der visuellen und der sprachlichen Verarbeitungsdomäne zu verstehen, wobei die Verarbeitung innerhalb des Filters zwar durch die Ähnlichkeit der Stimuli zu Wörtern beeinflusst wird, aber nicht sprachspezifisch ist.

Sowohl mit den Ergebnissen von Eulitz et al. (2000) als auch mit den Ergebnissen von Tarkiainen et al. (1999) sind unsere Ergebnisse gut vereinbar. Auch in den Daten der vorliegenden Arbeit zeigte sich im Zeitbereich um 180 ms ein signifikanter Unterschied zwischen der Verarbeitung von Nomina und Symbolen sowie ein schwächerer Unterschied zwischen der Verarbeitung von Non-Wörtern und Verben zu der Verarbeitung von Symbolen. Dagegen war kein Unterschied zwischen der Verarbeitung von Wörtern und der Verarbeitung von Non-Wörtern feststellbar. Vor allem die letztgenannte Tatsache weist in Übereinstimmung mit der Literatur darauf hin, dass die zugrunde liegenden Prozesse weder sprachspezifisch noch lexikalisch sind. Wir interpretieren die

beobachteten Effekte bei 160 ms daher als Korrelate prälexikalischer Verarbeitungsprozesse.

## 8.2 Lexikalische Evaluationsprozesse

Ein weiterer Unterschied zwischen der Verarbeitung von Wörtern und Non-Wörtern auf der einen Seite und der Verarbeitung der Symbole auf der anderen Seite zeigte sich in den vorliegenden Daten im Zeitbereich um 350 ms nach Stimuluspräsentation. Die Nomina, Verben und Non-Wörter erzeugten in diesem Zeitbereich an linken temporalen Sensoren ein negatives magnetisches Feld, wogegen die Symbole im gleichen Zeitbereich einen positiven Feldverlauf generierten. Als Erklärung für diesen Unterschied kommen im Wesentlichen zwei Erklärungen in Betracht: Der Effekt könnte durch eine abweichende Verarbeitung der Symbole bedingt sein oder er könnte seine Ursache in einer spezifischen Verarbeitung der Wörter und Non-Wörter haben.

Hinweise darauf, dass die letztgenannte Hypothese zutrifft, liefern die Experimente von Tarkiainen et al. (1999). Die Autoren stellten in ihren Experimenten im Zeitbereich um 300 ms eine Sensitivität des linken superioren temporalen Kortex für die Verarbeitung von visuell präsentierten Wörtern im Vergleich zu Symbolketten fest. Auch aus zahlreichen weiteren Studien ist die Relevanz des linken temporalen Kortex für die Verarbeitung von Wörtern bekannt (s. oben). Zudem belegen Studien, dass die Verarbeitung von Symbolen vorrangig in der rechten Hemisphäre stattfindet (Koul et al. 1998). Die Tatsache, dass in unseren Daten der Effekt bei 350 ms an Sensoren über dem temporalen Kortex der linken Hemisphäre auftrat, spricht daher eher dafür, dass es sich um ein Korrelat der Verarbeitung wortähnlicher Stimuli und nicht um ein Korrelat der Symbolverarbeitung handelt. Die Tatsache, dass sowohl die Wörter als auch die Non-Wörter im Rahmen dieses Effektes eine vergleichbare Auslenkung des magnetischen Feldes erzeugten, weist zudem darauf hin, dass die Prozesse, die dieser Aktivität zugrunde liegen, für beide Stimulusklassen vergleichbar sind. Für die Frage, um welche Prozesse es sich hierbei genau handelt, liefern neuere MEG-Studien ein mögliches

Erklärungsmodell. So wurde wiederholt eine biomagnetische Komponente beschrieben, die bei der Sprachverarbeitung Prozesse der Aktivierung und Konkurrenz zwischen lexikalischen Einträgen *vor* der definitiven Auswahl eines Lexikoneintrages reflektiert (Pylkkänen et al. 2002, 2003; Stockall et al. 2004; Embick et al. 2001). Bei dieser Komponente handelt es sich um die sogenannte M350, die sowohl von Wörtern als auch von Non-Wörtern im Zeitbereich zwischen 300-400 ms im temporalen Kortex evoziert wird. Die dabei gemachte Annahme, dass auch Non-Wörter lexikalische Evaluationsprozesse initiieren, ist nicht neu. Diese Möglichkeit ist bereits in dem Modell der Sprachperzeption von McClelland & Rumelhart (McClelland et al. 1981; Rumelhart and McClelland 1982) enthalten. Darüber hinaus legen mehrere experimentelle Befunde dies nahe. So konnten Jessen et al. (1999) in einer fMRT-Studie zeigen, dass zahlreiche Sprachverarbeitungsareale während der Verarbeitung von Buchstabenketten sogar stärker aktiviert werden als während der Verarbeitung von realen Wörtern. Die Autoren schlossen daraus, dass diese Aktivierungen einen intensiven lexikalischen Evaluationsprozess der bedeutungslosen Stimuli reflektieren (s. dazu auch Price et al. 1996).

In Übereinstimmung mit der Literatur belegen unsere Daten, dass Wörter und Non-Wörter bei 350 ms eine Komponente im linken temporalen Kortex generieren, die während der Symbolverarbeitung nicht auftritt. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um eine M350 und somit um ein Korrelat lexikalischer Evaluationsprozesse. Zudem bestätigen unsere Daten, dass sich sowohl Wörter als auch Non-Wörter in diesem Evaluationsprozess befinden. Auch für die Annahme von Pylkkänen et al. (2002; 2003), dass der Effekt bei 350 ms Auswahlprozesse *vor* dem Zugriff auf den passenden lexikalischen Eintrag reflektiert, lassen sich in unseren Daten gute Hinweise finden. So lässt sich der beschriebene Effekt bei 350 ms von einem weiteren Effekt abgrenzen, der mit hoher Wahrscheinlichkeit postlexikalischer Natur ist. An den Sensoren, an denen der M350-Effekt auftrat, war auch der Hauptunterschied zwischen den semantisch passenden und den semantisch unpassenden Nomina messbar (s. unten). Interessant ist die zeitliche Abfolge dieser beiden Effekte. Der „semantische Effekt“ trat zu einem Zeitpunkt auf, an dem der Effekt, der

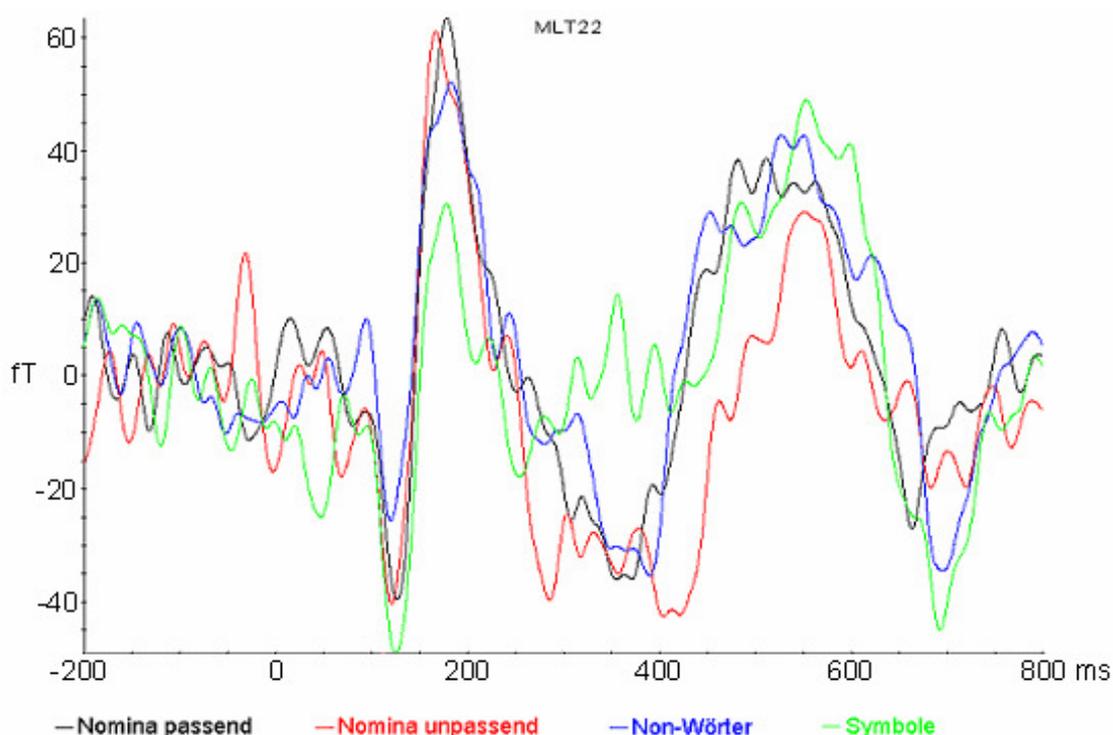
wahrscheinlich mit der lexikalischen Evaluation in Zusammenhang steht, bereits abgeklungen war (s. Abbildung 27). Da angenommen werden kann, dass Wörter erst dann semantisch bewertet werden können, wenn die entsprechenden Lexikoneinträge zur Verfügung stehen, ergibt sich ein konsistentes Zeitschema, bei dem bei 350 ms p. s. lexikalische Auswahlprozesse und bei 420 ms p. s. semantische Analysen stattfinden.

### **8.3 Lexikalische Repräsentationen**

Neben den bisher beschriebenen Effekten, die Unterschiede zwischen der Verarbeitung von Wörtern und wortähnlichen Stimuli auf der einen Seite und der Verarbeitung von Symbolen auf der anderen Seite belegen, zeigten sich in den Daten ebenfalls Unterschiede zwischen der Verarbeitung von bedeutungstragenden (Nomina/Verben) und nicht-bedeutungstragenden Stimuli (Non-Wörter/Symbole). Es handelt sich dabei um zwei Effekte: Der erste Effekt war zwischen 370-410 ms an Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar und der zweite Effekt trat zwischen 350-450 ms an Sensoren über okzipitotemporalen Gebieten der linken Hemisphäre auf. Beide Effekte waren 400 ms nach Stimuluspräsentation maximal ausgeprägt. Im Rahmen des frontalen Effektes wiesen die Amplituden, die durch die sprachlichen Stimuli erzeugt wurden, einen negativeren Verlauf auf als die, die durch die nicht-sprachlichen Stimuli erzeugt wurden. Im Rahmen des okzipitotemporalen Effektes generierten dagegen die sprachlichen Stimuli ein positives magnetisches Feld, wogegen die nicht-sprachlichen Stimuli einen negativen Feldverlauf generierten.

