MAX PLANCK INSTITUTE FOR HUMAN COGNITIVE AND BRAIN SCIENCES LEIPZIG

Angelika Wolf: Sprachverstehen mit Cochlea-Implantat: EKP-Studien mit postlingual ertaubten erwachsenen CI-Trägern. Leipzig: Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, 2004 (MPI Series in Human Cognitive and Brain Sciences; 44)

Sprachverstehen mit Cochlea-Implantat: EKP-Studien mit postlingual ertaubten erwachsenen CI-Trägern

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Philosophie
der Humanwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Potsdam
–
vorgelegt von
Angelika Wolf aus Dresden

Leipzig, Juni 2003

Gutachter:
Prof. Dr. Angela D. Friederici (MPI für neuropsychologische Forschung Leipzig)
Prof. Dr. Douglas Saddy (Universität Potsdam)

Disputation:
Potsdam, 11. Dezember 2003

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung in Leipzig. Sie wurde in dieser Form nur durch die Anregung, Hilfe und Unterstützung einer Reihe von Menschen möglich, bei denen ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte.

An vorderster Stelle sei hier Anja Hahne genannt, welche als Betreuerin meinen Weg beginnend bei Praktikum und Diplomarbeit bis hin zur Dissertation im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes begleitete und der ich einen Großteil meines Wissens über ereigniskorrelierte Potentiale und Sprachverarbeitung verdanke. Außerordentlich dankbar bin ich ebenso Angela Friederici – sowohl für die optimalen Arbeitsbedingungen am MPI als auch für die engagierte Unterstützung während der Niederschrift dieser Arbeit und zahlreiche Anmerkungen zu früheren Versionen. Für seine hilfreiche Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit sei auch Kai Alter herzlich gedankt.

Zu größtem Dank verpflichtet bin ich allen CI-Trägern, die bereit waren, an den Experimenten teilzunehmen und für ihren Aufenthalt in Leipzig manchmal sogar Urlaubstage opferten. Bei der Organisation von Anreise und Unterkunft der CI-Träger waren mir Frau Gabler und Frau Müller von der Institutsverwaltung stets freundlich behilflich, wofür ich mich herzlich bedanken möchte. Mein Dank geht des Weiteren an Korinna Eckstein, Anja Roye, Sandy Siegert und Constance Langheinrich für die Unterstützung bei der Vorbereitung der Patientenaufenthalte sowie an Heike Böthel, Cornelia Schmidt und Sylvia Stasch für ihre Hilfe bei der Erhebung der Kontrolldaten. Möglich wurden die Patientenmessungen nur durch die Kooperation mit Herrn Dr. Müller von der Julius-Maximilians-Universität Würzburg sowie Herrn Dr. Kiefer von der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt/Main, denen ebenfalls herzlich gedankt sei.

Um für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen über eine möglichst genaue Ausgangsdatenlage zu verfügen, sollten nur Experimente zum Einsatz kommen, welche in ähnlicher oder identischer Form be-

reits mit hörgesunden studentischen Probanden durchgeführt worden waren. Es ist nicht selbstverständlich, dass mir Anja Hahne und Monika Lück aus diesem Grund experimentelles Material, welches von ihnen erstellt wurde, zur Verwendung überließen und ich bin beiden sehr dankbar dafür.

Zu danken habe ich des Weiteren den vielen Kollegen am MPI, die mir mit Anregungen, Diskussionen und Hinweisen immer eine große Hilfe waren, wenn ich nicht mehr weiter wusste. Nicht unerwähnt bleiben sollen hier auch die stets schnelle und freundliche Erfüllung meiner Literaturwünsche durch Frau Lewin und Frau Zaspel ebenso wie die hilfsbereite Lösung manchen Problems bei der Datenanalyse durch Maren Grigutsch und die wiederholte geduldige Einführung in den Umgang mit Grafikprogrammen durch Andrea Gast-Sandmann.

Ein großer Dank geht an meine Eltern, und zwar nicht nur für gründlichstes Korrekturlesen (für verbleibende Fehler bin selbstverständlich allein ich verantwortlich!) und einige wertvolle LaTeX-Tipps, sondern vor allem für Zuspruch, Aufmunterung und ständige Unterstützung.

Allen von mir vernachlässigten Freundinnen und Freunden danke ich für ihr Verständnis; herzlichen Dank außerdem an Dana für aufmerksames Korrekturlesen einiger Kapitel dieser Arbeit.

Monika, Ansgar und ganz besonders Britta – seid bedankt für statistische, linguistische, experimentaltechnische, korrekturlesende und / oder datendiskutierende Hilfe, insbesondere aber für sehr viel Spaß in schönen Zeiten und nachsichtigen Beistand in anstrengenden Zeiten.

Ich danke Christian, der immer für mich da war.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Hören und Sprachverstehen mit CI **5**

2.1 Hören und Hörschädigung 5

2.1.1 Anatomische Grundlagen 5

2.1.2 Akustische Grundlagen 10

2.1.3 Physiologischer Hörvorgang 11

2.1.4 Pathophysiologie des Hörens 15

2.2 Cochlea-Implantate 18

2.2.1 Aufbau 18

2.2.2 Generelle Funktionsweise 19

2.2.3 Kodierungsstrategien 20

2.3 Hörvermögen nach Cochlea-Implantation 24

2.4 Neuronale Reorganisation nach Cochlea-Implantation 28

2.5 Zusammenfassung 33

3 Der elektrophysiologische Ansatz **35**

3.1 Ereigniskorrelierte Potentiale 35

3.1.1 EEG und EKP 35

3.1.2 Methodik der Datenerhebung 37

3.1.3 Komponenten im EKP 39

3.1.4 Möglichkeiten und Grenzen der EKP-Methode 42

3.2 Sprachunspezifische EKP-Komponenten 44

3.2.1 Exogene Komponenten 44

3.2.2 Endogene Komponenten 45

3.3 Sprachspezifische EKP-Komponenten 47

3.3.1 EKP-Korrelate semantischer Verarbeitung 48

3.3.2 EKP-Korrelate syntaktischer Verarbeitung 55

3.3.2.1 Verarbeitung der Phrasenstruktur 56

3.3.2.2 Verarbeitung der Verbargumentstruktur 61

3.3.2.3 Verarbeitung morphosyntaktischer Informationen 64

3.3.2.4 Überblick über die EKP-Korrelate syntaktischer Verarbeitungsprozesse . 69

3.3.3 Modell des Satzverstehens bei Hörgesunden 71

3.4 Elektrophysiologische Befunde bei CI-Trägern 73

3.5 Zusammenfassung 81

4 Überblick über die Experimente I bis V **83**

5 Experiment I (Phrasenstruktur und Semantik – auditiv) **87**
5.1 Fragestellung und Hypothesen 87
5.2 Methoden 88
5.2.1 Stimulusmaterial 88
5.2.2 Probanden 90
5.2.3 Versuchsdurchführung 90
5.2.4 Datenanalyse 93
5.3 Ergebnisse 97
5.3.1 Verhaltensdaten 97
5.3.2 EKP-Daten 98
5.3.2.1 Semantische Bedingung: Kontrollgruppe 98
5.3.2.2 Semantische Bedingung: CI-Gruppe 102
5.3.2.3 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe 103
5.3.2.4 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe 109
5.3.2.5 Syntaktische Bedingung: Gruppenanalysen für CI-Träger 110
5.4 Zusammenfassung und Diskussion 115

6 Experiment II (Phrasenstruktur und Semantik – visuell) **121**
6.1 Fragestellung und Hypothesen 121
6.2 Methoden 122
6.2.1 Stimulusmaterial 122
6.2.2 Probanden 123
6.2.3 Versuchsdurchführung 123
6.2.4 Datenanalyse 124
6.3 Ergebnisse 125
6.3.1 Verhaltensdaten 125
6.3.2 EKP-Daten 127
6.3.2.1 Semantische Bedingung: Kontrollgruppe 127
6.3.2.2 Semantische Bedingung: CI-Gruppe 129
6.3.2.3 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe 131
6.3.2.4 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe 135
6.4 Zusammenfassung und Diskussion 141

7 Experiment III (Phrasenstruktur in Pseudowort-Sätzen – auditiv) **147**
7.1 Fragestellung und Hypothesen 147
7.2 Methoden 148
7.2.1 Stimulusmaterial 148
7.2.2 Probanden 149
7.2.3 Versuchsdurchführung 150
7.2.4 Datenanalyse 151
7.3 Ergebnisse 151

7.3.1 Verhaltensdaten . . . 151
7.3.2 EKP-Daten . . . 152
7.3.2.1 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe . . . 152
7.3.2.2 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe . . . 161
7.4 Zusammenfassung und Diskussion . . . 162

8 Experiment IV (Argumentstruktur und Semantik – auditiv) 167
8.1 Fragestellung und Hypothesen . . . 167
8.2 Methoden . . . 169
8.2.1 Stimulusmaterial . . . 169
8.2.2 Probanden . . . 171
8.2.3 Versuchsdurchführung . . . 171
8.2.4 Datenanalyse . . . 172
8.3 Ergebnisse . . . 173
8.3.1 Verhaltensdaten . . . 173
8.3.2 EKP-Daten . . . 175
8.3.2.1 Semantische Bedingung und *probability*-Bedingung: Kontrollgruppe . . 175
8.3.2.2 Semantische Bedingung und *probability*-Bedingung: CI-Gruppe . . . 185
8.3.2.3 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe . . . 187
8.3.2.4 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe . . . 193
8.4 Zusammenfassung und Diskussion . . . 195

9 Experiment V (Morphosyntax – auditiv) 199
9.1 Fragestellung und Hypothesen . . . 199
9.2 Methoden . . . 201
9.2.1 Stimulusmaterial . . . 201
9.2.2 Probanden . . . 202
9.2.3 Versuchsdurchführung . . . 202
9.2.4 Datenanalyse . . . 203
9.3 Ergebnisse . . . 204
9.3.1 Verhaltensdaten . . . 204
9.3.2 EKP-Daten . . . 206
9.3.2.1 Feminine Pluralnomen: Kontrollgruppe . . . 206
9.3.2.2 Feminine Pluralnomen: CI-Gruppe . . . 212
9.3.2.3 Pluralformen von Namen: Kontrollgruppe . . . 213
9.3.2.4 Pluralformen von Namen: CI-Gruppe . . . 218
9.4 Zusammenfassung und Diskussion . . . 219

10 Allgemeine Diskussion und Ausblick 223

Literaturverzeichnis 239

Kapitel 1
Einleitung

In unserer heutigen Gesellschaft ist nicht nur bei älteren Menschen eine zunehmende Verbreitung von Hörschäden zu beobachten. Wenn der Hörverlust dabei auf einen Ausfall der Funktionen des Innenohrs zurückgeht, ist den betroffenen Patienten mit herkömmlichen Hörgeräten wenig oder gar nicht zu helfen. Während die Forschung mit dem Ziel der Wiederherstellung zerstörter Sinneszellen im Innenohr durch medikamentöse Therapien bisher kaum verwertbare Ergebnisse erbrachte, kommt die Möglichkeit, das Hörvermögen von innenohrgeschädigten Patienten durch eine elektronische Hörprothese – ein sogenanntes *Cochlea-Implantat (CI)* – zu rehabilitieren, seit mittlerweile bald 20 Jahren zur breiten klinischen Anwendung[1].

