

Magneto- und elektroenzephalographische Korrelate der Verarbeitung von visuellen verbalen und nicht-verbalen Reizen

Magneto- and Electroencephalographic Correlates of the Processing of Visual Verbal, and Non-Verbal Information: A reliable method for the clinically useful assessment of brain structures involved in language processing would be highly desirable. Ideally, the outcome of the diagnostic procedure would show negligible dependence on the current cognitive state of a patient. To approach this goal, we studied brain activational patterns during language processing on a rather basic level, i.e. we examined secondary processing of lexical information when words were visually presented to the subject. This condition was compared to three other experimental conditions requiring the secondary processing of non-lexical and non-verbal information in visual stimuli. The primary task for subjects was target detection. Electric and magnetic brain activity differentiated the experimental conditions starting at about 150 ms after stimulus onset. Amplitudes of components of event-related potentials and fields, as well as the similarity of magnetic field distributions between experimental conditions (as evaluated by cross-correlation) differed significantly between mainly verbal and the non-verbal conditions. This reflects presumably that secondary processing of verbal and non-verbal information in visual stimuli involves different neuroanatomical structures. Attempts to reinforce this result with source analysis techniques failed to reveal systematic effects. Possible reasons might be the inadequacy of the applied distributed source analysis model as well as interindividual variability of neuroanatomical structures involved in the processing of information.

Key words: Magnetoencephalography – MEG – Visual evoked magnetic fields – Electroencephalography – EEG – Visual evoked potentials – Language processing

Zusammenfassung: Die Darstellung von Hirnstrukturen, die in Sprachverarbeitung involviert sind, würde, insbesondere für klinische Bedürfnisse, von einer Meßmethode profitieren, die es erlaubt Sprachverarbeitung relativ unabhängig vom kognitiven Status der Patienten zu bewerten. Zu diesem Zweck wurden Hirnaktivierungsmuster während elementarer sprachverarbeitender Prozesse untersucht, und zwar während der sekundären Verarbeitung von lexikalischen Informationen bei visueller Darstellung von Wörtern. Diese Versuchsbedingung wurde mit drei anderen Bedingungen verglichen, in denen die sekundäre Verarbeitung nichtlexikalischer und nichtverbaler Informationen in visuellen Reizen gefordert war. Die Primäraufgabe für die Ver-

C. Eulitz¹, H. Eulitz², T. Elbert¹

¹ Fachgruppe Psychologie, Universität Konstanz

² Zentrum für Psychiatrie, Reichenau

suchspersonen war eine Zielreizdetektion. Die gemessenen elektrischen und magnetischen Hirnantworten differenzierten die untersuchten Bedingungen ab etwa 150 ms nach Reizbeginn. Die Amplituden von Komponenten der ereigniskorrelierten Potentiale (EKP) und Magnetfelder (EKF), als auch die Ähnlichkeiten von Magnetfeldverteilungen zwischen Versuchsbedingungen (mittels Kreuzkorrelationen bewertet) unterschieden sich signifikant zwischen den eher verbalen und den nicht-verbalen Bedingungen. Diese Ergebnisse legten nahe, daß an der sekundären Verarbeitung verbaler und nichtverbaler Informationen in visuellen Reizen neuroanatomisch unterschiedliche Hirnstrukturen beteiligt sind. Es wurde versucht dieses Ergebnis durch Quellenanalysen weiter zu untermauern und zu verfeinern, es konnten allerdings keine systematischen Lokalisationsunterschiede beobachtet werden. Neben der Möglichkeit, daß das verwendete „Verteilte Quelle-Modell“ der Komplexität der gemessenen Daten nicht gerecht wurde, ist eine zu starke interindividuelle neuroanatomische Variabilität der Hirnstrukturen zu diskutieren, welche an den untersuchten Informationsverarbeitungsprozessen beteiligt waren.

Einleitung

Es besteht ein klinischer Bedarf, z.B. vor verschiedensten neurochirurgischen Eingriffen, Lage und Ausdehnung sprachverarbeitender Hirnstrukturen möglichst genau zu ermitteln. Bisher werden für diese Zwecke invasive Verfahren wie der Wada-Test [10] oder intraoperatives Monitoring [15] angewendet. Die Suche nach alternativen diagnostischen Möglichkeiten wird in verschiedenen Disziplinen, wie der funktionellen Bildgebung mittels Positronen-Emissionstomographie [4], funktioneller Kernspintomographie [1], der transkraniellen Magnetstimulation [8], oder auch der Elektroenzephalographie (EEG) und Magnetoenzephalographie (MEG) betrieben. Eine Substitution der erstgenannten invasiven Verfahren wird angestrebt, bedarf aber noch weiterer Forschungen.

Die vorliegende Arbeit ist eine EEG- und MEG-Studie, die Sprachspezifität definierter Änderungen in evozierten Hirnantworten untersucht. Die zu entwickelnde Diagnostik sollte auch unter klinischen Bedingungen, weitgehend unabhängig vom kognitiven Zustand der Patienten, realisierbar sein. Deshalb wurden die hier untersuchten gesunden Versuchspersonen (Vpn) mit einer Primäraufgabe, hier eine visuelle Suchaufgabe, beschäftigt, während die Reizinhalt, u.a. Worte, lediglich sekundär verarbeitet wurden. Wie Studien zum Wort Superioritäts-Effekt [18,22] vermuten lassen, werden

lexikalische Informationen hochgradig automatisiert verarbeitet und Vpn können sich ihrer Verarbeitung „nicht entziehen“. Es wurde vermutet, daß sich in der Bedingung mit der sekundären Verarbeitung von Worten grundsätzlich andere Hirnaktivierungsmuster finden lassen als bei der Verarbeitung nichtverbaler Informationen. Diese Unterschiede sollen durch topographische Vergleiche, Kreuzkorrelationsanalysen bzw. Quellenlokalisationsverfahren bewertet werden.

EEG und MEG besitzen einige Vorteile im Vergleich zu anderen, auf dem Gebiet der Sprachforschung eingesetzten bildgebenden Verfahren wie PET oder fMRT. Neben der garantierten Nichtinvasivität ist es vor allem die hohe zeitliche Auflösung, die EEG und MEG für die Untersuchung schnell ablaufender kognitiver Prozesse wie z.B. Sprachperzeption interessant macht. Die kombinierte Erhebung und Auswertung von EEG und MEG ermöglicht weiterhin die partielle Kompensation der Unsicherheiten in der räumlichen Darstellung der neuronalen Aktivität (vgl. auch [3]), so daß bei einer weiteren Verfeinerung der bisher verwendeten Quellenlokalisationsverfahren (zu möglichen Wegen siehe [12]) EEG und MEG auch im Punkt der räumlichen Auflösung von kognitiven Hirnleistungen (in höheren Verarbeitungsstufen als der primär und sekundär sensorischen) ähnlich gut wie die o.g. bildgebenden Verfahren werden können. Für die Darstellung und Bewertung von Aktivierungsprozessen in primär und sekundär sensorischen Hirnarealen haben sich EEG und MEG bereits vielfach als aussagekräftige Meßverfahren bewährt (zur Übersicht siehe [2,7,20]).

In der vorliegenden Studie wurde die sekundäre Verarbeitung visuell dargebotener sprachlicher und nichtsprachlicher Informationen im menschlichen Kortex verglichen. Die sprachliche Information wurde in Form isolierter Inhaltswörter präsentiert, die nichtsprachliche Information in Form von Pseudoschriftart („False Font“-Reize; 4 buchstabenähnliche Symbole), Formmustern („Shapes“-Reize; nichtbenennbare komplexe Muster) und Punktmuster („Dots“-Reize; zufällig gestreute Pixel). Prinzipiell lassen sich vier verschiedene Hypothesen formulieren, wie sich die Verarbeitung dieser Reizklassen unterscheiden könnte.

Eine naheliegende Annahme wäre, daß sich die Aktivierungsmuster bei der sekundären Wortverarbeitung deutlich von denen bei den anderen drei Reizklassen unterscheiden (*Lexikalitäts-Hypothese*). Geht man davon aus, daß eine erhöhte und topographisch spezifische Signalleistung in evozierten Hirnantworten als ein Korrelat erhöhter kognitiver Verarbeitungsleistungen des Gehirns interpretiert werden kann, so sollte ein sprachspezifischer EEG- oder MEG-Parameter die „Wort“-Bedingung deutlich von anderen Bedingungen unterscheiden, während er in der „False Font“- , „Shapes“- und „Dots“-Bedingung in etwa gleichartig ausgeprägt sein sollte.

