

## Elektrophysiologische Analyse der Verarbeitung natürlichsprachlicher Sätze mit unterschiedlicher Belastung des Arbeitsgedächtnisses

H. M. Müller<sup>1,3</sup>, J. W. King<sup>1</sup>, Marta Kutas<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Cognitive Science, University of California at San Diego, USA

<sup>2</sup> Department of Neurosciences, University of California at San Diego, USA

<sup>3</sup> AG Experimentelle Neurolinguistik, Universität Bielefeld

**Electrophysiological Analysis of Spoken Sentence Processing as a Function of Working Memory Requirements:** The processing of 216 naturally spoken sentences, especially of sentences containing relative clauses of differing complexities, was investigated by an event-related potential (ERP) analysis with 24 participants. The ERP data provided information both on the timing and the intensity of processes involved in spoken language comprehension. The onset and offset of different relative clause types is visible in the ERP waveforms, and the complexity of the relative clause modulates the amplitude of a slow negative potential over frontal and central electrode sites. The time course of this latter effect reflects that of the expected demands made on working memory, and its scalp distribution is consistent with neural generators in the frontal and temporal cortex which are suggested to be vitally important for working memory function during language processing. This interpretation is also supported by sentence comprehension data in that the subjects who showed better comprehension also showed larger sentence type effects. We thus have evidence that differences in sentence complexity can have electrophysiologically measurable effects on working memory usage during spoken language processing.

**Key words:** Cognition - Language - Auditory language processing - Relative clause - Event-related potential (ERP) - Working memory

**Zusammenfassung:** Anhand der Analyse ereigniskorrelierter Potentiale (EKP) von 24 Versuchspersonen wurde die Verarbeitung von 216 natürlichsprachlichen Sätzen und Relativsätzen mit unterschiedlicher Komplexität untersucht. Die ermittelten EKP reflektieren sowohl den Zeit- als auch den Intensitätsverlauf von Prozessen, die der Sprachverarbeitung zugrundeliegen. Dabei sind nicht nur Anfang und Ende der Relativsatzeinbettungen, sondern auch deren unterschiedliche Komplexität anhand des Amplitudenverlaufes eines langsamen negativen Potentials an den frontalen und zentralen Ableitorten festzustellen. Das Zeitverhalten dieses langsamen Potentials spiegelt die erwartete Belastung des Arbeitsgedächtnisses und läßt vermuten, daß die ihm zugrundeliegenden neuronalen Generatoren im frontalen und temporalen Kortex für das Arbeitsgedächtnis von entscheidender Bedeutung für die Sprachverarbeitung sind. Weitere Belege für diese Vermutung lieferte eine Satzverständnisprüfung, in der Versuchspersonen mit höherem

Satzverständnis auch höhere Satztyp-Effekte aufweisen. Es konnte somit gezeigt werden, daß mit einer elektrophysiologischen Methode die jeweilige Belastung des Arbeitsgedächtnisses während der Verarbeitung unterschiedlich komplexer, natürlichsprachlicher Sätze erfaßt werden kann.

### Einleitung

Die Suche nach physiologischen Parametern zur Untersuchung der Sprachverarbeitungsprozesse ist eine der bedeutendsten Aufgaben der kognitiven Neurowissenschaft. Ein erweitertes Verständnis der hirnelektrophysiologischen Abläufe während des Verstehens, der Planung und der Produktion von Sprache hätte nicht nur große Auswirkungen auf die Diagnose und Therapie zentraler Sprachdefekte im klinischen Alltag, sondern auch auf anwendungsorientierte Bereiche der kindlichen Sprachentwicklung und des Fremdspracherwerbs.

Höhere kognitive Prozesse führen zu Aktivitätsveränderungen von Bereichen der Hirnrinde, die mit nicht-invasiven elektrophysiologischen Ableitetechniken wie dem EEG erfaßt werden können. Auch die Verarbeitung von Sprache kann anhand ihrer zugrundeliegenden physiologischen Prozesse der Hirnrinde über die Analyse ereigniskorrelierter Potentiale im EEG untersucht werden. Zwar kann die EKP-Analyse von Sprachverarbeitungsprozessen auf eine weit über zwei Jahrzehntelange Entwicklung zurückblicken [29], dennoch sind bislang häufig Untersuchungen lediglich auf der Phonem- oder Wortebene durchgeführt worden. Weiterhin basieren frühere Studien größtenteils auf Leseexperimenten mit visueller, wortweiser Darbietung auf einem Computermonitor [z.B. 27,35,40]. Sollen jedoch grundlegende Funktionen der Sprachverarbeitungsprozesse elektrophysiologisch untersucht werden, so erscheinen aus neurobiologischer und sprachwissenschaftlicher Sicht zwei Anforderungen an die verwendeten Stimuli wünschenswert, die bislang nur wenig berücksichtigt wurden: 1. die Verwendung natürlicher, kontinuierlich gesprochener Sprache, 2. die Verwendung geschlossener sprachlicher Äußerungen (Mitteilungen) in Form von einfachen oder sogar komplexen Sätzen, die eine phonologische, syntaktische, semantische und pragmatische Ebene aufweisen.

Es kann davon ausgegangen werden, daß natürlichsprachliche Stimuli als adäquater Reiz des kognitiven Systems der Sprachverarbeitung wirken und in optimaler Weise das quasi-Organ „Sprache“ aktivieren. Während sich einige Studien mit der wortweisen Verarbeitung von komplexen Sätzen beschäftigen

[z.B. 27, 28, 39, 41, 46], liegen zur EKP-Analyse von gesprochenen Sätzen vergleichsweise wenige Untersuchungen vor [z.B. 9,12,13,20,37]. Ein Ziel der vorliegenden Studie ist es, anhand der Analyse von ereigniskorrelierten Potentialen die Verarbeitung unterschiedlich komplexer, gesprochener Sätze darzustellen. Weiterhin sollen die Belastung des Arbeitsgedächtnisses und deren Zeitverlauf bei der Verarbeitung natürlichsprachlicher Relativsatzgefüge untersucht werden, da aufgrund der unterschiedlichen Satzkomplexität Verarbeitungsunterschiede zu erwarten sind.

**Komplexe Sätze und Relativsatzgefüge**

Komplexe Sätze sind z. B. zusammengesetzte Sätze, die aus mehreren mehr oder minder selbständigen Teilsätzen bestehen. Bei den Satzgefügen, die aus einem Haupt- und Nebensatz mit wechselseitiger Beziehung bestehen, können nach der äußeren Form weitere Typen unterschieden werden. Einen Typus bilden die Relativsätze. Hierbei handelt es sich um Nebensätze in einer Relativbeziehung zum Hauptsatz, die durch ein Relativpronomen oder ein Relativpartikel, das sogenannte Relativum, eingeleitet werden [34]. Bei den so eingeleiteten Nebensätzen handelt es sich um unselbständige Sätze (Hypotaxe), deren Relativum zwar ein syntaktisch notwendiges Satzglied des Relativsatzes bildet, aber nur über einen Rückbezug auf den Hauptsatz Bedeutung erlangt. Es wird dabei nur indirekt, und zwar durch den Rückbezug auf ein Satzglied des Hauptsatzes und der dort spezifizierten Bedeutung der Sachverhalt des ganzen Satzgefüges erschließbar [3]. Diese semantische Leerstelle, die sich durch das als Stellvertreter fungierende Relativum im Relativsatz ergibt, ist für die Unselbständigkeit des Nebensatzes verantwortlich. Dargestellt ist diese Leerstelle als „Ø“ in Abb. 1. Der hierdurch bedingte kognitive Verarbeitungsaufwand macht sie zu idea-

len Stimuli in einem Experiment zum sprachlichen Arbeitsgedächtnis.