In Folge einer Reihe von technischen Weiterentwicklungen sind Cochlea-Implantate inzwischen auf einem Stand angelangt, dass sie eine wirkliche Hörverbesserung für gehörlose und hochgradig hörgeschädigte Patienten darstellen. Obwohl die CI-Technik den meisten Patienten somit zwar den Wiedererwerb der Hörfähigkeit erlaubt und ihnen dadurch auch eine Teilnahme an lautsprachlichen Kommunikationsprozessen ermöglicht, weisen CI-Träger beim Verstehen von Sprache in der Regel dennoch klare Defizite auf. Die Ursachen dafür sind in den auch heute noch bestehenden technologischen Beschränkungen zu suchen, welche es nicht erlauben, die hochkomplexe Arbeitsweise des gesunden Hörsystems vollständig zu ersetzen. Die Übertragung von akustischen Sprachsignalen durch ein Cochlea-Implantat geht infolgedessen letztlich immer mit einer verminderten Frequenz-, Intensitäts- und Zeitauflösung und damit mit einem Verlust an sprachlicher Information einher. Bislang verfügt man über relativ wenig gesicherte Erkenntnisse darüber, wie das Gehirn mit dem solchermaßen eingeschränkten akustischen Sprachinput umgeht und inwiefern die bei den CI-Trägern auftretenden auditiven Perzeptionsschwierigkeiten Modifikationen in den Mechanismen der Sprachverarbeitung nach sich ziehen.

[1] So waren nach Angaben des Bayerischen Cochlear Implant Centrums Regensburg-Straubing Ende des Jahres 2002 etwa 40 000 Patienten weltweit mit einem Cochlea-Implantat versorgt (Quelle: http://www.ci-centrum.de/CI-Info/ci/CIInfoblatt2.htm, 30.01.2004).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll deshalb nun untersucht werden, ob die durch die CI-Übertragung bedingte Verminderung des akustischen Inputs bei CI-Trägern Veränderungen in den kognitiven Prozessen des Sprachverstehens auf Satzebene bewirkt. Die Mechanismen der Satzverarbeitung sollen dabei mit Hilfe der Messung *ereigniskorrelierter Hirnpotentiale (EKP)* erfasst werden. Diese zeitlich hochauflösende Methode hat sich bereits in einer Vielzahl von Studien als sensibel für Sprachverarbeitungsprozesse auf Satzebene erwiesen.

Nachfolgend werden insgesamt fünf EKP-Experimente berichtet, welche auf die systematische Aufklärung von verschiedenen Teilprozessen des Satzverstehens bei Cochlea-Implantat-Trägern abzielen. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dabei ausschließlich auf die Mechanismen der Sprachverarbeitung bei erwachsenen CI-Trägern, deren Ertaubung nach abgeschlossenem Spracherwerb stattfand. Die Interpretation der experimentellen Befunde für die Patienten wird auf der Basis eines Vergleichs mit den Daten einer Gruppe von hörgesunden, hinsichtlich ihres Alters mit den Patienten übereinstimmenden Kontrollprobanden erfolgen.

Im Mittelpunkt aller durchgeführten Experimente steht die Aufklärung der Prozesse der *syntaktischen* Informationsverarbeitung bei den CI-Patienten. Es wird vornehmlich auf diese Teilprozesse des Satzverstehens fokussiert, da von der Tatsache, dass CI-Träger viele der für das Sprachverstehen relevanten Informationen nicht wahrnehmen können, besonders die im akustischen Signal nur wenig prominenten Elemente der gesprochenen Sprache betroffen sind. Diese wiederum kodieren jedoch häufig wichtige syntaktische Informationen – so wie beispielsweise Flexionsmorpheme oder unbetonte Präpositionen –, welche für die Herleitung adäquater Satzrepräsentationen von großer Bedeutung sind. Daraus ergibt sich die Frage, ob CI-Träger möglicherweise alternative Verarbeitungsstrategien anwenden, um sprachliche Äußerungen trotz der anzunehmenden Schwierigkeiten bezüglich der auditiven Perzeption von syntaktischen Elementen korrekt interpretieren zu können. Dieser Frage soll durch die Verwendung verschiedener syntaktischer Informationstypen in den einzelnen Experimenten nachgegangen werden.

Einführend in die Thematik des Hörens mit Cochlea-Implantat wird im nachfolgenden zweiten Kapitel jedoch zunächst auf Anatomie und Physiologie des unbeeinträchtigten Hörsystems sowie auf den Aufbau und die Funktionsweise von CI-Systemen eingegangen. Damit soll ein grundlegendes Verständnis dafür geschaffen werden, inwiefern sich das Hören mit CI vom normalen Hören unterscheidet. Des Weiteren wird in diesem Kapitel experimentelle Evidenz für Veränderungen im Sprachverstehenssystem bei CI-Trägern berichtet. Die bisherigen Untersuchungen auf diesem Gebiet befassten sich allerdings we-

niger mit den im Rahmen der vorliegenden Arbeit interessierenden prozessualen Merkmalen des Sprachverstehens von CI-Trägern als vielmehr mit der neuroanatomische Basis der Sprachverarbeitung bei diesen Patienten.

Das dritte Kapitel stellt die Methode der Messung ereigniskorrelierter Hirnpotentiale vor. Anschließend wird hier ein Überblick über die im Kontext dieser Arbeit relevanten hirnelektrischen Korrelate der verschiedenen Teilprozesse des Sprachverstehens gegeben. Das Kapitel geht außerdem auf Studien ein, in denen bereits ereigniskorrelierte Potentiale zur Erforschung von auditiven Verarbeitungsprozessen bei CI-Trägern zum Einsatz kamen. Es sei aber vorwegnehmend angemerkt, dass sich die bisherigen EKP-Untersuchungen bei CI-Patienten ausschließlich den Prozessen der Hörwahrnehmung auf primären Verarbeitungsebenen – wie beispielsweise Frequenz- oder Phonemdiskrimination – gewidmet haben.

Die zentralen Fragestellungen der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf die Prozesse des Satzverstehens bei postlingual ertaubten CI-Trägern werden im vierten Kapitel hergeleitet, welches im Anschluss einen Überblick über die Fragestellungen der einzelnen Experimente gibt. Die Experimente I bis V selbst und ihre Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich dargestellt.

Das abschließende zehnte Kapitel beinhaltet schließlich einen zusammenfassenden Überblick über die Befunde der einzelnen Experimente sowie eine allgemeine Diskussion der Daten u. a. im Hinblick auf Parallelen in den Mechanismen des Sprachverstehens bei CI-Trägern und bei Zweitsprachlernern.

Kapitel 2
Hören und Sprachverstehen mit Cochlea-Implantat

2.1 Hören und Hörschädigung

2.1.1 Anatomische Grundlagen

Das menschliche Hörsystem besteht aus einem peripheren und einem zentralen Teil. Dem peripheren Hörorgan werden das Außenohr, das Mittelohr, das Innenohr und die peripheren Anteile des Hörnervs zugeordnet (vgl. Abbildung 2.1). Der zentrale Teil des Hörorgans umfasst dagegen die zentralen Anteile der Hörbahn sowie die subkortikalen und kortikalen Hörzentren. Die Grenze zwischen peripherem und zentralem Teil des Hörsystems im anatomisch-morphologischen Sinne befindet sich an der Eintrittstelle des Hörnervs in den Hirnstamm.[1]

Außenohr. Zum Außenohr werden die äußerlich sichtbare Ohrmuschel (*Auricula*) und der äußere Gehörgang gerechnet. Die Ohrmuschel besteht aus einem straff mit elastischer Haut umkleideten Knorpelgerüst mit charakteristischem Relief. Der daran anschließende äußere Gehörgang (*Meatus acusticus externus*) führt durch den Schädelknochen hindurch zum Mittelohr. Er verengt sich zum Trommelfell (*Membrana tympani*) hin und wird durch dieses hermetisch abgeschlossen. Der fast vollständig mit Haut ausgekleidete Gehörgang ist im vorderen Teil knorpelig, weiter innen dagegen knochig.

Mittelohr. Das Mittelohr umfasst die hinter dem Trommelfell liegende luftgefüllte Paukenhöhle (*Tympanon*) mit den darin befindlichen drei Gehörknöchelchen Hammer (*Mal-*

[1] Der im folgenden gegebene Überblick über die Anatomie der einzelnen Bestandteile des menschlichen Hörsystems ist grundlegender Natur. Ausführliche Beschreibungen finden sich zum Beispiel bei Hellbrück (1993), Møller (2000), Pickles (1988), Plath (1992), Rohen (1994), Yost (2000) und Zenner (1994, 1995), auf die sich auch die nachfolgenden Ausführungen zu Anatomie und Physiologie des menschlichen Hörsystems beziehen.

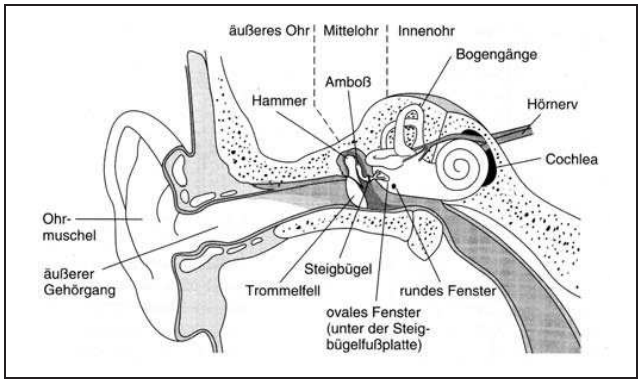

Abb. 2.1: *Überblick über das periphere Hörorgan mit Außenohr, Mittelohr und Innenohr (aus: Goldstein, 2002).*

leus), Amboss (*Incus*) und Steigbügel (*Stapes*), die beweglich miteinander verbunden sind. Der Hammer ist mit seinem langen Griff in das Trommelfell eingewebt. Er ist über den Amboss mit dem Kopf des Steigbügels verbunden. Die Fußplatte des Steigbügels ist mit Bändern in das ovale Fenster eingelassen, welches sich ebenso wie das runde Fenster in der schleimhautbedeckten Knochenwand des Felsenbeins befindet. Das Felsenbein grenzt das Mittelohr vom Innenohr ab. Dem Mittelohr zuzurechnen sind auch die Eustachische Röhre (*Tuba auditiva*), welche eine Verbindung zwischen Paukenhöhle und Nasenrachenraum herstellt sowie die beiden Binnenohrmuskeln *M. tensor tympani* und *M. stapedius*.