Als mögliche Basis für die beschriebenen Effekte kommt das Vorhandensein von lexikalischen Repräsentationen bei den Wörtern im Gegensatz zu einem Fehlen derartiger Repräsentationen im Falle der bedeutungslosen Stimuli in Betracht. Diese Interpretation lässt sich aus verschiedenen Modellen zur Struktur des mentalen Lexikons ableiten, in denen die Existenz von lexikalischen Einträgen nur für reale Wörter einer Sprache angenommen wird (s. oben). Zudem existiert experimentelle Evidenz für eine solche Annahme. So

konnten Sekiguchi et al. (2001) demonstrieren, dass Wörter lexikalische Repräsentationen besitzen, auf die im Zeitbereich um 400 ms nach Stimuluspräsentation zugegriffen wird, wohingegen Non-Wörter keine derartigen Repräsentationen besitzen. Als relevante Region für den Sitz der Lexikoneinträge wurde der linke perisylvische Kortex angegeben.



**Abbildung 27** Aktivierungszeitverlauf für die semant. passenden Nomina, die semant. unpassenden Nomina, die Non-Wörter und die Symbole an dem Sensor MLT22

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtgruppe von 16 Probanden. Die Zeitangaben sind in Millisekunden nach Stimulusonset angegeben. Die Stärke des magnetischen Feldes ist in Femtotesla (fT) angegeben.

In guter Übereinstimmung zu diesen Ergebnissen traten auch in unseren Daten die Effekte, die eine unterschiedliche Verarbeitung von sprachlichen und nicht-sprachlichen Stimuli reflektieren, mit einer Latenz von 400 ms auf. Es kann daher angenommen werden, dass diese Effekte ebenfalls mit dem Zugriff auf die lexikalischen Repräsentationen von Wörtern in Zusammenhang stehen. Diese Interpretation ist gut mit dem bisher skizzierten Zeitverlauf der sprachlichen Verarbeitung von Wörtern vereinbar: Wenn lexikalische Evaluationsprozesse bei 350 ms und postlexikalische Verarbeitungsschritte bei

420 ms stattfinden, muss der eigentliche Zugriff auf den Lexikoneintrag zwischen diesen beiden Zeitpunkten erfolgen. Die sprachspezifischen Effekte, die sich in unseren Daten im Zeitbereich um 400 ms zeigten, könnten mit diesem Zugriff in Verbindung stehen. Die Tatsache, dass im Fall der Non-Wörter keine lexikalischen Einträge ausgewählt werden können, erklärt dabei, warum die Verarbeitung der Wörter und die der Non-Wörter zu diesem Zeitpunkt erstmalig voneinander abweicht.

Obwohl sich die genannten Interpretationen gut belegen lassen, muss angemerkt werden, dass es sich dabei um post-hoc-Hypothesen handelt und auch andere Erklärungen für die beobachteten Effekte in Betracht kommen. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Effekte, die im Zeitbereich um 400 ms messbar waren, durch Aspekte der Aufgabenbearbeitung hervorgerufen wurden. So sollte in den Experimenten, in denen die Non-Wörter und die Symbolketten präsentiert wurden, nach bestimmten Elementen (Targets) in den Stimuli gesucht werden. Solche Prozesse waren nicht Bestandteil der Aufgabenstellung in den Experimenten, in denen die Nomina und die Verben präsentiert wurden. Während des gezielten Suchens von Elementen wurden in der Literatur wiederholt Aktivierungen in okzipitotemporalen und frontalen Arealen beschrieben (Kapur et al. 1994, Saarinen et al. 1998). Diese Prozesse kommen somit ebenfalls als mögliche Auslöser des gefundenen Unterschiedes zwischen der Verarbeitung von sprachlichen und nicht-sprachlichen Stimuli in Frage.

#### **8.4 Die semantische Verarbeitung**

Die Hauptunterschiede zwischen der Verarbeitung von semantisch passenden und semantisch unpassenden Nomina waren im Zeitbereich zwischen 400-500 ms nach Stimuluspräsentation an Sensoren über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre messbar. Die semantisch unpassenden Nomina generierten in diesem Zeitintervall eine negative Amplitude des magnetischen Feldes mit einem Peak bei 420 ms. Eine vergleichbare Aktivität wurde von den semantisch passenden Nomina nicht erzeugt.

Diese Ergebnisse gehen mit einer Reihe publizierter Studien konform. So konnten Simos et al. (2002) in ihrer MEG-Studie zeigen, dass der mittlere temporale Gyrus der linken Hemisphäre mit dem Zugriff auf die Bedeutung von Wörtern in Beziehung steht. Zudem belegen weitere Studien, dass der Zugriff auf die Bedeutung eines Wortes im Zeitbereich um 400 ms nach Präsentation des Zielwortes erfolgt. So erzeugten in den Experimenten von Suzuki et al. (2001) semantisch inkongruente Kategorie-Nomen-Paare im Vergleich zu kongruenten Paaren im Zeitbereich um 400 ms p. s. starke magnetische Aktivitäten im temporalen Kortex der linken Hemisphäre. Andere Studien erbrachten ebenfalls, dass die Haupteffekte der Verarbeitung von semantischer Inkongruenz im Zeitbereich um 400 ms nach Stimuluspräsentation auftreten (Halgren et al. 2002; Helenius et al. 1998; Simos et al. 1997). Da der Verlauf der magnetischen Felder in diesen Studien große Ähnlichkeiten zu dem Verlauf einer N400 zeigte, wurde von einigen Autoren angenommen, dass es sich um das biomagnetische Äquivalent der N400 handeln könnte. Die Tatsache, dass diese Effekte vorwiegend an Sensoren über dem temporalen Kortex der linken Hemisphäre auftraten, deckt sich dabei gut mit Ergebnissen aus fMRT- und PET-Studien. So konnte in zahlreichen Studien demonstriert werden, dass der linke temporale Kortex für die Verarbeitung von semantischen Inhalten in Kategorisierungsaufgaben relevant ist (Caramazza et al. 1990; Martin et al. 1995; Snyder et al. 1995; Damasio et al. 1996; Chao et al. 1999; Perani et al. 1999; Martin and Chao 2001).

Der Effekt, der sich in der vorliegenden Arbeit bei 400 ms p. s. in der Kategorisierungsaufgabe der Nomina zeigte, weist hinsichtlich Latenz und Topographie eine gute Übereinstimmung zu den genannten Studien auf. Er reflektiert damit vermutlich ebenfalls die Verarbeitung von semantischen Inhalten. Hierbei wies er eine hohe Spezifität für die Aufgabe der Kategorisierung von Nomina auf. Ein ähnlicher Aktivitätsverlauf trat in keiner der anderen Aufgaben auf. Insbesondere im Fall der Verben ist dieses Ergebnis erstaunlich, da auch diese unter semantischen Gesichtspunkten bewertet werden sollten. Dies geschah allerdings nicht im Kontext einer Kategorisierungsaufgabe. Aus diesem Ergebnis kann der Schluss gezogen

werden, dass sowohl die Art des Abrufs als auch die Klasse der abzurufenden Einträge einen Einfluss auf die kortikalen Aktivierungen haben.

Im Gegensatz zu den Nomina sollten die Verben in dem von uns durchgeführten Experiment hinsichtlich ihrer semantischen Kombinierbarkeit mit einer Vorgabe geprüft werden (z. B. Auto - waschen vs. Auto - reiten). Zahlreiche Studien mit bildgebenden Verfahren belegen, dass während des Abrufs von Verben starke Aktivierungen in frontalen Arealen auftreten (Petersen et al. 1988; Wise et al. 1991a; Eulitz et al. 1994; Buckner et al. 1995; Snyder et al. 1995; Warburton et al. 1996). In guter Übereinstimmung zu diesen Ergebnissen zeigten sich auch in der vorliegenden Arbeit die Hauptunterschiede zwischen der Verarbeitung von semantisch passenden und semantisch unpassenden Verben an Sensoren über frontalen Arealen der linken Hemisphäre. Dabei waren ein früher und ein später Effekt voneinander abgrenzbar. Der frühe Effekt trat im Zeitbereich zwischen 110-200 ms an frontalen Sensoren auf, der späte Effekt zwischen 630-660 ms an frontozentralen und temporookzipitalen Sensoren. Beide Effekte waren linkslateralisiert.

Die EEG- und MEG-Literatur liefert nur wenige Hinweise für eine detaillierte Interpretation dieser Ergebnisse, da insgesamt nur wenige Studien existieren, in denen frontale Aktivierungen im Zeitbereich um 200 ms während der Verarbeitung von Verben beobachtet wurden. Eine mögliche Erklärung für unser Ergebnis ist, dass die semantisch passenden Verben in stark überlernten Verbindungen zu dem jeweiligen Vorgabewort stehen (z. B. Auto - fahren). Diese Tatsache könnte dazu führen, dass diese Verben auf eine andere Weise abgerufen werden als die semantisch unpassenden Verben. Hinweise darauf liefern die Experimente von Abdullaev und Posner (1997). Die Autoren konnten zeigen, dass der linke frontale Kortex im Zeitbereich um 200 ms p. s. stärker aktiviert wird, wenn ein ungewöhnlicher Gebrauch für einen Gegenstand genannt wird als wenn ein gewöhnlicher Gebrauch genannt wird. In Analogie dazu könnte das stärkere Magnetfeld, das sich in unseren Daten während der Verarbeitung der semantisch unpassenden Verben bei 200 ms zeigte, eine

Folge des größeren Aufwandes sein, der bei dem Abruf dieser Verben anfällt. Der Abruf der semantisch passenden Verben in den stark überlernten Verbindungen ist dagegen möglicherweise bereits durch das Vorgabewort gebahnt. Dies könnte erklären, warum sich der Unterschied zwischen den beiden Bedingungen bereits zu einem so frühen Zeitpunkt zeigte. Diese Interpretation wird in weiteren Studien überprüft werden müssen. Weitere Studien sind auch für die Interpretation der Prozesse nötig, die dem späten Effekt bei 630 ms zugrunde liegen könnten. Sie könnten mit einer grammatikalischen Verarbeitung in Zusammenhang stehen. Für diese These lassen sich in der Literatur allerdings bisher keine übertragbaren Ergebnisse finden.

## **8.5 Die Verarbeitung von Nomina und Verben**

Die Nomina und Verben erzeugten zu drei Zeitpunkten unterschiedliche neuronale Antworten. Signifikante Unterschiede waren mit einer Latenz von 110 ms, 340 ms und 660 ms vorwiegend an Sensoren über dem temporalen Kortex der linken Hemisphäre messbar. In der Literatur lassen sich dazu vergleichbare Ergebnisse finden.