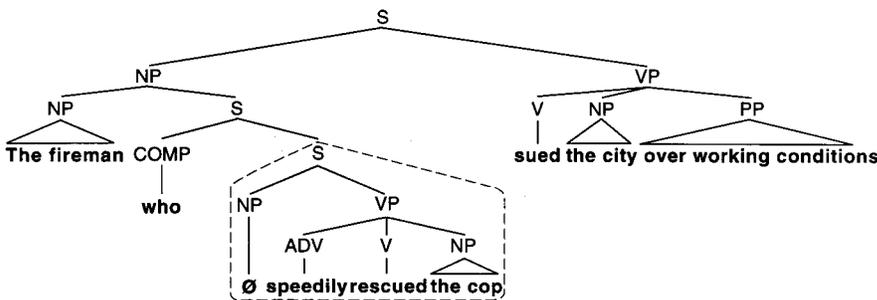
In der vorliegenden Studie wurden als unterschiedlich komplexe Sätze einfache Subjekt-Verb-Objekt-Sätze (SVO-Typ) sowie zwei Typen von Relativsatzgefügen mit nichtabhängigen Relativsätzen des Englischen verwendet. Die syntaktische Struktur der beiden Relativsatztypen zeigt Abb. 1. Zwar weist das Relativpronomen *who* bei beiden Satztypen auf die Subjekt-Nominalphrase (NP) des Hauptsatzes zurück, ist jedoch im Relativsatz entweder Subjekt (SS-Relativsatz) oder Objekt (SO-Relativsatz).

**Die Rolle des Arbeitsgedächtnisses für die Sprachverarbeitung**

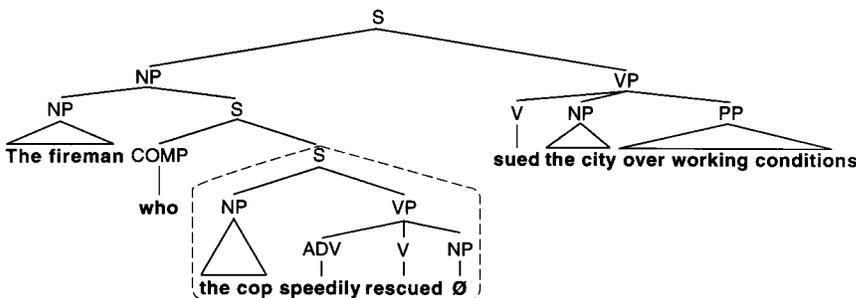
Die Verarbeitung der hier vorgestellten zwei Relativsatztypen stellt unterschiedliche Ansprüche an den Hörer. So sind Subjekt-Objekt-Relativsätze weitaus schwieriger zu verstehen als Subjekt-Subjekt-Relativsätze [36]. Als eine Ursache hierfür werden die während der Satzanalyse notwendigen höheren Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis angesehen, die sich durch die Notwendigkeit der Zwischenspeicherung ergeben [23].

Die Annahme eines solchen Arbeitsgedächtnisses („Working Memory“) repräsentiert eines der zentralen Konzepte der Kognitionsforschung. Es besteht aus einem Zentralprozessor („central controller“), der sowohl Aufmerksamkeitsprozesse als auch eine Gruppe von Untersystemen („slave systems“) steuert, wie z. B. den visuo-spatialen Skizzenblock („visuo-spatial sketch pad“) und die phonologische Schleife („phonological loop“) [2]. Diese phonologische Schleife dient der Speicherung von akustischen Ereignissen und ist daher auch

**Subjekt-Subjekt Relativsatz**



**Subjekt-Objekt Relativsatz**



**Abb.1** Exemplarische Baumdiagrammdarstellung der im Experiment verwendeten zwei Typen von Relativsatzgefügen anhand eines Satzes. Während die Subjekt-Nominalphrase (NP) des Hauptsatzes *the fireman* im oberen Beispiel sowohl im Hauptsatz als auch im Relativsatz als Subjekt und Agens erscheint (SS-Relativsatz), ist sie im unteren Beispiel im Hauptsatz Subjekt und Agens, im Relativsatz jedoch Objekt und Patiens (SO-Relativsatz). Die sich durch den Rückbezug des Relativums *who* für den Nebensatz ergebende semantische Leerstelle für die Subjekt-NP des Hauptsatzes ist durch Ø gekennzeichnet.

das Untersystem für wahrgenommene Sprache. Über einen Zeitraum von 1-2 Sekunden können hier phonologische Informationen der Sprache gespeichert werden, wobei die Erinnerungsspuren mittels subvokaler Artikulation auch wieder aufgefrischt und über längere Zeiträume erhalten werden können.

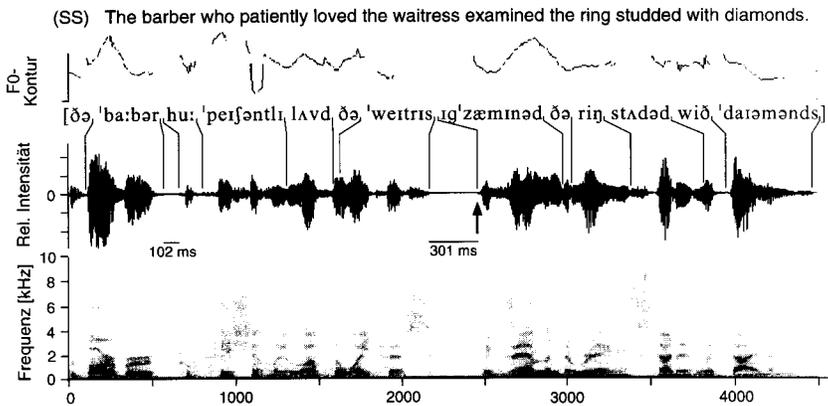
Bei der Verarbeitung natürlichsprachlicher Sätze müssen zunächst zeitlineare phonologische Strukturen sequentiell während der akustischen Analyse abgearbeitet und eine hierarchische Struktur der Syntax aufgebaut werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß bei diesem Vorgang drei unterschiedliche Prozesse zu einer Belastung des Arbeitsgedächtnisses führen [26]. Sind eingebettete Relativsätze vorhanden, so müssen 1. zusätzlich Satzteile kurzfristig gespeichert werden, da der Relativsatz gewissermaßen eine Unterbrechung der Hauptsatzanalyse darstellt [36]; 2. ergibt sich aus der notwendigen Zuordnung der richtigen thematischen Rollen der beiden Nominalphrasen eine zusätzliche Belastung des Arbeitsgedächtnisses [21] und 3. stellt die gleichzeitige Zuordnung eines einzelnen Konzeptes zu zwei unterschiedlichen Rollen eine erhöhte Beanspruchung dar [15], die sich im Fall einer Ambiguität auch in der Verarbeitungszeit niederschlägt [49]. Wegen der hohen Anforderungen an dieses sprachliche Arbeitsgedächtnis während der sequentiellen Analyse von gehörten Relativsätzen kann für deren Verarbeitung eine Korrelation von Satzkomplexität und Gedächtnisbelastung angenommen werden [6,26].

Insgesamt wird die Funktionsweise des Arbeitsgedächtnisses gegenwärtig als ein dynamischer und verteilter Prozeß angesehen, der eng an Aufmerksamkeitsprozesse gebunden ist [23]. Hinweise über die neuronalen Korrelate des durch verbale Aufgaben belasteten Arbeitsgedächtnisses liefern Studien mit Positronenemissionstomographie (PET) [1,14,48], funktioneller Kernspinresonanz-Tomographie (fMRI) [24] und EKP-Studien [18,27,35,37]. Im Tierversuch läßt sich die Gedächtnisbelastung anhand eines langsamen negativen Potentials („slow potentials“) im frontalen Kortex nachweisen [16]. Auch beim Menschen kann die Gedächtnisbelastung mittels EEG-Ableitung gemessen werden [27,30,46,47], dabei korreliert die Amplitudenhöhe des Potentials mit der Stärke der Gedächtnisbelastung. Solche langsamen Hirnpotentiale, also negative oder positive Potentialänderungen, deren Amplitudenwerte zumeist 500 ms, typischerweise mehrere Sekunden anhalten, werden als Korrelat mentaler Prozesse diskutiert