Innenohr. Zum Innenohr gehören der Vorhof (*Vestibulum*) und das aus den drei Bogengängen sowie der Hörschnecke (*Cochlea*) bestehende Labyrinth. Während die Bogengänge dem Vestibularapparat zugeordnet sind, welcher dem Gleichgewichtssinn dient, befindet sich das eigentliche Hörorgan in der Cochlea. Diese weist eine schneckenartige Form mit zweieinhalb Windungen auf (vgl. Abbildung 2.2). Sie ist – ebenso wie auch die anderen Teile des Labyrinths – von einer knöchernen Wandung umgeben. Innerhalb dieser Strukturen, dem sogenannten knöchernen Labyrinth, befindet sich das von dünnen Membra-

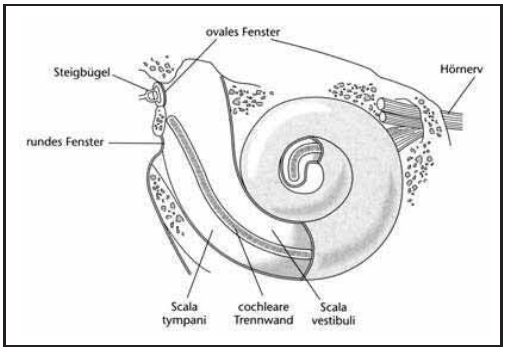

Abb. 2.2: *Längsschnitt durch das Innenohr mit einer teilweise entrollten Cochlea (aus: Goldstein, 2002).*

nen begrenzte häutige Labyrinth. Es ist mit einer als *Endolymphe* bezeichneten Flüssigkeit gefüllt, wohingegen die im Raum zwischen knochigem und häutigem Labyrinth befindliche Flüssigkeit *Perilymphe* genannt wird. Durch diese Strukturen ist die Cochlea in drei flüssigkeitsgefüllte Gänge unterteilt. Nach oben hin liegt zwischen der knöchernen Wandung und der entsprechenden Membran des häutigen Labyrinths, welche als Reissnersche Membran bezeichnet wird, die *Scala Vestibuli*. Am basalen Ende öffnet sie sich zum Vorhof mit dem darin befindlichen ovalen Fenster. Die unten liegende *Scala tympani* wird von der Basilarmembran begrenzt. Sie schließt zur Paukenhöhle hin mit dem runden Fenster ab. Die beiden mit Perilymphe gefüllten Gänge von Scala vestibuli und Scala tympani sind am apikalen Ende der Cochlea, dem *Helikotrema*, miteinander verbunden. Der zwischen Scala vestibuli und Scala tympani befindliche, mit Endolymphe gefüllte Hohlraum, der von Reissnerscher Membran und Basilarmembran begrenzt ist, wird als *Ductus cochlearis* oder *Scala media* bezeichnet. Innerhalb des Ductus cochlearis befindet sich das eigentliche Hörorgan, das *Cortische Organ* (vgl. Abbildung 2.3).

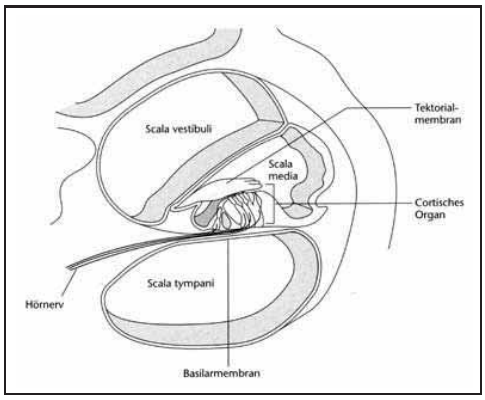

Abb. 2.3: *Querschnitt durch die Cochlea (aus: Goldstein, 2002).*

Cortisches Organ. Das Cortische Organ ist ein komplex aufgebautes Gebilde, welches innerhalb des Ductus cochlearis auf der Basilarmembran liegt (vgl. Abbildung 2.4). Auf dieser von basal nach apikal breiter werdenden Membran sind die Hörsinneszellen angeordnet. Sie werden aufgrund der feinen Sinneshärchen (*Stereozilien*), die sich an ihrem oberen Ende befinden, auch Haarzellen genannt. Man unterscheidet zwischen inneren und äußeren Haarzellen. Während die etwa 3500 inneren Haarzellen in einer Reihe angeordnet sind, bilden die etwa 12 000 äußeren Haarzellen zwischen drei und weiter apikal fünf Reihen. Die Haarsinneszellen sind von Stützzellen umgeben. Das Cortische Organ wird von der gelatinösen Masse der Deckmembran (*Membrana tectoria*) bedeckt. Die längsten der Stereozilien der äußeren Haarzellen sind mit der Tektorialmembran verbunden, wohingegen die Stereozilien der inneren Haarzellen keinen oder nur losen Kontakt mit der Tektorialmembran haben.

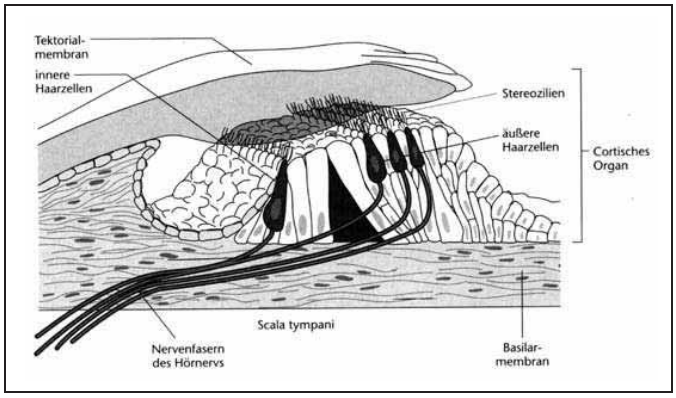

Abb. 2.4: *Querschnitt durch das Cortische Organ (aus: Goldstein, 2002).*

Die Haarzellen werden durch zwei Arten von Nervenfasern innerviert: durch die afferenten Fasern des Hörnervs und durch die efferenten Fasern des *olivocochleären Bündels* (vgl. nächster Abschnitt). Die afferenten Nervenfasern setzen zum überwiegenden Teil an den inneren Haarzellen an, die Innervierung der äußeren Haarzellen erfolgt hingegen zumeist efferent. Während die an den inneren Haarzellen ansetzenden Nervenfasern immer nur eine einzige solche Sinneszelle versorgen, verzweigen sich die zu den äußeren Haarzellen führenden Nervenfasern und innervieren jeweils eine ganze Reihe äußerer Haarzellen. Die Zellkörper der zu den Haarzellen ziehenden Nervenendigungen sind im *Ganglion spirale* vereinigt.

Hörnerv und zentrale Hörbahn. Der aus etwa 30 000 afferenten Nervenfasern bestehende menschliche Hörnerv (*N. cochlearis* oder *N. acusticus*) bildet gemeinsam mit dem aus dem Gleichgewichtsorgan kommenden *N. vestibularis* den VIII. Hirnnerv (*N. statoacusticus* bzw. *N. vestibulocochlearis*). Seine Fasern setzen an den Haarzellen des Cortischen Organs an (s. o.), die Zellkörper sind im *Ganglion spirale* vereinigt. Der Hörnerv bildet das erste der etwa fünf bis sechs hintereinandergeschalteten Neuronen der Hörbahn. Er verlässt das Innenohr durch den inneren Gehörgang (*Meatus acusticus internus*) und tritt am Kleinhirnbrückenwinkel in das verlängerte Rückenmark (*Medulla oblongata*) als Teil des Hirnstamms ein. Dort teilen sich die afferenten Fasern und ziehen zum vorderen und zum hinteren Cochleariskern (*Nucleus cochlearis ventralis* und *Nucleus cochlearis dorsalis*), wo größtenteils die Umschaltung zum zweiten Neuron erfolgt. Vom ventralen Cochleariskern aus verlaufen die afferenten Nervenfasern des zweiten Neurons teils ipsi-, hauptsächlich jedoch kontralateral zur oberen Olive (*Nucleus olivaris superior*). Die afferenten Fasern des dorsalen Cochleariskerns hingegen kreuzen nach kontralateral zum late-

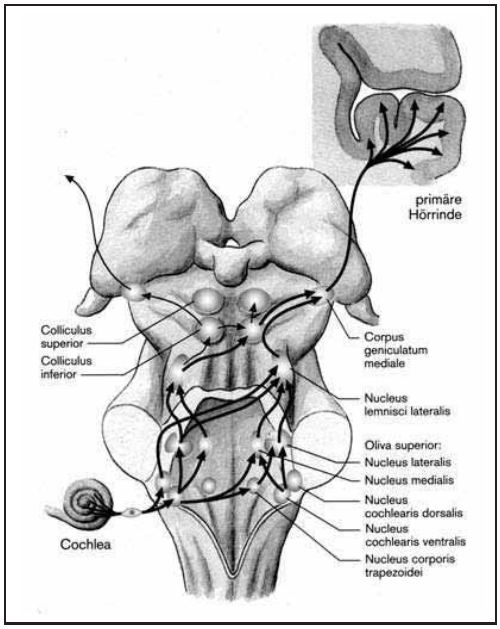

Abb. 2.5: *Schematische Darstellung der zentralen Hörbahn (aus: Klinke, 1996).*

ralen Schleifenkern (*Nucleus lemnisci lateralis* oder *Lemniscus lateralis*). Auch die dem zweiten Neuron nachgeschalteten höheren Neurone verlaufen teils ipsi- und teils kontralateral. Von der oberen Olive zieht die Hörbahn zunächst zum unteren Vierhügelkern (*Colliculus inferior*), wobei ein Teil der Fasern durch den Lemniscus lateralis hindurch führt. Sie erreicht danach den medialen Kniehöcker (*Corpus geniculatum mediale*), von wo aus sie als sogenannte Hörstrahlung (*Radiato acustica*) schließlich zum *auditorischen Kortex* zieht (vgl. Abbildung 2.5).

Neben der von der Cochlea zum auditorischen Kortex aufsteigenden, hier wesentlich vereinfacht beschriebenen afferenten Hörbahn verläuft in absteigender Richtung ein sogenanntes zentrifugales System efferenter Bahnen, das alle Ebenen des auditorischen Systems miteinander verbindet. Zur efferenten Hörbahn zählt u. a. das *olivocochleäre Bündel*, dessen Fasern aus dem oberen Olivenkomplex kommend zu den Haarsinneszellen in der Cochlea ziehen. Dabei ist zwischen dem ungekreuzten olivocochleären Bündel und dem gekreuzten olivocochleären Bündel zu unterscheiden. Die meisten Fasern des olivocochleären Bündels setzen an den äußeren Haarzellen an, wobei der überwiegende Teil der Fasern jeweils von kontralateral, d. h. aus dem gekreuzten olivocochleären Bündel stammt.

Hörzentren. Die für das Hören zuständigen Hirnrindenbereiche sind im Temporallappen des zerebralen Kortex angesiedelt. Es ist zu unterscheiden zwischen primärem auditorischem Kortex und auditorischen Assoziationsfeldern. Der primäre auditorische Kortex (AI) befindet sich im *Planum supratemporale*. Er erstreckt sich in der *Fissura Sylvii* entlang der *Gyri temporales transversi* in der sogenannten Heschl'schen Querwindung und besetzt damit die Brodmann-Areale[2] 41 und 42 (Pandya, 1995). Die den primären auditorischen Kortex umgebenden auditorischen Assoziationsfelder, welche auch als sekundäre Hörrinde bezeichnet werden, liegen an der Außenseite des Temporallappens im *Gyrus temporalis superior* (STG) sowie teilweise im *Gyrus temporalis medius* (MTG). Sie besetzen den Großteil des Brodmann-Areals 22 und liegen damit in enger Nachbarschaft zum Wernicke-Areal, das neben dem posterioren Teil des Brodmann-Areals 22 auch Teile der angrenzenden Areale umfassen kann (Pandya, 1995).