So beschrieben Pulvermüller und Mitarbeiter (1995; 1999; 2001) wiederholt frühe Unterschiede zwischen der Verarbeitung von Nomina und Verben. Als Grundlage für diese Effekte wurde die Kopplung der beiden Wortklassen an verschiedene Typen von Assoziationen angegeben. Auch in unseren Daten kann eine Kopplung an unterschiedliche Assoziationen bei den beiden Wortklassen angenommen werden, da die Nomina konkrete Objekte und die Verben motorische Tätigkeiten bezeichneten. Ob diese Tatsache allerdings die Erklärung für den gefundenen frühen Wortklasseneffekt darstellt, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Bei dieser Interpretation müsste ein Zugriff auf die Assoziationen zu einem Zeitpunkt angenommen werden, an dem nach heutigem Wissenstand noch visuelle und prälexikalische Verarbeitungsschritte ablaufen (s. oben). Zudem wäre nach den Ergebnissen von Preissl und Pulvermüller (1995) zu erwarten gewesen, dass auch im Zeitbereich um 200

ms ein Unterschied zwischen den beiden Wortklassen auftritt, der auf deren Kopplung an unterschiedliche Assoziationen zurückzuführen ist. Ein solcher Effekt zeigte sich in den erhobenen Daten nicht. Es spricht somit einiges gegen die These, dass die Assoziationskopplung der Wörter die Erklärung für den frühen Wortklasseneffekt darstellt, der sich in unserem Datenmaterial zeigte. Da der beobachtete Effekt einen quantitativen und keinen qualitativen Unterschied darstellte und zudem eher schwach ausgeprägt war, scheint es wahrscheinlicher, dass er seine Basis in Unterschieden in der visuellen oder prälexikalischen Verarbeitung der beiden Wortklassen hat. Dies muss in weiteren Studien überprüft werden.

Der zweite signifikante Unterschied bei der Verarbeitung von Nomina und Verben zeigte sich im Zeitbereich um 340 ms p. s.. Eine genauere Analyse ergab, dass die Verben zwischen 330-360 ms an Sensoren über dem linken temporalen Kortex eine Reduktion des magnetischen Feldes im Vergleich zur Baseline generierten. Eine vergleichbare Aktivität war für die Nomina nicht nachweisbar. Diese Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen von Dhond et al. (2003). In ihren Experimenten erzeugten Verben ebenfalls eine Magnetfeldänderung im Vergleich zur Baseline im Zeitbereich um 340 ms p. s. über dem linken temporalen Kortex. Da diese Feldänderung bei irregulären Verben stärker ausgeprägt war als bei regulären Verben, folgerten die Autoren, dass die Aktivität mit der Analyse der Flexionsform der Verben in Verbindung stehen könnte. Da in unseren Daten die beschriebene Änderung des magnetischen Feldes bei 340 ms ausschließlich während der Verarbeitung von Verben und nicht während der Verarbeitung von Nomina nachweisbar war, kommt eine grammatikalische Analyse der Verben auch als Erklärung für die vorliegenden Ergebnisse in Betracht. Dies muss in Folgestudien überprüft werden. Entsprechendes gilt für die Unterschiede, die sich in den Daten bei 600 ms zwischen den Verben und den Nomina zeigten. Sie könnten ebenfalls das Korrelat einer grammatikalischen Analyse der Verben sein.

## 8.6 Die Verarbeitung syntaktischer Inkorrektheit

In den erhobenen Daten zeigten sich mehrere signifikante Unterschiede zwischen der Verarbeitung von syntaktisch korrekten und syntaktisch fehlerhaften Sätzen. Diese Unterschiede wiesen einen zweigipfligen Verlauf mit einem frühen und einem späten Effekt auf. Der frühe Effekt war zwischen 130-210 ms an frontotemporalen und temporalen Sensoren in beiden Hemisphären mit einem Schwerpunkt in der linken Hemisphäre messbar. Der späte Effekt trat im Zeitbereich um 600 ms p. s. an Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre auf. Diese Ergebnisse sind gut mit den Daten aus früheren MEG-Studien vereinbar. So ähnelt der frühe Unterschied einem Effekt, der bereits von Knösche et al. (1999) und Friederici et al. (2000b) bei der Verarbeitung von Sätzen beschrieben wurde, die eine Phrasenstrukturverletzung enthielten. In beiden Studien war während der Verarbeitung syntaktisch fehlerhafter Sätze im Vergleich zu korrekten Sätzen eine höhere Amplitude der magnetischen Aktivität an temporalen und frontalen Sensoren im Zeitbereich zwischen 130-180 ms messbar. Die magnetischen Aktivitäten wurden in beiden Studien als neuromagnetisches Äquivalent der ELAN gewertet und mit einer frühen syntaktischen Verarbeitung in Verbindung gebracht. Ähnlich wie in den genannten Studien enthielten die inkorrekten Sätze auch in unserem Experiment eine Phrasenstrukturverletzung. Da zudem sowohl in der korrekten als auch der inkorrekten Bedingung das gleiche Zielwort gemessen wurde, kommen Unterschiede in der perzeptuellen, prälexikalischen oder semantischen Verarbeitung als Erklärung für die gemessenen Unterschiede nicht in Frage. Es spricht somit einiges dafür, dass der Effekt, der sich in unseren Daten zwischen 130-210 ms zeigte, ebenfalls mit einer frühen syntaktischen Verarbeitung in Verbindung steht<sup>22</sup>. Auch für die Interpretation des späten Effektes, der sich während der Verarbeitung der

---

<sup>22</sup> Es ist bekannt, dass Wörter, die innerhalb von Sätzen auftreten, auf andere Weise und mit einer anderen zeitlichen Dynamik verarbeitet werden als isoliert auftretende Wörter. Bei Wörtern, die in einem Satz stehen, kann daher eine syntaktische Analyse bereits im Zeitbereich um 200 ms p. s. stattfinden. Dagegen sind bei der Einzelwortverarbeitung in diesem Zeitbereich noch keine postlexikalischen Verarbeitungsschritte anzunehmen.

fehlerhaften Sätze um 600 ms p. s. an frontalen Sensoren der linken Hemisphäre zeigte, gibt es gute Hinweise in der Literatur. In unserem Experiment generierten die fehlerhaften Sätze im Gegensatz zu den korrekten Sätzen ab 450 ms eine langsame Positivierung, die für 300 ms anhielt. Eine solche Positivierung erfüllt die Kriterien einer P600, wie sie wiederholt in EEG-Studien während der Verarbeitung fehlerhafter Sätze beschrieben wurde (Neville et al. 1991; Osterhout und Holcomb 1992). Es existieren allerdings nur wenige MEG-Studien, in denen eine vergleichbare biomagnetische Aktivität beobachtet wurde. Eine dieser Studien stammt von Knösche et al. (1999). In dieser Studie wurde während der Verarbeitung von syntaktisch fehlerhaften Sätzen das Auftreten einer Positivierung beschrieben, die mit einer Latenz von 250 ms begann und bis ca. 600 ms p. s. anhielt. Sie wurde mit syntaktischen Reparaturprozessen in Verbindung gebracht. In Übereinstimmung mit dieser Studie und den vorliegenden EEG-Studien interpretieren wir daher den beobachteten Effekt bei 600 ms p. s. ebenfalls als Korrelat später syntaktischer Verarbeitungsprozesse<sup>23</sup>.

Neben den beschriebenen Unterschieden in der evozierten Aktivität zeigte sich in unseren Daten auch Unterschiede zwischen den syntaktisch korrekten und inkorrekten Sätzen in der induzierten magnetischen Aktivität. So wichen die von beiden Satztypen erzeugten Aktivitäten im Frequenzbereich um 2 Hz signifikant voneinander ab. Dieser Unterschied war über frontalen Arealen der linken Hemisphäre am deutlichsten ausgeprägt. Auch dieses Ergebnis ist gut mit Ergebnissen aus anderen MEG-Studien vereinbar. So beschrieben Friederici et al. (2000b), dass syntaktisch korrekte und inkorrekte Sätze im Frequenzbereich um 5 Hz abweichende Aktivitäten generieren. Dieser Effekt wurde von den Autoren ebenfalls mit der syntaktischen Verarbeitung in Verbindung gebracht.

---

<sup>23</sup> Die Tatsache, dass die Positivierung in der Studie von Knösche et al. (1999) bereits nach 250 ms, und nicht wie in unserem Fall nach 450 ms, begann, ist wahrscheinlich dadurch bedingt, dass in der Studie von Knösche auditiv und in der vorliegenden Studie visuell stimuliert wurde.

## 9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Stimulationsparadigma evaluiert, das es ermöglichen sollte, in nur einer Messsitzung möglichst viele umschriebene biomagnetische Antworten zu identifizieren, die verschiedene Stufen sprachlicher Verarbeitung abbilden. Dies wurde explorativ an einer Gruppe gesunder Probanden überprüft.

In den durchgeführten Experimenten gelang die Identifikation zahlreicher mit der Sprachverarbeitung assoziierter neuronaler Aktivitäten mit der Technik der Magnetoenzephalographie. Aus der Literatur zur Verarbeitung geschriebener Sprache ist bekannt, dass die prälexikalische Verarbeitung innerhalb der ersten 200 ms nach Stimuluspräsentation erfolgt. In unseren Daten bildete sich diese Verarbeitung in einer Komponente ab, die mit einer Latenz von 160 ms an Sensoren über temporookzipitalen Gebieten messbar war. Bei dieser Komponente handelt es sich vermutlich um eine M180 (s. Tarkiainen et al. 1999; Eulitz et al. 2000). In den erhobenen Daten war zudem eine Komponente nachweisbar, die wahrscheinlich Prozesse der lexikalischen Evaluation reflektiert, die sogenannte M350 (Pylkkänen et al. 2002; Pylkkänen and Marantz 2003). In Übereinstimmung mit der Literatur waren im Rahmen dieser Komponente Unterschiede zwischen der Verarbeitung von Wörtern und wortähnlichen Stimuli auf der einen Seite und der Verarbeitung von Symbolen auf der anderen Seite messbar. Des Weiteren zeigten sich in den Daten zwei Effekte, die 400 ms nach Stimuluspräsentation an frontalen und okzipitotemporalen Sensoren der linken Hemisphäre auftraten, und Unterschiede in der Verarbeitung von linguistischem und nicht-linguistischem Material abbildeten. Nach heutigem Forschungsstand haben sie ihre Grundlage wahrscheinlich in einem Zugriff auf die lexikalischen Repräsentationen während der Verarbeitung von bedeutungstragenden Stimuli im Gegensatz zu einem Fehlen solcher Repräsentationen bei den nicht-linguistischen Stimuli. Diese Interpretation wird durch die Tatsache gestützt, dass sich in den Daten ein weiterer Effekt bei 420 ms p. s. zeigte, der mit der semantischen Verarbeitung von Nomina assoziiert ist. Das Auftreten dieses Effektes impliziert, dass vorher

ein Zugriff auf den Lexikoneintrag stattgefunden haben muss, was gut mit der Annahme eines Zugriffs auf die lexikalischen Repräsentationen um 400 ms p. s. vereinbar ist. Im Gegensatz zu dem N400-ähnlichen Effekt, der sich bei der Kategorisierungsaufgabe der Nomina über temporalen Gebieten der linken Hemisphäre zeigte, traten die Effekte, die mit der semantischen Verarbeitung der Verben in Zusammenhang standen, vorwiegend an Sensoren über frontalen Gebieten der linken Hemisphäre auf. Diese topographische Differenzierung zwischen der Verarbeitung von Nomina und Verben stimmt gut mit den Ergebnissen aus zahlreichen Bildgebungsstudien überein (s. oben).

