

- Weiss, S. & Müller, H. M. (2003). The contribution of EEG coherence to the investigation of language. *Brain & Language*, 85, 325-343.
- Weiss, S. & Rappelsberger, P. (1996). EEG coherences within the 13-18 Hz band as correlates of a distinct lexical organization of concrete and abstract nouns in humans. *Neuroscience Letters*, 209, 17-20.
- Weiss, S. & Rappelsberger, P. (1998). Left frontal EEG coherence reflects modality independent language processes. *Brain Topography*, 11, 33-42.
- Weiss, S. & Rappelsberger, P. (2000). Long-range EEG synchronization during word encoding correlates with successful memory performance. *Cognitive Brain Research*, 9, 299-312.
- Weiss, S., Cromecek, W. & Rappelsberger, P. (1998). Electrophysiological signs for a differentiation between good and poor memory performers. *European Journal of Neuroscience, Suppl.* 10, 142.
- Weiss, S., Müller, H. M. & Rappelsberger, P. (1999). Processing concepts and scenarios: Electrophysiological findings on language representation. In A. Riegler, M. Peschl & A. v. Stein (Eds.), *Understanding representation in the cognitive sciences* (pp. 237-246). New York: Plenum Press.
- Weiss, S., Müller, H. M. & Rappelsberger, P. (2000). Theta synchronisation predicts efficient memory encoding of concrete and abstract nouns. *NeuroReport*, 11, 2357-2361.
- Weiss, S., Schack, B. & Rappelsberger, P. (1997). Lexical processing within the brain: Evidence from EEG spectral analysis and dynamic topographic coherence analysis. In H. Witte, U. Zwienen, B. Schack, & A. Doering (Eds.), *Quantitative and topological EEG and MEG analysis* (pp. 403-405). Jena: Universitätsverlag.
- Weiss, S., Berghoff, C., Rappelsberger, P. & Müller, H. M. (2001a). Elektrophysiologische Hinweise zur Kategorisierung von Verben. Proceedings der 1. Jahrestagung der Gesellschaft für Aphasieforschung und Behandlung, Bielefeld, 1.-3. November 2001, p. 64.
- Weiss, S., Müller, H. M., King, J. W., Kutas, M. & Rappelsberger, P. (2001b). EEG-coherence analysis of naturally spoken English relative clauses. *Brain Topography*, 13, 317.
- West, W. C. & Holcomb, P. J. (2000). Imaginal, semantic, and surface-level processing of concrete and abstract words: An electrophysiological investigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 1024-1037.

Gehirnoszillationen und Sprache: EEG-Bandpower-Veränderungen bei Sprachverarbeitungsprozessen

Dietmar Röhm, Hubert Haider und Wolfgang Klimesch

Sprachverarbeitung ist eine komplexe kognitive Aktivität. Um die dafür verantwortlichen neurophysiologischen Prozesse untersuchen zu können, müssen sie zuerst identifiziert werden. Dazu ist es erforderlich, Parameter der simultanen zeitlichen und räumlichen Verteilung der Hirnaktivität zu bestimmen, um diese mit computationellen Aspekten der Verarbeitungsvorgänge korrelieren zu können.

Mit den derzeit verfügbaren experimentellen Methoden der direkten, nicht-invasiven Beobachtung der Gehirnaktivität lässt sich die Zuordnung von Ort und Zeit der erfassten Aktivitäten nicht gleichermaßen zufriedenstellend bewerkstelligen: bildgebende Verfahren, wie z.B. Positronenemissionstomographie (PET) oder funktionelle Kernspintomographie (fKST), die auf Basis der hämodynamischen Aktivität (Veränderungen des regionalen cerebralen Blutflusses, rCBF) funktionieren, bieten zwar eine genaue Ortsbestimmung, liegen aber in ihrer zeitlichen Auflösung noch weit über den für Sprachverarbeitungsvorgänge relevanten Zeitintervallen. Demgegenüber erlauben Methoden, die auf der Analyse des am menschlichen Skalp abgeleiteten Elektroenzephalogramms (EEG) beruhen (ereigniskorrelierte Potentiale, Spektral- und Frequenzanalysen) zwar keine hinreichend genaue Eingrenzung der räumlichen Zuordnung der Quelle der Aktivität, jedoch liefern sie eine optimale Zeitauflösung (im Millisekundenbereich).

Damit eignen sich vorrangig elektrophysiologische Ableitetechniken, um die Verarbeitung von Sprache anhand der ihr zugrunde liegenden physiologischen Prozesse der Hirnrinde über die Analyse des EEGs untersuchen zu können.

Dieser Beitrag behandelt die Anwendung spektral- und frequenzanalytischer Methoden auf psycholinguistische Fragestellungen, die bisher noch nicht mit diesen Methoden untersucht wurden. Dazu wurden, in Ergänzung der etablierten Analysen mit ereigniskorrelierten Potentialen (*event-related potentials*, ERPs), frequenzbandspezifische Aktivierungsmuster als Korrelate der untersuchten Verarbeitungsprozesse in der simultanen Gehirnaktivität eruiert. Da die Untersuchung zwei grundsätzlich verschiedene Prozesse zu isolieren trachtete (d.h., rein syntaktische Umformung vs. semantisch determinierter Lexikonzugriff), konnte zumindest für letzteren

Aspekt auf die Erfahrungen aus zahlreichen Untersuchungen über *Retrieval*-Prozesse zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 2.3).

Die verwendete Methodik konzentriert sich auf die Untersuchung von Bandpower-Veränderungen, die während der Ausführung experimentell kontrollierter Sprachverarbeitungsprozesse gemessen werden. Bandpower-Veränderungen werden dabei mithilfe zweier komplementärer Analysemethoden beschrieben: die *event-related desynchronization* (ERD) und *induced band power* (IBP) (siehe dazu Abschnitt 2.2). Die Begründung, diese Methoden zu verwenden ergibt sich einerseits aus der Tatsache, dass so gut wie alle EEG-Befunde zur Sprachverarbeitung auf der Berechnung ereigniskorrelierter Potentiale (ERPs) beruhen (siehe dazu Abschnitt 1) und dass andererseits die Analyse des EEG mithilfe der ERD- und IBP-Methode gezeigt hat, dass sich unterschiedliche kognitive Leistungen (wie z.B. Aufmerksamkeits-, episodische und semantische Gedächtnisleistung) in unterschiedlichen Frequenzbändern mit sehr kleiner Bandbreite widerspiegeln bzw. nachweisen lassen. Dieser zuletzt genannte Befund stützt die gerade in jüngster Zeit wiederholt vorgeschlagene Hypothese, dass die neuronale Informationsverarbeitung auf oszillatorischen und frequenzbandspezifischen Aktivierungsvorgängen beruht (vgl. Miller, 1991; Lisman & Idiart, 1995; Klimesch, 1996, 1997; Basar, 1997).

Da bisher bei Untersuchungen zur Sprachverarbeitung die Verwendung von ERPs dominiert, ist es notwendig, Parameter von Bandpower-Veränderungen (z.B. die Stärke der Desynchronisation und Synchronisation) direkt mit Parametern ereigniskorrelierter Potentiale (z.B. der Amplitudenstärke bestimmter ERP-Komponenten) zu vergleichen. Die IBP-Methode, die u.a. für diesen Zweck entwickelt wurde, ermöglicht die Berechnung frequenzbandspezifischer induzierter Anteile und somit auch die Beantwortung der Frage, ob und in welchem Ausmaß Bandpower-Veränderungen unabhängig von evozierten (ERP-)Komponenten auftreten.

1. Übersicht

Eine technisch relativ einfache nicht-invasive Methode zur Untersuchung sprachlicher Prozesse mit einer hervorragenden zeitlichen Auflösung ist die bereits erwähnte elektrophysiologische Messung der Gehirnaktivität im Elektroenzephalogramm (EEG). Wie zu erwarten, liegen bereits zahlreiche Arbeiten zur Messung von ereigniskorrelierten Potentialen (*event-related potentials*, ERPs) während der Sprachverarbeitung vor (Kutas, 1997; Friederici, Hahne & Cramon, 1998; Hagoort, Brown & Osterhout, 1999).

Schon Anfang der 80er Jahre konnte ein elektrophysiologisches Korrelat für semantische Verarbeitungsprozesse gefunden werden (Kutas & Hillyard,

1980a,b,c; 1983; 1984; Neville et al., 1986). Die Annahme ist, dass eine negative ERP-Komponente (die so genannte N400), die im Bereich von ca. 400 ms nach Präsentationsbeginn eines mit dem vorausgegangenen Satzkontext semantisch inkongruenten Wortes auftritt, einen Aspekt postlexikalischer Verarbeitung darstellt, der die semantische Passform (*semantic fit*) eines Stimulus mit seinem Kontext widerspiegelt.

Die Identifikation einer syntaktischen Komponente stand hingegen lange Zeit aus. Bisher wurden vor allem zwei grundlegende ERP-Komponentenklassen identifiziert, die systematisch mit syntaktischen Verarbeitungsprozessen in Verbindung gebracht werden und von denen man annimmt, dass sie als Funktion syntaktischer Prozesse variieren:

1. relativ frühe Negativierungen mit einem frontalen, manchmal links-anterioren Amplitudenmaximum zwischen 100 und 200 ms bzw. zwischen 300 und 500 ms und
2. späte centro-parietale Positivierungen.

Nomenklatorisch werden zumeist drei weitgehend akzeptierte syntaktisch motivierte ERP-Komponenten unterschieden: frühe links-anteriore Negativierungen (*early left anterior negativities*; ELAN), links-anteriore Negativierungen (*left anterior negativities*; LAN) und späte Positivierungen (P600; *syntactic positive shift*.)