2.1.2 Akustische Grundlagen

Im physikalischen Sinne bedeutet Hören die Aufnahme und Weiterverarbeitung von Schallereignissen aus der Umwelt. Als Schallereignisse gelten hierbei periodische oder nicht-periodische Schwankungen des Luftdrucks, die sich physikalisch durch ihre Frequenz und ihre Amplitude charakterisieren lassen. Im menschlichen Sprachschall sind periodische Schallanteile in den Vokalen und in stimmhaften Konsonanten enthalten, wohingegen stimmlose Konsonanten als nicht-periodische Geräusche zu betrachten sind.

Frequenz. Als subjektives Korrelat der objektiv messbaren Frequenz (Einheit: Hz) gilt die Tonhöhe. Das menschliche Hörorgan ist in der Lage, Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz wahrzunehmen, wobei der sprachliche Frequenzbereich nach Goldstein (2002) zwischen 400 Hz und 3 kHz liegt.

Amplitude. Die Amplitude steht in direktem Zusammenhang mit der Schallintensität bzw. dem Schalldruck. Da der menschliche Hörbereich mit einem extrem großen dynamischen Bereich korrespondiert, der Schalldrücke zwischen 20 μPa und 20 Pa umfasst, verwendet man üblicherweise das handlichere logarithmische Maß des Schalldruckpegels (Einheit: dB(SPL)). Die subjektiv empfundene Lautstärke (Einheit: dB(A)) eines Schallereignisses korreliert mit seinem Schalldruckpegel, ist aber auch abhängig von seiner

[2]Die Brodmann-Areale (BA) geben die von Brodmann (1909) unter zyto- und myeloarchitektonischen Gesichtspunkten vorgenommene Einteilung der Oberfläche der Großhirnrinde in verschiedene, fortlaufend nummerierte Hirnrindenfelder wider.

Frequenz. Mit dem Maß des Lautstärkepegels (Einheit: Phon) wurde normiert, bei welchen Schalldruckpegeln Töne unterschiedlicher Frequenzen als gleich laut empfunden werden. Insofern stellt dieses Maß einen Zusammenhang zwischen objektiv messbarem Schalldruckpegel und subjektiv empfundener Lautstärke her. Per definitionem stimmt für einen Ton von 1 kHz der Wert des Lautstärkepegels genau mit dem Wert des Schalldruckpegels überein. Diese Übereinstimmung ist für niedrigere und höhere Töne aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Lautstärke nicht mehr gegeben. Mit der Lautheit (Einheit: Sone) als weiterer psychoakustischer Größe wird der Tatsache Rechnung getragen, dass der Anstieg der Lautstärkeempfindung nicht in linearer Weise sondern in Form einer Potentialfunktion erfolgt. Die Lautheit gibt empfundene Lautstärkeunterschiede in linearer Weise wider.

2.1.3 Physiologischer Hörvorgang

Der Hörvorgang ist ein vielstufiger Prozess, in dessen Verlauf die Luftdruckschwankungen eines Schallereignisses in mechanische Bewegungen und weiter in elektrische Nervenaktionspotentiale umgewandelt werden.

Die Schallwellen eines auf das menschliche Ohr auftreffenden Schallereignisses werden zunächst von der Ohrmuschel aufgenommen und durch den Gehörgang zum Trommelfell hin weitergeleitet. Dabei wird der Schall modifiziert, da Ohrmuscheln und Kopf als Beugungskörper wirken. Außerdem hat die Resonanzwirkung des äußeren Gehörgangs eine Schalldruckverstärkung am Trommelfell von bis zu 20 dB zur Folge.

Die auf das Trommelfell auftreffenden Luftdruckschwankungen versetzen dieses in Schwingungen, woraus eine Übertragung der Bewegungen auf die mit dem Trommelfell verbundene Gehörknöchelchenkette resultiert. Über die drei beweglich miteinander verbundenen Gehörknöchelchen erfolgt die Weitergabe der mechanischen Energie an das Innenohr. Hierbei ist eine Verstärkung des Schwingungsdrucks zu verzeichnen, die sich auf die unterschiedlichen Größenverhältnisse von Trommelfell und ovalem Fenster sowie auf die Hebelverhältnisse der Gehörknöchelchenkette zurückführen lässt. Eine solche Schalldruckerhöhung ist notwendig, da andernfalls – bedingt durch die wesentlich höheren Impedanzen der hinter dem ovalen Fenster liegenden Perilymphe verglichen mit der im Mittelohr befindlichen Luft – der Schall am ovalen Fenster fast vollständig reflektiert würde. Ein Angleich des Drucks im Mittelohr an den Außendruck, der die ungehinderte Beweglichkeit des Trommelfells in laterale und mediale Richtung gewährleistet, wird durch die Funktion der Tuba auditiva gesichert.

Die Umwandlung der Bewegungsenergie in Nervenimpulse erfolgt im Innenohr. Über die Fußplatte des Stapes wird der Schalldruck auf die in der Scala vestibuli der Cochlea befindliche Perilymphe übertragen. Da es sich hierbei um eine praktisch inkompressible Flüssigkeit handelt, bewirkt eine Druckerhöhung am ovalen Fenster das Ausweichen der Perilymphe zum Helikotrema hin. Ein Druckausgleich erfolgt über die am Helikotrema mit der Scala Vestibuli in Verbindung stehende Perilymphe in der Scala tympani sowie das an ihrem basalen Ende zur Paukenhöhle hin gelegene runde Fenster.

Gleichzeitig wird durch die Druckschwankungen in der Perilymphe auch eine wellenförmige Verschiebung der in der Cochlea befindlichen Membrane und insbesondere der Basilarmembran bewirkt, was wiederum eine Relativbewegung zwischen Cortischem Organ und der sie bedeckenden Tektorialmembran zur Folge hat. An der Stelle der maximalen Auslenkung der wellenförmigen Verschiebungen (s. u.) wird eine Deflektion der mit der Deckmembran in Verbindung stehenden Stereozilien verursacht. Für die diese Membran nicht berührenden Sinneshärchen der inneren Haarzellen werden hierbei hydrodynamische Kopplungsprozesse angenommen. Die Abscherung der Stereozilien stellt den für diese Sinneszellen adäquaten Reiz dar. Sie löst Stoffwechselvorgänge in der Sinneszelle aus, die letztendlich zur Freisetzung von Neurotransmittern und damit zur Erregung der an den Haarzellen ansetzenden Nervenendigungen führen.

Die Ausbreitung der Schallschwingungen in der Cochlea erfolgt in Form einer sogenannten Wanderwelle. Diese beginnt am ovalen Fenster mit einer kleinen Amplitude, wächst langsam an und erreicht in Abhängigkeit von der entsprechenden Frequenz an einer bestimmten Stelle ihr Maximum, um unmittelbar danach rasch wieder abzunehmen. Für hohe Frequenzen bildet sich das Wanderwellenmaximum am basalen Ende der Cochlea aus, für tiefe Frequenzen hingegen am apikalen Ende. Diese frequenzabhängige Ausbildung von Schwingungsmaxima entlang der Basilarmembran (*tonotopisches Prinzip*), die durch die Elastizitätsbedingungen dieser Membran und damit verbundene Dämpfungseigenschaften bedingt ist, ermöglicht bereits im Innenohr das Stattfinden einer ersten Frequenzanalyse. Diese 1960 durch v. Békésy erstmals beschriebene Wanderwellentheorie allein kann die hohe Frequenzauflösung des Gehörs jedoch nicht erklären. Die Theorie wurde deshalb durch neuere Modellvorstellungen relativiert und ergänzt.

So geht man mittlerweile davon aus, dass der von der Wanderwelle verursachte passive Erregungsvorgang entlang der Basilarmembran zunächst aktiv verstärkt wird. Als zelluläre Grundlagen eines solchen aktiven cochleären Verstärkers werden die efferent innervierten äußeren Haarzellen vermutet, welche eine schärfere Abstimmung der Auslenkung der Wanderwelle ermöglichen sollen.

Außerdem scheint die tonotopische Frequenzanalyse durch eine Periodizitätsanalyse des eintreffenden Schallsignals ergänzt zu werden. Indem die Transmitterfreisetzung der inneren Haarzellen in Abhängigkeit von der Phase der Auslenkung der Sinneshärchen erfolgt (*Phasenkopplung*), werden auch die an diesen Zellen ansetzenden afferenten Nervenfasern periodisch erregt, was wiederum ihre Entladungsrate beeinflusst. Dieser Vorgang ermöglicht die Registrierung der Phasenhäufigkeit eines Signals, welche in direkter Beziehung zu seiner Frequenz steht.

Das Prinzip der Frequenzortsabbildung setzt sich im Hörnerv fort. Indem jede Haarzelle einer bestimmten Tonhöhe zugeordnet ist, besteht auch für die an den Haarzellen ansetzenden Nervenfasern eine frequenzspezifische Zuordnung in dem Sinne, dass die Neurone durch jeweilige sogenannte charakteristische Frequenzen (*CF*, auch *Bestfrequenz*) bereits bei niedrigen Schallpegeln optimal erregt werden. Dass neben dieser Ortskodierung aber weitere Mechanismen zur Frequenzkodierung existieren müssen, legen beispielsweise die klinischen Erfahrungen mit einkanaligen Cochlea-Implantaten nahe (vgl. Abschnitt 2.2.1). Als ein solcher Kodierungsmechanismus kommt die bereits erwähnte Periodizitätsanalyse in Frage, d. h. dass die Auslösung der Nervenaktionspotentiale in Übereinstimmung mit temporalen Mustern des akustischen Reizes geschieht.

Zur Kodierung von Informationen über den Schalldruckpegel eines Schallsignals wird die Entladungsrate der Einzelneurone genutzt. Sie steigt bei zunehmendem Schallpegel an, wobei allerdings eine bestimmte Ladungsrate nicht überschritten werden kann. Bei einem Überschreiten dieses sogenannten Sättigungsbereiches werden zunehmend benachbarte Fasern erregt (*Recruitment*).

Als weiteres wichtiges Merkmal eines akustischen Ereignisses gilt seine Zeitdauer. Informationen darüber werden mittels der Dauer der Aktivierung der Nervenfasern verschlüsselt.

Im zweiten Neuron ist die Schallinformation in ähnlicher Weise kodiert wie in den Fasern des Hörnervs. Die Nervenfasern dieser ersten beiden Neurone haben im Wesentlichen die Aufgabe der reinen Informationsweitergabe an höhere Zentren.