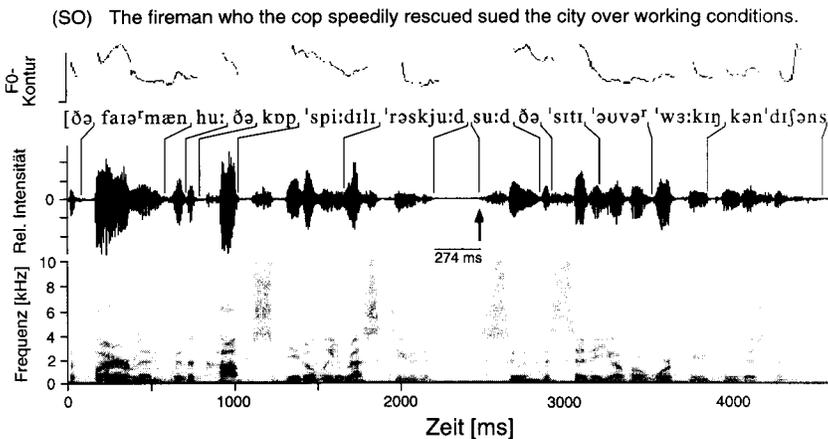
**Methodik und Material**

*Versuchspersonen*

An der Untersuchung teilgenommen haben 24 Versuchspersonen (12 w,12 m) im Alter von 18 bis 35 Jahren ( $\bar{O}=23,3\pm 3,5$ ). Es handelte sich um Studierende der Universität von Kalifornien, die für die Teilnahme 5 \$ pro Stunde oder anrechenbare Versuchspersonenstunden erhielten. Alle Vpn waren Muttersprachler des Englischen, ohne neurologische Auffälligkeiten und ohne akute Medikation (Befragung). Alle Vpn waren



**Abb.2** Darstellung der Spektrogramme eines SS- und eines SO-Relativsatzes in der Intensitäts- und der Frequenzdomäne sowie der phonetischen Umschrift. Ebenfalls dargestellt ist der Verlauf der Grundfrequenz (F0-Kontur), die eine Beurteilung von Prosodie und Intonation erlaubt. Artikulatorische Pausen > 100 ms sind als Balken eingezeichnet. Die Pfeile markieren das Ende der Pause nach dem Relativsatz.



Rechtshänder nach dem Edinburgh Handedness Inventory, neun Vpn hatten linkshändige Familienmitglieder 1. Ordnung. Die Hörfähigkeit wurde audiometrisch für 500, 2000 und 5000 Hz bestimmt, alle Vpn hatten normale Hörschwellen.

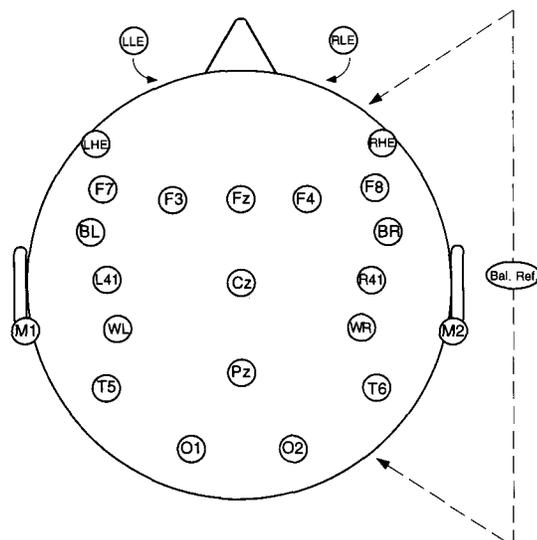
### Stimuli

Als Stimuli dienten 216 auditorisch präsentierte Sätze unterschiedlicher Komplexität mit einer Artikulationsdauer zwischen 2,5 und 6 Sekunden. Die Sätze wurden von einem 29 Jahre alten, trainierten Sprecher in einer schallgedämpften Kammer mit normaler Intonation gesprochen, mit einer Abtastrate von 44,1 KHz digitalisiert (16 bit) und computergestützt editiert. Bei den 72 kritischen Relativsätzen handelte es sich um 36 SS- und 36 SO-Relativsätze, die zufallsverteilt zwischen 144 unkritischen Sätzen (Distraktoren) angeordnet waren. Die Artikulationsdauer der Relativsätze lag bei den SS-Sätzen zwischen 3797 und 5659 ms ( $4642 \pm 478$  ms) und bei den SO-Sätzen zwischen 3743 und 5403 ms ( $4545 \pm 395$  ms). Die Nomina der jeweiligen Haupt- und Relativsätze waren einander hinsichtlich ihrer Häufigkeit und ihres Bedeutungsumfeldes angeglichen. Ebenso kamen in beiden Sets die gleichen Verben vor. Auch die physikalischen Parameter beider Relativsatztypen wurden kontrolliert und soweit möglich einander angenähert (Abb. 2). Infolge der unterschiedlichen Artikulationslängen der Relativsätze variierte der Zeitpunkt, an dem sich die beiden verwendeten Relativsatztypen voneinander unterscheiden haben, und lag beim SS-Typ zwischen 490 und 926 ms ( $751 \pm 101$  ms) und beim SO-Typ zwischen 589 und 985 ms ( $724 \pm 79$  ms).

Die mittlere Gesamtlänge aller 178 präsentierten Sätze lag bei etwa 3 s.

### EEG-Registrierung

Das EEG wurde mit 23 Kanälen aufgezeichnet und mit einer Abtastrate von 250 Hz digitalisiert, wobei 11 Hautelektroden in Übereinstimmung mit dem 10-20 System waren (F3, F4, F7, F8, Fz, Cz, Pz, T5, T6, O1, O2). Weitere sechs Elektroden



**Abb. 3** Schematische Darstellung der Elektrodenpositionen während der EEG-Aufzeichnung.

befanden sich bilateral etwa über der Broca-Region (Gyrus frontalis inferior), der Wernicke-Region (Gyrus temporalis superior) und dem auditorischen Kortex (Abb. 3). Zusätzlich wurde zur Artefakterkennung das Elektrooculogramm mit 4 Elektroden aufgezeichnet. Alle Signale wurden gegen eine balancierte, non-enzephalische Referenz abgeleitet (Bandpaßfilter 0,01-100 Hz, 60 Hz Notch-Filter).

### Versuchsablauf

Während der Ableitung ruhten die Vpn auf einem Liegesessel in einer schallgedämpften Kammer. Um Augenbewegungsartefakte auszuschließen waren die Vpn angehalten, einen von mehreren Fixationspunkten auf einer schwarzen Wand zu betrachten. Die Sätze wurden den Vpn über zwei Lautsprecher in einer Entfernung von 220 cm mit einem Interstimulusintervall von etwa 2 Sekunden präsentiert. Die mittlere Schallintensität lag zwischen 50 und 55 dB, was einer eher leisen Unterhaltung entspricht.

Nach einem kurzen Übungsteil wurden die 216 Sätze in 7 Blöcken, unterbrochen von kurzen Pausen, dargeboten. Die Vpn hatten die Aufgabe, den Sätzen lediglich zuzuhören und auf randomisierte Fragen zum Satzverständnis mit einem Tastendruck zu reagieren. Um die Aufmerksamkeit und das Satzverständnis beurteilen zu können, hörten die Vpn bei 38 % der 216 Stimulus-Sätze Kontrollaussagen, die sich inhaltlich auf den jeweils vorhergehenden Satz bezogen und durch Tastendruck mit „richtig“ oder „falsch“ beantwortet werden sollten (z.B. „The fireman rescued the cop“). Diese Kontrollaussagen wurden 500 ms vorher mit einem Signalton angekündigt (450 Hz Sinus, 200 ms Dauer, 48 dB SPL). Anhand der „richtig“- oder „falsch“-Beurteilung der Kontrollaussagen konnten die Vpn nach abgeschlossenem Experiment über einen Median-Split hinsichtlich ihres Sprachverständnisses in zwei Leistungsklassen, in „gute“ und „schlechte Versther“ eingeteilt werden.

Das gesamte Experiment nahm etwa drei Stunden, die eigentliche Stimulus-Darbietung etwa eine Stunde in Anspruch.

### Auswertung

Da bei den Relativsätzen die mittlere Länge der dargebotenen Stimuli 4672 ms (SS-Relativsatz) und 4545 ms (SO-Relativsatz) betrug, wurden 5000 ms lange Epochen des EEG mit einer Prästimuluszeit von 500 ms ausgewertet. Dabei wurden zunächst für eine Vp die EKP über die jeweils kritischen Sätze (Average) und dann über alle 24 Vpn gemittelt (Grand Average). Etwa 30% der EEG-Daten der kritischen Sätze waren durch Augenbewegungen oder sonstige Artefakte beeinträchtigt und mußten verworfen werden.