Auffallend ist, dass sich die überwiegende Mehrheit der ERP-Untersuchungen zur Syntaxverarbeitung zum einen nur mit Sprachperzeption (visuelle und auditive Präsentation), zum anderen zumeist mit syntaktischen Anomalien, wie z.B. Verletzung der Phrasenstruktur, der Subkategorisierung, Subjekt-Verb-Kongruenz, Subjazenzen oder mit syntaktischen Ambiguitäten, wie z.B. *Garden-Path*-Sätzen, Kasus-Ambiguitäten und *Filler-Gap*-Beziehungen beschäftigen. Es finden sich keine Arbeiten, die syntaktische Mechanismen anhand der Sprachproduktion untersuchen und nur wenige, die ausschließlich grammatische strukturell nicht-ambige Sätze einander gegenüberstellen (Ausnahmen sind z.B.: Rösler et al., 1998; Frisch, 2000; Schlesewsky, 2001; Bornkessel, Schlesewsky & Friederici, im Druck). Zudem bleiben bei einer Analyse der ERPs wesentliche Aspekte der EEG-Signale unberücksichtigt, die nur mittels Spektral- und Frequenzanalyse der Signale beschrieben werden können. So können EEG-Signale in zahlreiche Frequenzkomponenten zerlegt werden, die vermutlich Prozesse widerspiegeln, die mit ERP-Analysen nicht oder nur teilweise erfasst werden (Sayers, Beagley & Hanshall, 1974; Lopes da Silva, 1987; Klimesch et al., 1998; Pulvermüller, 1998). Vielfach wurde jedoch gezeigt, dass sich in verschiedenen Frequenzbändern mit sehr kleiner Bandbreite sehr unterschiedliche kognitive Leistungen widerspiegeln (z.B. Rappelsberger, Lacroix & Petsche, 1993; Basar, 1998). Die Arbeitsgruppe um Klimesch konnte in mehreren Arbeiten zeigen, dass Alpha-Aktivität im 10-12 Hz-Bereich die kognitive,

sensorisch-semantische Verarbeitung eines Stimulus widerspiegelt (Klimesch, 1996; 1997; Klimesch Schimke & Pfurtscheller, 1993; Klimesch et al., 1997; Klimesch et al., 1998). Während Alpha-Aktivität im Frequenzbereich von 8-10 Hz vorwiegend mit Aufmerksamkeitsprozessen korreliert, Giannitrapani (1988) stellte einen engen Zusammenhang zwischen Frequenzbandaktivitäten im Bereich von 12-14 Hz und komplexeren sprachlichen Gehirnleistungen fest. Hingegen beschreiben Galin et al. (1992) Veränderungen im niederen Beta-Band (13,5-20,5 Hz) als Korrelat komplexer Sprachverarbeitung. Diese Befunde werden u.a. von zahlreichen Kohärenzstudien bestätigt. So bringen beispielsweise Weiss et al. (1997) eine erhöhte Kohärenz über frontalen und fronto-zentralen Gehirn-Arealen im Beta-1-Band (13-18 Hz) in Verbindung mit höheren kognitiven Prozessen bei auditiver Sprachverarbeitung (siehe auch Weiss, 1997; Weiss & Rappelsberger, 1996; 1998; Müller, Weiss & Rappelsberger, 1997; Weiss, Müller & Rappelsberger, 1997).

1.1 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend sei festgehalten, dass die Korrelation der ERP-Komponente N400 mit semantischer Verarbeitung als relativ etabliert gilt. Ebenso lassen sich Aktivierungsveränderungen im oberen Alpha-Band eindeutig mit sensorisch-semantischer Verarbeitung in Verbindung bringen (vgl. dazu Abschnitt 2.3). Eine offene Frage ist allerdings, ob und – falls ja – wie die beiden Ergebnisse zusammenhängen. Auch ist die Identifikation eines rein syntaktisch motivierten EEG-Korrelates nach wie vor umstritten. Dies dürfte u.a. mit dem Faktum zu tun haben, dass zumeist grammatisch deviante Stimuli verwendet wurden, so dass beispielsweise die Interpretation der P600-Komponente als rein sprachspezifische Komponente sehr unwahrscheinlich ist. Auch erscheint das perzeptionsbasierte Paradigma bei EEG-Untersuchungen zur Sprachverarbeitung für den Nachweis eines rein syntaktischen Prozesses als eher ungeeignet. Die Forderung an ein Testdesign muss daher sein, ausschließlich anhand grammatischer Sätze mittels eines spezifisch syntaktischen Prozesses zu testen. Durch eine syntaktische Umordnungsoperation bei der Sprachproduktion kann diese Forderung eingelöst werden. Wichtig ist dabei anzumerken, dass ein derartiges Experiment mit einer klassischen ERP-Analyse nicht vereinbar ist, da naturgemäß bei Experimenten zur Sprachproduktion die für eine ERP-Analyse notwendige Zeitrelation zwischen Stimulierung und kognitiver Verarbeitung nicht eindeutig fixierbar ist. (Dieser Aspekt dürfte allerdings für langsame ERP-Komponenten eine weniger wichtige Rolle spielen als für schnelle ERP-Komponenten.) Diese Einschränkung gilt nicht für Frequenzbandanalysen, die induzierte Aktivierungsänderungen erfassen können, wodurch sich ein

neuer methodischer Zugang zu diesem Forschungsbereich eröffnet. Daraus ergibt sich dann auch letztlich der innovative Aspekt eines solchen Ansatzes.

2. Zielsetzung

2.1 Psycholinguistische Aspekte

Die vorliegende Arbeit untersucht die frequenzspezifische EEG-Aktivität bei zwei grundsätzlich verschiedenen Prozessen der Sprachverarbeitung. Der eine Prozess ist ein rein syntaktischer. Er steuert die serielle Anordnung, die durch die Grammatik der Satzstrukturierung determiniert ist. Der andere Prozess ist ein semantisch-lexikalischer: Ein semantisch identifizierter Ausdruck muss ersetzt werden. Klinischen und bildgebenden Befunden zufolge ist die jeweilige Hauptaktivität für diese zwei Verarbeitungsvorgänge in unterschiedlichen Arealen (frontal vs. temporal) konzentriert.

2.2 Gewählte Methodik: Bandpower-Veränderungen, gemessen mit Hilfe der ERD/ERBP

Die Quantifizierung der ERD (*event-related desynchronization*) im Sinne eines eigenständigen methodischen Ansatzes wurde von Pfurtscheller (vgl. Pfurtscheller & Aranibar, 1977) vorgeschlagen und in einer Reihe verschiedener perzeptueller und motorischer Aufgaben zur Untersuchung des topografisch-zeitlichen Verlaufes kortikaler Aktivierung eingesetzt (vgl. z.B. die Zusammenfassungen in Pfurtscheller & Klimesch, 1990; Pfurtscheller, Stancak & Neuper, 1990). Die Grundlage für die Berechnung der ERD (ebenso wie der ERBP – *event-related band power*) ist die Bandpassfilterung der EEG-Rohdaten in einem definierten Frequenzband, das typischerweise – aber nicht notwendigerweise – das Alpha-Band ist. Nach der Bandpassfilterung werden die Amplitudenwerte jedes Kanals k für jeden *Sample*-Zeitpunkt i einer Epoche j quadriert (um einfache Schätzwerte der Power im gegebenen Frequenzband zu erhalten) und über die Epochen j gemittelt. Die gemittelten quadrierten bandpassgefilterten Daten werden als Bandpower-Rohwerte bezeichnet. Anschließend können zeitlich aufeinander folgende Werte einer Epoche innerhalb bestimmter Intervalle zusammengefasst werden. Beträgt die Samplefrequenz z.B. 250 Hz, so können z.B. bei einer gewählten Intervalldauer von 100 ms jeweils 25 zeitlich aufeinander folgende Werte zu einem Intervall zusammengefasst bzw. gemittelt werden. Wichtig ist, dass die ERD relative Power-Verän-

derungen darstellt und dass daher immer zwei Intervalle, ein Referenz- und ein Testintervall ausgewählt werden müssen. Das Referenzintervall soll (so weit wie möglich) eine Ruhesituation erfassen. In den meisten Fällen wird als Referenzintervall ein Intervall zu Beginn einer Epoche gewählt, in dem die Versuchsperson (Vp) noch keine spezifische kognitive (oder motorische) Aufgabe durchzuführen hat. Als Testintervall kommen beliebige Zeitabschnitte derselben Epoche in Frage, in denen bestimmte kognitive (oder motorische) Aufgaben auszuführen sind. Die ERD ist definiert als die prozentuelle Ab- oder Zunahme der Power im Testintervall, bezogen auf das Referenzintervall, wobei z.B. im Alpha-Band die Stärke der Abnahme der Power im Testintervall als Ausmaß kortikaler Aktivierung interpretiert wird. Die einfache Berechnungsformel ist: $((\text{Power Referenz} - \text{Power Testintervall}) / (\text{Power Referenz})) * 100$.

Wichtig ist, dass positive ERD-Werte Desynchronisation (d.h., eine Abnahme der Amplitudenhöhe) widerspiegeln, wohingegen ereigniskorrelierte Synchronisation (*event-related synchronization*; ERS) durch negative Werte ausgedrückt wird (Pfurtscheller, 1992; Pfurtscheller & Stancak, 1996). (Häufig werden allerdings negative ERD-Werte mit -1 multipliziert und dann mit positiven Werten als ERS bezeichnet.)

Ein typischer Befund betrifft z.B. die Tatsache, dass nicht nur die Stärke der ERD, sondern auch die Flächenausdehnung der aktivierten Regionen (wie sie beispielsweise mit ERD-Maps leicht beobachtet werden kann) in dem Maß zunimmt, in dem die Aufgabenschwierigkeit (unabhängig davon, ob es sich um eine motorische, perzeptive, kognitive oder aufmerksamkeitsbedingte Belastung der Vp handelt) zunimmt.

Vergleicht man die Methodik der Berechnung der ERP mit der ERD, so zeigen sich folgende wichtige Unterschiede. Die ERP stellt eine Analyse in der Zeitdomäne (*time domain*) dar, die – bedingt durch die Aufsummierung und Mittelung der Signale – die zeitgekoppelte, evozierte Reaktion auf einen Stimulus bzw. Ereignis in einem sehr weiten Frequenzbereich widerspiegelt. Die ERD hingegen ist eine Analyse in der Frequenzdomäne (*frequency domain*) die – bedingt durch die Quadrierung der bandpassgefilterten EEG-Signale – auch jene stimulus- bzw. ereignisbezogene Veränderungen (in einem bestimmten Frequenzbereich) erfasst, die nicht in einer konstanten zeitlichen Relation zum auslösenden Ereignis stehen.

Die für die weiteren Überlegungen entscheidende Tatsache ist, dass die ERD daher – bezogen auf die zeitliche Relation zum auslösenden Ereignis – zwei verschiedene, voneinander nicht mehr differenzierbare (frequenzspezifische) Komponenten aufweist, eine evozierte und eine induzierte. Der evozierte Anteil ist jener, der in einer spezifischen zeitlichen (d.h., Phasen- und/oder Amplitudenrelation) zum auslösenden Ereignis steht, der induzierte jener, der in keiner fixen zeitlichen Relation steht.

Nehmen wir zur Veranschaulichung der folgenden Überlegungen ein ERP an, das durch die Mittelung von $j = 1, \dots, n$ Trials gewonnen wurde.

Die Varianz, die pro *Sample*-Zeitpunkt i zwischen den *Single Trial*-ERPs j und dem gemittelten ERP besteht, wird auch als Intertrial-Varianz bezeichnet (Kaufman et al., 1989; Kalcher & Pfurtscheller, 1995). Ist $x(i,j)$ die Amplitude des EEG-Signals zum *Sample*-Zeitpunkt i des j -ten *Trials*, dann ist die Intertrialvarianz $ITV(i) = (x(i,j) - \mu(i))^2/n$, wobei das evozierte Potential (zum Zeitpunkt i) gleich dem Mittelwert $\mu(i) = \sum x(i,j)/n$ ist. Dieses einfache Beispiel zeigt, dass pro *Sample*-Zeitpunkt i das EEG in einen evozierten (repräsentiert durch $\mu(i)$) und einen induzierten Anteil (repräsentiert durch $x(i,j) - \mu(i)$) zerlegt werden kann. (Als "induzierte Rhythmen" verstehen wir Oszillationen die durch Stimuli oder Ereignisse moduliert werden und die (im Gegensatz zu evozierten Rhythmen) nicht phasengekoppelt reagieren.)