Die funktionelle Organisation der zentralen Hörbahnen ist derzeit noch nicht vollständig erforscht. Es gilt aber als gesichert, dass sich die akustische Reizverschlüsselung in den höheren Neuronen grundlegend wandelt. Zwar bleibt das tonotopische Prinzip auf allen Stationen der Hörbahn bis hin zum auditorischen Kortex bestehen, jedoch reagieren die höheren Neurone nicht mehr – wie das auf den untergeordneten Verarbeitungsebenen der Fall ist – auf einfache Reize wie reine Sinustöne. Sie sind stattdessen zunehmend auf bestimmte Eigenschaften von komplexen Schallmustern spezialisiert. So gibt es beispiels-

weise Fasern, deren Aktivierung nur durch bestimmte Frequenzen ausgelöst werden kann, wohingegen höhere oder tiefere Frequenzen eine Hemmung hervorrufen. Andere Fasern werden nur durch Frequenzmodulationen aktiviert und zwar in Abhängigkeit vom Grad der Modulation. Wieder andere Nervenfasern sind auf Änderungen der Amplitude des Schallsignals spezialisiert. Grundsätzlich gilt, dass die Spezialisierung der Neurone auf komplexe Schallmuster bis zur Hörrinde hin zunimmt.

Dabei erfolgt durch komplexe wechselseitige Verschaltungen auf den verschiedenen Ebenen, welche mit Prozessen der Verstärkung, Hemmung, Selektion und Relationierung einhergehen, eine Vorverarbeitung des akustischen Signals bereits vor seinem Eintreffen auf der kortikalen Ebene. Die zunehmende Spezialisierung der Neurone ermöglicht es, relevante Muster innerhalb eines Schallereignisses hervorzuheben (*feature extraction*) und für die kortikale Verarbeitung vorzubereiten. Dieser Vorverarbeitung schreibt man unter anderem die Funktion der Trennung zwischen Nutz- und Störschall zu.

Im den kortikalen Hörzentren ist eine noch ausgeprägtere Spezialisierung der Neurone auf bestimmte Merkmale im Schallmuster anzutreffen. Bestimmte Neurone werden beispielsweise nur durch den Beginn oder das Ende eines akustischen Reizes aktiviert, andere wiederum reagieren nur auf mehrfache Wiederholungen oder eine bestimmte Mindestzeitdauer. Obwohl man von einem umfassenden Verständnis der auditiven Verarbeitung auf kortikaler Ebene noch weit entfernt ist, kann doch als gesichert gelten, dass auch im primären akustischen Kortex das bereits im peripheren Hörorgan auftretende Prinzip der tonotopen Organisation wiederzufinden ist (vgl. z. B. Pantev & Ross, 2002; Read, Winer & Schreiner, 2002).

Die der im primären akustischen Kortex stattfindenden akustisch-phonetischen Analyse nachgeordneten Schritte im Prozess des Lautsprachverstehens reichen vom Aufbau phonologischer Repräsentationen über Worterkennung und damit verbundene lexikalische Verarbeitungsschritte bis hin zur syntaktischen Verarbeitung auf Satzebene und daran anschließender Integration der Informationen auf Diskursebene (vgl. u. a. Friederici, 1999). Die Verarbeitung von phonologischer, semantischer und syntaktischer Information geschieht dabei innerhalb verschiedener neuronaler Netzwerke. Der Identifizierung der neuronalen Basis für die einzelnen Subprozesse des Sprachverstehens hat sich eine Vielzahl von Studien gewidmet, auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden kann[3].

Aufbauend auf den Befunden einer Reihe von Studien – Läsionsstudien ebenso wie Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren – schlägt Friederici (2002) ein Modell vor,

[3]Ein Überblick hierzu findet sich beispielsweise bei Friederici (2002), Friederici und von Cramon (1999), Gernsbacher und Kaschak (2003) und Martin (2003).

welches die neuroanatomische Basis des auditorischen Sprachverstehenssystems als bilaterales temporo-frontales Netzwerk beschreibt, bei dem semantische und syntaktische Informationen vorwiegend links-hemisphärisch verarbeitet werden, wohingegen die rechte Hemisphäre maßgeblich an der Verarbeitung prosodischer Informationen beteiligt ist. Von den links-temporalen Regionen werden dabei Prozesse der Identifikation phonetischer, lexikalischer und struktureller Informationen unterstützt. Der links-anteriore STG ist an der syntaktischen Verarbeitung beteiligt, semantische Verarbeitungsprozesse involvieren den linken MTG. Die frontalen Regionen der linken Hemisphäre unterstützen Prozesse der Sequenzierung sowie den Aufbau struktureller, semantischer und thematischer Relationen, wobei den Brodmann-Arealen 45 und 47 die Erstellung semantischer Relationen und dem Brodmann-Areal 44 sowie dem frontalen operkularen Kortex der Aufbau syntaktischer Relationen zugeschrieben werden. Die Identifizierung von prosodischen Parametern erfolgt dem Modell zufolge in rechts-temporalen Anteilen, der rechts-frontale Kortex unterstützt die Verarbeitung von Satzmelodie.

2.1.4 Pathophysiologie des Hörens

Störungen des Hörens können in jedem Bereich des peripheren Hörorgans ebenso wie auf der zentralen Hörbahn oder in den Hörzentren auftreten. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen peripheren und zentralen Hörstörungen. Letztere betreffen Läsionen im Bereich der Hörbahn oberhalb der Cochleariskerne einschließlich der Hörrinde. Es handelt sich hier vor allem um Störungen der auditiven Informationsverarbeitung, die somit den neurologischen Störungsbildern zugeordnet werden können (Diller, 1997; Plath, 1992). Die das periphere Hörsystem betreffenden Störungen werden in der Regel wiederum in Schallleitungsstörungen (*conductive hearing loss*) und Schallempfindungsstörungen (*sensorineural hearing loss*) unterteilt.

Schallleitungsstörungen betreffen die Schallaufnahme und -weitergabe hin zur Cochlea. Sie werden durch Funktionsstörungen oder Missbildungen von Gehörgang, Trommelfell oder Mittelohr verursacht. Eine Schallleitungsstörung geht mit einer Minderung der Schallintensität einher, es ist aber ein Hören über den gesamten Frequenzbereich möglich. Somit ist das akustische Signal in qualitativer Hinsicht nicht beeinträchtigt. Die Hörfähigkeit bei von Störungen dieser Art betroffenen Patienten kann in der Regel durch medikamentöse Therapien, operative Maßnahmen oder Hörgeräteversorgung wiederhergestellt werden (Møller, 2000).

Bei den Schallempfindungsstörungen, welche dem englischen Sprachgebrauch folgend zunehmend auch als sensorineurale Hörstörungen bezeichnet werden, liegt in den meisten Fällen eine Schädigung im cochleären Bereich vor. Ein sensorineuraler Hörverlust kann aber auch durch eine sogenannte retrocochleäre Störung, welche den N. acusticus betrifft, bedingt sein. Die Störung der neuralen Reizübermittlung bei einer solchen retrocochleären Störung wird häufig durch ein Akustikusneurom, also einen Tumor im inneren Gehörgang verursacht (Møller, 2000; Pickles, 1988). Die seit wenigen Jahren bestehende Möglichkeit, Schädigungen des Hörnervs mittels eines Hirnstammimplantats (*Auditory Brainstem Implant, ABI*) technisch zu kompensieren, befindet sich derzeit noch in der klinischen Erprobungsphase (Lenarz, 1998).

Weitaus häufiger als retrocochleäre Hörstörungen treten Hörschädigungen cochleärer Art auf (Innenohrschwerhörigkeit). Hier liegt eine Läsion im Bereich des Innenohres vor, die Funktionsfähigkeit des Hörnervs bleibt davon aber unbeeinträchtigt. Cochleäre Hörverluste können im Zusammenhang mit Schädigungen des Endolymphsystems stehen oder durch Durchblutungsstörungen in der Cochlea hervorgerufen werden. In den meisten Fällen ist ihre Ursache jedoch die Beschädigung oder der Verlust von äußeren oder inneren Haarzellen (Møller, 2000). Da Sinneszellen im Gegensatz zu den meisten sonstigen Körperzellen nicht neu gebildet werden können, ist die Hörschädigung in diesen Fällen bleibend.

Eine Innenohrschwerhörigkeit hat im Gegensatz zur Schallleitungsstörung nicht nur eine Intensitätsminderung zur Folge, sondern das Schallsignal ist in der Regel auch qualitativ verändert. Der als typisch geltende Verlust hinsichtlich des Frequenzauflösungsvermögens resultiert in der Regel aus der Beschädigung der äußeren Haarzellen, da in diesem Fall die Verstärkung und Feinabstimmung der cochleären Wanderwelle nicht mehr gegeben ist. Insgesamt sind cochleäre Hörstörungen dadurch gekennzeichnet, dass bestimmte Frequenzbereiche nur verzerrt beziehungsweise gedämpft oder gar nicht wahrgenommen werden können. Davon sind in der Regel besonders die hohen Frequenzen betroffen. Meistens liegt auch eine Beeinträchtigung des selektiven Hörens vor (Hellbrück, 1993; Møller, 2000; Pickles, 1988). Je größer das Ausmaß einer solchen Hörstörung ist, umso schwieriger wird es, die Hörfähigkeit mit Hilfe von Hörgeräten entscheidend zu verbessern. Ein Hörgerät kann zwar gedämpfte Abschnitte verstärken, es ist jedoch nicht in der Lage, fehlende Tonbereiche zu ersetzen oder Verzerrungen zu beheben.

Schädigungen des Innenohrs können durch eine Vielzahl von Faktoren hervorgerufen werden. Kongenitale Hörschäden treten als isolierte erbliche Innenohrschwerhörigkeit auf oder sind Bestandteil eines Fehlbildungssyndroms (z. B. Usher-Syndrom). Es kann sich

aber auch um pränatal erworbene Schädigungen handeln (z. B. durch Infektionskrankheiten der Mutter oder teratogene Medikamente). Perinatale Störungen gehen auf Komplikationen während der Geburt zurück (z. B. Sauerstoffmangel oder Geburtstraumata). Als wichtigste Ursachen für postnatal erworbene Hörschäden gelten Meningitiserkrankungen und andere Infektionskrankheiten (z. B. Röteln), die Anwendung ototoxischer Medikamente sowie chronische Lärmbelastungen und Knall- oder Explosionstraumata. Zunehmend treten Hörstörungen auch in Folge von Durchblutungsstörungen des Innenohres auf, insbesondere ist hier der Hörsturz als akute Form der Durchblutungsstörung zu erwähnen. Die Altersschwerhörigkeit (*Presbyakusis*) kann als die wahrscheinlich häufigste Form von Hörstörung im mittleren und hohen Alter betrachtet werden. Weiterhin ist ein nicht unbeträchtlicher Teil von cochleären Hörverlusten unbekannter Ätiologie zu verzeichnen (Hellbrück, 1993; Lenarz, 1998; Møller, 2000; Wendler, Seidner, Kittel & Eysholdt, 1996).