Für die statistische Auswertung wurden in den 5-Sekunden-Epochen die gemittelten EKP-Amplituden für drei überlappungsfreie Fenster (I, II, III) berechnet, die die drei wesentlichen Bereiche der Stimuli umfaßten. Die Bereiche II und III waren weiter unterteilt (Abb. 4). Für jedes Fenster wurden separate Varianzanalysen für Meßwiederholungen (ANOVA) mit folgenden Faktoren berechnet. Innerhalb der Vpn: „Satztyp“ (SS oder SO), „Hemisphäre“ (links oder rechts), „Elektrode“ (frontal, anterior, temporal, zentral, posterior-temporal

Bereich I (Prä-RS) 0-700 ms	Bereich II (RS) 700-2300 ms		Bereich III (Post-RS) 2300-4000 ms		
(SS) <i>The fireman who</i>	<i>speedily rescued the cop</i>		<i>sued the city over working ...</i>		
(SO) <i>The fireman who</i>	<i>the cop speedily rescued</i>		<i>sued the city over working ...</i>		
	Bereich IIa 700-1500 ms	Bereich IIb 1500-2300 ms	Bereich IIIa 2300-2600 ms (Pause)	Bereich IIIb 2600-3000 ms (Hauptsatzverb)	Bereich IIIc 3000-4000 ms

**Abb.4** Die für die statistische Analyse benutzten drei Zeitfenster der Relativsätze.

oder okzipital). Zwischen den Vpn: „Verstehenstyp“ (guter oder schlechter Versther).

**Ergebnisse**

*Satzverständnisprüfung*

Die Satzverständnisprüfung zeigte, daß die Vpn bei nur 77% der kritischen Relativsätze die Zuordnung der thematischen Rollen erfolgreich vornehmen konnte, die Sätze also richtig verstanden wurden. Die guten Versther beurteilten 86% und die schlechten Versther 68% der Kontrollaussagen zu den beiden Relativsatztypen richtig.

*EKP-Verlauf bei der Verarbeitung von Sätzen*

Um den grundsätzlichen Verlauf des ereigniskorrelierten EEG-Signals während des Hörens von Sätzen darzustellen, wurden zunächst die EKPs über alle unterschiedlich komplexen Sätze gemittelt (Abb. 5). Es zeigen sich an fast allen Ableitorten typische N1- und P2-Komponenten zu Satzbeginn und vor allem bei den zentralen Elektroden eine langanhaltende Negativierung während der Satzverarbeitung und ein typischer Abfall der Negativierung zum Satzende (z. B. Pz). Das ist auch der Grund für den vor allem rechtshemisphärisch (z.B. F8 und Br) deutlich sichtbaren Abfall der Negativierung 3 Sekunden nach Satzanfang, der auf das bereits erfolgte Ende kürzerer Sätze zurückzuführen ist. Weiterhin existiert zwischen den Elektrodenpositionen Bl und Br sowie zwischen F7 und F8 ein Hemisphärenunterschied in Höhe von etwa 1,5 uV.

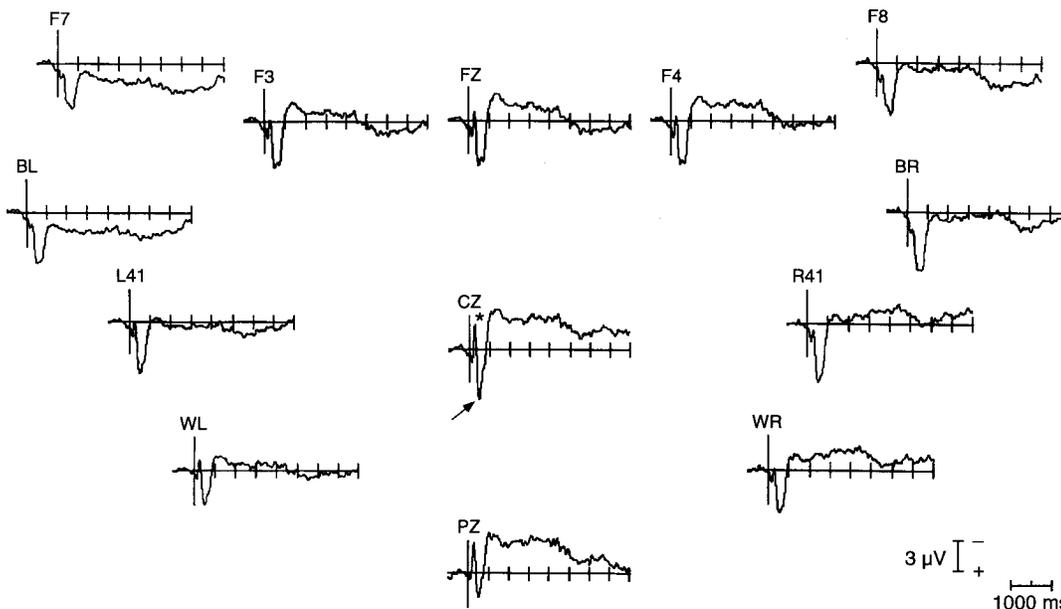
*EKP-Verlauf von Subjekt/Subjekt- und Subjekt/Objekt-Relativsätzen*

Um die verschiedenen Regionen der Relativsätze in den folgenden Abbildungen den entsprechenden EKP-Abschnitten zuordnen zu können, wird zunächst die schematische Darstellung der Satzverläufe einem exemplarischen EKP (F7) zugeordnet und beschrieben (Abb. 6).

Wie in Abb. 6 B zu erkennen, ergeben sich für die 36 getesteten SS-Relativsätze unterschiedliche Zeitverläufe der wichtigsten Satzregionen, da auch die Satzlänge insgesamt zwischen 3797 und 5659 ms variiert. Die für diese Untersuchung wichtigen Bereiche vom Beginn bzw. Ende des Relativsatzes liegen im Mittel jedoch um etwa 750 und 2300 ms. Für die hier nicht gezeigten SO-Relativsätze ergibt sich ein ähnlicher Zeitverlauf, da sich nur die Wortreihenfolge ändert.

Zwischen den beiden Relativsatztypen zeigen sich große Unterschiede im EKP-Verlauf während des Relativsatzes (Bereich II) und nach dem Ende der Pause (Post-Rs, etwa 2400 bis 4000 ms). Die SO-Relativsätze bewirken einen im Vergleich zu den SS-Relativsätzen deutlich sichtbaren Abfall der Amplitude (stärkere Negativierung). Der Beginn dieses Unterschiedes entspricht ziemlich genau dem Zeitpunkt des eingebetteten Relativsatzes (RS), und dies trotz der leichten zeitlichen Variabilität der Stimulussätze. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung zeigt Tab. 1.

Potentialverlauf während der Verarbeitung von Sätzen



**Abb. 5** Dargestellt ist der Verlauf der EKP über alle Versuchspersonen, die jeweils 178 akustisch präsentierte Sätze wahrgenommen haben. Die Y-Achse zeigt den Artikulationsbeginn, die dargestellte Prästimuluszeit beträgt 500 ms. Zu sehen sind 4-Sekunden-Epochen, bei einer mittleren Satzlänge aller 178 Sätze von etwa 3 Sekunden. Die N1- und die P2-Komponenten sind für die Elektrodenposition Cz mit einem Stern (N1) bzw. mit einem Pfeil (P2) markiert. Zur Elektrodenlokalisation siehe Abb. 3.

**Tab.1** Zusammenstellung der ANOVA-Ergebnisse (p-Werte) für die unterschiedlichen Analysefenster der Relativsatzgefüge (vgl. Abb. 4).

	Hemisphäre	Satztyp	Hemisphäre x Satztyp
<i>Bereich</i>			
Relativsatz (II)	0,001	–	0,05
Beginn Relativsatz (IIa)	0,05	0,01	–
Ende Relativsatz (IIb)	0,001	–	0,05
nach der Pause (IIIb, IIIc)	0,01	–	0,05
Hauptsatzverb (IIIb)	–	0,05	–
nach dem Hauptsatzverb	0,05	0,01	–
Hauptsatzverb-NP	–	–	–
Ende der NP (IIIc)	0,05	0,01	–

Der zu Beginn des eingebetteten Relativsatzes (RS) auftretende Unterschied im EKP zwischen den beiden Relativsatztypen läßt sich, abgesehen von der linkshemisphärischen okzipitalen Elektrode, an allen Ableitorten zeigen. Am größten ist dieser Effekt im anterior-temporalen und im frontalen Bereich, wobei der stärkste Effekt rechtshemisphärisch bei den fronto-lateralen Elektroden auftritt.