Andererseits kann man sich auch vorstellen, daß die Verarbeitungsleistung des Gehirns sowohl mit lexikalischen als auch sublexikalischen Suchprozessen korreliert. Da die „False Font“-Stimuli noch hinreichend viele Reizmerkmale haben, die es ermöglichen nach mentaler Rotation Buchstaben zu erkennen, kann man annehmen, daß die Darbietung dieser Reizklasse sublexikalische Suchprozesse auslöst. In diesem Fall sollte die Verarbeitung verbaler Informationen („Wort“- und „False Font“-Bedingung) ähnliche Veränderungen in der

Hirnaktivität auslösen, die sich von denen in der „Shapes“- und „Dots“-Bedingung unterscheiden (*Verbalitäts-Hypothese*).

Alternativ dazu kann man annehmen, daß die zu erbringende Verarbeitungsleistung des Gehirns von viel allgemeineren Dingen abhängt, wie z.B. dem Informationsverarbeitungsaufwand des Gehirns für die Mustererkennung. Je überlernter das Muster ist desto geringer wird der Informationsverarbeitungsaufwand sein, da überlernte Muster (wie z.B. Worte) optimierte Verarbeitungsstrukturen haben sollten (vgl. auch [21]). Der Informationsverarbeitungsaufwand sollte ebenfalls gering sein, wenn offenbar keine relevanten Informationen extrahierbar sind („Shapes“- und „Dots“-Bedingung). Dagegen sollte in der „False Font“-Bedingung der Informationsverarbeitungsaufwand wesentlich höher sein, da hier nach mentaler Rotation relevante Informationen rekonstruierbar sind (*Informationsverarbeitungsaufwand-Hypothese*).

Als vierte Alternativannahme ist denkbar, daß die zu erbringende Verarbeitungsleistung des Gehirns davon abhängt, wie konkret die zu verarbeitenden Muster und Formen sind. Je interpretierbarer die Objektmerkmale sind, d.h. je definierter die Gestalten und je größer ihre assoziative Nähe zu bekannten Gestalten, desto größer wird der Informationsverarbeitungsaufwand sein, da die Verarbeitung interpretierbarer Objektmerkmale vermutlich erfolgreiche Zugriffe auf Gedächtnisstrukturen auslöst. In anderen Worten: Je verknüpfter einzelne Bildpunkte zu Formen und Figuren sind und je mehr diese Formen einen Bezug zu bekannten Konzepten oder Gestalten haben, desto größer ist die Änderung eines Parameters der diese Integrationsprozesse reflektiert (*Konkrettheit der Gestalt-Hypothese*).

Methodik

Versuchspersonen

Präsentiert werden die Daten von 13 gesunden, erwachsenen, rechtshändigen Versuchspersonen (Vpn) im Alter zwischen 20 und 32 Jahren. Die Händigkeit wurde mit dem Edinburgh-Händigkeitstest [16] bestimmt. Bei einer Vpn löste sich während der Messung die EEG-Referenzelektrode, wodurch deren EEG-Daten nicht mehr auswertbar waren. Infolgedessen basieren die MEG-Ergebnisse auf den Daten von 13 und die EEG-Ergebnisse auf den Daten von 12 Vpn.

Versuchsablauf

Im Experiment gab es insgesamt 4 Reizklassen: „Wort“- , „False Font“-Reize und nicht benennbare „Shapes“- und „Dots“-Muster. Jede der 4 Reizklassen wurde in 42 verschiedenen Reizvarianten erzeugt und dargeboten. Die in den Reizen verwendete Anzahl an schwarzen und weißen Pixeln war im Mittel in allen Reizklassen gleich. Wie auch anhand von Beispielen in Abb. 1 dargestellt, waren die „Wort“-Reize zweisilbige, 4-buchstabige Inhaltswörter. Die „False Font“-Stimuli bestanden aus 4 rotierten, gespiegelten und verzerrten Buchstaben, wobei die Kombination der ursprünglichen Buchstaben in der Regel keine sinnvollen Wörter ergab. Die „Shapes“-Stimuli waren 4–5 längliche Punktcluster, bei deren Auswahl darauf geachtet wurde, daß die einzelnen Punktcluster nach Möglichkeit keine benennbaren Symbole (Piktogramme, Buchstaben, Zahlen, verschiedene Gegenstände) dar-

stellen. Die „Dots“-Stimuli stellten zufällig gestreute Pixel dar, die im Durchschnitt auf der gleichen Fläche des Bildschirms wie die vorigen Stimulusklassen angeordnet waren. Es wurde darauf geachtet, daß die Pixel möglichst gleichmäßig über die zulässige Fläche verteilt waren, so daß eine gute Diskriminierbarkeit von den „Shapes“-Stimuli gegeben war. Ferner wurde beachtet, daß vereinzelt auftretende Pixelcluster keine benennbaren Symbole darstellten. In der unteren Reihe von Abb. 1 sind die ebenfalls dargebotenen Zielreize dargestellt. Die Zielreize wurden aus den kompletten Varianten der 4 Reizklassen durch Herausschneiden eines gut erkennbaren Teils des Stimulus hergestellt. Sie wurden mit einer Auftretswahrscheinlichkeit von 15% dargeboten, wobei jede der 4 Reizklassen gleichhäufig vorkam. Aufgabe der Vpn war es die Zielreize zu detektieren und eine Taste zu drücken, wenn ein Zielreiz auftrat. Diese Aufgabe sollte so korrekt wie möglich ausgeführt werden.

	Wort	False Font	Shapes	Dots
Reize	Base			
	Demo			
	Gala			
Zielreize	Base			

Abb. 1 In den vier Spalten sind Beispiele der verwendeten visuellen Stimuli aller vier Reizklassen gezeigt. Insgesamt gab es 42 verschiedene Reize in jeder Reizklasse. In der unteren Zeile sind Beispiele von Zielreizen jeder Reizklasse dargestellt.

Alle Reize wurden zentriert in einem schwarzen Rahmen (visuelle Winkel 3,1° vertikal; 6,8° horizontal) präsentiert, der kontinuierlich auf dem Bildschirm zu sehen war und dessen Mitte während des Versuches zu fixieren war, um Augenbewegungen weitgehend einzuschränken. Die Stimuli wurden innerhalb des Rahmens zentriert dargeboten (visuelle Winkel 1,4° vertikal; 4,1° horizontal). Die Farbe der Stimuli war ebenfalls schwarz, der Bildhintergrund hellgrau. Die Reizdarbietungszeit betrug 400 ms, das Interstimulusintervall variierte zufällig zwischen 2000 und 2400 ms. Die Datenerhebung erfolgte blockweise, wobei innerhalb eines Versuchsblocks nur 2 Reizklassen dargeboten wurden, um Effekte durch höhere Kategorisierungen auf die gemessenen Hirnantworten zu vermeiden. Jede Reizklasse wurde mit jeder kombiniert, so daß sich insgesamt 6 Versuchsblöcke ergaben. Im Gesamtversuch wurden die Reize wiederholt dargeboten, pro Reizklasse ergaben sich 252 Einzelstimuli. Vor Beginn der Messungen konnten sich die Vpn mit allen Reizen und der kompletten Wortliste vertraut machen, um Priming und Wortwiederholungseffekte [11] zu vermeiden.

Die Sensoren des 37kanaligen MEG-Gerätes (Magnes, BTi) wurden 1,5 cm über der Elektrodenposition T3 zentriert. Die Kopfform der Vpn und seine räumliche Relation zu den Meßsensoren wurde mit einem Positionsmeßsystem (Polhe-

mus) gemessen. EEG-Daten (SynAmps, Neuroscan) wurden mittels Ag/AgCl-Elektroden von den Positionen F3, F4, C3, C4, T3, T4, P3, P4, M2 und M1 gegen Cz als Referenz gemessen (Impedanz < 5 kOhm). Als Elektrolyt diente die Grass-Paste EC2. Weiterhin wurden das vertikale und horizontale Elektrookulogramm (EOG) sowie der Tastendruck registriert.