Um nun die frequenzbandspezifischen induzierten Veränderungen getrennt von evozierten Anteilen analysieren und quantifizieren zu können, berechnet man die induzierte Bandpower (IBP) für die bandpassgefilterten EEG-Daten (die mit $x'(i,j)$ bezeichnet werden) in einem definierten Frequenzband:

$$IBP(i) = (x'(i,j) - \mu'(i))^2/n$$

$\mu'(i)$ ist dabei das bandpassgefilterten ERP zum Zeitpunkt i .

1. Zuerst wird das EEG für jedes selektierte Frequenzband über die gesamte Trialsequenz bandpassgefiltert. 2. Dann wird das bandpassgefilterte ERP berechnet. 3. Für jedes *Trial* wird das gefilterte ERP vom bandpassgefilterten EEG abgezogen. 4. Die Differenz wird quadriert (um einfache Power-Schätzwerte zu erhalten) und über die gesamte Trialsequenz für jede Vp, Elektrodenposition und experimentelle Bedingung gemittelt. 5. Für die statistische Analyse werden die gemittelten Daten z-transformiert (vgl. John & Pritchep, 1993; Klimesch et al., 1998a). Die z-transformierten Power-Werte werden als IBP bezeichnet. IBP und ITV unterscheiden sich daher lediglich darin, dass das Maß der IBP die z-transformierte und damit normalisierte ITV widerspiegelt. Der gleiche Zusammenhang gilt zwischen ERBP und ERD. Indem Konfidenzintervalle berechnet werden, kann die statistische Signifikanz der induzierten Bandpower-Veränderungen vor, während und nach der Stimulation bestimmt werden (mit Bezug auf ein Referenzintervall, das typischerweise die ersten 1000 ms jeder Epoche umfasst).

Die frequenzbandspezifische ereigniskorrelierte EEG-Veränderung (*Event-related band power* bzw. ERBP) erhält man durch Quadrieren der bandpassgefilterten EEG-Daten:

$$ERBP(i) = ((x'(i,j))^2)/n$$

Mit der Ausnahme, dass das bandpassgefilterte ERP nicht abgezogen wird, ist die Berechnung der ERBP identisch mit der IBP. Eine detailliertere

Darstellung dieser Methode und Ihrer Möglichkeiten ist in Klimesch et al. (1998a,b) zu finden.

Im Gegensatz zur IBP und ERBP repräsentiert die ERD (Pfurtscheller & Aranibar, 1977) die prozentuale Veränderung der Bandpower in einem Testintervall bezüglich einer Referenz. Der formale Zusammenhang zwischen ERD und ITV erlaubt es, ein einfaches Differenzmaß anzugeben, das den Einfluss evozierter Anteile auf die ERD angibt. Es handelt sich dabei um die Differenz D zwischen ERD und ITV (in einem definierten Frequenzband):

$$D = \text{ERD} - \text{ITV}$$

Für den Fall, dass keine evozierten Anteile die ERD beeinflussen, ist $D = 0$. Sind jedoch evozierte Anteile vorhanden, dann nimmt (bedingt durch die Subtraktion von $\mu'(i)$) die ITV im Vergleich zur ERD ab, und D nimmt zu. Diese Gegenüberstellung zeigt sehr deutlich, dass die ITV als die um den evozierten Anteil $\mu'(i)$ reduzierte ERD angesehen werden kann. Deshalb ist auch klar, dass die ITV immer kleiner oder gleich der ERD sein muss. (Zu beachten ist, dass – bedingt durch die Quadrierung der Daten – keine Additivität gegeben ist. Es handelt sich also lediglich um ein relationales Maß. Dieser Zusammenhang gilt zudem nur für ERD-Rohwerte (ERDr) und nur bedingt – sofern der Einfluss des evozierten Anteils im Referenzintervall zu vernachlässigen ist – für prozentualisierte Werte (ERD/ITV). Da ERBP- und IBP-Werte per definitionem z-transformiert sind (Klimesch et al., 1998a), kann keine sinnvolle Differenzbildung zur Ermittlung von D angewandt werden (Doppelmayer, pers. Mitteilung).

2.3 Funktionale Interpretation von Desynchronisation

In einer Reihe von Experimenten konnte gezeigt werden, dass die geeignete Bestimmung der Frequenzbänder einen der kritischen Faktoren bei der Berechnung der ERD oder anderer Maße darstellt (Klimesch et al., 1998a,b).

So können beispielsweise aufgrund starker interindividueller Unterschiede in der Alpha-Frequenz weite Bereiche der Alpha-Power außerhalb fest gewählter Frequenzbänder liegen und daher zu irreführenden Ergebnissen und Interpretationen führen (Klimesch, 1999). Um diese und ähnliche Probleme, die bei der Anwendung fester Frequenzfenster auftreten können, zu vermeiden, wurde vorgeschlagen, die individuelle Alpha-Frequenz $\text{IAF}_{(i)}$, gemittelt über alle Elektrodenpositionen, als Ankerpunkt für die Adjustierung der Frequenzbänder individuell für jede Vp(i) zu verwenden (Klimesch et al., 1990; Klimesch et al., 1997a,b,c). Ausgehend von diesem Ankerpunkt, können vier Frequenzbänder mit einer Bandbreite von

2 Hz in Relation zur $\text{IAF}_{(i)}$ definiert werden, die den traditionellen Theta- und Alpha-Frequenzbereich von 4-12 Hz abdecken. Die mit dieser Methode erhaltenen Frequenzbänder werden als Theta ($[\text{IAF}_{(i)} - 6]$ bis $[\text{IAF}_{(i)} - 4]$); *Lower-1-Alpha* ($[\text{IAF}_{(i)} - 4]$ bis $[\text{IAF}_{(i)} - 2]$); *Lower-2-Alpha* ($[\text{IAF}_{(i)} - 2]$ bis $[\text{IAF}_{(i)}]$); *Upper-Alpha* ($[\text{IAF}_{(i)}]$ bis $[\text{IAF}_{(i)} + 2]$) bezeichnet. Für jede Vp können somit die ereigniskorrelierten Veränderungen der Bandpower auf der Basis dieser individuell festgelegten Frequenzbänder berechnet werden.

Eines der grundlegenden Ergebnisse bezüglich der funktionellen Bedeutung der Alpha-Frequenz beruht auf der Erkenntnis, dass Desynchronisation kein einheitliches Phänomen darstellt. Unterscheidet man zwischen verschiedenen Frequenzbändern im Bereich des erweiterten Alpha-Bandes (*Lower-1*, *Lower-2*, *Upper*), lassen sich zwei unterschiedliche Desynchronisationsmuster voneinander isolieren, die bezüglich Topographie und Zeitverlauf völlig verschiedene und zum Teil entgegengesetzte Ergebnisse erbringen und zudem auch klare Hinweise dafür geben, welche kognitiven Prozesse sich in verschiedenen Frequenzbändern widerspiegeln und nach welchen Kriterien die Bandbreite der jeweiligen Frequenzbänder zu bestimmen ist. Eine Desynchronisation im *Lower-Alpha*-Band (im Bereich von 6-10 Hz) zeigt sich in Reaktion auf eine Vielzahl bezüglich der Aufgabenstellung und Stimulusqualität unspezifischer Faktoren (vgl. Weiss & Rappelsberger, 1996; Gevins et al., 1997; Klimesch et al., 1998a,b), die sich am ehesten unter dem Begriff "Aufmerksamkeit" zusammenfassen lassen (für ein ähnliches Konzept vgl. Shaw, 1996). Die topographische Verteilung der Desynchronisation erstreckt sich über den gesamten Skalp und reflektiert primär vermutlich phasische Aufmerksamkeitsveränderungen, wie sie z.B. als Reaktion auf ein Warnsignal oder durch eine bestimmte Erwartungshaltung beobachtet werden können. (Aufmerksamkeit im Sinne einer Verwaltung von Verarbeitungsressourcen reflektiert möglicherweise die Überwachungsfunktion thalamo-kortikaler Feedback-Verschaltungen, wohingegen sich stimulusbezogene kognitive Prozesse eher durch kortikale Oszillationen in höheren Frequenzbändern widerspiegeln. In diesem Sinne kann Alpha-Aktivität auch als Reflex einer Top-Down-Verarbeitung angesehen werden (vgl. von Stein et al., 2000). Desynchronisation im oberen Alpha-Band (im Bereich von 10-12 Hz) ist hingegen topographisch begrenzter und zeigt sich während der Verarbeitung sensorisch-semantischer Information (Klimesch et al., 1992; 1994; 1996; 1997a,b,c). Es spricht daher primär auf jene kognitiven Prozesse an, die sich auf die Wahrnehmung und semantische Verarbeitung eines dargebotenen Stimulus beziehen. Bezüglich des Verhältnisses zwischen Desynchronisation im oberen Alpha-Band und Gedächtnisleistungen konnten diese Ergebnisse u.a. von Serman et al. (1996) repliziert werden. (Die meisten Studien, die Bandbreiten mit festen Frequenzgrenzen verwendeten, konnten dies allerdings nicht zeigen; z.B. Salenius et al., 1995).

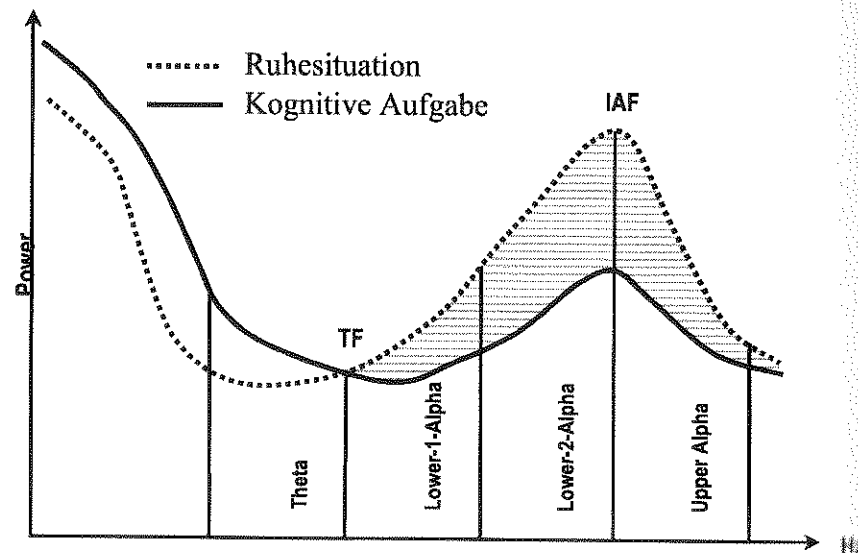


Abb. 1: Schematische Darstellung der funktionellen Bedeutung von Frequenzbändern im Bereich von 4-12 Hz. Ein idealisiert dargestelltes Power-Spektrum zeigt die erwarteten Ergebnisse: 1. Synchronisation (Power-Zunahme) im Theta-Band zeigt Vorgänge der Enkodierung oder des Abrufens neuer Information an. 2. Desynchronisation (Power-Abnahme) im unteren Alpha-Band geht mit Aufmerksamkeitsanforderungen einher. 3. Desynchronisation (Power-Abnahme) im oberen Alpha-Band tritt vor allem dann auf, wenn Information aus dem semantischen Gedächtnis abgerufen wird.