Werden die Vpn hinsichtlich ihrer Leistungsdaten im Verständnistest in gute und schlechte Versther unterschieden, so ergibt sich auch hinsichtlich des beobachteten Effektes im EKP eine Zweiteilung. Während die guten Versther einen nochmals stärkeren Effekt beim Vergleich der beiden Testbedingungen zeigen, verringert sich der Effekt bei den schlechten Versther deutlich. Wie in Abb. 7 zu sehen, zeigen gute Versther den Effekt in den frontalen und anterior-temporalen Regionen vor allem auf der rechten Hemisphäre, während er bei den schlechten Versther fast verschwunden ist. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei den okzipitalen Elektroden in beiden Untergruppen keine Unterschiede.

Für die SO-Relativsätze zeigt sich bei den guten Versther frontal und anterior temporal eine deutlich stärkere Negativierung im Vergleich zu den SS-Relativsätzen. Anders bei den schlechten Versther, bei denen bereits die leichteren SS-

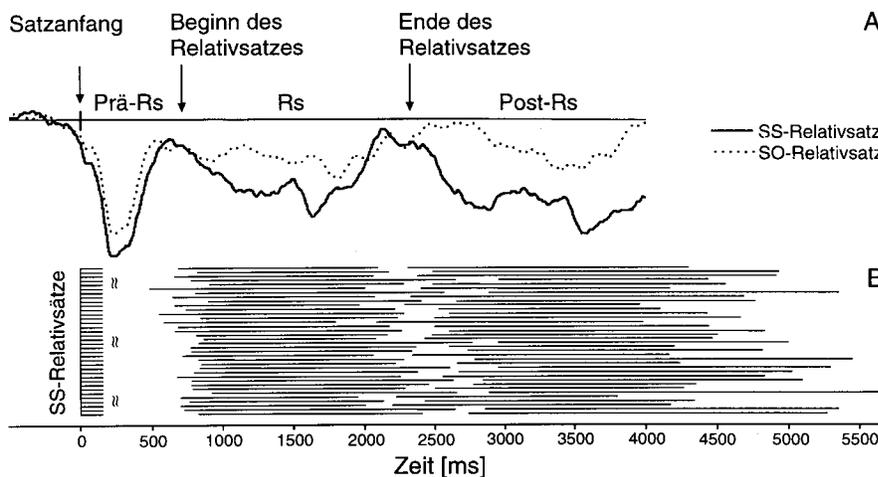
Relativsätze einen den SO-Relativsätzen der guten Versther vergleichbare Amplitudenverlauf zeigen. Die schwieriger zu verstehenden SO-Relativsätze führen bei den schlechten Versther somit nicht zu einer noch größeren Negativierung des EKP.

**Diskussion**

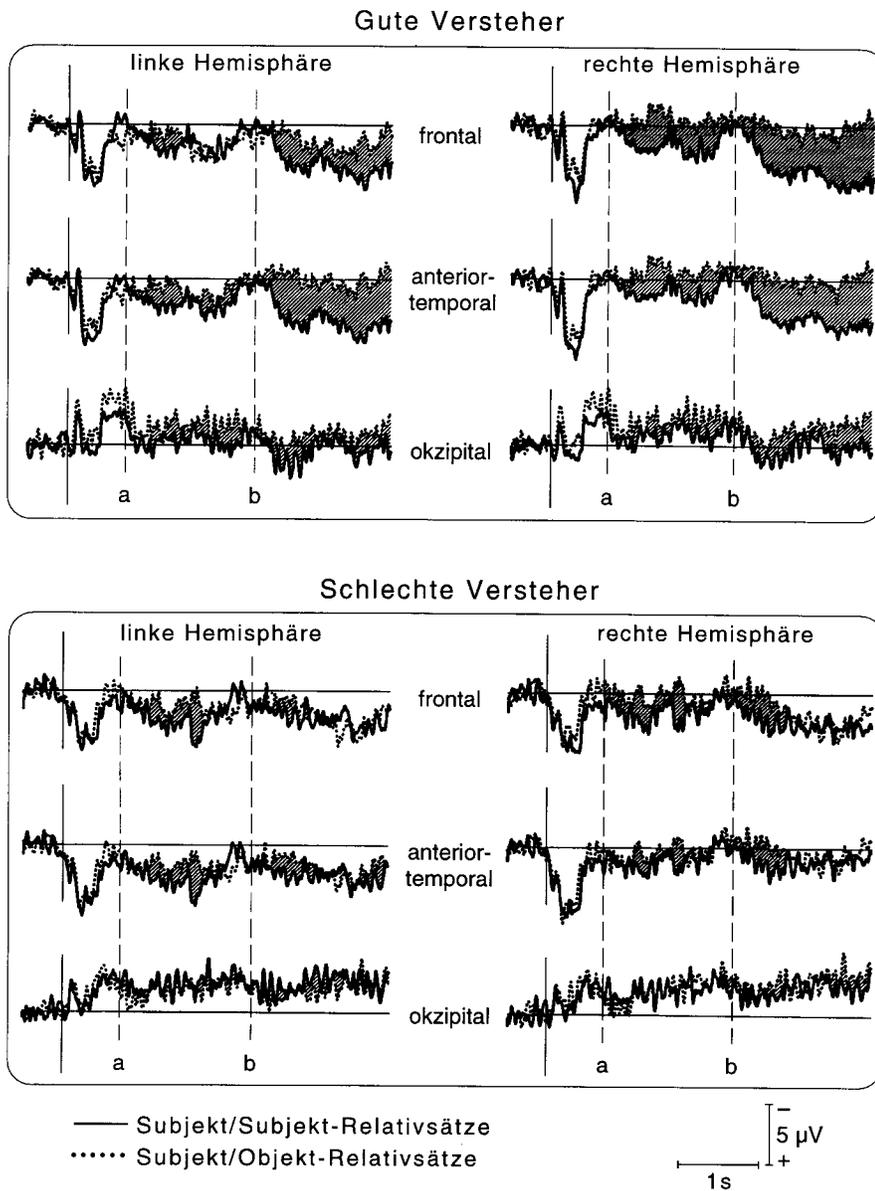
*EKP-Verlauf bei der Wahrnehmung von Subjekt- und Objekt-Relativsätzen*

a) Relativsatzverarbeitung und Arbeitsgedächtnis-Belastung

Die Tendenz Relativsätze zu verwenden existiert in allen Sprachgruppen, so daß dieses Phänomen als sprachliche Universalie angesehen werden kann [8]. Grundsätzlich stellen Relativsatzgefüge jedoch höhere Anforderungen an die kognitive Verarbeitung als etwa einfache Sätze des Subjekt-Verb-Objekt-Typs [26]. Für die in dieser Studie verwendeten Relativsatztypen existiert ein darüber hinausgehender Verarbeitungsunterschied. Wegen der im Englischen nicht vorhandenen Kasusmarkierung über Flexionsformen werden Wortstellung und Intonation zum entscheidenden Merkmal der Kasuszuweisung. Es ergibt sich daher die Situation, daß der SO- im Vergleich zum SS-Relativsatz, bei insgesamt fast identischer syntaktischer Struktur, ungleich schwieriger zu verstehen ist [36]. Auch in der vorliegenden Studie belegt das Ergebnis der Verständnisprüfung die prinzipielle Verarbeitungsschwierigkeit von Relativsätzen allgemein und von Relativsätzen des SO-Typs im besonderen. Larkin & Burns [31] fanden für den SO-Typus eine durchschnittliche Fehlerhäufigkeit in der Zuweisung von Verb und Agens von etwa 15%. Diese höheren Verarbeitungsanforderungen des SO-Relativsatzes sind durch mehrere Lese- und Reaktionszeitexperimente belegt [21,26,49]. Weiterhin konnte als Ort des Verarbeitungsunterschiedes zwischen beiden Relativsatztypen das Ende der Artikulationspause nach dem Relativsatz bestimmt werden (s. Pfeil in Abb. 2). Um den Satz zu analysieren ist es für den Hörer unerläßlich, zunächst die Subjekt-Nominalphrase des Hauptsatzes und dann den eingebetteten Relativsatz so lange im Gedächtnis zu behalten, bis die nachfolgende Hauptsatz-Verbalphrase ebenfalls gehört wurde und das Satzgefüge als Ganzes analysiert werden kann. Im Fall des



**A** **Abb.6A** Exemplarischer EKP-Verlauf während der Wahrnehmung der getesteten SS- und SO-Relativsätze (F7). Der Satzbeginn und die für die Auswertung über alle Sätze gemittelten Zeitpunkte des Relativsatzbeginns und des Relativsatzendes sind durch Pfeile markiert. Es ergeben sich so die drei Satzregionen Prä-Relativsatz (Prä-Rs), Relativsatz (Rs) und Post-Relativsatz (Post-Rs) (vgl. Abb. 4). **B** Schematische Darstellung der konkreten Zeitverläufe anhand der 36 SS-Relativsätze mit einer deutlich sichtbaren Variabilität der Pausen um 2300 ms.