Die Datenaufzeichnung erfolgte mit einer Bandbreite von 0,03 bis 100 Hz. Die Digitalisierung der Analogdaten wurde mit einer Abtastrate von 297,6 Hz durchgeführt. Artefaktfreie, 1500 ms lange Epochen wurden selektiv für die „Wort“, „False Font“, „Shapes“ und „Dots“-Bedingung gemittelt. Die Grundlinie der Epochen betrug 300 ms. In die Mittelung gingen nur Einzelepochen ein, die keine Signalabweichung von mehr als 2,5 pT im MEG, 100 µV im EEG und 120 µV im EOG aufwiesen. Weiterhin wurde sichergestellt, daß in die Mittelungen keine Epochen mit Tastendruck eingingen. Die gemittelten Wellenformen wurden digital 20 Hz tiefpass gefiltert (12 dB/oct).

Folgende Komponenten der evozierten Hirnantworten wurden in den gemittelten Wellenformen für jede Versuchsbedingung, als maximale Signalauslenkung in folgenden Zeitintervallen definiert: die M100/P100 im Latenzbereich von 90 bis 135 ms; die M180/N180 zwischen 160 und 220 ms; die M300/P300 zwischen 280 und 400 ms; die M400/N400 zwischen 380 und 500 ms und die M500/N500 zwischen 500 und 600 ms. Die M300, M400 und der M500 wurden zusammenfassend auch als mittlere Amplitude im Latenzbereich zwischen 350 und 550 ms parametrisiert und im folgenden als P300/N400-Komplex bzw. M300/M400-Komplex bezeichnet. Eine ausführliche Betrachtung zur Rolle dieser Komponenten bei kognitiven Prozessen unter besonderer Berücksichtigung von Sprachverarbeitung findet man bei Kutas u. Van Petten [11].

Mittels eines „Verteilte Quelle“-Modells [6] wurde versucht, Quellen der evozierten Hirnaktivität zu beschreiben. Dabei wurden mit den gemittelten MEG-Daten folgende Analysen durchgeführt:

- Im ersten Schritt berechnet das Modell eine Minimum-Norm-Anpassung einer endlichen Menge von Dipolen an eine Magnetfeldverteilung. Die Dipole sind auf einer Kugel fixiert und gitterförmig angeordnet. Der Abstand der Dipole beträgt 2 mm und die Kugel ist 2 cm unter der Schädeloberfläche der Vpn positioniert. Die Dipolmomente und die Orientierungen der Dipole sind variabel. Nach der Minimum-Norm-Schätzung werden für jeden Zeitpunkt in der Menge der Dipole lokale Maxima des Dipolmoments detektiert und dort gelegene Dipole als Startwerte für ein Mehrquellenmodell benutzt.
- Im zweiten Schritt wird nach Quellenlokalisationen mittels eines Mehrquellenmodells gesucht. Alle als Startwerte ausgewählten Dipole dürfen sich in Stärke und Tiefe (Radius) ändern. Die Raumwinkel des Dipolortes und die Dipolorientierungen sind fixiert. Während dieses Dipolfits liefern „artifizielle“ Quellen (oder Scheinlösungen; „ghost sources“) unplausible Lösungen, so daß mittels diverser Selektionskriterien (siehe [6]) die Quellenlösung von „artifiziellen“ Quellen bereinigt werden kann. Solange „artifizielle“ Quellen detektiert werden, werden sie verworfen und die Mehrquellenlösung mit der reduzierten Anzahl an Startwerten erneut berechnet. Diese Prozedur wird wiederholt, bis eine Lösung mit ausschließlich „nicht-artifiziellen“

Quellen gefunden wurde. Diese Quellenlösung wird für jeden Meßzeitpunkt berechnet.

In einem dritten Schritt wird dann nach akzeptablen und zeitlich stabilen Aktivierungsmustern gesucht. Hierfür wird über die Zeit nach kontinuierlich aktivierten Quellen gesucht. Die Kriterien dafür sind folgende:

1. Die Dipole müssen in aufeinanderfolgenden Zeitpunkten relativ ortsstabil bleiben, d.h. der euklidische Abstand soll unter 8 mm sein.
2. Der ortsstabile Dipol soll mindestens 20 ms lang aktiviert sein.
3. Er soll ein Dipolmoment von mindestens 5 nAm aufweisen.
4. Er soll zu einer Quellenlösung für einen Zeitpunkt gehören, zu dem die Signalleistung (RMS „root mean square“; mittlere quadratische Abweichung über 37 Kanäle) größer als 30 fT war.
5. Er soll zu einer Quellenlösung gehören, die für einen Zeitpunkt berechnet wurde, zu dem die Anpassungsgüte (goodness of fit) besser als 0,98 war.

Die so extrahierten Quellenlösungen wurden dann für weiterführende deskriptive und statistische Analysen verwendet. Parameter sind in diesen Fällen Anzahl, Ort, Orientierung und Dipolmoment der äquivalenten Stromdipole.

Eine mögliche Alternative zu Analysen und Vergleichen im Quellenraum, die allerdings räumlich wesentlich unschärfere Lösungen liefert, besteht in der Analyse der Ähnlichkeit der gemessenen Magnetfeldverteilungen zwischen den Versuchsbedingungen. Zu diesem Zweck wurden die Kreuzkorrelationskoeffizienten für jede mögliche Paarung der Versuchsbedingungen separat berechnet.

Die statistische Testung der verschiedenen Parameter erfolgte mittels univariater Varianzanalysen (ANOVA) für Meßwiederholungsdesigns. Waren die Meßwiederholungsfaktoren mehr als 2fach gestuft, so wurden die Freiheitsgrade Greenhouse-Geisser korrigiert. Die Meßwiederholungsfaktoren waren für EEG- und MEG-Parameter die Stimulusklasse („Wort“, „False Font“, „Shapes“, „Dots“) und für EEG-Parameter außerdem die Ableitorte (frontal, temporal, mastoidal, parietal) sowie die Hemisphäre (rechte vs. linke). Mittels Kontrastanalysen wurden außerdem post-hoc verschiedene Hypothesen getestet:

- a. *Lexikalitäts-Hypothese*: Die Hirnaktivierung in der „Wort“-Bedingung unterscheidet sich von der in allen anderen Versuchsbedingungen. [Kontraste: „Wort“ (3), „False Font“ (-1), „Shapes“ (-1), „Dots“ (-1)]
- b. *Verbalitäts-Hypothese*: Die Hirnaktivierung bei der Verarbeitung verbaler Elemente („Wort“- und „False Font“-Bedingung) unterscheidet sich von der bei Verarbeitung nichtverbaler Elemente („Dots“ und „Shapes“-Bedingung). [Kontraste: „Wort“ (1), „False Font“ (1), „Shapes“ (-1), „Dots“ (-1)]
- c. *Informationsverarbeitungsaufwand-Hypothese*: Der geistige Aufwand bei der Verarbeitung der „False Font“-Reize ist durch mentale Rotation und andere Prozesse größer als der für die Verarbeitung von überlernten Mustern wie Worten oder von sinnlosen Mustern wie „Shapes“ und „Dots“. [Kontraste: „Wort“ (-1), „False Font“ (3), „Shapes“ (-1), „Dots“ (-1)]
- d. *Konkretheit der Gestalt-Hypothese*: Je mehr einzelne Bildpunkte zu Formen und Figuren verknüpft sind und je mehr diese Formen einen Bezug zu bekannten Konzepten oder Gestalten haben, desto größer ist die Änderung eines Parameters der diese Integrationsprozesse reflektiert. [Kontraste: „Wort“ (3), „False Font“ (1), „Shapes“ (-1), „Dots“ (-3)]