Unabhängig von ihrer Lokalisierung kann eine Einteilung der Hörschädigungen auch hinsichtlich ihres Schweregrades vorgenommen werden. Eine Schwerhörigkeit liegt vor, wenn mittels Hörgeräten noch ein Sprachverstehen möglich ist. Es wird zwischen leichtgradiger (20 bis 40 dB Hörverlust), mittelgradiger (40 bis 70 dB Hörverlust) und hochgradiger (über 80 dB Hörverlust) Schwerhörigkeit unterschieden (Biesalski, 1994). Ein völliger Hörverlust kommt selten vor, jedoch umfasst der Begriff der Gehörlosigkeit auch die Fälle einer in geringem Maße vorhandenen Resthörigkeit. Im allgemeinen ist von Gehörlosigkeit bzw. Taubheit die Rede, wenn auch mit Hörgeräten weder ein Sprachverstehen noch eine angemessene Geräuschwahrnehmung möglich ist. Einer Definition des American National Standards Institute zufolge liegt Gehörlosigkeit bei einem sensorineuralen Hörverlust von 90 dB und mehr vor (Boothroyd, 1993). Die Anzahl der Hörbehinderten in Deutschland wird auf etwa 14 Millionen geschätzt, von denen etwa 80 000 als gehörlos gelten[4].

Gehörlosigkeit oder hochgradige, an Taubheit grenzende Schwerhörigkeit ist fast immer cochleären Ursprungs, also durch einen Funktionsausfall innerhalb der Cochlea bedingt. Bei Schädigungen dieser Art kann die Wiederherstellung der Hörfähigkeit in der Regel nicht durch eine Hörgeräteversorgung gewährleistet werden (s. o.). Seit einigen Jahren ist es jedoch möglich, den Funktionsausfall im Innenohr technisch zu überbrücken, indem der Hörnerv durch ein sogenanntes Cochlea-Implantat (CI) direkt elektrisch gereizt wird.

[4] nach Angaben des Deutschen Schwerhörigenbundes (DSB) bzw. des Deutschen Gehörlosenbundes (DGB), Quellen: http://www.schwerhoerigen-netz.de/DSB/DSB/index.htm (12.01.2004) bzw. http://www.gehoerlosenbund.de/wirueberuns/allgemeine_aufgaben.htm (12.01.2004).

2.2 Cochlea-Implantate

Ein Cochlea-Implantat (CI) ist eine elektronische Innenohrprothese, mit deren Hilfe der durch einen Funktionsausfall in der Cochlea bedingte Verlust der Hörfähigkeit kompensiert werden kann. Indem Elektroden in die Cochlea implantiert werden, welche den Hörnerv direkt elektrisch stimulieren, ist es möglich, bei gehörlosen oder hochgradig schwerhörigen Patienten Hörempfindungen hervorzurufen. Voraussetzung hierfür ist die Unversehrtheit des Hörnervs und der zentralen Anteile des Hörsystems.

Die seit den 50er und 60er Jahren in der Entwicklung befindliche CI-Technik kommt seit mittlerweile bald 20 Jahren zur breiten klinischen Anwendung (vgl. hierzu u. a. Lehnhardt, 1998). Heute werden Cochlea-Implantate allgemein als eine äußerst erfolgreiche Methode zur Rehabilitierung von ertaubten und kongenital tauben Patienten anerkannt. Während sie zunächst vor allem bei postlingual, d. h. nach abgeschlossenem Spracherwerb ertaubten Erwachsenen eingesetzt wurden, hat sich der Indikationsbereich in den letzten Jahren zunehmend auf prälingual gehörlose und postlingual ertaubte Kinder ausgedehnt. Die ständige Verbesserung der Technologie und die damit einhergehende gute Hörprognose hat dazu geführt, dass Cochlea-Implantate heute auch bei Patienten mit einer geringen, jedoch mittels konventioneller Hörgeräte für ein Sprachverstehen nicht mehr ausreichend verstärkbaren Resthörigkeit zum Einsatz gebracht werden (Probst, 1998)[5].

In Deutschland werden derzeit hauptsächlich CI-Systeme der österreichischen Firma *MED-EL* (Combi 40 bzw. Combi 40+), der Firma *Advanced Bionics* (Clarion) aus den USA und der australischen Firma *Cochlear* (Nucleus) verwendet. Auf dem Markt sind weiterhin CI-Systeme der französischen Firma *MXM* (Digisonic) und der belgischen Firma *Antwerp Bionic* (Laura).

2.2.1 Aufbau

Unabhängig von der Art des Modells oder vom Hersteller besteht ein CI-System immer aus den externen Komponenten und dem eigentlichen Implantat, welches operativ eingesetzt wird. Zum externen Teil gehören das hinter dem Ohr getragene Mikrofon sowie der batteriebetriebene Sprachprozessor und die Sendespule. Modernere Sprachprozessoren sind gemeinsam mit dem Mikrofon in ein am Ohr zu tragendes Gerät integriert

[5] vgl. hierzu auch „Leitlinie ‘Cochlear Implant Versorgung’ einschließlich auditorisches Hirnstammimplantat“ der Arbeitsgemeinschaft Deutschsprachiger Audiologen und Neurootologen (ADANO) der Deutschen Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie, Quelle: http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/ll/hno_ll71.htm (12.01.2004).

(HdO-Prozessor), während bei anderen Prozessortypen, die separat am Körper getragen werden, die Verbindung zum Mikrofon über ein Kabel hergestellt wird. In jedem Fall ist der Sprachprozessor über ein Kabel mit der Sendespule verbunden. Diese befindet sich äußerlich am Kopf hinter dem Ohr an korrespondierender Stelle zur in den Schädel eingesetzten Empfängerspule. Die beiden Spulen werden mittels Magneten genau übereinander gehalten[6].

Der interne Teil eines CI-Systems umfasst neben der bereits erwähnten Empfängerspule mit einem dazugehörigen Mikroprozessor auch die in die Cochlea hineingeschobenen Elektroden[7], welche vom Mikroprozessor ausgehen und durch das Mittelohr verlaufen. Durch ihre Lage in der Scala tympani befinden sich die Kontaktpunkte der Elektroden in unmittelbarer Nähe zum Hörnerv. Sie sind in unterschiedlicher Höhe auf einem flexiblen Elektrodenträger angeordnet, welcher es ermöglicht, dass die Elektroden auch durch die Schneckenwindungen hindurch möglichst weit in die Cochlea hineingeschoben werden können (Battmer, 1998; Lenarz, 1998).

2.2.2 Generelle Funktionsweise

Das akustische Signal wird zunächst über das Mikrofon aufgenommen und dem Sprachprozessor zugeleitet. Hier erfolgt die Kodierung des Schallsignals in eine Abfolge elektrischer Impulse (vgl. hierzu Abschnitt 2.2.3). Das im Sprachprozessor generierte elektrische Reizabfolgemuster wird als Radiosignal an die Sendespule weitergeleitet und von dort über eine induktive Kopplung zur Empfängerspule und damit an das eigentliche Implantat übertragen. Durch den Empfänger bzw. den zugehörigen Mikroprozessor erfolgt daraufhin die Ansteuerung der in die Cochlea hineingeschobenen Elektroden entsprechend des vorgegebenen Reizabfolgemusters. Die an die einzelnen Elektroden weitergeleiteten elektrischen Impulse stimulieren den Hörnerv, d. h. sie sind letztendlich für die Erzeugung von Aktionspotentialen in den einzelnen Fasern des Hörnervs verantwortlich. Der Bereich, in dem die Aktivierung des Hörnervs stattfindet, liegt dabei zwischen der jeweiligen aktiven Elektrode sowie einer weiteren intra- oder extracochleär gelegenen

[6] Die im Gegensatz zu den hier beschriebenen transkutanen Gerätetypen anfänglich genutzten perkutanen Implantate, bei denen die beiden Spulen über eine Steckverbindung miteinander verbunden waren, werden heute nicht mehr verwendet.

[7] In der Regel werden heutzutage Implantate mit mehreren (bis zu 22) Elektroden verwendet, während die in den Anfängen der CI-Entwicklung üblichen Implantate mit nur einer Elektrode mittlerweile von untergeordneter Bedeutung sind. Auch die extracochleäre Platzierung der Elektroden ist heute eher ungebräuchlich, da ursprüngliche Bedenken gegen eine intracochleäre Elektrodenplatzierung widerlegt werden konnten.

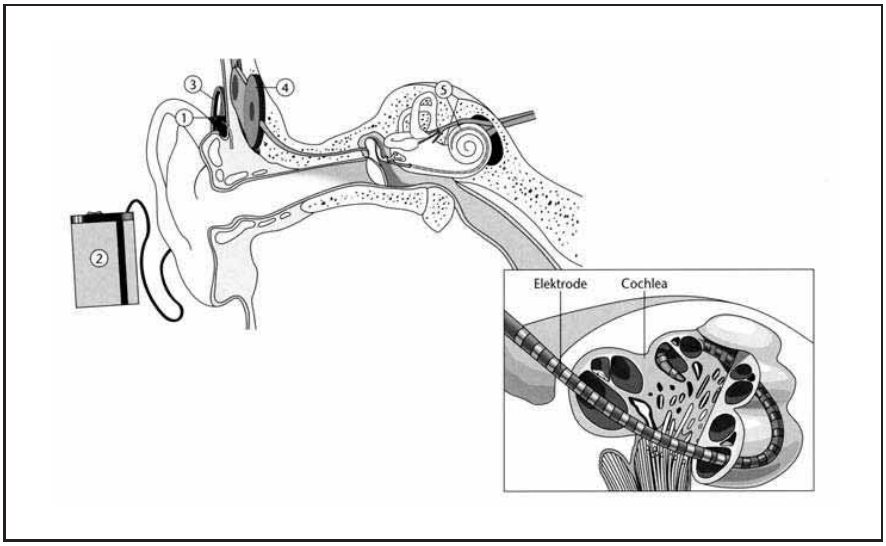

Abb. 2.6: *Prinzipieller Aufbau eines Cochlea-Implantats (aus: Goldstein, 2002). Der Schall wird über ein Mikrofon (1) aufgenommen und dem Sprachprozessor (2) zugeführt. Dort werden die wesentlichen Anteile des akustischen Schallsignals selektiert und kodiert und zur Sendespule (3) weitergeleitet. Das Signal gelangt über eine induktive Kopplung zum Implantat (4), welches entsprechend der empfangenen Signale die einzelnen Elektroden (5) mit Stromimpulsen ansteuert, wodurch der Hörnerv elektrisch stimuliert wird.*

Referenzelektrode, wobei die Reizung entweder monopolar oder bipolar erfolgen kann. Die im Hörnerv erzeugten Aktionspotentiale werden dann ebenso wie natürlich erzeugte Potentiale über die einzelnen Stationen der Hörbahn an die zentralen Hörzentren weitergeleitet, wo sie auditive Sensationen auslösen (Battmer, 1998; Diller, 1997).

2.2.3 Kodierungsstrategien

Während der Vorgang, den Hörnerv mittels implantierter Elektroden mit elektrischem Strom zu reizen, technisch relativ einfach zu realisieren ist, stellt die Kodierung der im Schallsignal enthaltenen akustischen Informationen durch ein adäquates Muster von elektrischen Impulsen ein kompliziertes Verfahren dar.