Neben der Verarbeitung von isolierten Wörtern wurde auch die Verarbeitung von Sätzen untersucht. Die syntaktisch fehlerhaften Sätze generierten in zwei Zeitbereichen eine von den korrekten Sätzen abweichende neuronale Aktivität. Ein früher Effekt war im Zeitbereich zwischen 130-210 ms an frontotemporalen Sensoren der linken Hemisphäre messbar und ein später Effekt bei 600 ms an frontalen Sensoren der linken Hemisphäre. Beide Effekte zeigten starke Gemeinsamkeiten zu den in der Literatur beschriebenen Komponenten ELAN und P600 und reflektieren somit wahrscheinlich frühe und späte syntaktische Verarbeitungsprozesse.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Experimente, dass sich das von uns konzipierte Paradigma gut dazu eignet, sprachassoziierte neuronale Aktivitäten mit dem MEG zu identifizieren. Einige der verwendeten Experimente waren für diesen Zweck besser geeignet als andere. Die besten Ergebnisse lieferten die Kategorisierungsaufgabe der Nomina, der Vergleich einer sprachlichen mit einer nichtsprachlichen Bedingung (hier genügen die Nomina und die Symbole) sowie das Experiment zur Satzverarbeitung. Mit diesen drei Aufgaben konnten eine M180, M350, N400m, ELAN und P600 identifiziert werden. Das vorgestellte Paradigma ist somit prinzipiell gut für einen Einsatz im Rahmen der funktionellen Neuronavigation zur Darstellung sprachassoziiert neuronaler Aktivitäten mit der Technik der Magnetoenzephalographie geeignet.

Neben diesem für die klinische Anwendung relevanten Aspekt, ließen sich

durch die Tatsache, dass in der vorliegenden Arbeit die verschiedenen sprachlichen Experimente bei denselben Probanden durchgeführt wurden, einzelne Aktivierungen direkt zueinander in Beziehung setzen und so der Zeitverlauf der sprachlichen Verarbeitung zusammenhängend darstellen. Da die meisten der bisher publizierten Studien zur Sprachverarbeitung nur auf einzelne Schritte der Verarbeitung fokussierten, eröffnen diese Ergebnisse neue Einblicke in den Sprachverarbeitungsprozess.

## 10 Kritik und Ausblick

Mit dem vorgestellten Stimulationsparadigma konnten die biomagnetischen Korrelate verschiedener sprachlicher Verarbeitungsschritte mit dem MEG identifiziert werden. Hierbei zeigten sich durch die strenge Kontrolle des Stimulusmaterials stabile Ergebnisse auf Ebene der Gruppendaten. Soll das vorgestellte Paradigma in Zukunft auch im Rahmen der funktionellen Neuronavigation eingesetzt werden, ist allerdings zu fordern, dass es ähnlich stabile Ergebnisse auch auf der Ebene der Einzelpersonen liefert. Die Anzahl der Stimuli, die in den einzelnen Bedingungen präsentiert wurden, war mit 32 relativ gering. Dies ist eine Folge des explorativen Charakters der Untersuchung, in der verschiedene Aufgaben erprobt wurden. Dies führte zu einem ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis auf der Ebene der einzelnen Versuchspersonen. Dennoch waren in einer ersten Inspektion der Daten die meisten der beschriebenen biomagnetischen Komponenten auch bei den Einzelpersonen vorhanden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das Paradigma nach einer Erhöhung der Stimulusanzahl pro Bedingung auch zuverlässige Ergebnisse auf individueller Ebene liefern wird. Eine solche Erhöhung der Stimulusanzahl ohne Verlängerung der Gesamtdauer der Messsituation kann durch zwei Maßnahmen erreicht werden. Zum Einen sollten ausschließlich die Experimente des Paradigmas verwendet werden, welche die besten Ergebnisse lieferten (s. oben). Zum Zweiten kann durch ein Herausnehmen der Wiederholungsdurchgänge zusätzlicher Raum für eine Erhöhung der Stimulusanzahl pro Bedingung geschaffen werden. Letzteres ist

sinnvoll, da sich bei der Auswertung der Daten zeigte, dass das Wiederholen der Stimuli trotz einer Erhöhung der Gesamttrialzahl pro Bedingung zu keiner Verbesserung der Ergebnisse führte. Dies legt auch die publizierte Literatur nahe. So konnten Belege dafür gefunden werden, dass das Wiederholen von Stimuli zu einem Rückgang der messbaren, elektrophysiologischen Aktivitäten führen kann (van Turenout et al. 2000; Sekiguchi et al. 2001). Unter Berücksichtigung der genannten Punkte kann das Paradigma so angepasst werden, dass die einzelnen Experimente eine größere Anzahl von Stimuli enthalten und trotzdem die Gesamtdauer der Messsitzung von ca. 1 ½ Stunden nicht überschritten wird. In Folgestudien wird zu untersuchen sein, ob sich mit dieser Anpassung die beschriebenen Komponenten der evozierten magnetischen Aktivität auch auf der Ebene der Einzelpersonen zuverlässig identifizieren lassen.

Ebenfalls Gegenstand folgender Studien wird die detaillierte topographische Zuordnung der gemessenen Aktivitäten zu kortikalen Strukturen sein. Aufgrund des inversen Problems (s. oben) können mit der Technik der Magnetoenzephalographie zum jetzigen Zeitpunkt komplexe kognitive Prozesse wie die Verarbeitung von Sprache nicht fehlerfrei lokalisiert werden. Es existieren allerdings bereits vielversprechende Ansätze, um die Lokalisationsleistung des MEG auch bei komplexen Quellekonfigurationen zu verbessern. Dies kann beispielsweise durch eine Kombination mit anderen Messverfahren wie der funktionellen Magnetresonanztomographie geschehen (Simos et al. 1999; Dale et al. 2000; Demonet and Thierry 2001; Fujimaki et al. 2002; Sato et al. 2004; Wheless et al. 2004; Im et al. 2005; s. Su and Yao 2005 für einen Überblick). Wenn es in Folgestudien gelingt, die in der vorliegenden Arbeit gemessenen sprachassoziierten neuronalen Antworten zuverlässig kortikalen Strukturen zuzuordnen, kann das vorgestellte Paradigma in Zukunft mit Gewinn in die klinische Praxis integriert werden.

## Literaturverzeichnis

- Abdullaev YG, Posner MI (1997) Time course of activating brain areas in generating verbal associations. *Psychol Sci* 8(1): 56-59
- Ahlfors SP, Simpson GV (2004) Geometrical interpretation of fMRI-guided MEG/EEG inverse estimates. *Neuroimage* 22: 323-332
- Amunts K, Schleicher A, Burgel U, Mohlberg H, Uylings HB, Zilles K (1999) Broca's region revisited: cytoarchitecture and intersubject variability. *J Comp Neurol* 412: 319-341
- Anderson JR (1983) *The architecture of cognition*. Harvard University Press, Cambridge, MA
- Armstrong E, Schleicher A, Omran H (1995) The ontogeny of human gyrification. *Cereb Cortex* 5: 56-63
- Auranen T, Nummenmaa A, Hamalainen MS, Jaaskelainen IP, Lampinen J, Vehtari A, Sams M (2005) Bayesian analysis of the neuromagnetic inverse problem with  $l(p)$ -norm priors. *Neuroimage* 26: 870-884
- Baillet S, Mosher JC, Leahy RM (2001) Electromagnetic brain mapping. *IEEE Signal Processing Magazine*, Nov:14-30
- Barrett SE, Rugg MD (1990) Event-related potentials and the semantic matching of pictures. *Brain Cogn* 14: 201-212
- Besson M, Faita F (1995) An event-related study of musical expectancy: Comparison of musicians and nonmusicians. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 21 (6): 1278-1296
- Billingsley-Marshall RL, Simos PG, Papanicolaou AC (2004) Reliability and validity of functional neuroimaging techniques for identifying language-critical areas in children and adults. *Dev Neuropsychol* 26: 541-563
- Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, Rao SM, Cox RW (1996) Function of the left planum temporale in auditory and linguistic processing. *Brain* 119 ( Pt 4): 1239-1247
- Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, Cox RW, Rao SM, Prieto T (1997) Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci* 17: 353-362
- Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, Bellgowan PS, Springer JA, Kaufman JN, Possing ET (2000) Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cereb Cortex* 10: 512-528
- Blank SC, Scott SK, Murphy K, Warburton E, Wise RJ (2002) Speech production: Wernicke, Broca and beyond. *Brain* 125: 1829-1838
- Bookheimer S (2002) Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annu Rev Neurosci* 25: 151-188

- Braitenberg V (1978) Cell assemblies in the cerebral cortex. In: R. Heim and G. Palm (Eds.), *Theoretical approaches to complex systems*. Springer Verlag, Berlin, 1978, pp. 171-188
- Braitenberg V, Schütz A (1991) *Anatomy of the cortex. Statistics and geometry*. Springer Verlag, Berlin
- Braitenberg V, Pulvermüller F. (1992) Entwurf einer neurologischen Theorie der Sprache. *Naturwissenschaften* 79: 103-117
- Broca P (1861) Remarque sur le siège de la faculté de langage articulé, suivie d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bull Soc Anat* 36: 330-357
- Brown C, Hagoort P (1999) On the electrophysiology of language comprehension: Implications for the human language system. In: Crocker, Pickering, Clifton (Eds.), *Architectures and Mechanisms for Language Processing*, Cambridge University Press, 1999, pp. 213-237
- Buckner RL, Raichle ME, Petersen SE (1995) Dissociation of human prefrontal cortical areas across different speech production tasks and gender groups. *J Neurophysiol* 74: 2163-2173
- Cabrera FD, Grave de Peralta Menendez R, Gonzales A (1995) Some limitations of spatio-temporal source models. *Brain Topogr* 7:233-243
- Caramazza, Hillis, Rapp, (1990) The multiple semantics hypothesis: multiple confusions? *Cog Neuropsychol* 7: 161-89
- Chao LL, Haxby JV, Martin A (1999) Attribute-based neural substrates in temporal cortex for perceiving and knowing about objects. *Nat Neurosci* 2: 913-919
- Cohen D, Cuffin BN, Yunokuchi K, Maniewski R, Purcell C, Cosgrove GR, Ives J, Kennedy JG, Schomer DL (1990) MEG versus EEG localization test using implanted sources in the human brain. *Ann Neurol* 28: 811-817
- Cohen D, Halgren E (2003) Magnetencephalography (neuromagnetism), In: Elsevier's *Encyclopedia of Neuroscience*, Adelman, Smith (Eds.), 3rd edition, Elsevier Science, B.V., 2003
- Connolly JF, Stewart SH, Phillips NA (1990) The effects of processing requirements on neurophysiological responses to spoken sentences. *Brain Lang* 39: 302-318
- Crinion JT, Lambon-Ralph MA, Warburton EA, Howard D, Wise RJ (2003) Temporal lobe regions engaged during normal speech comprehension. *Brain* 126: 1193-1201
- Dale AM, Liu AK, Fischl BR, Buckner RL, Belliveau JW, Lewine JD, Halgren E (2000) Dynamic statistical parametric mapping: combining fMRI and MEG for high-resolution imaging of cortical activity. *Neuron* 26: 55-67
- Dale AM, Halgren E (2001) Spatiotemporal mapping of brain activity by integration of multiple imaging modalities. *Curr Opin Neurobiol* 11: 202-208