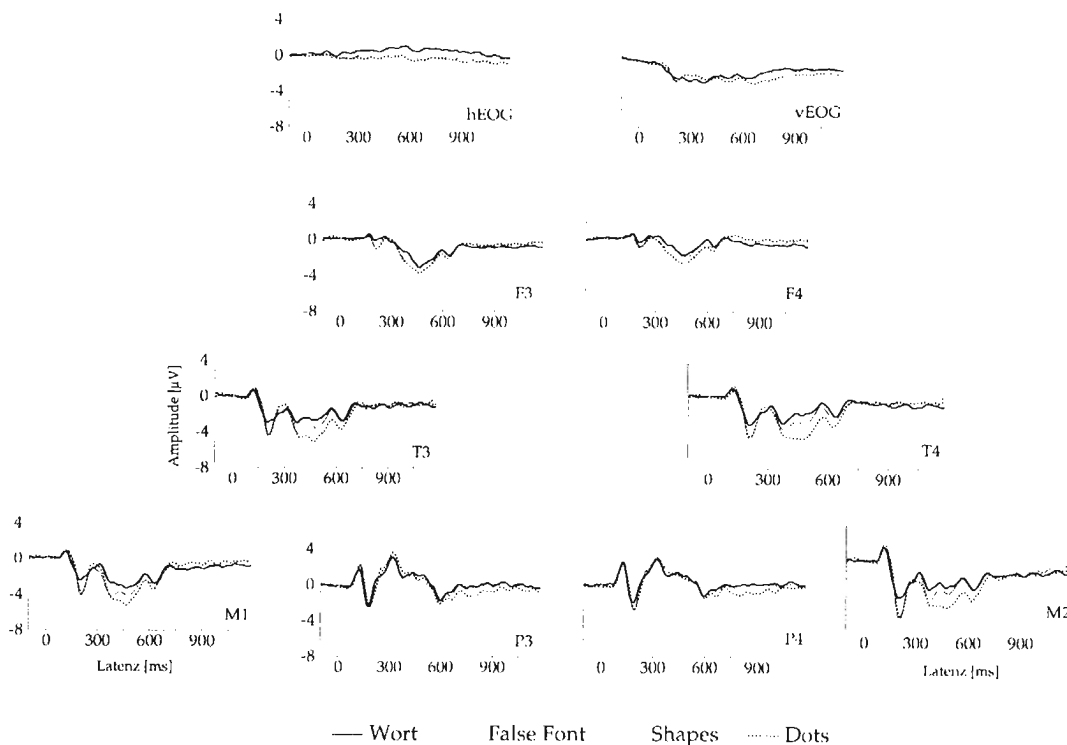


Abb. 2 Die Abbildung zeigt das Gruppenmittel der EKP-Wellenformen (gegen Cz als Referenz) über 12 Vpn in allen gemessenen Elektrodenpositionen sowie das horizontale und vertikale EOG (in der oberen Zeile). Die Elektrodenposition ist in der rechten unteren Ecke jeder Teilabbildung angezeigt. Die vier Versuchsbedingungen liegen in jeder Teilabbildung übereinander. Die durchgezogene dicke Linie kodiert die „Wort“-Bedingung, die durchgezogene dünne Linie die „False Font“-Bedingung, die unterbrochene dünne Linie die „Shapes“- und die dicke Punktlinie die „Dots“-Bedingung.

Tab.1 Übersicht zu den Ergebnissen der Kontrastanalysen für die untersuchten abhängigen Variablen.

Parameter	M180 RMS Amplitude der EKF	mittlere RMS Amplitude von 350–550 ms der EKF	mittlere Amplitude von 350–550 ms der EKF
Freiheitsgrade	1/12	1/12	1/11
Ränge der Mittelwerte	F ≈ W » D ≈ S	F » W > S > D	W « F < S < D
Lexikalitäts-Hypothese	5,17 0,05	n.s.	35,45 0,001
Verbalitäts-Hypothese	14,23 0,003	n.s.	16,03 0,003
Informationsverarbeitungs-aufwand-Hypothese	14,22 0,003	8,35 0,02	n.s.
Konkretheit der Gestalt-Hypothese	7,66 0,02	n.s.	36,38 0,001

Ergebnisse

Die Komponenten der evozierten Hirnantworten zeigten keine systematischen und statistisch signifikanten Latenzunterschiede zwischen den Versuchsbedingungen. Überzufällige Unterschiede in der Ausprägung der Amplituden konnten beobachtet werden.

Ereigniskorrelierte Potentiale

Ein Vergleich der Komponentenausprägung über die Versuchsbedingungen in Abb. 2 zeigt identische Amplituden für die P100 und deutliche Unterschiede für die längerlatenten Komponenten. Während die P100 homogene Kurvenverläufe für alle Versuchsbedingungen zeigte, war die N180 in der „Wort“-Bedingung weniger ausgeprägt als in den anderen Versuchsbedingungen. Der P300/N400-Komplex ist nur in den parietalen Ableitungen positiv; an den anderen Ableitorten ist er negativ gegen Cz als Referenz. Im Latenzbereich zwischen 350 und 650 ms sind die Amplituden in den 4 Versuchsbedingungen unterschiedlich ausgeprägt, insbesondere in den temporalen und mastoidalen Ableitungen.

Die im Grand-Average deutlichere Ausprägung der N180 in der „Wort“-Bedingung konnte statistisch nicht untermauert werden. Deutliche Amplitudenunterschiede zwischen den Versuchsbedingungen wurden erst für den P300/N400-Komplex gefunden. Für die mittlere Amplitude im Latenzbereich zwischen 350 und 550 ms zeigte die dreifaktorielle ANOVA eine signifikante Hauptwirkung der Stimulusklasse ($F(3/33) = 9,23; \epsilon = 0,742; p < 0,02$), des Ableitortes ($F(3/33) = 113,82; \epsilon = 0,762; p < 0,01$) und der Hemisphäre ($F(3/33) = 5,12; p < 0,05$) sowie signifikante Wechselwirkungen von Stimulusklasse und Ableitort ($F(9/99) = 12,14; \epsilon = 0,310; p < 0,001$) und von Ableitort mit Hemisphäre ($F(3/33) = 4,54; \epsilon = 0,760; p < 0,05$). Die Wechselwirkung von Stimulusklasse und Ableitort blieb signifikant, nachdem die Ausgangswerte für die statistische Analyse nach den von McCarthy u. Wood [14]

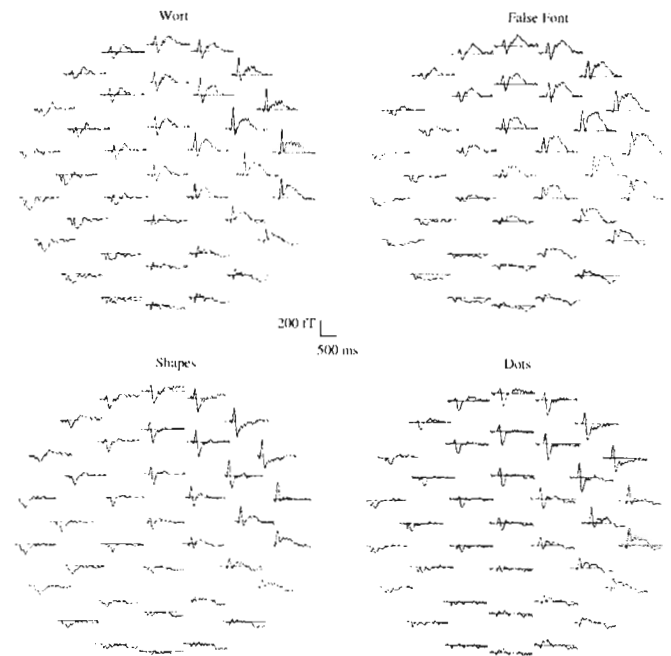


Abb. 3 Gemittelte EKF-Wellenformen einer repräsentativen Vpn, der Sensoranordnung entsprechend dargestellt. Die vier Teilabbildungen repräsentieren jeweils eine der Versuchsbedingungen. Die Skalierungen sind in der Mitte der Abbildung dargestellt.

beschriebenen Prinzipien z-transformiert wurden ($F(9/99) = 3,42; \epsilon = 0,300; p < 0,04$).

Für relevante Vergleiche, d.h. die Unterschiede zwischen den Stimulusklassen anzeigen, ergaben Kontrastanalysen, daß die *Konkretheit der Gestalt-Hypothese* ($F(1/11) = 36,38; p < 0,001$) und die *Lexikalitäts-Hypothese* ($F(1/11) = 35,35; p < 0,001$) die Amplitudenunterschiede zwischen den Stimulusklassen beim P300/N400-Komplex am besten erklärten (vergleiche auch Tab.1).