Grundsätzlich stehen drei verschiedene Parameter zur Verfügung, mit deren Hilfe eine Informationskodierung im elektrischen Signal erfolgen kann. Zunächst kann akustische Reizinformation über die Amplitude, d. h. die abgegebene Stromstärke verschlüsselt werden. Weiterhin kann auch die Pulsrate, also der zeitliche Ablauf der Reizung Informationen über die Schalleigenschaften enthalten. Und nicht zuletzt ermöglichen die heute gebräuchlichen Cochlea-Implantate mit mehreren Elektroden eine Informationskodierung

mittels des Orts der elektrischen Stimulation, indem eine Auswahl der zur Reizung verwendeten Elektroden stattfindet (Battmer, 1998).

Wie diese Parameter eingesetzt werden, um die Informationen des Schallsignals präzise und gleichzeitig möglichst effektiv zu verschlüsseln, ist in der im Sprachprozessor implementierten Kodierungsstrategie festgelegt. Die CI-Systeme der verschiedenen Herstellerfirmen unterscheiden sich hinsichtlich der von ihnen verwendeten Kodierungsstrategien, wobei einige Modelle die Wahl zwischen verschiedenen Strategien zulassen, während andere nur eine bestimmte Strategie erlauben. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Strategien betreffen dabei die zugrunde liegenden Prinzipien der Signalanalyse, der Signaltransformation und der Art der Stimulation.

Signalanalyse. Zunächst muss von der Kodierungsstrategie festgelegt werden, wie die akustischen Parameter des Schallsignals extrahiert werden sollen. Eine möglichst genaue Analyse des akustischen Signals, welches durch seine Frequenz und durch seine Intensität charakterisiert wird (vgl. Abschnitt 2.1.2), ist dabei die Grundvoraussetzung dafür, dass ein adäquates elektrisches Reizabfolgemuster erstellt werden kann.

Die Frequenzen des eingehenden akustischen Signals werden durch eine Reihe von Bandpassfiltern elektronisch in verschiedene Frequenzbänder unterteilt, wobei die Anzahl der Filter durch die Kodierungsstrategie festgelegt ist. Je nach Strategie wird das Eingangssignal bei den herkömmlichen CI-Systemen so in bis zu 20 Frequenzbereiche aufgeteilt. Das Ziel der Analyse ist es dabei, vor allem den Bereich der sprachrelevanten Frequenzen zu erfassen (Battmer, 1998; Marangos & Laszig, 1998).

Die Kodierungsstrategie muss außerdem die unterschiedlichen Amplituden analysieren, die im Sprachschall oder anderen akustischen Signalen enthalten sind. Allerdings ist der absolute Wert der Amplituden bei der Intensitätsanalyse eher von untergeordneter Bedeutung. Vielmehr interessiert hier das Verhältnis, in welchem die Amplituden des akustischen Signals innerhalb eines Filters zueinander stehen.

Signaltransformation. Welche der durch die Bandpassfilterung gewonnenen Informationen letztendlich an die Elektroden übertragen werden, ist ebenfalls durch die Kodierungsstrategie festgelegt. Grundsätzlich ist hier zwischen zwei Prinzipien zu unterscheiden. Entweder erfolgt eine Abbildung der jeweiligen akustischen Wellenform bzw. ihrer Umhüllenden (*waveform strategy*) oder es werden nur bestimmte, als sprachrelevant erachtete Signalparameter an die Elektroden übermittelt, wie beispielsweise Grundfrequenz oder Formantfrequenzen (*feature extraction strategy*) (Battmer, 1998; Loizou, 1998).

Mittels der Parameter Stimulationsort, Stimulationsrate und Stromstärke erfolgt dann die Kodierung der festgelegten Merkmale des zu übertragenden Schallsignals. Die Bestimmung des Stimulationsortes, welche über die Auswahl der stimulierenden Elektroden erfolgt, dient zur Frequenzkodierung. Indem die zur Signalanalyse genutzten Filter an bestimmte Elektroden gekoppelt sind, ist es möglich, verschiedene Frequenzbereiche zu verschiedenen Abschnitten entlang der Cochlea zu senden und somit wiederum eine systematische Erregung von bestimmten Fasern des Hörnervs herbeizuführen. Auf diese Weise versucht man, die tonotopischen Eigenschaften der Cochlea und des Hörnervs auszunutzen. Zusätzlich erfolgt die Vermittlung von Frequenzinformationen aber auch über die Periodizität der elektrischen Signale, womit das auch im gesunden Hörsystem vorhandene Prinzip der Phasenkopplung (vgl. Abschnitt 2.1.3) imitiert wird (Diller, 1997). Die Lautstärkewahrnehmung wird zum einen über die an die einzelnen Elektroden gesendeten Stromstärken beeinflusst, welche das Verhältnis der Amplituden des akustischen Signals abbilden. Zur Intensitätskodierung wird zum anderen aber auch die Stimulationsrate genutzt. Sie legt fest, wie oft durch die Elektroden elektrische Impulse an den Hörnerv abgegeben werden und bestimmt damit die Entladungsrate im Hörnerv. Wenn eine Nervenfaser dabei ihren Sättigungsbereich erreicht, werden benachbarte Fasern miterregt (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die Entladungsrate und die Anregung benachbarter Fasern sind dann wie auch beim gesunden Hörsystem für die Weitergabe von Informationen über die Intensität des Schallsignals verantwortlich (Diller, 1997).

Die Anzahl von Kanälen und aktiven Elektroden ist ebenfalls durch die Kodierungsstrategie determiniert. Eine begriffliche Unterscheidung ist hier zu treffen, da die Kanalanzahl, welche angibt, wie viele verschiedene Stimulationsmuster versendet werden, nicht zwangsläufig der Zahl der zu aktivierenden Elektroden entspricht. In der Regel stimmen Kanäle und aktive Elektroden zwar überein, da meistens jede Elektrode mit einem anderen Muster gereizt wird, in einigen Fällen jedoch erhalten mehrere und manchmal auch alle Elektroden das gleiche Stimulationsmuster (Tyler & Tye-Murray, 1991).

Art der Stimulation. Die Stimulation der Hörnervenfasern durch die Elektroden kann durch kontinuierliche sinusoidale, d. h. analoge Signale oder aber in Form von pulsatilen Signalen erfolgen. Bei der Verwendung analoger Sinussignale werden alle Elektroden simultan angesteuert. Es handelt sich hierbei zwar um eine technisch relativ einfach zu realisierende Variante, sie hat sich jedoch insofern als nachteilig erwiesen, als dass die simultane Elektrodenansteuerung Kanalinterferenzen zur Folge hat. Solche Kanalinterferenzen lassen sich durch pulsatile Strategien vermindern. Bei der pulsatilen Elektro-

denansteuerung kann man zwei Arten unterscheiden. Entweder die Pulse werden streng sequentiell abgegeben, was bedeutet, dass stets die gleiche Anzahl von Elektroden aktiv ist, oder die Anzahl der aktiven Elektroden ändert sich beständig (Diller, 1997; Dillier, 1998).

Beschreibung ausgewählter Kodierungsstrategien. Ebenso wie die CI-Technik selbst ständigen Neuerungen unterworfen ist, werden auch immer wieder neue Kodierungsstrategien entwickelt oder die existierenden Strategien modifiziert. Im Mittelpunkt der Bemühungen steht dabei immer das Ziel, den implantierten Patienten ein möglichst genaues Sprachverstehen zu ermöglichen. Zu den derzeit gebräuchlichsten Strategien zählen die SPEAK-Strategie (*Spectral Peak*), die CIS-Strategie (*Continuous Interleaved Sampling*) und die ACE-Strategie (*Advanced Combination Encoders*). Sie werden im folgenden exemplarisch beschrieben, da sie auch von den CI-Trägern genutzt wurden, welche an den in den Kapiteln 5 bis 9 beschriebenen Experimenten teilnahmen (vgl. Tabelle 5.2).

Die standardmäßig in den CI-Systemen der Firma Nucleus genutzte Kodierungsstrategie SPEAK arbeitet nach dem Prinzip der Informationsselektion. Das Eingangssignal wird zunächst durch die Bandpassfilterung in 20 Frequenzbänder unterteilt. Es werden dann die Energieinhalte in den einzelnen Filtern ermittelt. An die Elektroden werden nur die Inhalte der Filter mit den größten Amplituden weitergegeben. Die Anzahl der selektierten Maxima ändert sich dabei in Abhängigkeit von den Differenzen der einzelnen Frequenzbänder untereinander, es können bis zu 10 Energiemaxima ausgewählt werden (Battmer, 1998).

Der von Wilson und Mitarbeitern (z. B. Wilson et al., 1991) entwickelten CIS-Strategie, welche mittlerweile auf den Geräten verschiedener Hersteller implementiert ist, liegt das Prinzip der Informationsdichte zugrunde. Das eingehende Schallsignal wird zunächst einer Bandpassfilterung unterworfen. Die Anzahl der Filter und die Anzahl der Elekroden sind identisch, es werden in der Regel bis zu zwölf Elektroden genutzt. Alle Elektroden werden kontinuierlich nacheinander angesteuert und entsprechend der aktuellen Energieinhalte der jeweiligen Filterbereiche stimuliert, wobei durch die sequentielle Elektrodenansteuerung Kanalinterferenzen vermieden werden können. Charakteristisch für die CIS-Strategie ist die Erfassung und Übertragung großer Informationsmengen. Sie wird durch eine ständige verschachtelte Abtastung ermöglicht, die mit hohen Stimulationsraten einhergeht. So soll eine möglichst exakte Wiedergabe des zeitlichen Verlaufs und damit ein verbessertes Sprachverständnis gewährleistet werden (Battmer, 1998; Marangos & Laszig, 1998).

Mit der ACE-Strategie wurde der Versuch unternommen, die Prinzipien von CIS und von SPEAK miteinander zu kombinieren. Neben der Selektion spektraler Maxima, die an die Elektroden weitergeleitet werden, arbeitet die Strategie deshalb unter Verwendung vergleichbar hoher Stimulationsraten wie die CIS-Strategie. Sowohl die Elektrodenanzahl als auch die Stimulusrate können dabei individuell angepasst werden, wovon man sich eine optimale patientenspezifische Übertragung sowohl spektraler als auch temporaler Aspekte erhofft (Marangos & Laszig, 1998).

2.3 Hörvermögen nach Cochlea-Implantation

Das Cochlea-Implantat ist heute technisch auf einem Stand angelangt, dass es eine wirkliche Hörverbesserung für gehörlose und hochgradig hörgeschädigte Patienten darstellt und ihnen einen enormen Hörgewinn verschaffen kann. Gerade für postlingual ertaubte Erwachsene ist es durch ein CI häufig möglich, die Kommunikationsfähigkeit auf rein akustischer Basis ohne zusätzliches Lippenabsehen wiederzuerlangen. Mehr als die Hälfte dieser Patientengruppe erreicht in sprachaudiometrischen Tests ein Satzverständnis von 80 bis 100 Prozent (Dorman, 2000).