Befunde aus Studien zum hippokampalen Theta-Rhythmus bei Tieren zeigen, dass Theta-Power mit der Enkodierung neuer Information (vgl. die Übersichten in Miller, 1991; Buzsaki et al., 1994) und insbesondere mit episodischen Gedächtnisprozessen in Zusammenhang steht (Givens, 1996). Dazu ist anzumerken, dass eine Power-Zunahme im Theta-Band als Aktivierung interpretiert wird (im Gegensatz zum Alpha-Band). In einer Reihe von Experimenten konnte gezeigt werden, dass das Theta-Band auch in am menschlichen Skalp abgeleiteten EEG selektiv sowohl auf die Enkodierung neuer Information in das Arbeitsgedächtnis als auch auf das Abrufen frisch eingespeicherter Information aus dem Arbeitsgedächtnis (*Retrieval*) reagiert. Dieser Effekt wurde zuerst von Klimesch et al. (1994) belegt und konnte mittlerweile ausgeweitet (Klimesch et al., 1996; 1997a,c; Weiss & Rappelsberger, 1996; Gevins et al., 1997; 1998) und von anderen Forschergruppen repliziert werden (Burgess & Gruzelier, 1997).

Da zu den hier skizzierten Befunden ausführliche Reviews vorliegen (Klimesch, 1996; 1997), die vor allem in ihrer Bedeutung für Gedächtnis-

prozesse diskutiert werden (Klimesch, 1994), soll hier nicht weiter auf eine Darstellung der Ergebnisse eingegangen werden. Allerdings muss betont werden, dass für die Hypothesenbildung des durchgeführten Experimentes vor allem der Befund wichtig ist, dass eine ereignisbezogene Desynchronisation im oberen Alpha-Band das Abrufen sensorisch-semantischer Information widerspiegelt.

3. Versuchsplan und Hypothesen

3.1 Experimentgruppen

Die hier berichteten Ergebnisse stammen aus einer Untersuchung mit insgesamt drei Experimentalgruppen (das ursprüngliche Experiment beinhaltete fünf Experimentalgruppen, von denen die Ergebnisse zweier Gruppen anderweitig berichtet werden):

- Gruppe 1: syntaktisch gesteuerte Umordnung,
- Gruppe 2: semantisch gesteuerte Substitution,
- Gruppe 3: Belastung des Arbeitsgedächtnisses.

Der erste Teil diente dazu, EEG-Effekte der syntaktischen Sequenzierung in der Planung der Satzproduktion zu bestimmen. Der zweite Teil untersuchte die Aktivierung der mit der Semantikverarbeitung (und Lexikonsuche) verknüpften Prozesse. Im dritten Teil wurde als Kontrollexperiment die Belastung des Arbeitsgedächtnisses getestet, die durch das Wiedergeben eines zuvor gelesenen Satzes zustande kommt.

Das Testmaterial für die Teile eins bis drei bestand aus 54 deutschen Deklarativsätzen konstanter Länge und Konstruktion (je 27 mit einer Präpositionalphrase am Beginn bzw. einer Nominalphrase) und Übungssätzen zur Demonstration der Aufgabenstellung als Vorbereitung für die Probanden.

Bei der syntaktisch gesteuerten Umordnung (Experimentalgruppe 1) hatten die Probanden die Aufgabe, den jeweils vorgegeben Satz (1) umzuordnen (2), indem sie einen neuen Satzbeginn zu wählen hatten (alternative Vorfeldbesetzung). (Die Probanden wurden anhand des Einübungsmaterials entsprechend instruiert.) Die Sätze waren so gewählt, dass dafür nur eine mögliche Alternative bestand. (Hinweis zur deutschen Satzstruktur: Am Beginn des deutschen Deklarativsatzes befindet sich eine einzige Konstituente, gefolgt vom finiten Verb. Diese Konstituente ist hinsichtlich ihrer grammatischen Funktion nicht beschränkt. Zu einem Satz gibt es daher so viele alternative Varianten, wie es verfügbare Konstituenten für die Anfangsposition gibt.) Diese Aufgabe umfasst die grammatisch-getriebene

Identifikation der vorgegebenen Satzstruktur und die anschließende Planung und Produktion der neuen, alternativen Struktur. Da die Bedeutung des Satzes sich nicht ändert, blieb dieser Anteil der Verarbeitung konstant.

- (1) Vorgabe: *In dieser Kiste haben sich die Kaninchen versteckt.*
- (2) Ziel: *Die Kaninchen haben sich in dieser Kiste versteckt.*

Die einzige grammatische Variante zum Vorgabesatz (1) ist die Voranstellung von *die Kaninchen* an Stelle des Präpositionalausdrucks *in dieser Kiste*, da das Reflexivpronomen *sich* als nicht-referentielles Element für die erste Position nicht in Frage kommt. (Hinweis: Konstituenten in der Anfangsposition kommt eine besondere Funktion bei der Ermittlung der Informationsstruktur des Satzes zu. Nicht-referentielle Objekte sind für diese Position nicht zulässig. Daher fällt das Reflexivum als Kandidat für eine Vorstellungsalternative aus.) Das Verb könnte zwar prinzipiell vorangestellt werden, jedoch nur mit einem markierten Diskurseffekt (Fokussierung).

Bei der semantisch motivierten Substitution (Experimentalgruppe 2) bestand die Aufgabe darin, im vorgegebenen Satz (3) einen Ausdruck aus dem Mittelfeld durch seinen Oberbegriff zu ersetzen (4). So, wie in Gruppe 1, beinhaltet die Aufgabe sowohl die Identifikation der vorgegebenen Struktur als auch eines geeigneten Elements. Anders als in Gruppe 1 war jedoch keine syntaktische Umstellungsoperation erforderlich, sondern eine semantisch gesteuerte Recherche- und Substitutionsaktivität. Um das Zielitem durch einen geeigneten Oberbegriff zu ersetzen, muss ein Zugriff auf das Lexikon erfolgen, welches als Bestandteil des Langzeitgedächtnissystems (*long-term memory system*, LTMS) angesehen werden kann (Shiffrin & Geisler, 1973; Badeley, 1992).

- (3) Vorgabe: *In dieser Kiste haben sich die Kaninchen versteckt.*
- (4) Ziel: *In dieser Kiste haben sich die Tiere versteckt.*

Alternativ wäre prinzipiell auch die Ersetzung von *Kiste* zulässig. Allerdings wurden die Probanden im Trainingsdurchlauf vor den Experimenten angeleitet, Elemente aus dem Mittelfeld zu substituieren.

Das Lesen eines Satzes, verbunden mit einer Umformungsaufgabe (Planung) und der anschließenden Produktion, bedingt, dass der Satz vorübergehend im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden muss. Das reine Lesen und Wiedergeben eines Satzes unterscheidet sich beispielsweise von der in Gruppe 1 geforderten syntaktischen Umformungsaufgabe lediglich in der Planung und Produktion einer alternativen Struktur. Mit dieser zusätzlichen Kontrollaufgabe lässt sich daher die spezifisch syntaktische bzw. semantische Verarbeitungsaktivität aus Gruppe 1 bzw. Gruppe 2 differentiell bestimmen.

3.2 Hypothesen

Anders als bei vielen EEG-Untersuchungen zur Sprachverarbeitung (z.B. ERP-Experimenten mit grammatisch devianten Stimuli) wurden in diesem Experiment ausschließlich grammatikalisch korrekte Sätze getestet, aber in unterschiedlichen sprachlichen Verarbeitungsbedingungen (i.e. syntaktisch vs. semantisch-lexikalisch). Dadurch sollte gewährleistet werden, dass in der vergleichenden Analyse ausschließlich die spezifischen Sprachverarbeitungsaktivitäten differenziert werden.

Unter der Annahme, dass Sprachverarbeitungsaktivitäten spezialisierte kognitive Prozesse zugrunde liegen, wurde erwartet, dass in Abhängigkeit von der Verarbeitungsart (Abruf von gespeicherter Information, mentale Manipulation von sprachlichen Repräsentationen, Koordination von Subsystemen der sprachlichen Verarbeitung) unterschiedliche, jedoch frequenzspezifische Oszillationen (bandspezifische Aktivität) auftreten. (Simultan ausgelöste und miteinander interagierende, multiple fokale Aktivitäten erfordern eine Synchronisation, deren Zusammenspiel sich im Spektrum als frequenzspezifische Änderung auffinden lassen sollten.) Diese aufgabenspezifischen Anteile sollten sich aus der gesamten spektralen Aktivität filtern und zuordnen lassen, indem die spezifischen Aufgaben in Kombination miteinander und in Isolation voneinander getestet und intersektiv ausgewertet werden.

Bei semantischer Substitution muss auf semantische Information aus dem Lexikon zurückgegriffen werden. Auf Grund der Ergebnisse früherer Studien, die zeigten, dass sich sensorisch-semantisch gesteuerte Verarbeitungsprozesse im oberen Alpha-Band widerspiegeln, wurde erwartet, dass semantisch getriggerte Substitution zu einer stimulusbezogenen Desynchronisation im oberen Alpha-Band führt. Im Kontrollexperiment (Experimentalgruppe 3: Lesen und Wiedergeben eines Satzes) sowie bei syntaktischer Umformung sollte es hingegen zu keiner derartigen Desynchronisation im oberen Alpha-Band kommen, da für die Durchführung der Aufgaben das semantische Gedächtnis nicht aktiviert werden muss. Bezüglich der syntaktischen Umformung konnten, da noch keine einschlägigen Befunde vorliegen, keine spezifischen Hypothesen postuliert werden. Es wurde aber erwartet, dass sich syntaktisches Verarbeiten in einem anderen Frequenzband widerspiegelt.