Ereigniskorrelierte Magnetfelder

Abb. 3 zeigt die gemittelten Wellenformen der ereigniskorrelierten Magnetfelder einer repräsentativen Vpn für alle Versuchsbedingungen in einer Sensor-Layout-Darstellung. Deutliche Unterschiede in der Magnetfeldstärke sind in dieser Darstellung vor allem ab 300 ms nach Stimulusbeginn sichtbar.

Eine allgemeingültigere Beschreibung der Feldstärkeänderungen in der Zeit ist mittels des mittleren Abweichungsquadrates (RMS) möglich, welches die Signalleistung repräsentiert. Abb. 4 zeigt die Grand Average RMS-Amplitude in der Zeit für die vier untersuchten Stimulusklassen. Die Amplituden der M100 unterschieden sich unwesentlich zwischen den Versuchsbedingungen, dagegen waren die M180-Amplitude für die „False Font“- und die „Wort“-Bedingung im Mittel größer als für die „Shapes“- und die „Dots“-Bedingung. Die mittlere Amplitude des M300/M400-Komplexes zeigte jeweils die stärkste Ausprägung in der „False Font“-Bedingung, während sie sich bei den anderen drei Versuchsbedingungen nur unwesentlich voneinander unterschieden.

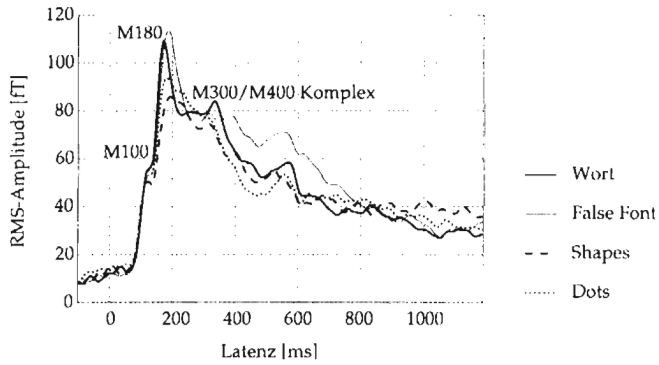


Abb. 4 Dargestellt sind die Gruppenmittel der RMS-Wellenformen für jede der Versuchsbedingungen. Beginn des 400 ms lang dargebotenen Reizes war bei 0 ms. Die durchgezogene dicke Linie repräsentiert die „Wort“-Bedingung, die durchgezogene dünne Linie die „False Font“-Bedingung, die unterbrochene Linie die „Shapes“-Bedingung und die Punktlinie die „Dots“-Bedingung.

Die einfaktorielle ANOVA zeigte eine statistisch signifikante Hauptwirkung der Stimulusklasse für die RMS-Amplitude der M180 ($F(3/36) = 7,88$; $\epsilon = 0,636$; $p < 0,003$). Die Komponenten im M300/M400-Komplex zeigten ebenfalls signifikante Unterschiede, u.a. für die mittlere Amplitude im Latenzbereich von 350–550 ms ($F(3/36) = 5,24$; $\epsilon = 0,572$; $p < 0,02$).

Die M180-Amplitudenunterschiede wurden am besten durch die *Verbalitäts-Hypothese* ($F(1/12) = 14,23$; $p < 0,003$) und die *Informationsverarbeitungsaufwand-Hypothese* ($F(1/12) = 14,22$; $p < 0,003$) erklärt. Die Unterschiede der mittleren Amplitude im Zeitbereich zwischen 350 und 550 ms waren nur durch die *Informationsverarbeitungsaufwand-Hypothese* ($F(1/12) = 8,35$; $p < 0,02$) erklärbar (s. auch Tab. 1).

Vergleiche der Magnetfeldverteilungen mittels Kreuzkorrelation

Unterschiede in den RMS-Werten müssen nicht zwangsläufig bedeuten, daß auch unterschiedliche Hirnstrukturen aktiviert waren. Ein derartiger Unterschied könnte auch durch unterschiedlich starke Aktivierungen gleicher Generatorstrukturen erzeugt werden. Eine Möglichkeit die Ähnlichkeit der Aktivierungsmuster des Gehirns zwischen den Versuchsbedingungen zu vergleichen, besteht in der Analyse der Kreuzkorrelationen von normierten Feldverteilungen zwischen Paaren von Versuchsbedingungen. Dabei gilt: „Je ähnlicher die Feldverteilungen für einen Zeitpunkt in den zu vergleichenden Versuchsbedingungen, desto näher ist der Kreuzkorrelationskoeffizient an Eins“. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß eine geringe Rotation der Feldverteilung deutlichere Unterschiede der Kreuzkorrelation bewirken würde als eine geringe Verschiebung der Feldverteilung. Daher läßt sich aus der Kreuzkorrelation alleine nur schwer eine interpretierbare Aussage ableiten, als ergänzender Parameter für die vertiefende Beschreibung differentieller Effekte kann sie aber durchaus sinnvoll sein. Die Änderung der mittleren Kreuzkorrelation in der Zeit, gemittelt über alle Vpn und separat für jede der 6 möglichen Paarungen von Versuchsbedingungen ist in Abb. 5 dargestellt.

Die Ähnlichkeit der Aktivierungsmuster wächst etwa 80 ms nach Stimulusdarbietung stark an. Bis etwa 200 ms sind bei

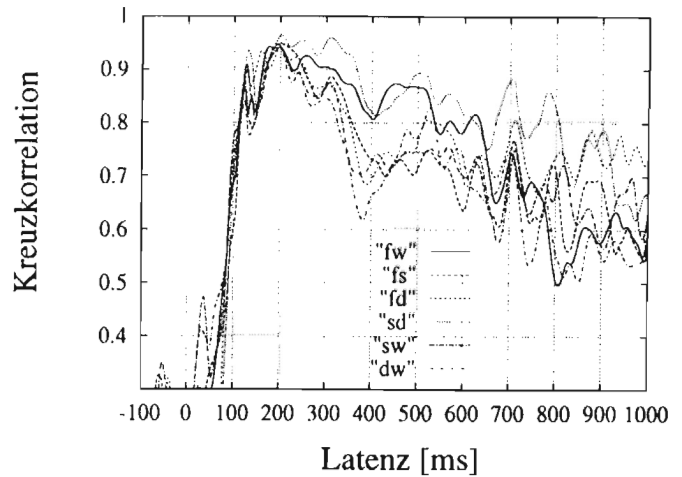


Abb. 5 Änderung der mittleren (über alle Vpn) Kreuzkorrelation der Magnetfeldverteilungen für jede der 6 möglichen Paarungen von Versuchsbedingungen in der Zeit. Jede Paarung ist durch einen anderen Linientyp gekennzeichnet. Die Abkürzungen für die Bedingungskombinationen bedeuten: „fw“ = „False Font“- und „Wort“-Bedingung; „fs“ = „False Font“- und „Shapes“-Bedingung; „fd“ = „False Font“- und „Dots“-Bedingung; „sd“ = „Shapes“- und „Dots“-Bedingung; „sw“ = „Shapes“ und „Wort“-Bedingung; „dw“ = „Dots“- und „Wort“-Bedingung.

generell großer Ähnlichkeit der Aktivierungsmuster kaum Unterschiede zwischen Versuchsbedingungs paaren zu beobachten. Danach zeigen 2 Paarungen von Versuchsbedingungen eine deutlich höhere Ähnlichkeit der Aktivierungsmuster als alle anderen Paarungen, was im Zeitbereich von 250 bis 550 ms am deutlichsten wird. Es zeigt sich, daß die „False Font“- und die „Wort“-Bedingung einerseits und die „Dots“- und die „Shapes“-Bedingung andererseits ähnlichere Aktivierungsmuster aufweisen als die anderen Kombinationen von Versuchsbedingungen.