- Damasio H, Grabowski TJ, Tranel D, Hichwa RD, Damasio AR (1996) A neural basis for lexical retrieval. *Nature* 380: 499-505
- Dapretto M, Bookheimer SY (1999) Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron* 24: 427-432
- Deacon TW (1992a) Cortical connections of the inferior arcuate sulcus cortex in the macaque brain. *Brain Res* 573: 8-26
- Deacon TW (1992b) Brain-Language evolution. In: Hawkins JA, Gell-Mann M (Eds.). *The evolution of human languages*. SFI Studies in the Sciences of Complexity. Vol. X. Addison-Wesley, 1992, pp. 49-83
- Dehaene S, Le Clec HG, Poline JB, Le Bihan D, Cohen L (2002) The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport* 13: 321-325
- Del Gratta C, Pizzella V, Tecchio F, Romani GL (2001), Magnetoencephalography - a noninvasive brain imaging method with 1ms time resolution. *Rep Prog Phys* 64: 1759-1814
- Dell GS (1990) Effects of frequency and vocabulary type on phonological speech errors. *Language and Cognitive Processes* 5: 313-349
- Demb JB, Desmond JE, Wagner AD, Vaidya CJ, Glover GH, Gabrieli JD (1995) Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: a functional MRI study of task difficulty and process specificity. *J Neurosci* 15: 5870-5878
- Demonet JF, Chollet F, Ramsay S, Cardebat D, Nespoulous JL, Wise R, Rascol A, Frackowiak R (1992) The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain* 115 ( Pt 6): 1753-1768
- Demonet JF, Price C, Wise R, Frackowiak RS (1994) A PET study of cognitive strategies in normal subjects during language tasks. Influence of phonetic ambiguity and sequence processing on phoneme monitoring. *Brain* 117(Pt 4): 671-682
- Demonet JF, Fiez JA, Paulesu E, Petersen SE, Zatorre RJ (1996) PET Studies of Phonological Processing: A Critical Reply to Poeppel. *Brain Lang* 55: 352-379
- Demonet JF, Thierry G (2001) Language and brain: what is up? What is coming up? *J Clin Exp Neuropsychol* 23: 49-73
- Demonet JF, Thierry G, Cardebat D (2005) Renewal of the neurophysiology of language: functional neuroimaging. *Physiol Rev* 85: 49-95
- Dhond RP, Marinkovic K, Dale AM, Witzel T, Halgren E (2003) Spatiotemporal maps of past-tense verb inflection. *Neuroimage* 19: 91-100
- Duffau H, Capelle L, Sichez J, Faillot T, Abdennour L, Law Koune JD, Dadoun S, Bitar A, Arthuis F, Van Effenterre R, Fohanno D (1999) Intra-operative direct electrical stimulations of the central nervous system: the Salpetriere experience with 60 patients. *Acta Neurochir (Wien)* 141: 1157-1167

- Duffner F, Freudenstein D, Schiffbauer H, Preissl H, Siekmann R, Birbaumer N, Grote EH (2003) Combining MEG and MRI with neuronavigation for treatment of an epileptiform spike focus in the precentral region: a technical case report. *Surg Neurol* 59: 40-45; discussion 45-46
- Duus P (1995) Neuropsychologisch-topische Diagnostik. 6. überarbeitete Auflage. Thieme Verlag, Stuttgart
- Embick D, Hackl M, Schaeffer J, Kelepir M, Marantz A (2001) A magnetoencephalographic component whose latency reflects lexical frequency. *Brain Res Cogn Brain Res* 10: 345-348
- Engel U, Schumacher H (1978) Kleines Valenzlexikon deutscher Verben. Gunter Narr Verlag, Tübingen
- Eulitz C, Elbert T, Bartenstein P, Weiller C, Müller SP, Pantev C (1994) Comparison of magnetic and metabolic brain activity during a verb generation task. *Neuroreport* 6: 97-100
- Eulitz C, Maess B, Pantev C, Friederici AD, Feige B, Elbert T (1996) Oscillatory neuromagnetic activity induced by language and non-language stimuli. *Brain Res Cogn Brain Res* 4: 121-132
- Eulitz C, Eulitz H, Maess B, Cohen R, Pantev C, Elbert T (2000) Magnetic brain activity evoked and induced by visually presented words and nonverbal stimuli. *Psychophysiology* 37: 447-455
- Fiebach CJ, Schlesewsky M, Friederici AD (2001) Syntactic working memory and the establishment of filler-gap dependencies: insights from ERPs and fMRI. *J Psycholinguist Res* 30: 321-338
- Fiebach CJ, Friederici AD, Müller K, von Cramon DY (2002) fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *J Cogn Neurosci* 14: 11-23
- Fiebach CJ, Friederici AD, Müller K, von Cramon DY, Hernandez AE (2003) Distinct brain representations for early and late learned words. *Neuroimage* 19: 1627-1637
- Fiez JA, Raichle ME, Balota DA, Tallal P, Petersen SE (1996) PET activation of posterior temporal regions during auditory word presentation and verb generation. *Cereb Cortex* 6: 1-10
- Fiez JA, Balota DA, Raichle ME, Petersen SE (1999) Effects of lexicality, frequency, and spelling-to-sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron* 24: 205-218
- Flanagan JL (1965) Speech analysis. Synthesis and perception. Berlin
- Freudenstein D, Duffner F, Preißl H (2000) Magnetenzephalographie in der Neurochirurgie. Ein Routineprotokoll zur präoperativen Planung und intraoperativen Navigation. *Klinische Neuroradiologie* 10: 76-84
- Friederici AD (1995) The time course of syntactic activation during language processing: a model based on neuropsychological and neurophysiological data. *Brain Lang* 50: 259-281

- Friederici AD, Hahne A, Mecklinger A (1996) Temporal structure of syntactic parsing: early and late event-related brain potential effects. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 22: 1219-1248
- Friederici AD, Meyer M, von Cramon DY (2000a) Auditory language comprehension: an event-related fMRI study on the processing of syntactic and lexical information. *Brain Lang* 74: 289-300
- Friederici AD, Wang Y, Herrmann CS, Maess B, Oertel U (2000b) Localization of early syntactic processes in frontal and temporal cortical areas: a magnetoencephalographic study. *Hum Brain Mapp* 11: 1-11
- Friederici AD (2002) Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cogn Sci* 6: 78-84
- Friederici AD, Kotz SA (2003a) The brain basis of syntactic processes: functional imaging and lesion studies. *Neuroimage* 20 Suppl 1: S8-17
- Friederici AD, Ruschemeyer SA, Hahne A, Fiebach CJ (2003b) The role of left inferior frontal and superior temporal cortex in sentence comprehension: localizing syntactic and semantic processes. *Cereb Cortex* 13: 170-177
- Frisch S, Schlesewsky M, Saddy D, Alpermann A (2002) The P600 as an indicator of syntactic ambiguity. *Cognition* 85: B83-92
- Frith CD, Friston KJ, Liddle PF, Frackowiak RS (1991) A PET study of word finding. *Neuropsychologia* 29: 1137-1148
- Fujimaki N, Hayakawa T, Nielsen M, Knosche TR, Miyauchi S (2002) An fMRI-constrained MEG source analysis with procedures for dividing and grouping activation. *Neuroimage* 17: 324-343
- Gabrieli JD, Poldrack RA, Desmond JE (1998) The role of left prefrontal cortex in language and memory. *Proc Natl Acad Sci U S A* 95: 906-913
- Gallen CC, Bucholz R, Sobel DF (1994) Intracranial neurosurgery guided by functional imaging. *Surg Neurol* 42: 523-530
- Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G (1996) Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 119 ( Pt 2): 593-609
- Ganslandt O, Fahlbusch R, Nimsky C, Kober H, Moller M, Steinmeier R, Romstock J, Vieth J (1999) Functional neuronavigation with magnetoencephalography: outcome in 50 patients with lesions around the motor cortex. *J Neurosurg* 91: 73-79
- Ganslandt O, Buchfelder M, Hastreiter P, Grummich P, Fahlbusch R, Nimsky C (2004) Magnetic source imaging supports clinical decision making in glioma patients. *Clin Neurol Neurosurg* 107: 20-26
- Garnsey SM, Tanenhaus MK, Chapman RM (1989) Evoked potentials and the study of sentence comprehension. *J Psycholinguist Res* 18: 51-60
- Gharib S, Sutherling WW, Nakasato N, Barth DS, Baumgartner C, Alexopoulos N, Taylor S, Rogers RL (1995) MEG and ECoG localization accuracy test. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 94: 109-114

- Grosjean F (1980) Spoken word recognition processes and the gating paradigm. *Percept Psychophys* 28: 267-283
- Gruber O, von Cramon DY (2001) Domain-specific distribution of working memory processes along human prefrontal and parietal cortices: a functional magnetic resonance imaging study. *Neurosci Lett* 297: 29-32
- Gruber O, von Cramon DY (2003) The functional neuroanatomy of human working memory revisited. Evidence from 3-T fMRI studies using classical domain-specific interference tasks. *Neuroimage* 19: 797-809
- Haglund MM, Berger MS, Shamseldin M, Lettich E, Ojemann GA (1994) Cortical localization of temporal lobe language sites in patients with gliomas. *Neurosurgery* 34: 567-576; discussion 576
- Hagoort P, Brown C, Groothusen J (1993) The syntactic positive shift (SPS) as an ERP measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processes* 8: 439-483
- Hagoort P, Indefrey P, Brown C, Herzog H, Steinmetz H, Seitz RJ (1999) The neural circuitry involved in the reading of German words and pseudowords: A PET study. *J Cogn Neurosci* 11: 383-398
- Hagoort P (2003) How the brain solves the binding problem for language: a neurocomputational model of syntactic processing. *Neuroimage* 20 Suppl 1: S18-29
- Hahne A, Friederici AD (1999) Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis. Early automatic and late controlled processes. *J Cogn Neurosci* 11: 194-205
- Halgren E, Dhond RP, Christensen N, Van Petten C, Marinkovic K, Lewine JD, Dale AM (2002) N400-like magnetoencephalography responses modulated by semantic context, word frequency, and lexical class in sentences. *Neuroimage* 17: 1101-1116
- Hämäläinen M, Hari R, Ilmoniemi J (1993) Magnetoencephalography. Theory, instrumentation and applications to the noninvasive study of human brain function. *Rev Mod Phys* 65: 413-497
- Härle M, Dobe C, Cohen R, Rockstroh B (2002) Brain activity during syntactic and semantic processing - a magnetoencephalographic study. *Brain Topogr* 15: 3-11
- Hauk O (2004) Keep it simple: a case for using classical minimum norm estimation in the analysis of EEG and MEG data. *Neuroimage* 21: 1612-1621
- Hebb DO (1949) *The organization of behavior. A neuropsychological theory.* Jon Wiley, New York
- Helbig G, Schenkel W (1983) *Wörterbuch zur Valenz und Distribution deutscher Verben.* Max Niemeyer Verlag, Tübingen