Wie weiter oben bereits diskutiert, konnte in einer Reihe von Experimenten gezeigt werden, dass Theta-Band-Aktivierungen (Synchronisation) sowohl Enkodierungs- als auch *Retrieval*-Prozesse des Arbeitsgedächtnisses reflektieren. Da die Belastung des Arbeitsgedächtnisses für alle drei Aufgabentypen gleich sein sollte, wurde jeweils eine aufgabenabhängige Theta-Synchronisation erwartet, die jedoch keine aufgabenspezifische Differenzierung erlauben sollte.

3.3 Methodik und Stimulusmaterial

Versuchspersonen:

An der Untersuchung nahmen 22 Versuchspersonen im Alter von 19 bis 40 Jahren teil (8 m, $\bar{M} = 22,9$, $SD = 3,3$; 14 w, $\bar{M} = 23,8$; $SD = 4,4$). Die Probanden waren Studierende der Universität Salzburg, die für die Teilnahme geringfügig entlohnt wurden. Alle Versuchspersonen waren monolingual muttersprachlich Deutsch, ohne neurologische Auffälligkeiten und ohne akute Medikation (Befragung). Alle Versuchspersonen waren Rechtshänder.

Stimuli:

Als Testmaterial dienten 54 visuell präsentierte Deklarativsätze gleicher Länge (gemessen in Silben) mit je einer Präpositionalphrase und einer Nominalphrase. 27 Sätze mit der Präpositionalphrase und 27 mit der Nominalphrase am Satzanfang (geschlossene Satzklammer). Die Sätze wurden jeweils in vier *Chunks* präsentiert. Der erste *Chunk* enthielt das Subjekt (bzw. Objekt), der zweite das finite Verb und ein Reflexivum, der dritte das Objekt (bzw. Subjekt) und der vierte das Verb. Jeder *Chunk* wurde für 800 ms auf einem Computerbildschirm präsentiert (NeuroScan-STIM-System).

EEG-Registrierung:

Die EEG-Signale wurden mit einem 64-Kanal NeuroScan-Verstärker aufgezeichnet und mit einer Abtastrate von 250 Hz digitalisiert (Bandpassfilter 0,16-50 Hz). Es wurden insgesamt 58 gesinterte Silber/Silberchloridelektroden am Skalp angebracht (in Übereinstimmung mit dem erweiterten 10-20 System). Zusätzlich wurden zwei Mastoid-Elektroden (A1, A2) am linken und rechten Ohrfläppchen angebracht. Alle Signale wurden monopolar gegen eine gemeinsame Referenz (arithmetisches Mittel der Ohrfläppchen-signale $[A1+A2]/2$) abgeleitet. Außerdem wurde zur Artefakterkennung ein Elektrooculogramm (EOG) mit zwei Elektrodenpaaren bipolar aufgezeichnet, um horizontale und vertikale Augenbewegungen zu registrieren.

Während der Daten-Erhebung wurden die EEG-Signale *online* auf einem PC registriert und gespeichert. Alle Epochen des EEG wurden mittels visueller Kontrolle individuell auf Artefakte überprüft (Blinzeln, horizontale und vertikale Augenbewegungen, Muskelartefakte usw.). Die Datenverarbeitung wurde mit einem dafür entwickelten Matlab-Programm vorgenommen.

Versuchsablauf:

Während der Ableitung saßen die Versuchspersonen in einem bequemen Sessel ungefähr 1,4 Meter von einem Computerbildschirm entfernt. Der Laborraum wurde abgedunkelt; der Versuchsleiter war während des gan-

zen Versuchs im Raum anwesend. Die präsentierten *Chunks* erschienen in der Mitte eines Monitors; die Buchstabenhöhe betrug 3 cm, so dass ein Wort mit 10 Buchstaben ungefähr eine Länge von 23 cm hatte.

Die Versuchspersonen wurden anhand von Übungssätzen instruiert, direkt nach dem letzten *Chunk* eines Satzes die erwünschte Umformungsaufgabe durchzuführen und erst auf das Erscheinen eines Fragezeichens auf dem Bildschirm die Antwort zu verbalisieren (Vermeidung von Sprechartefakten im EEG). Das Aussprechen des umgeformten Satzes diente dabei lediglich als Kontrollbedingung für die erfolgte Durchführung der Aufgabe.

Der zeitliche Aufbau eines Trials umfasste folgende Abschnitte (für Experiment 1-3 identisch; vgl. Abbildung 2).

Nach einem Referenzintervall von 1000 ms am Beginn eines jedes Trials ertönte nach einer Pause von 300 ms für 300 ms ein Warnton (3000 Hz), um die Versuchsperson daran zu erinnern, die Mitte des Bildschirms zu fixieren. 600 ms nach Beginn des Warntons erschien der erste *Chunk* eines Satzes für 800 ms am Bildschirm, direkt gefolgt von der Präsentation der weiteren *Chunks* für jeweils 800 ms. Die *Stimulus-Onset-Asynchrony* (SOA) zwischen den einzelnen *Chunks* eines Satzes betrug 800 ms, wodurch die

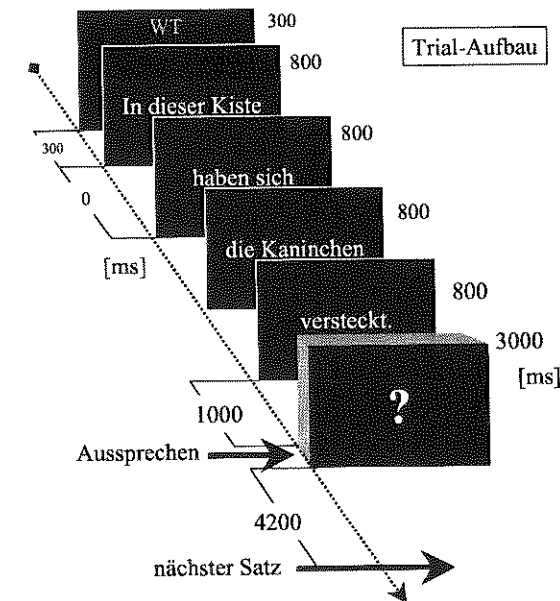


Abb. 2: Schematische Darstellung des Verlaufs der Satzpräsentation.

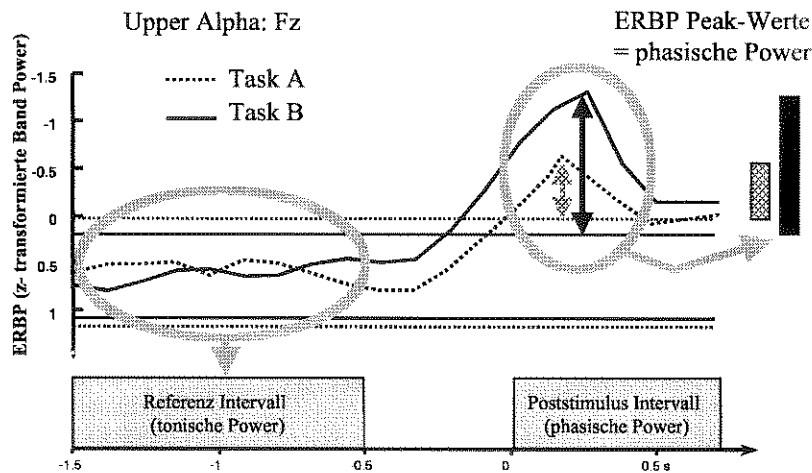


Abb. 3: Dargestellt sind die über mehrere Vpn gemittelten, bandpassgefilterten (Upper-Alpha) und z-transformierten ERBP-Werte für zwei unterschiedliche Aufgabentypen (Task A, Task B) für die Elektrodenposition Fz. Die aufgabenspezifische durchschnittliche (tonische) Power im Referenzintervall (1000 ms) dient zur Kalkulation der jeweiligen Konfidenzintervalle. Die Präsentation eines Stimulus führt gegenüber dem Referenzintervall zu einer Bandpower-Veränderung (phasische Power). Lediglich für die außerhalb des Konfidenzintervalls liegenden Werte wird – wie z.B. in Abbildung 4 – die Differenz zum Konfidenzintervall für jeden Zeitpunkt abgetragen (pro Bedingung und Lokation). Zu beachten ist, dass es sich hier im Poststimulus Intervall um eine Power-Abnahme handelt (negative ERBP-Werte).

Darbietungszeit eines Satzes (bei 4 *Chunks* pro Satz) 3200 ms dauerte. Nach *Offset* des letzten *Chunks* hatte die Versuchsperson 1000 ms für die Durchführung der Umformungsaufgabe zur Verfügung. Daraufhin erschien für 3000 ms ein Fragezeichen auf dem Bildschirm, welches als Signal für das Aussprechen des Satzes fungierte, gefolgt von einer Pause von 2900 ms bis zum Beginn des folgenden Trials. Die Länge eines Trials betrug 12 Sekunden. Die Darbietung der einzelnen Experimentgruppen erfolgte als Blockdesign. (Dies geschah zum einen aus Parallelitätsgründen: mit demselben Stimulusmaterial wurde ein kooperierendes fKST-Experiment an der Universitäten Stuttgart, Tübingen und Salzburg durchgeführt (vgl. Dogil et al., 2002). Zum anderen wurde erwartet, dass sich insbesondere hoch-automatisierte sprachliche Verarbeitungsprozesse (die unabhängig von Gewöhnungseffekten auftreten) innerhalb eines Blockdesigns besser isolieren lassen.) Am Beginn und Ende einer experimentellen Sitzung wurden je zwei Ruhe-EEGs abgeleitet (mit geschlossenen sowie mit geöffneten Au-

gen). Diese dienten als Berechnungsgrundlage für die Bestimmung der individuellen Alpha-Frequenz (IAF) (vgl. Abschnitt 2.3).

4. Ergebnisse

Auf der Basis der Ergebnisse von Klimesch et al. (vgl. für eine detaillierte Übersicht: Klimesch, 1996; 1997) wurde erwartet, dass die semantische Verarbeitung eines präsentierten Stimulus sich in einer Desynchronisation im oberen Alpha-Band (10-12 Hz) widerspiegelt, während sich im unteren Alpha-Band (6-10 Hz) primär phasische Veränderungen der Aufmerksamkeit (wie etwa als Reaktion auf ein Warnsignal oder ausgelöst durch Antizipation) zeigen. Tatsächlich fand sich für die lexikalisch-semantische Substitutionsaufgabe eine gegenüber den Kontrollbedingungen signifikant höhere Desynchronisation im oberen Alpha-Band (vgl. Abbildung 4). (Sowohl gegenüber der syntaktischen Umstellungsoperation als auch im Vergleich zur Kontrollaufgabe (Lesen und Wiedergeben)).