Statistische Vergleiche zeigten, daß im Latenzbereich des M300/M400-Komplexes die Unterschiede signifikant wurden. Die mittlere Kreuzkorrelation im Latenzbereich von 350–550 ms über alle Vpn erreichte einen Wert von 0,86 für die „Wort“-„False Font“-Kombination und für die „Dots“-„Shapes“-Kombination, blieb aber unter 0,73 für alle anderen Paarvergleiche. Die einfaktorielle ANOVA für den 6fach gestuften Meßwiederholungsfaktor Kombinationen ergab eine statistisch signifikante Hauptwirkung der Kombinationen ($F(5/60) = 3,52$; $\epsilon = 0,515$; $p < 0,03$). Die für die oben berichteten Parameter getesteten Hypothesen mittels Kontrastanalysen lassen sich nur schwer auf die Kreuzkorrelationen adaptieren.

Quellenanalyse der MEG-Daten

Mittels Quellenanalysen sollte versucht werden, die gemessene Magnetfeldverteilung der Aktivierung definierter Hirnstrukturen zuzuordnen. Die visuelle Inspektion der gemessenen Magnetfeldverteilungen ergab, daß mehr als ein äquivalenter Stromdipol zur Erklärung der gemessenen Magnetfeldverteilung herangezogen werden muß. Das verwendete Verteilte-Quelle-Modell ist relativ voraussetzungsarm, was die Anzahl der zu lokalisierenden Quellen betrifft und schien

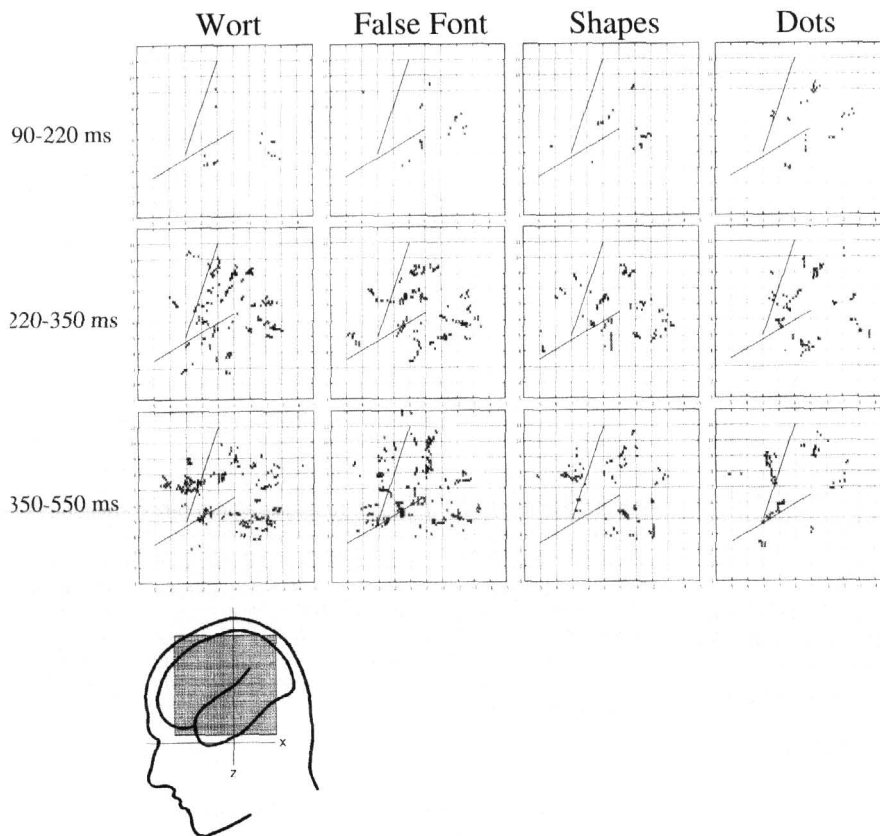


Abb. 6 Projektion der Quellenlokalisationsergebnisse auf die sagittale Schnittebene. Der untere Teil der Abbildung zeigt schematisch den dargestellten Bereich in Relation zu Kopf und Gehirn. Die 4 Spalten repräsentieren die verschiedenen Stimulusklassen, die Zeilen verschiedene Zeitfenster. Die durchgezogenen Linien in den Einzelabbildungen zeigen schematisch die ungefähre Lage der Sylvischen und der Zentralfurche (mittlere interpolierte Lage, die in Magnetresonanztomogrammen von 20 anderen Vpn ermittelt wurde). Die Gitterkonstante beträgt 1 cm. Jedes Kreuz in den Einzelabbildungen repräsentiert einen Quellenort einer der 13 Vpn im gegebenen Zeitfenster, der den verwendeten Datenreduktionskriterien genügte.

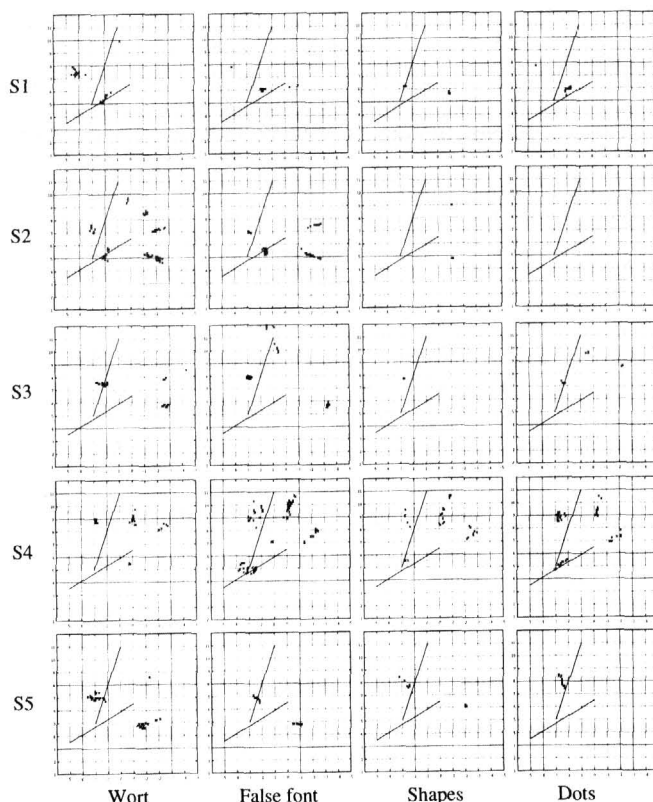


Abb. 7 Projektion der Quellenlokalisationsergebnisse einzelner Vpn für das Zeitfenster von 350–550 ms auf die sagittale Schnittebene. Die Spalten repräsentieren die 4 verschiedenen Stimulusklassen, die Zeilen verschiedene Vpn. Zur Erläuterung der Einzelabbildungen siehe auch Legende der Abb. 6.

daher für die Quellenanalysen geeignet zu sein. Abb. 6 faßt die reduzierten Quellenlokalisationsergebnisse von allen Vpn für die verschiedenen Versuchsbedingungen und für verschiedene Zeitfenster zusammen.

Über alle Vpn hinweg betrachtet lassen sich Aktivierungszentren in frontalen, inferotemporalen, extrastriären, supratemporalen und parietalen Hirnregionen beobachten. Der Vergleich der Aktivierungsmuster über die Zeitfenster hinweg zeigt Änderungen in frontalen und parietalen Hirnarealen. Allerdings ist keine dieser Änderungen in den Aktivierungsmustern spezifisch für einzelne Versuchsbedingungen gewesen. Es entsteht daher verallgemeinert der Eindruck, daß bei den hier untersuchten Informationsverarbeitungsanforderungen alle Stimulusklassen im Verlauf der Informationsverarbeitung ähnliche Hirnregionen aktivieren. Einige tendenzielle Unterschiede sind allerdings sichtbar. In Latenzbereichen nach 220 ms gibt es mehr Lösungen für die „False Font“- und die „Wort“-Bedingungen, verglichen mit der „Dots“- und der „Shapes“-Bedingung. Im Latenzintervall zwischen 220 und 350 ms wurden die anterioren Abschnitte des Temporallappens in der „Wort“-Bedingung häufiger aktiviert als in den anderen Versuchsbedingungen. Quellenlösungen im anterioren Temporallappen (x-Wert auf der anterior-posterior Achse größer als 1 cm und z-Wert auf der inferior-superior Achse unter 5 cm) wurden in der „Wort“-Bedingung bei 5 Vpn beobachtet, während in den restlichen Versuchsbedingungen nur bei einer Vpn in der „Dots“-Bedingung eine Quelle in diesem Bereich zu finden war, die zudem vergleichsweise posterior gelegen war.