- Helenius P, Salmelin R, Service E, Connolly JF (1998) Distinct time courses of word and context comprehension in the left temporal cortex. *Brain* 121 (Pt 6): 1133-1142
- Herholz K, Reulen HJ, von Stockhausen HM, Thiel A, Ilmberger J, Kessler J, Eisner W, Yousry TA, Heiss WD (1997) Preoperative activation and intraoperative stimulation of language-related areas in patients with glioma. *Neurosurgery* 41: 1253-1260; discussion 1260-1252
- Hillebrand A, Barnes GR (2002) A quantitative assessment of the sensitivity of whole-head MEG to activity in the adult human cortex. *Neuroimage* 16: 638-650
- Hinojosa JA, Martin-Loeches M, Rubia FJ (2001) Event-related potentials and semantics: an overview and an integrative proposal. *Brain Lang* 78: 128-139
- Holcomb PJ (1988) Automatic and attentional processing: an event-related brain potential analysis of semantic priming. *Brain Lang* 35: 66-85
- Hörmann H (1977) *Psychologie der Sprache*, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin
- Hounsfield GN (1973) Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. *Br J Radiol* 46: 1016-1022
- Howard D, Patterson K, Wise R, Brown WD, Friston K, Weiller C, Frackowiak R (1992) The cortical localization of the lexicons. Positron emission tomography evidence. *Brain* 115 ( Pt 6): 1769-1782
- Howes DH (1954) On the interpretation of word frequency as a variable affecting speed of recognition. *J Exp Psychol* 48: 106-112
- Im CH, Jung HK, Fujimaki N (2005) fMRI-constrained MEG source imaging and consideration of fMRI invisible sources. *Hum Brain Mapp* 26: 110-118
- Indefrey P (2001a) A meta-analysis of PET and fMRI experiments on syntactic parsing. *Neuroimage* 13(6): 545
- Indefrey P, Hagoort P, Herzog H, Seitz RJ, Brown CM (2001b) Syntactic processing in left prefrontal cortex is independent of lexical meaning. *Neuroimage* 14: 546-555
- Indefrey P (2003) *Hirnaktivierung bei syntaktischer Sprachverarbeitung: eine Metaanalyse*, personal communication
- Inoue T, Shimizu H, Nakasato N, Kumabe T, Yoshimoto T (1999) Accuracy and limitation of functional magnetic resonance imaging for identification of the central sulcus: comparison with magnetoencephalography in patients with brain tumors. *Neuroimage* 10: 738-748
- James KH, James TW, Jobard G, Wong AC, Gauthier I (2005) Letter processing in the visual system: different activation patterns for single letters and strings. *Cogn Affect Behav Neurosci* 5: 452-466
- Jenkins JJ, Russel WA (1952) Associative clustering during recall. *J Abnorm Soc Psychol* 47: 818-821

- Jessen F, Erb M, Klose U, Lotze M, Grodd W, Heun R (1999) Activation of human language processing brain regions after the presentation of random letter strings demonstrated with event-related functional magnetic resonance imaging. *Neurosci Lett* 270: 13-16
- Jonides J, Smith EE, Koeppe RA, Awh E, Minoshima S, Mintun MA (1993) Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature* 363: 623-625
- Jüptner M, Weiller C (1995) Review: does measurement of regional cerebral blood flow reflect synaptic activity? Implications for PET and fMRI. *Neuroimage* 2: 148-156
- Just MA, Carpenter PA (1980) A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychol Rev* 87: 329-354
- Just MA, Carpenter PA, Keller TA, Eddy WF, Thulborn KR (1996) Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science* 274: 114-116
- Kaan E, Harris A, Gibson E, Holcomb P. (2000), The P600 as an index of syntactic integration difficulty. *Language and Cognitive Processes* 15: 159-201
- Kapur S, Rose R, Liddle PF, Zipursky RB, Brown GM, Stuss D, Houle S, Tulving E (1994) The role of the left prefrontal cortex in verbal processing: semantic processing or willed action? *Neuroreport* 5: 2193-2196
- Katzir T, Misra M, Poldrack RA (2005) Imaging phonology without print: assessing the neural correlates of phonemic awareness using fMRI. *Neuroimage* 27: 106-115
- Kelly PJ (1986) Computer-assisted stereotaxis: new approaches for the management of intracranial intra-axial tumors. *Neurology* 36: 535-541
- Kempen G, Huijbers P (1983) The lexicalization process in sentence production and naming: Indirect election of words. *Cognition* 14: 185-209
- King JW, Kutas M, A brain potential whose latency indexes the length and frequency of words, *Center for Research in Language, CRL Newsletter*, Article 10-2, Quelle: <http://crl.ucsd.edu/newsletter/10-2/Article.html>, Stand: 06.06.2002
- Knösche TR (1997) Solutions of the neuromagnetic inverse problem: an evaluation study. PhD thesis, University of Twente, The Netherlands
- Knösche TR, Maess B, Friederici AD (1999) Processing of syntactic information monitored by brain surface current density mapping based on MEG. *Brain Topogr* 12: 75-87
- Kober H, Moller M, Nimsky C, Vieth J, Fahlbusch R, Ganslandt O (2001) New approach to localize speech relevant brain areas and hemispheric dominance using spatially filtered magnetoencephalography. *Hum Brain Mapp* 14: 236-250

- Kochendörfer G (1997) *Neuronale Modelle des Sprachverstehens*. Freiburg i. Breisgau. Hochschul Verlag
- Kohonen T (1989) *Self organization and associative memory*, 3rd edition, Springer Verlag, Berlin
- Kotz SA, O'Rourke TB, Holcomb P (1993) Event-related potentials and the time course of spoken word recognition. *Soc Neurosci Bst* 19: 1807-18
- Koul RK, Lloyd LL (1998) Comparison of graphic symbol learning in individuals with aphasia and right hemisphere brain damage. *Brain Lang* 62(3): 398-421
- Kuperberg GR, McGuire PK, Bullmore ET, Brammer MJ, Rabe-Hesketh S, Wright IC, Lythgoe DJ, Williams SC, David AS (2000) Common and distinct neural substrates for pragmatic, semantic, and syntactic processing of spoken sentences: an fMRI study. *J Cogn Neurosci* 12: 321-341
- Kutas M, Hillyard SA (1980) Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207: 203-205
- Kutas M, Hillyard SA (1983) Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Mem Cognit* 11: 539-550
- Kutas M, Hillyard SA (1984a) Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature* 307: 161-163
- Kutas M, Lindamood T, Hillyard SA (1984b) In: S. Kornblum, J. Requin (Eds.), *Preparatory states and processes*, Erlbaum, Hillsdale, NJ, pp. 217-238
- Kutas M, Van Petten C, Besson M (1988) Event-related potential asymmetries during the reading of sentences. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 69: 218-233
- Kutas M, Van Petten C (1990) Electrophysiological perspectives on comprehending written language. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl* 41: 155-167
- Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, Goldberg IE, Weisskoff RM, Poncelet BP, Kennedy DN, Hoppel BE, Cohen MS, Turner R (1992) Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 89: 5675-5679
- Lange JJ, Wijers AA, Mulder LJ, Mulder G (1998) Color selection and location selection in ERPs: differences, similarities and 'neural specificity'. *Biol Psychol* 48: 153-182
- Lauterbur P (1973) Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature* 242: 190-191
- Lauterbur PC (1989) Image formation by induced local interactions. Examples employing nuclear magnetic resonance. 1973. *Clin Orthop Relat Res*: 3-6

- Leahy RM, Mosher JC, Spencer ME, Huang MX, Lewine JD (1998) A study of dipole localization accuracy for MEG and EEG using a human skull phantom. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 107: 159-173
- Levelt WJ (1983) Monitoring and self-repair in speech. *Cognition* 14: 41-104
- Levelt WJ (1989) *Speaking: From Intention to Articulation*, MIT Press, Cambridge, MA
- Levelt WJ, Wheeldon L (1994) Do speakers have access to a mental syllabary? *Cognition* 50: 239-269
- Levelt WJ, Roelofs A, Meyer AS (1999) A theory of lexical access in speech production. *Behav Brain Sci* 22: 1-38
- Liberman AM (1957) Some results of research on speech perception. *Journal of the Acoustical Society of America* 29: 117-123
- Liberman AM, Mattingly IG (1985) The motor theory of speech perception revised. *Cognition* 21: 1-36
- Lichtheim L (1885) On aphasia. *Brain* 7: 433-484
- Liu AK, Belliveau JW, Dale AM (1998) Spatiotemporal imaging of human brain activity using functional MRI constrained magnetoencephalography data: Monte Carlo simulations. *Proc Natl Acad Sci U S A* 95: 8945-8950
- Logothetis NK, Pauls J, Augath M, Trinath T, Oeltermann A (2001) Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature* 412: 150-157
- Lounasmaa OV, Hamalainen M, Hari R, Salmelin R (1996) Information processing in the human brain: magnetoencephalographic approach. *Proc Natl Acad Sci U S A* 93: 8809-8815
- MackKay D (1987) *The organization of perception and action: a theory of language and other cognitive skills*. Springer, New York
- Maclay H, Osgood CE (1959) Hesitation phenomena in spontaneous English speech, *Word* 15: 19-44
- Marslen-Wilson WD, Welsh A (1978) Processing interactions and lexical access during word recognition in continuous speech. *Cog Psychol* 10: 29-63
- Marslen-Wilson WD (1987) Functional parallelism in spoken word-recognition. *Cognition* 25: 71-102
- Marslen-Wilson WD (1995), Activation, Competition and Frequency in Lexical Access, In: Altmann TM (Ed.) *Cognitive models of speech processing: Psycholinguistic and computational perspectives*. A Bradford Book, MIT Press, Cambridge, MA, 1995
- Martin A, Haxby JV, Lalonde FM, Wiggs CL, Ungerleider LG (1995) Discrete cortical regions associated with knowledge of color and knowledge of action. *Science* 270: 102-105