**Abb.7** Vergleichende Darstellung der gemittelten EKP von „guten“ und „schlechten“ Versther nach den im Verhaltensversuch ermittelten Leistungen zum Satzverständnis. Gezeigt werden die Ableitungen der frontalen und anterior-temporalen Elektroden sowie zum Vergleich der okzipitalen Elektroden. Die y-Achse zeigt den Satzbeginn, die unterbrochenen Linien zeigen Anfang **a** und Ende **b** der Nebensätze (vgl. Abb. 6).

schwierigeren SO Relativsatzes kann wegen der längeren Verarbeitungszeit von einer ebenfalls längeren Speicherzeit ausgegangen werden. Weiterhin müssen bereits gehörte Teile möglicherweise re-aktiviert werden, wenn der Hörer das Relativsatzverb „entdeckt“. Eine weitere Schwierigkeit im Satzverständnis kann für den Zeitpunkt angenommen werden, wenn der Hörer das Relativsatzverb erkennt und dessen Wortstellung für die syntaktische Analyse des Satzes benutzt. Dann müssen unterschiedliche Zuweisungen der thematischen Rollen (Theta-Rollen) durchgeführt werden, die mit der Frage „wer machte was und wann?“ umschrieben werden können [27]. Um die hierbei ablaufenden kognitiven Prozesse zu untersuchen, erscheint die Verwendung natürlich gesprochener Sprache als unablässlich, da der Intonation [7] als auch der Artikulationspause [49] bei der Verarbeitung von Relativsätzen eine wichtige Funktion zukommt.

Als Ort der für die Analyse von Relativsätzen bzw. Texten notwendigen kurzzeitigen Speicherungsprozesse wird das

Arbeitsgedächtnis ("Working Memory") angesehen, wobei sich individuelle Unterschiede der Leistungsfähigkeit sowohl im Reaktionszeitversuch [6] als auch im EKP [27, 35,40] feststellen lassen. Im Tierversuch konnte mit invasiven Ableitungen ein eindeutiger Bezug zwischen der frontalen Negativierung und einer im Verhaltensversuch kontrollierten Gedächtnisbelastung des Arbeitsgedächtnisses festgestellt werden [16]. Daher kann auch bei den hier vorliegenden Ergebnissen von einer Korrelation von Gedächtnisbelastung und frontaler Negativierung ausgegangen werden. Die Höhe der beobachteten Negativierung spiegelt somit die Stärke der gleichzeitig auftretenden Belastung des Arbeitsgedächtnisses wider. Diese Feststellung wird nochmals plausibler, wenn man den Zeitverlauf der so festgestellten Gedächtnisbelastung untersucht (vgl. Abb. 6 A). Die in vorliegender Studie angenommene Belastung des Arbeitsgedächtnisses beginnt exakt mit dem Anfang des Relativsatzes, verringert sich für den Zeitraum der artikulatorischen Pause und beginnt dann erneut mit dem Beginn der Objekt-NP des Hauptsatzes.

Der stärkste Amplitudenunterschied zwischen SS- und SO-Sätzen findet sich rechtshemisphärisch frontal. Dies ist ein zunächst unerwarteter Befund, da man davon ausgehen kann, daß die rechtshändigen Vpn dieser Studie hinsichtlich ihrer Sprache fast ausschließlich links-lateralisiert sind. Auch konnten King u. Kutas [27] mit visuell dargebotenen SS- und SO-Relativsätzen einen eher linkshemisphärischen Unterschied nachweisen. Es muß jedoch festgestellt werden, daß anhand der EKP-Komponenten keine Aussage über den exakten Ort der ihnen zugrundeliegenden Generatoren gemacht werden können. Weiterhin können Zugriffe auf den Zentralprozessor des Arbeitsgedächtnisses als von der unmittelbaren Sprachverarbeitung unabhängig angesehen werden, was sich in teilweise modalitätsunabhängigen Effekten im Vergleich der Verarbeitung von gelesenen und gehörten Relativsätzen zeigt [27,37]. Auch in anderen Studien zeigte sich für Zugriffe auf das Arbeitsgedächtnis eine eher bilaterale Aktivität. Die rechtshemisphärische Negativierung könnte mit einem stärkeren Zugriff auf das episodische Gedächtnis begründet werden, das rechts-frontal angesiedelt wird [14,51].

#### b) Gute vs. schlechte Versther

Betrachtet man zunächst ausschließlich die schlechten Versther, so zeigt sich bei ihnen linkshemisphärisch bereits bei den vergleichsweise leichten SS-Relativsätzen eine Gedächtnisbelastung, die hingegen bei den guten Versther erst bei den SO-Sätzen auftritt (vgl. Abb. 7). Die schwierigeren SO-Relativsätze führen in der Gruppe der schlechten Versther zu einer noch stärkeren Überforderung, was sich sowohl im Verhaltensversuch als auch im EKP zeigt. Bei den schlechten Versther kam es bei den schwierigeren Sätzen nicht zu einer weiteren frontalen Negativierung. Bei ihnen war die Zuweisung der thematischen Rollen gestört und sie hatten im Verständnistest prozentual häufiger vergessen, welche Person in den Relativsätzen Agens oder Patiens war. Bei den guten Versther hingegen zeigte sich ein komplett anderes Bild. Während Relativsätze des einfachen SS-Typs bei ihnen nur zu einer mäßigen Negativierung führten, zeigt die starke frontale Negativierung während der Sätze des SO-Typs die Belastung des Arbeitsgedächtnisses. Sowohl bei den schlechten als auch bei den guten Versther paßt darüber hinaus der zeitliche Verlauf der Stärke des langsamen negativen Potentials sehr gut mit dem Beginn der Relativsätze und dann wieder mit dem Zeitpunkt des Hauptsatzverbs überein. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen zum Satzverständnis kann somit von einer Korrelation von frontaler Negativierung und arbeitsgedächtnisabhängigem Sprachverarbeitungsprozeß ausgegangen werden.

#### Zur Verarbeitung natürlichsprachlicher Äußerungen

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, daß die EEG-Analyse sehr gut geeignet ist, um Prozesse der Hirnrinde während des Verlaufs der Verarbeitung von natürlich gesprochener Sprache im zeitlichen Bereich von Millisekunden zu untersuchen. Aufgrund der hervorragenden zeitlichen Auflösung sind EKP viel eher als sogenannte bildgebende Verfahren, wie etwa Positronenemissionstomographie (PET) oder funktionelle Kernspinresonanz-Tomographie (fMRI), geeignet, höhere kognitive Vorgänge in ihrem dynamischen Verlauf zu erfassen. Die PET- und fMRI-Techniken führen zu Ergebnissen mit einer exzellenten räumlichen Auflösung im Millimeterbereich eines

dreidimensionalen Raumes. Da gegenwärtig die Hirnaktivität jedoch über mehrere/viele Sekunden bis hin zu einigen Minuten hinweg erfaßt werden muß, um zu einer Abbildung zu kommen, zeigen PET- und fMRI-Studien nur statische Aktivitätsmuster der Hirnaktivität und mitteln somit über alle Prozesse der Satzverarbeitung. Aufgrund der enormen Verarbeitungsgeschwindigkeit wird gegenwärtig davon ausgegangen, daß es während der Verarbeitung von gesprochenen Sätzen, die nichts anderes als mehrere Sekunden lange sequentielle Phonemketten darstellen, zu parallelen und sequentiellen Verarbeitungsprozessen kommt. Mit der EKP-Analyse können solche dynamischen Prozesse, die z.T. erst während der Satzverarbeitung beginnen, mit einer zeitlichen Auflösung im Millisekundenbereich beobachtet werden.