Für einzelne Vpn betrachtet zeigte sich, daß die Quellenlokalisationen eine relativ hohe interindividuelle Variabilität der Quellenorte aufwiesen. Wie in Abb.7 für den Latenzbereich von 350 bis 550 ms an sechs der untersuchten Vpn demonstriert, scheint die interindividuelle Variabilität größer zu sein als die Variabilität der Quellenorte zwischen den Versuchsbedingungen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich mittels der hier verwendeten Quellenlokalisationsverfahren keine verallgemeinerbaren Schlußfolgerungen bez. der Aktivierung umschriebener und sich zwischen den Versuchsbedingungen systematisch unterscheidender Hirnareale ziehen lassen, obwohl die zuvor berichteten Parameter die Möglichkeit von systematischen Unterschieden nahelegten.

Diskussion

Während der sekundären Verarbeitung der Reizinhalt von vier verschiedenen Klassen visueller Reize, die eine unterschiedliche perzeptuelle Nähe zu Schrift aufwiesen, wurden in den ereigniskorrelierten Änderungen der elektrischen und magnetischen Hirnaktivität ab ca. 150 ms nach Reizbeginn systematische Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen nachweisbar. Die Gipfellenzen der verschiedenen analysierten Komponenten zeigten keine systematischen Unterschiede, wohl aber die Amplituden der spätlatenten Komponenten.

Um 180 ms zeigten die MEG-Ergebnisse einen systematischen Amplitudenunterschied zwischen den Bedingungen an, während die Unterschiede bei den EEG-Ergebnissen nicht signifikant waren. Die M180-Amplitude war für die „False Font“- und die „Wort“-Bedingung im Mittel größer als für die „Shapes“- und die „Dots“-Bedingung. Diese Abstufung der Unterschiede entspricht der *Verbalitäts-Hypothese*, die in der Tat bei den Kontrastanalysen die Unterschiede am besten erklärte. Allerdings war die Erklärung durch die *Informationsverarbeitungsaufwand-Hypothese* gleichfalls gut. Es kann geschlußfolgert werden, daß unter sekundären Verarbeitungsbedingungen, die unterschiedlichen Bildinhalte differenziert verarbeitet wurden, wobei Worte und Bildelemente, die mit Buchstaben assoziiert werden können, ähnliche Aktivierungsmuster aufweisen, die sich von denen in den nichtverbalen Bedingungen unterscheiden. Zuverlässige Hinweise darauf, daß sich im RMS-Wert der M180 sprachspezifische Informationsverarbeitung abbildet, konnten allerdings nicht gefunden werden.

Gleiches gilt für die MEG-Amplituden im Latenzbereich um 400 ms. Hier zeigte die mittlere Amplitude des M300/M400-Komplexes jeweils die stärkste Ausprägung in der „False Font“-Bedingung, während sich die Amplituden für die anderen drei Versuchsbedingungen nur unwesentlich voneinander unterschieden. Diese Unterschiede der mittleren Amplitude im Zeitbereich zwischen 350 und 550 ms waren nur durch die *Informationsverarbeitungsaufwand-Hypothese* erklärbar. Das heißt, auch hier zeigen sich unterschiedliche Ausprägungen in Abhängigkeit davon, welche Art von Objektmerkmalen sekundär verarbeitet werden, aber keine Sprachspezifität. Die Aktivierung unterschiedlicher Hirnstrukturen bei der Verarbeitung der verschiedenen Stimulusklassen wurde auch durch die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalysen unterstützt. Sie belegten durch den Vergleich der

Ähnlichkeit der MEG-Aktivierungsmuster zwischen Versuchsbedingungs-paaren auch ohne genaue räumliche Lokalisation der Quellen, daß im Latenzbereich von 350–550 ms in den verbalen und nichtverbalen Versuchsbedingungen mit großer Wahrscheinlichkeit unterschiedliche Strukturen die Hirnaktivität generiert haben.

Die Analyse der EEG-Daten im Latenzbereich von 350 bis 550 ms ergab im Vergleich zu den MEG-Daten ein modifiziertes Bild. Die Amplituden und auch die Signalleistungen waren im Gegensatz zu den MEG-Daten für die „Shapes“- und „Dots“-Bedingung am größten, reduziert für die „False Font“- und am kleinsten in der „Wort“-Bedingung. Das illustriert, daß MEG und EEG unterschiedliche Aspekte ähnlicher neurophysiologischer Vorgänge reflektieren können (ausführlichere Betrachtungen dieser Befunde sind in [3] zu finden).

Beide Meßverfahren können unterschiedliche Aspekte ähnlicher neurophysiologischer Vorgänge reflektieren. Dies illustrieren insbesondere die Post-hoc-Kontrastanalysen. Während die MEG-Befunde für den Zeitbereich zwischen 350 und 550 ms am besten durch die *Informationsverarbeitungsaufwand-Hypothese* erklärbar waren, werden die Amplitudenunterschiede in den EEG-Daten am besten durch die *Konkretheit der Gestalt-Hypothese* und die *Lexikalitäts-Hypothese* erklärt. Damit ergibt sich die etwas fatale Situation, daß im gleichen Latenzbereich innerhalb der gleichen Messung erhobene Daten, die auch noch ähnliche neurophysiologische Vorgänge reflektieren sollten, de facto unterschiedliche Verarbeitungsmodelle erklären. Daraus muß geschlossen werden, daß die gegenwärtige psychologische Modellbildung entweder grundsätzlich unzulänglich ist oder daß die Zuordnung von physiologischen Prozessen – hier Komponenten der ereigniskorrelierten Antwort – zu psychologischen Konstrukten – hier Schritten im Ablauf der Informationsverarbeitung – nicht statthaft ist. Zumindest letzteres erscheint plausibel, da das Postulat, eine Komponente würde durch die Aktivierung eines Teilprozessors getriggert, welcher eine bestimmte Informationstransformation durchführt, nicht durch unser Wissen über die Funktionsweise neuronaler Netze gestützt wird.

In anderen MEG-Studien mit Sprachstimuli [5,9,19] wurden ebenfalls Aktivierungen im frühen Latenzbereich beschrieben und in extratriären Hirnregionen lokalisiert. Diese frühen Aktivierungen wurden von den Autoren als nicht sprachverarbeitungsspezifisch interpretiert, was mit dem hier berichteten Ergebnis übereinstimmt. In späteren Latenzbereichen beschrieben diese Autoren sprachverarbeitungsspezifische, eng umschriebene und lokalisierbare Aktivierungen. In einer so direkten Weise bildete sich Sprachspezifität in den hier untersuchten Parametern nicht ab. Das kann u.a. darauf zurückgeführt werden, daß sowohl die Versuchsanforderungen, als auch die Reduktion der Daten mit den o.g. Studien nicht vergleichbar ist.

Das hier verwendete Quellenlokalisationsverfahren, welches der Verteiltheit der generierenden Hirnstrukturen Rechnung trägt, lieferte den Eindruck, daß bei den hier untersuchten Informationsverarbeitungsanforderungen alle Stimulusklassen im Verlauf der Informationsverarbeitung weit verteilt und interindividuell sehr variable Hirnregionen aktivieren. Das unterstützt Befunde über die interindividuelle neuroanatomische Variabilität von Strukturen, insbesondere auch von

solchen, die in die Sprachverarbeitung involviert sind. Auch deren Zuordnung zu sprachverarbeitenden Aufgaben variiert zwischen Personen offensichtlich deutlich, was durch vielfältige experimentelle Befunde in Studien mit kortikaler Elektrostimulation [15], in PET-Studien oder durch Befunde aus der Aphasieforschung [17] belegt wurde und sich auch in MEG-Studien verschiedener Arbeitsgruppen [5,9,19] andeutete.