Trotz dieses Ergebnisses (d.h. obere Alpha-Desynchronisation in Korrelation mit semantischer Verarbeitung) erscheint es allerdings höchst unwahrscheinlich, dass dieser Effekt als das Resultat spezifisch linguistischer Verarbeitungsaktivitäten angesehen werden kann. Ergebnisse nicht-linguistischer Experimente legen vielmehr die Interpretation nahe, dass sich im oberen Alpha-Band eher semantische Prozesse generellerer Art widerspiegeln. Um die mögliche funktionale Rolle oszillatorischer Prozesse im oberen Alpha-Bereich klären zu können, ist es daher notwendig, semantische Verarbeitung mit geeigneten Kontrollaufgaben zu kontrastieren, die eine Separation der einzelnen Verarbeitungsebenen erlauben. Für die anderen Alpha-Bänder (*Lower-1-Alpha* ~[6-8 Hz], *Lower-2-Alpha* ~[8-10 Hz]) zeigten sich keinerlei Unterschiede zwischen den jeweiligen Aufgabentypen; jedoch konnten die aus vorausgegangenen Experimenten bekannten Effekte repliziert werden (unspezifische Aufmerksamkeit, Erwartung usw.; vgl. Klimesch et al., 1998).

Obwohl reichlich Evidenz für die Annahme vorhanden ist, dass Theta-Synchronisation mit Beanspruchungen des Kurzzeitgedächtnisses einhergeht (Gevins et al., 1997; Basar, 1998; Klimesch, 1999), wurde in jüngster Zeit die Hypothese vorgeschlagen, dass eine ereigniskorrelierte Zunahme von Theta-Oszillationen eher sprachliche Prozesse anstatt Prozesse des Kurzzeitgedächtnisses (*short-term memory*, STM) reflektiert (Bastiaansen et al., 2001).

In der Nomenklatur der Kognitiven Psychologie (Baddeley, 1992) wird STM als ein Subsystem eines komplexen Arbeitsgedächtnissystems (*working memory system*, WMS) betrachtet. Da in unserem Experiment sowohl

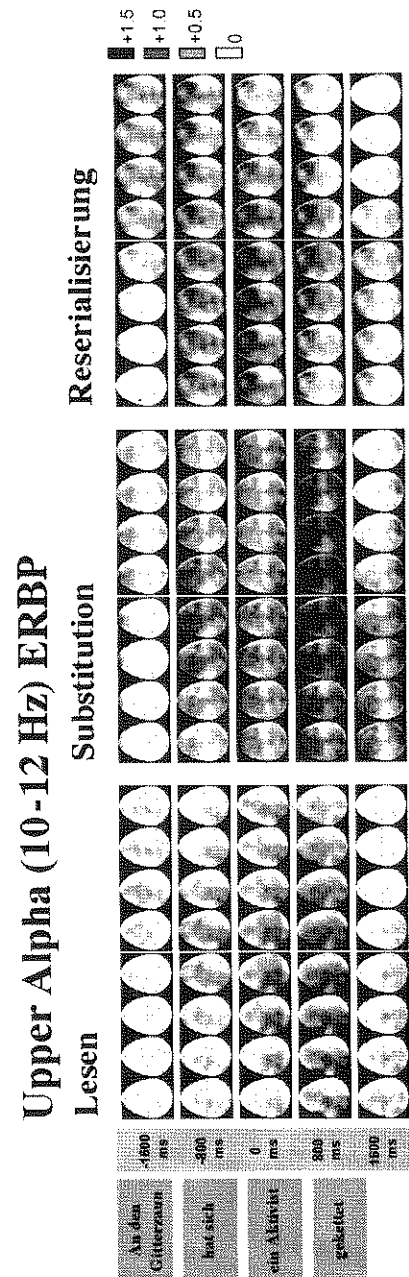


Abb. 4. Die topographischen Maps zeigen z-transformierte ERBP-Veränderungen bezüglich eines Referenzintervalls von 1000 ms (der Präsentation eines Warnsignals um 300 ms vorausgehend). Die z-Werte entsprechen der Farbskala und indizieren das Ausmaß der das Konfidenzintervall überschreitenden Bandpower-Veränderung (vgl. Abbildung 3). Für das obere Alpha-Band bedeuten dunklere Bereiche eine Abnahme der ERBP. Die Sätze wurden in vier aufeinanderfolgenden *Chunks* präsentiert. Jede Reihe mit acht Maps repräsentiert einen *Chunk*. Jede Map umfasst ein Zeitfenster von 100 ms. Der erste *Chunk* wurde 1600 ms vor Erscheinen des Ziel-*Chunks* (0 ms) präsentiert.

die Beanspruchung des STM als auch des WMS zwischen den experimentellen Bedingungen konstant gehalten wurde, wohingegen die linguistischen Prozessanforderungen variierten, konnte die Frage untersucht werden, ob eine ereigniskorrelierte Zunahme im Theta-Band per se linguistische Prozesse widerspiegelt (Röhm et al., 2001).

Die Ergebnisse (vgl. Abbildung 5) unterstützen klar die Hypothese, dass sowohl semantisches *Retrieval* im Sinne eines automatischen Prozesses zur Auffindung eines übergeordneten Konzepts (Hyperonym) als auch die syntaktisch gesteuerte Umstellungsoperation keine selektive Belastung der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zur Folge haben.

Sowohl der Zeitverlauf als auch das Ausmaß der Theta-Bandpower-Veränderungen waren für alle linguistischen Aufgabenstellungen ähnlich. Daraus schließen wir, dass sich im Theta-Band generelle Verarbeitungsanforderungen eines komplexen Arbeitsgedächtnissystems widerspiegeln und sich keine spezifischen linguistischen Verarbeitungsprozesse in diesem Frequenzband zeigen.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen für die unteren Frequenzbänder, in denen sich keinerlei spezifischen linguistischen Prozesse nachweisen ließen, zeigten sich im Bereich des unteren Beta-Bandes (Beta 2: 14-16 Hz) klare Korrelationen. Nur in diesem Frequenzband konnte ein höchst selektiver Reflex der lexikalisch-semantischen Substitutionsaufgabe gefunden werden, sowohl was die räumliche Zuordnung als auch was den Zeitverlauf des Effekts betrifft (vgl. Abbildung 6).

Weitere Evidenz für die Hypothese, dass sich spezifische linguistische Verarbeitungsaktivitäten in den höheren Frequenzbereichen widerspiegeln könnten, liefern Experimente von Klimesch et al. (2001).

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass sich die hier gefundenen aufgabenspezifischen Bandpower-Abnahmen in den höheren Frequenzbändern (*Upper*-Alpha, Beta-2) nicht auf evozierte Anteile zurückführen lassen. Vergleicht man die ERD mit der um den evozierten Anteil reduzierten ITV (s. Abbildung 7), zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Maßen (lediglich in Reaktion auf die Präsentation des Warntones findet sich ein geringer aufgabenunspezifischer evozierter Anteil).

Dies gilt auch für die Berechnung der IBP im Gegensatz zur ERBP (s. Abbildung 8).

Theta (4-6 Hz) ERBP

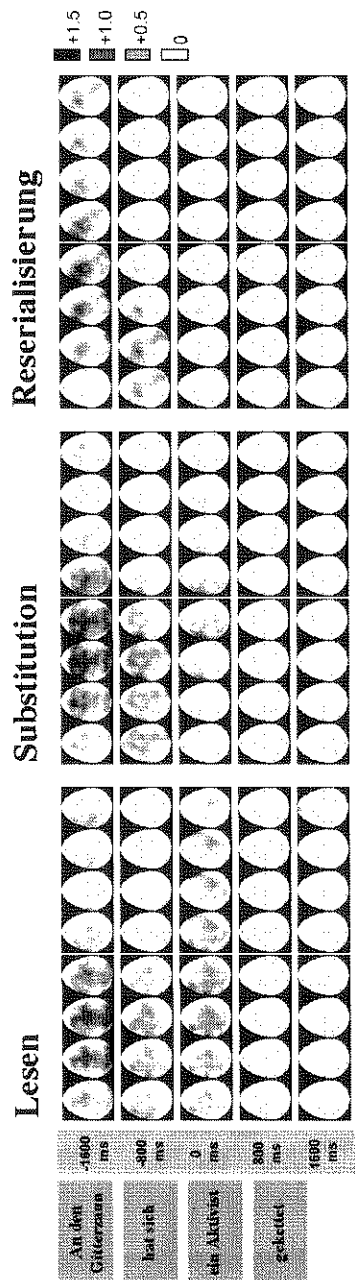


Abb. 5: Legende s. Abbildung 4; für das Theta-Band zeigen dunklere Bereiche eine Zunahme der ERBP an.

Beta 2 (14-16 Hz) ERBP

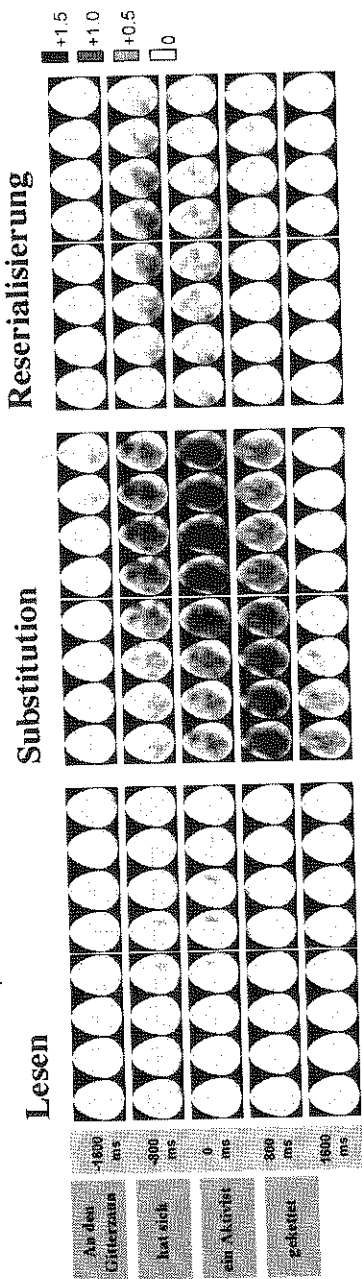


Abb. 6: Legende wie Abbildung 4; für das Beta-Band (wie für das obere Alpha-Band) zeigen dunklere Bereiche eine Abnahme der ERBP.

Für die syntaktische Umstellungsaufgabe konnten keine bestimmten Hypothesen bezüglich etwaiger frequenzbandspezifischer Aktivierungen formuliert werden, da diese Fragestellung bisher noch nicht in der vorliegenden Form untersucht wurde. Dennoch wurde erwartet, dass sich syntaktische Verarbeitung eher in höheren Frequenzbändern (über dem Alpha-Band) zeigen sollte. Bis jetzt konnten jedoch keine spezifischen Korrelate der syntaktischen Umstellungsaufgabe gefunden werden, weder im Beta-1- (12-14 Hz) noch im Beta-2-Band (14-16 Hz). Allerdings steht eine genauere Untersuchung im höheren Beta- und Gamma-Bereich noch aus.