- Martin A, Chao LL (2001) Semantic memory and the brain: structure and processes. *Curr Opin Neurobiol* 11: 194-201
- Martin JG, Strange W (1968) The perception of hesitation in spontaneous speech. *Perception and Psychophysics* 3: 427-432
- Martin NA, Beatty J, Johnson RA, Collaer ML, Vinuela F, Becker DP, Nuwer MR (1993) Magnetoencephalographic localization of a language processing cortical area adjacent to a cerebral arteriovenous malformation. Case report. *J Neurosurg* 79: 584-588
- McClelland JL, Rumelhart DE (1981) An interactive activation model of context effects in letter perception: Part I. An account of basic findings. *Psychol Rev* 88: 375-407
- McClelland JL, Rumelhart DE (1986) The Appeal of parallel distributed processing. In: Rumelhart DE, McClelland JL (Eds.) *Parallel distributed processing. Explorations in the microstructure of cognition. Vol. 2: Psychological and biological models.* MIT Press, Cambridge, MA, 1986
- McKinnon R, Osterhout L (1996) Constraints on movement phenomena in sentence processing: Evidence from event-related brain potentials, *Language and Cognitive Processes* 11(5): 495-523
- Mesulam MM (1990) Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Ann Neurol* 28: 597-613
- Milham MP, Banich MT, Webb A, Barad V, Cohen NJ, Wszalek T, Kramer AF (2001) The relative involvement of anterior cingulate and prefrontal cortex in attentional control depends on nature of conflict. *Brain Res Cogn Brain Res* 12(3): 467-73
- Moore CJ, Price CJ (1999) A functional neuroimaging study of the variables that generate category-specific object processing differences. *Brain* 122 (Pt 5): 943-962
- Morton J (1964) A Preliminary function model for language behaviour. In: Oldfield RC, Marshall JC (Eds.) *Penguin modern psychology Readings, Language,* Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middlesex, England, 1971, pp. 147-158
- Morton J (1969) Interaction of information in word recognition. *Psychol Rev* 76: 165-178
- Morton J (1970) Word recognition. In: Morton J, Marshall JD (Eds.) *Psycholinguistics 2: Structure and Processes.* MIT Press, Cambridge, MA, 1970
- Näätänen R, Gaillard AWK (1983) The orienting reflex and the N2 deflection of the event-related potential (ERP). In: Gaillard & Ritter (Eds.) *Tutorials in event-related potentials research: Endogenous components,* Amsterdam, North-Holland, pp. 119-141

- Näätänen R, Lehtokoski A, Lennes M, Cheour M, Huotilainen M, Iivonen A, Vainio M, Alku P, Ilmoniemi RJ, Luuk A, Allik J, Sinkkonen J, Alho K (1997) Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature* 385: 432-434
- Neville HJ, Nicol JL, Barss A (1991) Syntactically based sentence processing classes: evidence from event-related brain potentials. *J Cog Neurosci* 3: 151-165
- Neville HJ, Mills DL, Lawson DS (1992) Fractionating language: different neural subsystems with different sensitive periods. *Cereb Cortex* 2: 244-258
- Neville HJ, Coffey SA, Holcomb PJ, Tallal P (1993) The neurobiology of sensory and language processing in language-impaired children. *J. Cog Neurosci* 5: 235-253
- Neville HJ, Coffey SA, Lawson DS, Fischer A, Emmorey K, Bellugi U (1997) Neural systems mediating American sign language: effects of sensory experience and age of acquisition. *Brain Lang* 57: 285-308
- Nobre AC, Allison T, McCarthy G (1994) Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature* 372: 260-263
- Nobre AC, McCarthy G (1995) Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: II. Effects of word type and semantic priming. *J Neurosci* 15: 1090-1098
- Norris D (1986) Word recognition: context effects without priming. *Cognition* 22: 93-136
- Ogawa S, Lee TM, Kay AR, Tank DW (1990) Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 87: 9868-9872
- Ojemann G, Ojemann J, Lettich E, Berger M (1989) Cortical language localization in left, dominant hemisphere. An electrical stimulation mapping investigation in 117 patients.
- Osterhout L, Holcomb PJ (1992) Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language* 31: 785-806
- Osterhout L, Mobley LA (1995) Event-related brain potentials elicited by failure to agree. *Journal of Memory and Language* 34: 739-773
- Osterhout L, McLaughlin J, Bersick M (1997) Event-related brain potentials and human language. *Trends Cog Sci* 1: 203-209
- Palva S, Palva JM, Shtyrov Y, Kujala T, Ilmoniemi RJ, Kaila K, Näätänen R (2002) Distinct gamma-band evoked responses to speech and non-speech sounds in humans. *J Neurosci* 22: RC211
- Papanicolaou AC, Simos PG, Breier JI, Zouridakis G, Willmore LJ, Wheless JW, Constantinou JE, Maggio WW, Gormley WB (1999) Magnetoencephalographic mapping of the language-specific cortex. *J Neurosurg* 90: 85-93

- Paulesu E, Frith CD, Frackowiak RS (1993) The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature* 362: 342-345
- Penfield W, Boldrey E (1937) Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain* 60: 381-443
- Penney TB, Maess B, Busch N, Derrfuss J, Mecklinger A (2003) Cortical activity reduction with stimulus repetition: a whole-head MEG analysis. *Brain Res Cogn Brain Res* 16: 226-231
- Perani D, Schnur T, Tettamanti M, Gorno-Tempini M, Cappa SF, Fazio F (1999) Word and picture matching: a PET study of semantic category effects. *Neuropsychologia* 37: 293-306
- Petersen SE, Fox PT, Posner MI, Mintun M, Raichle ME (1988) Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature* 331: 585-589
- Petersen SE, Fox PT, Snyder AZ, Raichle ME (1990) Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science* 249: 1041-1044
- Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH (1999) Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clin Neurophysiol* 110: 1842-1857
- Poldrack RA, Wagner AD, Prull MW, Desmond JE, Glover GH, Gabrieli JD (1999) Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *Neuroimage* 10: 15-35
- Polich J (1985) N400 from sentences, semantic categories, numbers and letter strings? *Bulletin of the Psychonomic society* 23(4): 361-364
- Posner MI, Petersen SE, Fox PT, Raichle ME (1988) Localization of cognitive operations in the human brain. *Science* 240: 1627-1631
- Pregel D, Rickheit G (1987) *Der Wortschatz im Grundschulalter. Häufigkeitwörterbuch zum verbalen, substantivischen und adjektivischen Wortgebrauch.* Georg Olms Verlag, Hildesheim, Zürich, New York
- Preissl H, Pulvermüller F, Lutzenberger W, Birbaumer N (1995) Evoked potentials distinguish between nouns and verbs. *Neurosci Lett* 197: 81-83
- Price CJ, Wise RJ, Frackowiak RS (1996) Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cereb Cortex* 6: 62-70
- Price CJ, McCrory E, Noppeney U, Mechelli A, Moore CJ, Biggio N, Devlin JT (2006) How reading differs from object naming at the neuronal level. *Neuroimage* 29: 643-648
- Pulvermüller F, Lutzenberger W, Birbaumer N (1995) Electrocortical distinction of vocabulary types. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 94: 357-370

- Pulvermüller F, Eulitz C, Pantev C, Mohr B, Feige B, Lutzenberger W, Elbert T, Birbaumer N (1996) High-frequency cortical responses reflect lexical processing: an MEG study. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 98: 76-85
- Pulvermüller F (1999) Words in the brain's language. *Behav Brain Sci* 22: 253-279; discussion 280-336
- Pulvermüller F, Assadollahi R, Elbert T (2001) Neuromagnetic evidence for early semantic access in word recognition. *Eur J Neurosci* 13: 201-205
- Pylkkänen L, Stringfellow A, Marantz A (2002) Neuromagnetic evidence for the timing of lexical activation: an MEG component sensitive to phonotactic probability but not to neighborhood density. *Brain Lang* 81: 666-678
- Pylkkänen L, Marantz A (2003) Tracking the time course of word recognition with MEG. *Trends Cogn Sci* 7: 187-189
- Raichle ME (1994) Images of the mind: studies with modern imaging techniques. *Annu Rev Psychol* 45: 333-356
- Rezai AR, Hund M, Kronberg E, Zonenshayn M, Cappell J, Ribary U, Kall B, Llinas R, Kelly PJ (1996) The interactive use of magnetoencephalography in stereotactic image-guided neurosurgery. *Neurosurgery* 39: 92-102
- Roberts TP, Ferrari P, Perry D, Rowley HA, Berger MS (2000) Presurgical mapping with magnetic source imaging: comparisons with intraoperative findings. *Brain Tumor Pathol* 17: 57-64
- Roelofs A (1992) A spreading-activation theory of lemma retrieval in speaking. *Cognition* 42: 107-142
- Roelofs A (1997) The WEAVER model of word-form encoding in speech production. *Cognition* 64: 249-284
- Rösler F, Pechmann T, Steb J (1998) Parsing of sentences in a language with varying word order: word-by-word variations of processing demands are revealed by event-related potentials. *Journal of Memory and Language* 38: 150-176
- Rumelhart DE, McClelland JL (1982) An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 2. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychol Rev* 89: 60-94
- Ruoff A (1981) Häufigkeitwörterbuch gesprochener Sprache, *Idiomata*, Band 8, Max Niemeyer Verlag, Tübingen
- Russel WA, Meseck OR (1959) Der Einfluss der Assoziation auf das Erinnern von Wörtern in der deutschen, französischen und englischen Sprache. *Z Exp Psychol* 6: 191-211
- Saarinen J, Vanni S., Hari R (1998) Human cortical-evoked fields during detection, localisation, and identification of 'pop-out' targets. *Perception* 27 (2): 215-24

- Salmelin R, Hari R, Lounasmaa OV, Sams M (1994) Dynamics of brain activation during picture naming. *Nature* 368: 463-465
- Sato MA, Yoshioka T, Kajihara S, Toyama K, Goda N, Doya K, Kawato M (2004) Hierarchical Bayesian estimation for MEG inverse problem. *Neuroimage* 23: 806-826
- Schäffler L, Luders HO, Dinner DS, Lesser RP, Chelune GJ (1993) Comprehension deficits elicited by electrical stimulation of Broca's area. *Brain* 116 ( Pt 3): 695-715
- Schendan HE, Ganis G, Kutas M (1998) Neurophysiological evidence for visual perceptual categorization of words and faces within 150 ms. *Psychophysiology* 35: 240-251
- Scherg M, Von Cramon D (1985) Two bilateral sources of the late AEP as identified by a spatio-temporal dipole model. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 62: 32-44
- Scherg M, Berg P (1991) Use of prior knowledge in brain electromagnetic source analysis. *Brain Topogr* 4: 143-150
- Schiffbauer H, Berger MS, Ferrari P, Freudenstein D, Rowley HA, Roberts TP (2003) Preoperative magnetic source imaging for brain tumor surgery: a quantitative comparison with intraoperative sensory and motor mapping. *Neurosurg Focus* 15: E7
- Seidenberg MS, McClelland JL (1989) A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev* 96: 523-568
- Sekiguchi T, Koyama S, Kakigi R (2001) The effect of stimulus repetition on cortical magnetic responses evoked by words and nonwords. *Neuroimage* 14: 118-128
- Sergent J, Zuck E, Levesque M, MacDonald B (1992) Positron emission tomography study of letter and object processing: empirical findings and methodological considerations. *Cereb Cortex* 2: 68-80
- Shaywitz BA, Shaywitz SE, Pugh KR, Constable RT, Skudlarski P, Fulbright RK, Bronen RA, Fletcher JM, Shankweiler DP, Katz L (1995) Sex differences in the functional organization of the brain for language. *Nature* 373: 607-609
- Shtyrov Y, Pulvermüller F, Näätänen R, Ilmoniemi RJ (2003) Grammar processing outside the focus of attention: an MEG study. *J Cogn Neurosci* 15: 1195-1206
- Simos PG, Basile LF, Papanicolaou AC (1997) Source localization of the N400 response in a sentence-reading paradigm using evoked magnetic fields and magnetic resonance imaging. *Brain Res* 762: 29-39
- Simos PG, Breier JI, Zouridakis G, Papanicolaou AC (1998) Identification of language-specific brain activity using magnetoencephalography. *J Clin Exp Neuropsychol* 20: 706-722