Der einzige etwas deutlichere tendenzielle Unterschied, der mit den verwendeten Quellenlokalisations- und Datenreduktionsverfahren sichtbar gemacht werden konnte, war im Latenzintervall zwischen 220 und 350 ms zu beobachten. Hier wurden die anterioren Abschnitte des Temporallappens in der „Wort“-Bedingung bei einem Teil der Vpn nachweislich aktiviert und in den anderen Versuchsbedingungen de facto bei keiner der Vpn. Die verwendeten Datenreduktionsverfahren für die Quellenlokalisationsergebnisse waren sehr konservativ, so daß die Häufigkeit dieser Aktivierung im untersuchten Vpn-Kollektiv möglicherweise unterschätzt ist. Weitere Untersuchungen der anterior-temporalen Aktivierungen könnten sich damit als sinnvoll erweisen. Interpretiert werden könnte sie als Aktivierung von Hirnarealen, die an der Sprachverarbeitung beteiligt sind. Naheliegend ist, daß diese Aktivierung ein Korrelat des Zugriffs auf manifeste Gedächtnisinhalte darstellt wie z.B. die Zuordnung des wahrgenommenen visuellen Musters zu einem bekannten Graphem oder einen Zugriff aufs Lexikon. Zum einen war in der vorliegenden Studie nur in der Wortbedingung ein derartiger Zugriff möglich, zum anderen existieren viele neuropsychologische Befunde, die die Rolle der anterioren Anteile des Temporallappens für das Gedächtnis belegen. Diese, basierend auf den vorliegenden Ergebnissen wenig fundierten, aber naheliegenden Annahmen müssen in weiteren experimentellen Studien belegt werden. Eine Beteiligung ähnlicher Hirnstrukturen bei einer sprachverarbeitenden Anforderung konnte kürzlich auch von McCarthy u. Mitarb. [13] demonstriert werden. Sie fanden in einer Studie mit implantierten Elektroden, bei der das klassische N400-Paradigma verwendet wurde, die N400 im anterioren Teil des Gyrus temporalis medialis in beiden Hemisphären lokalisiert.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß elektrische und magnetische Hirnantworten differentielle Aktivierungsmuster bei der sekundären Verarbeitung von lexikalischen, nichtlexikalischen und nichtverbalen Informationen in visuellen Reizen ab etwa 150 ms nach Reizbeginn zeigen. Die Unterschiede bildeten sich in den Amplituden von Komponenten der EKP und EKF, als auch die Ähnlichkeiten von Magnetfeldverteilungen zwischen Versuchsbedingungen (mittels Kreuzkorrelationen bewertet) ab und unterschieden sich signifikant zwischen den eher verbalen und den nichtverbalen Bedingungen. Diese Ergebnisse legten nahe, daß an der sekundären Verarbeitung verbaler und nichtverbaler Informationen in visuellen Reizen neuroanatomisch unterschiedliche Hirnstrukturen beteiligt sind. Beim Versuch dieses Ergebnisses durch Quellenanalysen weiter zu untermauern und zu verfeinern, konnten allerdings keine systematischen Lokalisationsunterschiede beobachtet werden. Obwohl in weiteren Studien zu sichern, sind die gemessenen Unterschiede bei der Verarbeitung von verbalen und nichtverbalen Informationen interessant, da er bei „nur“ sekundärer Verarbeitung der Reizinhalt nachweisbar war. Das macht diese Versuchsanordnung für die Anwendung unter klinischen Routinebedingungen interes-

sant, da die Untersuchungen unter gut standardisierbaren Meßbedingungen, bei einfachen und leicht zu bewältigenden Versuchsanforderungen für die Patienten stattfinden können.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Eu 39/3) unterstützt. Die Datenerhebung erfolgte am Institut für Experimentelle Audiologie der Universität Münster und die Autoren danken den ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die vielfältige Unterstützung, insbesondere Herrn Prof. Dr. M. Hoke und PD Dr. C. Pantev.

Literatur

- ¹ Binder, J. R., S. J. Swanson, T. A. Hammeke, G. L. Morris, W. M. Mueller, M. Fischer, S. Benbadis, J. A. Frost, S. M. Rao, V. M. Haughton: Determination of language dominance using functional MRI: A comparison with the Wada test. *Neurology* 46 (1996) 978–984
- ² Elbert, T., C. Pantev, C. Wienbruch, B. Rockstroh, E. Taub: Increased use of the left hand in string players associated with increased cortical representation of the fingers. *Science* 220 (1995) 21–23
- ³ Eulitz, C., H. Eulitz, T. Elbert: Differential outcomes from magneto- and electroencephalography for the analysis of human cognition. *Neuroscience Letters* 227 (1997) 185–188
- ⁴ Frackowiak, R. S. J.: Functional mapping of verbal memory and language. *Trends in Neuroscience* 17 (1994) 109–115
- ⁵ Fujinaki, N., H. Yoshihiro, S. Kuriki, H. Nakajima: Event-related magnetic fields at latencies of over 400 ms in silent reading of Japanese Katakana meaningless words. *Neuroscience Research* 23 (1995) 419–422
- ⁶ Grunwald, A.: Das Verteilte-Quelle-Modell bei der Analyse von MEG-Daten: Kritische Betrachtungen zur Quellenanalyse, Medizinische Fakultät, WWU Münster, Münster (1996)
- ⁷ Hari, R.: The neuromagnetic method in the study of the human auditory cortex. In: *Auditory evoked magnetic fields and electric potentials*, 6, hrsg. von F. Grandon, M. Hoke, G. L. Romani. Karger, Basel (1990) 222–282
- ⁸ Jennum, P., L. Friberg, A. Fugelsang-Frederiksen, M. Dam: Speech Localisation using repetitive transcranial magnetic stimulation. *Neurology* 44 (1994) 269–73
- ⁹ Kuriki, S., Y. Hirata, N. Fujimaki, T. Kobayashi: Magnetoencephalographic study on the cerebral neural activities related to the processing of visually presented characters. *Cognitive Brain Research* 4 (1996) 185–199
- ¹⁰ Kurthen, M., C. Helmstaedter, D. B. Linke, A. Hufnagel, C. E. Elger, J. Schramm: Quantitative and Qualitative Evaluation Patterns of Cerebral Language Dominance: An Amobarbital Study. *Brain and Language* 46 (1994) 536–564
- ¹¹ Kutas, M., C. Van Petten: Event-Related Brain Potential Studies of Language. In: *Advances in Psychophysiology*, 3, hrsg. von P. K. Ades, J. R. Jennings, M. G. H. Coles. JAI Press, Greenwich, CT (1988) 139–187
- ¹² Lütkenhöner, B.: Möglichkeiten und Grenzen der neuromagnetischen Quellenanalyse, Lit Verlag (1992)
- ¹³ McCarthy, G., A. Nobre, S. Bentin, D. D. Spencer: Language Related Field Potentials in the Anterior-Medial Temporal Lobe: Intracranial Distribution and Neural Generators. *Journal of Neuroscience* 15 (1995) 1080–1089
- ¹⁴ McCarthy, G., C. Wood: Scalp Distribution of Event-Related Potentials: An Ambiguity Associated with Analysis of Variance Models. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* 62 (1985) 203–208

- ¹⁵ Ojemann, G. A.: Brain Organisation for language from the perspective of electrical stimulation mapping. *The Behavioral and Brain Sciences* 2 (1983) 189 – 230
- ¹⁶ Oldfield, R. C.: The Assessment and Analysis of Handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia* 9 (1971) 97 – 113
- ¹⁷ Poeck, K.: Sprache im Gehirn: eng lokalisierbar? *Spektrum der Wissenschaft* Mai (1995) 92 – 98
- ¹⁸ Reicher, G. M.: Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology* 81 (1969) 275 – 280
- ¹⁹ Salmelin, R., Hari, O. V., Lounasmaa, M., Sams: Dynamics of brain activation during picture naming. *Nature* 368 (1994) 463 – 465
- ²⁰ Stöhr, M., J. Dichgans, H. C. Diener, U. W. Büttner: *Evozierte Potentiale*, Springer Verlag, 1989
- ²¹ Ungerleider, L. G.: Functional Brain Imaging Studies of Cortical Mechanisms for Memory. *Science* 270 (1995) 769 – 775
- ²² Wheeler, D. D.: Processes in word recognition. *Cognitive Psychology* 1 (1970) 59 – 80

Dr. Carsten Eulitz
Universität Konstanz
Postfach 5560-D25,
78434 Konstanz