Obwohl in einigen wenigen EEG-Studien ein Zusammenhang zwischen komplexer Sprachverarbeitung und oszillatorischer Aktivität in höheren Frequenzbändern (z.B. Pulvermüller, 1998), insbesondere im unteren Beta-Bereich, gefunden werden konnte und diese Befunde von Ergebnissen aus Kohärenzstudien gestützt werden (z.B. Weiss et al., 1997), gibt es zur Zeit keine systematischen Untersuchungen hochfrequenziger Oszillationen in Kombination mit Sprachverarbeitung.

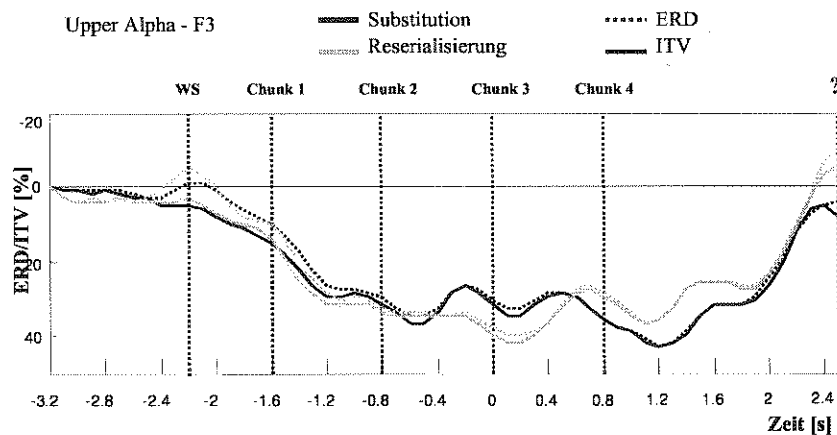


Abb. 7: Dargestellt ist der Verlauf der ERD bzw. ITV (in Prozent) im Upper-Alpha für die Aufgaben "Substitution" (schwarz) und "Reserialisierung" (grau). Die punktierte Linie zeigt jeweils den Verlauf der ERD, die durchgezogene Linie den der ITV. Positive Werte stehen für eine Desynchronisation (Power-Abnahme), wohingegen negative Werte Synchronisation (Power-Zunahme) bedeuten. Zu beachten ist, dass es bis auf eine minimale Power-Zunahme (ERD) in Reaktion auf die Präsentation des Warnsignals keinen signifikanten Unterschied zwischen ERD und ITV für die dargestellten Versuchsbedingungen gibt. Das heißt, dass die aufgabenspezifischen Bandpower-Änderungen im Upper-Alpha keinen signifikanten evozierten Anteil beinhalten.

Beta 2 (14-16 Hz) - Substitution

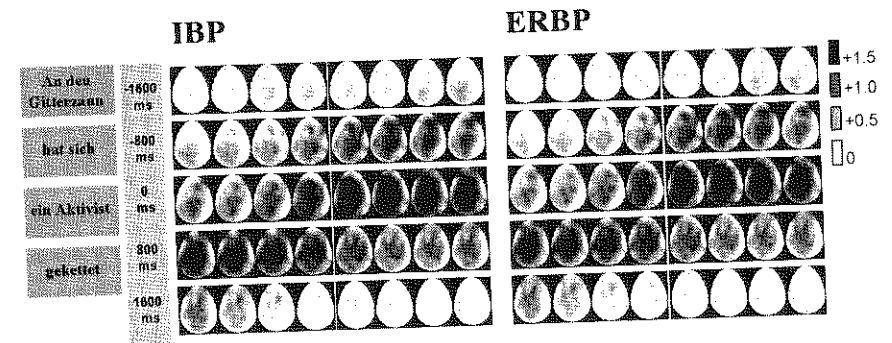


Abb. 8: Legende wie Abbildung 4; für das Beta-2-Band (wie für das obere Alpha-Band) zeigen dunklere Bereiche eine Abnahme der ERBP. Zu beachten ist, dass die hier für die semantisch motivierte Substitution im Beta-2-Band dargestellten topographischen Maps keinerlei Unterschied zwischen ERBP und IBP zeigen. Sowohl der Verlauf als auch das Ausmaß der Aktivierung sind für beide Berechnungsmethoden identisch. Auch für das Beta-2-Band gilt daher im Rahmen dieses Experimentes: es findet sich kein signifikanter evozierter Anteil.

5. Diskussion

Ein wesentliches Ziel der durchgeführten Experimente war zu zeigen, dass frequenzbandanalytische Methoden erfolgreich zur Untersuchung von Sprachverarbeitungsaktivitäten (als spezialisierte kognitive Prozesse) angewendet werden können. Insbesondere wurde erwartet, dass sich je nach Verarbeitungsaufgabe unterschiedliche, jedoch frequenzspezifische Oszillationen zeigen, die aus der gesamten spektralen Aktivität gefiltert und den jeweiligen aufgabenspezifischen Anteilen zugeordnet werden können.

Dieser grundlegende Aspekt des gewählten Paradigmas hat sich in den durchgeführten Experimenten auf eindrucksvolle Weise bestätigen lassen (vgl. Röhm et al., 2001). Es zeigten sich nicht nur die mit komplexen kognitiven Aufgaben einhergehenden bereits bekannten unspezifischen Bandpower-Änderungen wie erwartet (generelle Aufmerksamkeits- und Erwartungseffekte, Belastung des Arbeitsgedächtnisses). Auch die hypothetisierten spezifischen Bandpower-Änderungen konnten eindeutig nachgewiesen werden.

Da sowohl im Upper-Alpha- als auch im Beta-2-Band keine signifikanten evozierten Anteile vorhanden waren, gehen die gefundenen Bandpower-Änderungen notwendigerweise auf induzierte Aktivitätsänderungen zurück. Das entscheidende Argument ist nun, dass induzierte Anteile mit

der ERP-Methode nicht erfasst werden können, da sie in keiner fixen zeitlichen Relation zum auslösenden Ereignis stehen. Daher kann lediglich ein methodischer Zugang, der sowohl die evozierten als auch die induzierten frequenzspezifischen Aktivitätsänderungen (in Kombination und isoliert voneinander) zu erfassen vermag, einer umfassenden Analyse der EEG-Aktivität im Zusammenhang mit höheren kognitiven Verarbeitungsprozessen gerecht werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass gezielte linguistische Verarbeitungsaktivitäten Korrelate in oszillatorischen Aktivitätsmustern aufweisen, die nicht mit der Methode der ERPs erfasst werden können. Auf der einen Seite korreliert eine Desynchronisation im oberen Alpha- und insbesondere im Beta-2-Band mit (sensorisch)-semantischer Verarbeitung. Auf der anderen Seite schlägt sich semantische Verarbeitung nicht in der generellen Auslastung des Arbeitsgedächtnisses nieder (keine Theta-Band spezifischen Synchronisationen).

Eine der zur Zeit offenen Fragen betrifft die funktionale Bedeutung des oberen Alpha-Bandes für semantische und syntaktische Prozesse. Die ursprüngliche Annahme war, dass das obere Alpha-Band eine Unterscheidung zwischen semantischen und syntaktischen Verarbeitungsprozessen erlaubt. Es wurde vermutet, dass sich Prozesse, die im Zusammenhang mit linguistisch-semantischer Verarbeitung stehen, im oberen Alpha-Band widerspiegeln. Bisher wurden jedoch nur Experimente durchgeführt, die linguistisch-semantische Verarbeitung ausschließlich mit syntaktischer Verarbeitung kontrastieren. Es ist daher im Weiteren notwendig, Experimente durchzuführen, die eine genauere Unterscheidung dieser zwei Verarbeitungstypen erlauben. Desgleichen ist eine systematische Untersuchung höherer Frequenzbänder in Bezug auf sprachspezifische Verarbeitungsaktivitäten nötig.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert mit Mitteln des Österreichischen "Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung", Projekt P-13748/SPR.

6. Literatur

- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556-559.
 Basar, E. (1997). Towards a renaissance of 'alphas'. *International Journal of Psychophysiology*, 26, 1-3.
 Basar, E. (1998). *Brain function and oscillations. I: Brain oscillations. Principles and approaches*. Berlin: Springer.

- Bastiaansen, M. C. M., van Berkum, J. J. A. & Hagoort, P. (2001). Event-related theta responses in the human EEG differentiate between gender and number agreement violations during on-line sentence processing. *CNS 8th annual meeting. Abstract guide*, p. 167.
 Bornkessel, I., Schlesewsky, M. & Friederici, A. D. (im Druck). Eliciting thematic reanalysis effects: On the importance of structure-independent information during parsing. *Language and Cognitive Processes*.
 Burgess, A. P. & Gruzelić, J. H. (1997). Short duration synchronization of human theta rhythm during recognition memory. *NeuroReport*, 8, 1039-1042.
 Buzsáki, G., Bragin, A., Chrobak, J. J., Nadasdy, Z., Sik, A., Hsu, M. & Ylinen, A. (1994). Oscillatory and intermittent synchrony in the hippocampus: Relevance to memory trace formation. In G. Buzsáki, R. R. Llinás, W. Singer, A. Berthoz & Y. Christen (Eds.), *Temporal coding in the brain* (pp. 145-172). Berlin: Springer-Verlag.
 Dogil, G., Ackermann, H., Grodd, W., Haider, H., Kamp, H., Mayer, J., Riecker, A. & Wildgruber, D. (2002). The speaking brain: A tutorial introduction to fMRI experiments in the production of speech, prosody and syntax. *Journal of Neurolinguistics*, 15, 1-90.
 Friederici, A. D., Hahne, A. & von Cramon, D. Y. (1998). First-pass versus second-pass parsing processes in a Wernicke's and a Broca's aphasic: Electrophysiological evidence for a double dissociation. *Brain and Language*, 62, 311-341.
 Frisch, S. (2000). *Verb-Argument, Kasus und thematische Interpretation beim Sprachverstehen*. Leipzig: MPI Series in Cognitive Neuroscience.
 Galin, D., Raz, J., Fein, G., Johnstone, J., Herron, J. & Yingling, C. (1992). EEG spectra in dyslexic and normal readers during oral and silent reading. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82, 87-101.
 Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L. & Yu, D. (1997). High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: Effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cerebral Cortex*, 7, 374-385.
 Gevins, A., Smith, M. E., Leong, H., McEvoy, L., Whitfield, S., Du, R. & Rush, G. (1998). Monitoring working memory load during computer-based tasks with EEG pattern recognition methods. *Human Factors*, 40, 79-91.
 Giannitrapani, D. & Murri, L. (1988). *The EEG of mental activities*. Basel: Karger.
 Givens, B. (1996). Stimulus-evoked resetting of the dentate theta rhythm: Relation to working memory. *NeuroReport*, 8, 159-163.
 Hagoort, P., Brown, C. M. & Osterhout, L. (1999). The neurocognition of syntactic processing. In C. M. Brown & P. Hagoort (Eds.), *The neurocognition of language* (pp. 273-316). Oxford: Oxford University Press.
 John, E. R. & Pritchard, L. (1993). Principles of neurometric analysis of EEG and evoked potentials. In E. Niedermeyer & F. H. Lopes da Silva (Eds.), *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields* (pp. 989-1004). Baltimore: Williams and Wilkins.
 Kalcher, J. & Pfurtscheller, G. (1995). Discrimination between phase-locked and non-phase locked event-related EEG activity. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 94, 381-384.
 Kaufman, L., Schwartz, B., Salustri, C. & Williamson, S. J. (1989). Modulation of spontaneous brain activity during mental imagery. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2, 124-132.
 Klimesch, W. (1994). *The structure of long-term memory: A connectivity model for semantic processing*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
 Klimesch, W. (1996). Memory processes, brain oscillations and EEG synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, 24, 61-100.