Ergebnisse aus allen Bereichen der kognitiven Neurowissenschaften haben innerhalb der letzten Jahre gezeigt, daß die Sprachverarbeitung bei einem typischen Rechtshänder nicht ausschließlich in der linken Hemisphäre anzusiedeln ist. Weiterhin ist das ursprünglich auf C. Wernicke und L. Lichtheim zurückgehende und von Geschwind präzisierete Wernicke-Geschwind Schema [17] nicht mehr unumstritten, auch wenn es noch immer als Lehrbuchwissen gilt [z.B. 25, 50]. Diesem Modell, in dem Broca- und Wernicke-Region als die Orte der Sprachfunktionen gelten, liegen im wesentlichen klinische Befunde der Aphasologie zugrunde. Dabei wurden die Prozesse der Sprachproduktion hauptsächlich der Broca-Region und die Prozesse der Sprachverarbeitung hauptsächlich der Wernicke-Region zugewiesen. Anhand von PET-Studien konnte jedoch auch beim Sprachverstehen eine Aktivität in der Broca-Region nachgewiesen werden [32,45].

Weiterhin wurde von einer starken funktionellen Lateralisation ausgegangen, wonach bei fast allen Rechtshändern und den meisten Linkshändern nur die linkshemisphärischen Regionen als Sprachzentren angesehen wurden. Jüngere Befunde zur Physiologie der Sprachverarbeitung stellen die ehemals so klare funktionelle Zuordnung des Wernicke-Geschwind-Schemas jedoch in Frage. Experimentelle Arbeiten der letzten Dekade zeigen eine viel kompliziertere Situation mit einer Beteiligung weiterer Hirnregionen an den Sprachprozessen, z. B. das motorische Supplementärfeld („Supplementary Motor Area“, SMA) [44], die links-frontale semantische Area [33,44] oder den Temporallappen [10]. Auch elektrische Stimulationsexperimente zeigen z. B. die Beteiligung frontaler Kortextbereiche am Sprachprozeß [43]. Weiterhin belegen Ergebnisse mit intrakranialen Elektroden bei der visuellen Darbietung von Sätzen Aktivitäten im inferioren Lobus temporalis [42]. Auch eine Beteiligung der rechten Hemisphäre an Sprachverarbeitungsprozessen ist nachgewiesen [z.B. 11, 24,38]. Das für die Sprachverarbeitung wichtige Arbeitsgedächtnis ist ebenfalls nicht nur in frontalen Kortextregionen lokalisiert. Vielmehr zeigen sich bei Zugriffen auf das Arbeitsgedächtnis bilaterale weitverteilte Kortextaktivitäten [14,19] und sogar Aktivitäten im Cerebellum [1, 22]. Insgesamt läßt sich feststellen, daß semantische Einträge eher linksfrontal und episodische Einträge eher rechtsfrontal repräsentiert sind [1, 51]. Die nicht-sprachdominante Hemisphäre, also die rechte Hemisphäre eines typischen Rechtshänders, scheint z. B. eine wichtige Rolle bei der Analyse von Metaphern [5] zu spielen. Gerade für die Verarbeitung von unterschiedlich komplexen Relativsätzen des SS- und SO-Typs konnten just et al. [24] anhand einer fMRI-Studie eine

komplexitätsabhängige Mitwirkung auch der rechten Hemisphäre nachweisen. So führten die höheren Verarbeitungsansprüche von schwierigeren Relativsätzen (SO-Typ) auch zu einer stärkeren Aktivität der rechtshemisphärischen Sprachverarbeitungsregionen [24]. Auch für die Sprachverarbeitung muß somit die ausschließlich „lokalistische“ Suche nach distinkten Regionen im Gehirn zugunsten der Annahme eines auch globalen Prozesses aufgegeben werden, indem mehrere verteilte Hirnareale synchronisiert zusammenarbeiten. Eine Möglichkeit natürlichsprachliche Sätze hinsichtlich den ihr zugrundeliegenden Synchronisationsprozessen zwischen beteiligten Hirnregionen zu untersuchen, bieten spektralanalytische Verfahren, wie die EEG-Kohärenzanalyse [38, 52]. Befunde aus mehreren Bereichen der kognitiven Neurowissenschaften legen nahe, daß die gängige Ansicht über die Orte kortikaler Sprachverarbeitung teilweise revidiert werden muß. Der Sprachfähigkeit liegen somit weitverteilte Aktivitäten der Hirnrinde zugrunde, die nicht nur die klassischen Sprachzentren umfassen und sogar in der nicht-dominanten Hemisphäre angesiedelt sind.

### Danksagungen

Diese Arbeit wurde gefördert mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft an HMM (Mu 797/2) sowie des National Institute of Child and Human Development (HD22614) und des National Institute of Aging (AG08313) an MK sowie des San Diego Center for Cognitive Neuroscience (McDonnell-Pew postdoctoral fellowship), dem Center for Human Information Processing (MH-14268) und vom Center for Research on Language (T32 D000041-01) an JWK. Für hilfreiche Kommentare zu einer früheren Fassung des Manuskriptes möchten wir PD Dr. Thomas Münte, Prof. Dr. Gert Rickheit, Prof. Dr. Peter Rappelsberger sowie einer anonymen Gutachterin danken.