- Simos PG, Papanicolaou AC, Breier JI, Wheless JW, Constantinou JE, Gormley WB, Maggio WW (1999) Localization of language-specific cortex by using magnetic source imaging and electrical stimulation mapping. *J Neurosurg* 91: 787-796
- Simos PG, Breier JI, Fletcher JM, Foorman BR, Castillo EM, Papanicolaou AC (2002) Brain mechanisms for reading words and pseudowords: an integrated approach. *Cereb Cortex* 12: 297-305
- Singh KD, Barnes GR, Hillebrand A, Forde EM, Williams AL (2002) Task-related changes in cortical synchronization are spatially coincident with the hemodynamic response. *Neuroimage* 16: 103-114
- Slobin DI (1985) *The crosslinguistic study of language acquisition, Volume 2, theoretical issues*, Hillsdale, New Jersey
- Smith ME, Halgren E (1987) Event-related potentials during lexical decision: effects of repetition, word frequency, pronounceability, and concreteness. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl* 40: 417-421
- Snyder AZ, Abdullaev YG, Posner MI, Raichle ME (1995) Scalp electrical potentials reflect regional cerebral blood flow responses during processing of written words. *Proc Natl Acad Sci U S A* 92: 1689-1693
- Steinmeier R, Sobottka SB, Reiss G, Bredow J, Gerber J, Schackert G (2002) Surgery of low-grade gliomas near speech-eloquent regions: brainmapping versus preoperative functional imaging. *Onkologie* 25: 552-557
- Stemberger JP (1984) structural errors in normal and agrammatical speech. *Cog Neuropsychol* 1: 281-313
- Stemberger JP, MacWhinney B (1986) Frequency and the lexical storage of regularly inflected forms. *Mem Cognit* 14: 17-26
- Stippich C, Freitag P, Kassubek J, Soros P, Kamada K, Kober H, Scheffler K, Hopfengartner R, Bilecen D, Radu EW, Vieth JB (1998) Motor, somatosensory and auditory cortex localization by fMRI and MEG. *Neuroreport* 9: 1953-1957
- Stockall L, Stringfellow A, Marantz A (2004) The precise time course of lexical activation: MEG measurements of the effects of frequency, probability, and density in lexical decision. *Brain Lang* 90: 88-94
- Stromswold K, Caplan D, Alpert N, Rauch S (1996) Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain Lang* 52: 452-473
- Su M, Yao D (2005) [Research progress in the technique of integrating multiple imaging modalities in the functional brain imaging]. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi* 22: 385-388
- Suzuki K, Okuda J, Otsuka Y, Sugawara A, Hatanaka K, Nakasato N, Kanno A, Yoshimoto T, Fujii T, Yamadori A (2001) Judging semantic and episodic incongruity: a magnetoencephalographic study. *Neuroreport* 12: 195-199

- Tarkiainen A, Helenius P, Hansen PC, Cornelissen PL, Salmelin R (1999) Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain* 122 ( Pt 11): 2119-2132
- Ter-Pogossian MM, Phelps ME, Hoffman EJ, Mullani NA (1975) A positron-emission transaxial tomograph for nuclear imaging (PETT). *Radiology* 114: 89-98
- Thomas E, Van Hulle MM, Vogels R (2001) Encoding of categories by noncategory-specific neurons in the inferior temporal cortex. *J Cogn Neurosci* 13: 190-200
- Tyler LK (1984) The structure of the initial cohort: evidence from gating. *Percept Psychophys* 36: 417-427
- Uusitalo MA, Ilmoniemi RJ (1997) Signal-space projection method for separating MEG or EEG into components. *Med Biol Eng Comput* 35: 135-140
- Van Petten C, Kutas M (1990) Interactions between sentence context and word frequency in event-related brain potentials. *Mem Cognit* 18: 380-393
- Van Petten C, Kutas M (1991) Influences of semantic and syntactic context on open- and closed-class words. *Mem Cognit* 19: 95-112
- Van Petten C, Rheinfelder H (1995) Conceptual relationships between spoken words and environmental sounds: event-related brain potential measures. *Neuropsychologia* 33: 485-508
- Van Petten C, Senkfor AJ (1996) Memory for words and novel visual patterns: repetition, recognition, and encoding effects in the event-related brain potential. *Psychophysiology* 33: 491-506
- Van Turennout M, Ellmore T, Martin A (2000) Long-lasting cortical plasticity in the object naming system. *Nat Neurosci* 3: 1329-1334
- Wagner AD, Koutstaal W, Maril A, Schacter DL, Buckner RL (2000) Task-specific repetition priming in left inferior prefrontal cortex. *Cereb Cortex* 10: 1176-1184
- Wagner AD, Pare-Blagoev EJ, Clark J, Poldrack RA (2001) Recovering meaning: left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval. *Neuron* 31: 329-338
- Walla P, Hufnagl B, Lindinger G, Imhof H, Deecke L, Lang W (2001) Left temporal and temporoparietal brain activity depends on depth of word encoding: a magnetoencephalographic study in healthy young subjects. *Neuroimage* 13: 402-409
- Warburton E, Wise RJ, Price CJ, Weiller C, Hadar U, Ramsay S, Frackowiak RS (1996) Noun and verb retrieval by normal subjects. *Studies with PET. Brain* 119 ( Pt 1): 159-179
- Wernicke C (1874) *Der aphasische Symptomkomplex*. Breslau

- Wheless JW, Castillo E, Maggio V, Kim HL, Breier JI, Simos PG, Papanicolaou AC (2004) Magnetoencephalography (MEG) and magnetic source imaging (MSI). *Neurologist* 10: 138-153
- Wickens JR, Arbutnott GW (1993) The corticostriatal system on computer simulation: an intermediate mechanism for sequencing of actions. *Prog Brain Res* 99: 325-339
- Wikswa JP (1989) Biomagnetic sources and their models. In: Williamson SJ (Ed.) *Advances in Biomagnetism*, Plenum, New York, NY, pp. 1-18
- Wildgruber D, Kischka U, Ackermann H, Klose U, Grodd W (1999) Dynamic pattern of brain activation during sequencing of word strings evaluated by fMRI. *Brain Res Cogn Brain Res* 7: 285-294
- Wise R, Chollet F, Hadar U, Friston K, Hoffner E, Frackowiak R (1991a) Distribution of cortical neural networks involved in word comprehension and word retrieval. *Brain* 114 ( Pt 4): 1803-1817
- Wise R, Hadar U, Howard D, Patterson K (1991b) Language activation studies with positron emission tomography. *Ciba Found Symp* 163: 218-228; discussion 228-234
- Xiang J, Wilson D, Otsubo H, Ishii R, Chuang S (2001) Neuromagnetic spectral distribution of implicit processing of words. *Neuroreport* 12: 3923-3927
- Yamamoto T, Williamson SJ, Kaufman L, Nicholson C, Llinas R (1988) Magnetic localization of neuronal activity in the human brain. *Proc Natl Acad Sci U S A* 85: 8732-8736
- Zatorre RJ, Evans AC, Meyer E, Gjedde A (1992) Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science* 256: 846-849
- Zatorre RJ, Meyer E, Gjedde A, Evans AC (1996) PET studies of phonetic processing of speech: review, replication, and reanalysis. *Cereb Cortex* 6: 21-30
- Zilles K (1990) Cortex. In: Paxinos G (Ed.) *The human nervous system*. San Diego, Academic Press, 1990, pp. 757-802

## **Danksagung**

Zuerst möchte ich Prof. Nils Birbaumer danken, der mir die Durchführung der Arbeit am MEG-Zentrum des Instituts für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie in Tübingen ermöglichte und Herrn Prof. Tatagiba, der auf der klinischen Seite Anregungen für die Arbeit gab.

Ganz besonders möchte ich außerdem Dr. Hubert Preissl danken, der mir die notwendigen Kenntnisse zur Durchführung der Experimente und zur Auswertung der Daten vermittelt hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Ich danke zudem dem gesamten Team des MEG-Zentrums.

Des Weiteren danke ich Dr. Dirk Freudenstein, der mein Ansprechpartner in der Neurochirurgischen Klinik war und mich theoretisch und praktisch mit der funktionelle Neuronavigation vertraut gemacht hat.

Ebenso möchte ich Berthold Reuter danken, der mir in linguistischen Fragen ein geschätzter Diskussionspartner war und mir immer wieder neue Denkanstöße und Anregungen gab.

Zuletzt danke ich meiner Familie, die mich immer wieder, auch in schwierigen Phasen, motiviert und unterstützt hat.

## Curriculum Vitae

18.12.1977	geboren in Hilden
1984 – 1988	Grundschule in Homburg/Saar
1988 – 1997	Gymnasium Johanneum in Homburg/Saar
06/1997	Abitur
10/1997 – 11/2004	Studium der Humanmedizin an der Universität des Saarlandes und der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
11/2000 – 11/2001	Wissenschaftliche Hilfskraft in der Klinik für Neurochirurgie der Universität Tübingen
10/2002 – 11/2002	Praktikum am F.C. Donders Centre for Cognitive Neuroimaging, University of Nijmegen, Niederlande
03/2003 – 05/2003	Studentische Hilfskraft am MEG-Zentrum Tübingen
04.11.2004	3. Staatsexamen
03/2004 – 01/2005	Praktikum in der Arbeitseinheit „Experimentelle Neuropsychologie“, Universität des Saarlandes, Saarbrücken
01/2005	Approbation als Ärztin
03/2005 – 10/2006	Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe „Kognitive Neurowissenschaften in der Psychiatrie“, Klinik für Psychiatrie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg
seit 11/2006	Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe „Systemische Neurowissenschaften“, Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Georg-August-Universität Göttingen