- Klimesch, W. (1997). EEG-alpha rhythms and memory processes. *International Journal of Psychophysiology*, 26, 319-340.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Review*, 29, 169-195.
- Klimesch, W., Pfurtscheller, G., Schimke, H. (1992). Pre- and poststimulus processes in category judgement tasks as measured by event-related desynchronization (ERD). *International Journal of Psychophysiology*, 6, 186-203.
- Klimesch, W., Schimke, H. & Pfurtscheller, G. (1993). Alpha frequency, cognitive load and memory performance. *Brain Topography*, 5, 241-251.
- Klimesch, W., Schimke, H. & Schwaiger, J. (1994). Episodic and semantic memory: An analysis in the EEG-theta and alpha band. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 91, 428-441.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Schimke, H. & Pachinger, T. (1996). Alpha frequency, reaction time and the speed of processing information. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 13, 511-518.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Pachinger, T. & Ripper, B. (1997a). Brain oscillations and human memory performance: EEG correlates in the upper alpha and theta bands. *Neuroscience Letters*, 238, 9-12.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Pachinger, T. & Russegger, H. (1997b). Event-related desynchronization in the alpha band and the processing of semantic information. *Cognitive Brain Research*, 6, 83-94.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Schimke, H. & Ripper, B. (1997c). Theta synchronization in a memory task. *Psychophysiology*, 34, 169-176.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Russegger, H., Pachinger, T. & Schwaiger, J. (1998a). Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neuroscience Letters*, 244, 73-76.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Wimmer, H., Gruber, W., Röhm, D., Schwaiger, J. & Hutzler, F. (2001). Alpha and beta band power changes in normal and dyslectic children. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1186-1195.
- Klimesch, W., Pfurtscheller, G., Mohl, W. & Schimke, H. (1990). Event-related desynchronization, ERD-mapping and hemispheric differences for words and numbers. *International Journal of Psychophysiology*, 8, 297-308.
- Klimesch, W., Russegger, H., Doppelmayr, M. & Pachinger, T. (1998b). Induced and evoked band power changes in an oddball task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 108, 123-130.
- Kutas, M. (1997). Views on how the electrical activity that the brain generates reflects the functions of different language structures. *Psychophysiology*, 34, 383-398.
- Kutas, M. & Hillyard, S. A. (1980a). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic anomaly. *Science*, 207, 203-205.
- Kutas, M. & Hillyard, S. A. (1980b). Event-related brain potentials to semantically inappropriate and surprisingly large words. *Biological Psychology*, 11, 99-116.
- Kutas, M. & Hillyard, S. A. (1980c). Reading between the lines: Event-related brain potentials during natural sentence processing. *Brain and Language*, 11, 354-373.
- Kutas, M. & Hillyard, S. A. (1983). Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory and Cognition*, 11, 539-550.
- Kutas, M. & Hillyard, S. A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature*, 307, 161-163.
- Lisman, J. E. & Idiart, M. A. P. (1995). Storage of 7 +/- 2 short-term memories in oscillatory subcycles. *Science*, 267, 1512-1515.
- Lopes da Silva, F. (1987). Event-related potentials: Methodology and quantification. In E. Niedermeyer & F. Lopes da Silva (Eds.), *Electroencephalography. Basic principles,*

- clinical applications and related fields* (pp. 763-772). München: Urban & Schwarzenberg.
- Miller, R. (1991). *Cortico-hippocampal interplay and the representation of contexts in the brain*. Berlin, Heidelberg & New York: Springer.
- Müller, H. M., Weiss, S. & Rappelsberger, P. (1997). EEG coherence analysis of auditory sentence processing. In H. Witte, U. Zwiener, B. Schlack & A. Doering (Eds.), *Quantitative and Topological EEG and MEG analysis* (pp. 429-431). Jena: Druckhaus Mayer.
- Neville, H. J., Kutas, M., Chesney, G. & Schmidt, A. L. (1986). Event-related brain potentials during initial encoding and recognition memory of congruous and incongruous words. *Journal of Memory and Language*, 25, 75-92.
- Pfurtscheller, G. (1992). Event-related synchronization (ERS): An electrophysiological correlate of cortical areas at rest. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 83, 62-69.
- Pfurtscheller, G. & Aranibar, A. (1977). Event-related cortical desynchronization detected by power measurements of scalp EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 42, 817-826.
- Pfurtscheller, G. & Klimesch, W. (1990). Topographical display and interpretation of event-related desynchronization during a visual-verbal task. *Brain Topography*, 3, 85-93.
- Pfurtscheller, G., Stancak, A. & Neuper, C. (1996). Event-related synchronization (ERS) in the alpha band - An electrophysiological correlate of cortical idling. A review. *International Journal of Psychophysiology*, 24, 39-46.
- Pulvermüller, F. (1998). Words in the brain's language. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 253-336.
- Rappelsberger, P., Lacroix, D. & Petsche, H. (1993). Amplitude and coherence mapping: Its application in psycho- and pathophysiological studies. In M. Rother & U. Zwiener (Eds.), *Quantitative EEG analysis - Clinical utility and new methods*. (pp. 179-186). Jena: Universitätsverlag.
- Röhm, D., Klimesch, W., Haider, H. & Doppelmayr, M. (2001). The role of theta and alpha oscillations for language comprehension in the human electroencephalogram. *Neuroscience Letters*, 310, 137-140.
- Rösler, F., Pechmann, T., Streb, J., Röder, B. & Hennighausen, E. (1998). Parsing of sentences in a language with varying word order: Word-by-word variations of processing demands are revealed by event-related brain potentials. *Journal of Memory and Language*, 38, 150-176.
- Salenius, S., Kajola, M., Thompson, W. L., Kosslyn, S. & Hari, R. (1995). Reactivity of magnetic parieto-occipital alpha rhythm during visual imagery. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 95, 453-462.
- Sayers, B., Beagley, H. A. & Hanshall, W. R. (1974). The mechanisms of auditory evoked EEG responses. *Nature*, 247, 481-483.
- Schlesewsky, M. (2001). Die thematische Natur morphologischer Kasus: Beobachtungen und Konsequenzen. Habilitationsschrift, Universität Potsdam.
- Shaw, J. C. (1996). Intention as component of the alpha-rhythm response to mental activity. *International Journal of Psychophysiology*, 24, 7-23.
- Shiffrin, R. M. & Geisler, W. S. (1973). Visual recognition in a theory of information processing. In R. L. Solso (Ed.), *Contemporary issues in cognitive psychology* (pp. 53-101). The Loyola Symposium, Washington.
- Sterman, M. B., Kaiser, D. A. & Veigel, B. (1996). Spectral analysis of event-related EEG responses during short-term memory performance. *Brain Topography*, 9, 21-30.

- von Stein, A., Chiang, C. & König, P. (2000). Top-down processing mediated by inter-areal synchronization. *PNAS*, 97, 14748-14753.
- Weiss, S. (1997). EEG-Kohärenz und Sprachverarbeitung: Die funktionelle Verkopplung von Gehirnregionen während der Verarbeitung unterschiedlicher Nomina. In G. Rickheit (Ed.), *Studien zur Klinischen Linguistik – Modelle, Methoden, Intervention* (pp. 125-146). Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Weiss, S. & Rappelsberger, P. (1996). EEG coherence within the 13-18 Hz band as a correlate of a distinct lexical organisation of concrete and abstract nouns in humans. *Neuroscience Letters*, 209, 17-20.
- Weiss, S. & Rappelsberger, P. (1998). Left frontal EEG coherence reflects modality independent language processes. *Brain Topography*, 11, 33-42.
- Weiss, S., Müller, H. M. & Rappelsberger, P. (1997). Processing concepts and scenarios: Electrophysiological findings on language representation. In A. Riegler, M. Peschl & A. v. Stein (Eds.), *Understanding representation in the cognitive sciences* (pp. 237-245). New York: Plenum Press.

Sprachliches Lernen und synaptische Aktivität im Schläfenlappen des Menschen

Thomas Grunwald

Um uns mit Wörtern verständigen zu können, müssen wir über diese verfügen; das heißt, wir müssen sie gelernt haben, und sie müssen in irgendeiner Weise Teil unseres Gedächtnisses sein. Umgekehrt vollzieht sich ein Großteil unseres Lernens in Sprache, und das Gelernte ist uns sprachlich zugänglich. Dass Sprach- und Gedächtnisprozesse des Menschen eng miteinander verknüpft sind, wird uns schmerzhaft klar, wenn ihre Störung die Lebensqualität beeinträchtigt. Andererseits sind es gerade solche Störungen des Verbalgedächtnisses, die uns Einsichten in die Mechanismen sprachlichen Lernens ermöglichen.

In diesem Kapitel werden wir nicht fragen, wo im Gehirn Wissen in (und über) Sprache zu suchen sein könnte. Gefragt werden soll vielmehr, ob wir Spuren der Hirnaktivität identifizieren können, die es ermöglicht, dass wir ein Wort, einen Namen oder einen Begriff lernen und uns später daran erinnern können. Dabei werden wir Patienten mit einer Temporallappen-Epilepsie (TLE) begegnen, denen intrakranielle Elektroden unmittelbar auf die Gehirnoberfläche oder in die mesialen Anteile der Schläfenlappen implantiert wurden, um die Möglichkeit einer operativen Behandlung abzuklären. Und wir werden es wagen, einen Brückenschlag von der Neuropsychologie verbaler Gedächtnisprozesse hin zu ihren zellphysiologischen Korrelaten zu versuchen.

1. Temporallappen-Epilepsien und die Gedächtnissysteme des Menschen

Ein epileptischer Anfall entsteht durch pathologische synchrone Entladungen kortikaler Neuronen. Auch bei gesunden Menschen kann dies z.B. durch einen Schlafentzug oder durch bestimmte Medikamente und Drogen provoziert werden. Erst wenn es ohne eine solche Provokation zu wiederholten Anfällen kommt, spricht man von einer Epilepsie. Manche Anfälle betreffen unmittelbar beide Gehirnhälften, während andere von einem umgrenzten Fokus innerhalb des Gehirns ausgehen und z.T. auch auf die-