### Literatur

- 1 Andreasen, N. C., D. S. O'Leary, S. Arndt, T. Cizadlo, R. Hurtig, K. Rezaï, G. L. Watkins, L. L. Ponto, R. D. Hichwa: Short-term and long-term verbal memory - A positron emission tomography study. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)* 92 (1995) 5111-5115
- 2 Baddeley, A.: Working memory. In: *The Cognitive Neurosciences*, 755-764, hrsg. von M. S. Gazzaniga. MIT Press, Cambridge 1995
- 3 Bergmann, R.: Relativsatz-Probleme in Grammatiken der deutschen Gegenwartssprache. In: *Studien zur deutschen Grammatik - Johannes Erben zum 60. Geburtstag*, 51-66, hrsg. von E. Koller, H. Moser. Institut für Germanistik, Innsbruck 1985
- 4 Birbaumer, N., T. Elbert, A. G. M. Canavan, B. Rockstroh: Slow potentials of the cerebral cortex and behaviour. *Physiol. Rev.* 70 (1990) 1-41
- 5 Bottini, G., R. Corcoran, R. Sterzi, E. Paulesu, P. Schenone, P. Scarpa, R. S. Frackowiak, C. D. Frith: The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language - A positron emission tomography activation study. *Brain* 117 (1994) 1241-1253
- 6 Budd, D., P. Whitney, K. J. Turley: Individual differences in working memory strategies for reading expository text. *Mem. & Cogn.* 23 (1995) 735-748
- 7 Clancy, P. M., H. Lee, M.-H. Zoh: Processing strategies in the acquisition of relative clauses - Universal principles and language-specific realizations. *Cognition* 24 (1986) 225-262
- 8 Comrie, B.: *Language Universals and Linguistic Typology. Syntax and Morphology*. Blackwell, Oxford 1981
- 9 Connolly, J. F., N. A. Phillips, S. H. Stewart, W. G. Brake: Event-related potential sensitivity to acoustic and semantic properties of terminal words in sentences. *Brain & Lang.* 43 (1992) 1-18
- 10 Damasio, H., T. J. Grabowski, D. Tranel, R. D. Hichwa, A. R. Damasio: A neural basis for lexical retrieval. *Nature* 380 (1996) 499-505
- 11 Eulitz, C., B. Maess, C. Pantev, A. D. Friederici, B. Feige, T. Elbert: Oscillatory neuromagnetic activity induced by language and non-language stimuli. *Cogn. Brain Res.* 4 (1996) 121-132
- 12 Friederici, A. D., E. Pfeifer, A. Hahne: Event-related brain potentials during natural speech processing - Effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Cogn. Brain Res.* 1 (1993) 183-192
- 13 Friederici, A. D., A. Hahne, A. Mecklinger: Temporal structure of syntactic parsing. Early and late event-related brain potential effects. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 22 (1996) 1219-1248.
- 14 Fletcher, P. C., R. J. Dolan, C. D. Frith: The functional anatomy of memory. *Experientia* 51 (1995) 1197-1207
- 15 Fodor, J. A., T. G. Bever, M. F. Garrett: *The Psychology of Language*. McGraw-Hill, New York 1974
- 16 Fuster, J. M.: *The Prefrontal Cortex - Anatomy, Physiology, and Neuropsychology of the Frontal Lobe*. Raven, New York 1989
- 17 Geschwind, N., A. M. Galaburda (1984, Hrsg.). *Cerebral Dominance: The Biological Foundations*. Harvard: University Press
- 18 Gevins, A., M. E. Smith, J. Le, H. Leong, J. Bennett, N. Martin, L. McEvoy, R. Du, S. Whitfield: High resolution evoked potential imaging of the cortical dynamics of human working memory. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 98 (1996) 327-348.
- 19 Grasby, P. M., C. D. Frith, K. J. Friston, J. Simpson, P. C. Fletcher, R. S. Frackowiak, R. J. Dolan: A graded task approach to the functional mapping of brain areas implicated in auditory-verbal memory. *Brain* 117 (1994) 1271-1282
- 20 Holcomb, P. J., H. J. Neville: Natural speech processing. An analysis using event-related brain potentials. *Psychobiology* 19 (1991) 286-300
- 21 Holmes, V. M., J. K. O'Regan: Eye fixation patterns during the reading of relative-clause sentences. *J. Verbal Learn. Verbal Behav.* 20 (1981) 417-430
- 22 Jenkins, I. H., R. S. Frackowiak: Functional studies of the human cerebellum with positron emission tomography. *Rev. Neurol. Paris* 149 (1993) 647-653
- 23 Just, M. A. & P. A. Carpenter: A capacity theory of comprehension - Individual differences in working memory. *Psychol. Rev.* 99 (1992) 122-149
- 24 Just, M. A., P. A. Carpenter, T. A. Keller, W. F. Eddy: Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science* 274 (1996) 114-116
- 25 Kandel, E. R., J. H. Schwartz, T. M. Jessel (Hrsg.): *Principles of Neural Science*, 3. Aufl. Elsevier, New York 1991
- 26 King, J., M. A. Just: Individual differences in syntactic processing - The role of working memory. *J. Mem. Lang.* 30 (1991) 580-602.
- 27 King, J. W., M. Kutas: Who did what and when? Using word- and clause-related ERPs to monitor working memory usage in reading. *J. Cogn. Neurosci.* 7 (1995) 378-397.
- 28 Kutas, M., S. A. Hillyard: Reading senseless sentences - Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207 (1980) 203-205
- 29 Kutas, M., C. Van Petten: Psycholinguistics electrified - Event-related brain potential investigations. In: *Handbook of Psycholinguistics*, 83-143, hrsg. von M. A. Gernsbacher. Academic Press, San Diego 1994
- 30 Lang, M., W. Lang, F. Uhl, A. Kornhuber, L. Deecke, H. H. Kornhuber: Slow negative potential shifts indicating verbal cognitive learning in a concept formation task. *Hum. Neurobiol.* 6 (1987) 183-190

- <sup>31</sup> Larkin, W., D. Burns: Sentence comprehension and memory for embedded structure. *Mem. & Cogn.* 5 (1977) 17-22
- <sup>32</sup> Liotti, M., C. T. Gay, P. T. Fox: Functional imaging and language. Evidence from positron emission. *J. Clin. Neurophysiol.* 11 (1994) 175-190
- <sup>33</sup> McCarthy, G., A. M. Blamire, D. L. Rothman, R. Gruetter, R. G. Shulman: Echo-planar magnetic resonance imaging studies of frontal cortex activation during word generation in humans. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)* 90 (1993) 4952-4956
- <sup>34</sup> McCawley, J. D.: The syntax and semantics of English relative clauses. *Lingua* 53 (1981) 99-149
- <sup>35</sup> Mecklinger, A., H. Schriefers, K. Steinhauer, A. D. Friederici: Processing relative clauses varying on syntactic and semantic dimensions - An analysis with event-related potentials. *Mem. & Cogn.* 23 (1995) 477-494
- <sup>36</sup> Miller, G.A., N. Chomsky: Finitary models of language users. In: *Handbook of Mathematical Psychology*, 419-492, hrsg. von D. Luce, R. Bush, E. Galanter. John Wiley, New York 1963
- <sup>37</sup> Müller, H. M., J. W. King, M. Kutas: Event related potentials elicited by spoken relative clauses. *Cogn. Brain Res.* 5 (1997) 193-203
- <sup>38</sup> Müller, H. M., S. Weiss, P. Rappelsberger: EEG coherence analysis of auditory sentence processing. In: *Quantitative and Topological EEG and MEG Analysis*, hrsg. von H. Witte, U. Zwiener. Universitätsverlag, Jena (1997, im Druck)
- <sup>39</sup> Münte, T. F.: Ereigniskorrelierte Potentiale in der Untersuchung der Sprache. *Z. EEG-EMG* 24 (1993) 34-40
- <sup>40</sup> Münte, T. F., O. Schwirtz, B. M. Wieringa, M. Matzke, S. Johannes: Elektrophysiologie komplexer Sätze - Ereigniskorrelierte Potentiale auf der Wort- und Satzebene. *Z. EEG-EMG* 28 (1997) 11-17
- <sup>41</sup> Neville, H., M. Kutas, G. Chesney, A. L. Schmidt: Event-related brain potentials during Initial encoding and recognition memory of congruous and incongruous words. *J. Mem. Lang.* 25 (1986) 75-92
- <sup>42</sup> Nobre, A. C., T. Allison, G. McCarthy: Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature* 372 (1994) 260-263
- <sup>43</sup> Ojemann, G.: Localization of Language in Frontal Cortex. *Advances in Neurology* 57 (1992) 361-368
- <sup>44</sup> Petersen, S. P., P. T. Fox, M. I. Posner, M. Mintun, M. E. Raichle: Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature* 331 (1988) 585-589
- <sup>45</sup> Price, C. J., R. J. S. Wise, E. A. Warburton, C. J. Moore, D. Howard, K. Patterson, R. S. J. Frackowiak, K. J. Friston: Hearing and saying - The functional neuro-anatomy of auditory word processing. *Brain* 119 (1996) 919-931
- <sup>46</sup> Röster, F., P. Putz, A. Friederici, A. Hahne: Event-related brain potentials while encountering semantic and syntactic constraint violations. *J. Cogn. Neurosci.* 5 (1993) 170-182
- <sup>47</sup> Röster, F., M. Heil, U. Glowalla: Monitoring retrieval from long-term memory by slow event-related brain potentials. *Psychophysiology* 30 (1993) 170-182
- <sup>48</sup> Salmon, E., M. Van der Linden, F. Collette, G. Delfiore, P. Maquet, C. Degueldre, A. Luxen, G. Franck: Regional brain activity during working memory tasks. *Brain* 119 (1996) 1617-1625
- <sup>49</sup> Schriefers, H., A. D. Friederici, K. Kuhn: The processing of locally ambiguous relative clauses in German. *J. Mem. Lang.* 34 (1995) 499-520
- <sup>50</sup> Schmidt, R. F. G. Thews (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. 25. Aufl. Springer Verlag, Berlin 1993
- <sup>51</sup> Tulving, E., S. Kapur, F. I. Craik, M. Moscovitch, S. Houle: Hemispheric encoding/retrieval asymmetry in episodic memory - Positron emission tomography findings. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)* 91 (1994) 2016-2020.
- <sup>52</sup> Weiss, S., P. Rappelsberger: EEG coherence within the 13-18 Hz band as a correlate of a distinct lexical organization of concrete and abstract nouns in humans. *Neurosci. Lett.* 209 (1995) 17-20

PD Dr. Horst M. Müller

AG Experimentelle Neurolinguistik  
Fakultät für Linguistik und Literaturwissenschaft  
Universität Bielefeld  
Postfach 100 131  
33 501 Bielefeld  
E-mail: mueller@cogsci.ucsd.edu