Trotzdem vermag das CI nicht, die hochkomplexe Arbeitsweise des gesunden Hörsystems mit seiner äußerst feinen Frequenz-, Intensitäts- und Zeitauflösung vollständig zu ersetzen. Technologische Beschränkungen haben eine wesentlich geringere Frequenzauflösung sowie eine reduzierte Zeitkodierung zur Folge – die Kodierung des Schallsignals in elektrische Impulse geht also letztlich immer mit einem Verlust an akustischer Information einher. Eine eingeschränkte Diskriminierung und Identifikation von Sprachlauten kann daher selbst für sehr erfolgreiche CI-Träger angenommen werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass dieser eingeschränkte akustische Input in Alltagssituationen oder beispielsweise eben auch im Rahmen von Satzverstehenstests häufig durch die Einbeziehung kontextueller Informationen kompensiert wird.

Obwohl also sehr viele hörgeschädigte Patienten mit Hilfe eines Cochlea-Implantates ein sehr gutes Sprachverständnis entwickeln können, profitieren nicht alle CI-Träger gleichermaßen von dieser Technik. Vielmehr lässt sich eine große Variabilität hinsichtlich der individuellen sprachperzeptiven Fähigkeiten beobachten. Seit Beginn der CI-Forschung wird deshalb mit großem Interesse der Frage nachgegangen, woher diese ausgeprägte Variabilität stammt und durch welche Faktoren die Hörverstehensleistungen beeinflusst werden. Hierzu wurde, in der Regel unter Zuhilfenahme sprachaudiometrischer Testpara-

digmen[8], eine Vielzahl von Studien durchgeführt. Als Erklärung für die sehr unterschiedlichen Hörverstehensleistungen von CI-Trägern kommen demzufolge neben technischen Faktoren auch eine Reihe patientenspezifischer Faktoren in Frage. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass durch die mangelnde Standardisierung des Testmaterials sowie die ungenügenden Möglichkeiten zur Kontrolle und Berücksichtigung aller patientenindividuellen Faktoren eine vergleichende Evaluierung der bisher vorliegenden Forschungsergebnisse schwierig ist.

Technische Faktoren. Das Sprachverständnis von CI-Trägern ist zunächst in hohem Maße durch technische Faktoren, die das CI-System betreffen, determiniert. Im Mittelpunkt des Forschungsinteresses steht hier vor allem die Frage nach der geeignetsten Kodierungsstrategie. Derzeit besteht noch keine Klarheit darüber, ob für gute Hörverstehensleistungen vorrangig die Vermittlung von spektraler oder eher von temporaler Information von Bedeutung ist (z. B. Shannon, Zeng, Kamath, Wygonski & Ekelid, 1995).

Im Zusammenhang mit der Kodierungsstrategie diskutiert man auch, wie viele Kanäle bzw. aktive Elektroden für ein gutes Hörverstehen notwendig sind. Es konnte gezeigt werden, dass bei Stille schon mit vier bis acht Kanälen ein sehr gutes Sprachverständnis erreicht werden kann und dass mehr Elektroden bzw. Kanäle möglicherweise aufgrund der elektroanatomischen Verhältnisse in der Cochlea nicht unbedingt zu einem verbesserten Sprachverständnis beitragen (Dorman & Loizou, 1997; Tyler et al., 2000). Im Störlärm hingegen sind mehr Kanäle durchaus von Vorteil (Dorman, 2000; Faulkner, Rosen & Wilkinson, 2001). Ein zuweilen vermuteter Zusammenhang zwischen dem Hörvermögen und der Insertionstiefe der Elektroden konnte bei CI-Trägern bisher noch nicht nachgewiesen werden (z. B. Hodges et al., 1999), obgleich sich ein solcher Effekt in Experimenten mit CI-Simulationen gezeigt hatte (Dorman, Loizou & Rainey, 1997).

Außerdem beschäftigt man sich seit einigen Jahren mit der Frage, ob eine Verbesserung des Hörvermögens durch bilaterale Implantationen herbeizuführen ist. In ersten Studien dazu konnte ein positiver Einfluss auf das Hörverstehen im Störlärm sowie auf das Richtungshören festgestellt werden (Müller, Schön & Helms, 2000; Schön, Müller & Helms, 2002; van Hoesel, Ramsden & O'Driscoll, 2002), es zeigte sich aber auch eine signifikante Verbesserung des Sprachverstehens in Ruhe (Müller, Schön & Helms, 2002).[9]

[8] Ein ausführlicher Überblick über solche sprachaudiometrischen Testverfahren findet sich beispielsweise bei Lehnhardt (1996b), Plath (1992) oder Sendlmaier (1992).

[9] Dass die bilaterale CI-Versorgung heute trotzdem noch nicht allseits anerkannt ist, geht vor allem auf Bedenken zurück, welche das Kosten-Nutzen-Verhältnis betreffen (zu Vor- und Nachteilen der bilateralen Implantation vgl. u. a. Hessel, Ziese, Wesarg & von Specht, 2001).

Patientenspezifische Faktoren. Wie gut das Sprachverständnis ist, das ein CI-Träger nach der Implantation entwickelt, wird auch von patientenspezifischen Faktoren beeinflusst. An vorderster Stelle ist hier der Zeitpunkt der Ertaubung zu nennen. Für das Hörverstehen mit CI ist es von großer Bedeutung, ob die Ertaubung vor, während oder nach abgeschlossenem Spracherwerb erfolgte. Man geht heute allgemein davon aus, dass die Hörprognose für postlingual ertaubte CI-Träger sehr günstig ist, da sie auf vorhandene Hörmuster zurückgreifen können. Prälingual ertaubte CI-Träger verfügen hingegen über keinerlei Hörerfahrung. Sie sind darauf angewiesen, auf der Basis des vom CI vermittelten reduzierten akustischen Inputs lautsprachliche Repräsentationen aufzubauen. Während allerdings angenommen wird, dass prälingual ertaubte Jugendliche und Erwachsene u. a. aufgrund von bereits abgeschlossenen Hirnreifungsprozessen wenig oder gar nicht von einem Cochlea-Implantat profitieren können, bestehen für prä- und auch perilingual ertaubte Kinder bei möglichst frühzeitiger Implantation gute Erfolgsaussichten hinsichtlich des Erwerbs lautsprachlicher Kompetenz (u. a. Diller, 1997). Da es im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich um postlingual ertaubte erwachsene CI-Träger gehen wird, soll hier auf den speziellen Themenkomplex der CI-Versorgung von Kindern aber nicht weiter eingegangen werden.

Individuell sehr unterschiedliche Sprachverstehensleistungen lassen sich allerdings auch beobachten, wenn man nur die postlingual ertaubten CI-Träger betrachtet. Hierfür werden eine Reihe weiterer Faktoren verantwortlich gemacht. Als zentrale Komponenten gelten dabei Alter, Taubheitsdauer und CI-Tragedauer. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Sprachverständnis und CI-Tragedauer besteht dahingehend, dass die sprachperzeptuellen Fähigkeiten sich mit zunehmender CI-Tragedauer verbessern (Blamey et al., 1996; Weston & Waltzman, 1995). Es konnte weiterhin klar nachgewiesen werden, dass sich eine längere Taubheitsdauer negativ auf den Hörerfolg auswirkt (Battmer, Gupta, Allum-Mecklenburg & Lenarz, 1995; Blamey et al., 1996; Geier, Barker, Opie & Fisher, 2000; van Dijk et al., 1999; Waltzman, Fisher, Niparko & Cohen, 1995). Einen etwas geringeren negativen Einfluss als die Taubheitsdauer hat das Alter zum Zeitpunkt der Implantation, wobei dieser Einfluss aber in der Gruppe der über 60-Jährigen zunimmt (Blamey et al., 1996; Waltzman et al., 1995). Allerdings konnte gezeigt werden, dass durchaus auch ältere Patienten von einer CI-Versorgung profitieren können (Butts, Hodges, Ash, Schloffman & Balkany, 2000; Kelsall, Shallop & Burnelli, 1995; Waltzman, Cohen & Shapiro, 1993). Ebenfalls bei den über 60-Jährigen konnte ein leicht negativer Einfluss auf den Hörerfolg durch das Alter zum Zeitpunkt der Ertaubung festgestellt werden (Blamey et al., 1996). In einer Studie von Battmer et al. (1995) werden auch

ein progressiver Verlauf der Ertaubung sowie eine der Implantation vorausgegangene Hörgeräteversorgung als günstig für den Hörerfolg mit CI bewertet[10]. Im Zusammenhang mit dem Hörvermögen von CI-Trägern wird in der Literatur weiterhin diskutiert, inwiefern die Ätiologie der Hörstörung und die durch sie bedingte Anzahl der verbliebenen funktionsfähigen Hörnervenzellen von Bedeutung ist. Diesbezügliche Aussagen werden jedoch in der Regel durch die Tatsache erschwert, dass die Anzahl der funktionsfähigen Hörnervenzellen auch immer in starkem Maße von der Taubheitsdauer und vom Lebensalter abhängig ist und somit eine Konfundierung verschiedener Faktoren schlecht ausgeschlossen werden kann (Blamey et al., 1996). Verschiedentlich wird zur Erklärung der Variabilität in den Hörverstehensleistungen von CI-Trägern auch ein Zusammenhang mit allgemeineren Faktoren wie Intelligenz, Kommunikativität, Rehabilitation, Engagement und familiärer Unterstützung hergestellt (vgl. Loizou, 1998).

Obwohl also verschiedene technische und patientenspezifische Faktoren identifiziert werden konnten, welche die Hörverstehensfähigkeiten von CI-Trägern beeinflussen können, ist die breite Varianz der Verständnisleistungen nur partiell mit dem Einfluss dieser Faktoren sowie ihren gegenseitigen Wechselwirkungen zu erklären. Aufgrund dieser Tatsache können im Allgemeinen keine exakten prognostischen Aussagen über künftige Hörerfolge eines CI-Kandidaten getroffen werden. Insgesamt besteht aber gerade für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu untersuchende Gruppe der postlingual ertaubten Erwachsenen eine sehr gute Hörprognose. Für diese Patienten, welche nicht darauf angewiesen sind, ein Hör- und Lautsprachsystem auf der Basis eines reduzierten akustischen Inputs auszubilden, besteht die Hauptschwierigkeit in der Regel in der Umstellung auf die veränderten Höreindrücke. Das ist bekannt aus Erfahrungsberichten von CI-Trägern, die über Vergleichsmöglichkeiten aus der Zeit vor ihrer Ertaubung verfügen. Das vom CI vermittelte akustische Sprachsignal wird von ihnen häufig als „metallische Roboterstimme“ beschrieben oder mit dem Klang einer Bahnhofsdurchsage oder eines schlecht eingestellten Radiosenders verglichen[11]. Es kann vermutet werden, dass das Hörverständnis bei diesen CI-Trägern maßgeblich dadurch bestimmt wird, wie die zentralen Strukturen des Hörens und Sprachverstehens in der Lage sind, sich auf den veränderten akustischen

[10] An der entsprechenden Studie nahmen allerdings neben postlingual ertaubten Patienten auch eine Reihe perilingual ertaubter CI-Träger teil, bei denen ein progressiver Ertaubungsverlauf im Vergleich zu einem akuten Hörverlust den Spracherwerb und damit das spätere Sprachverständnis natürlich entscheidend begünstigt. Bislang liegen keine weiteren Studien vor, in denen ein Einfluss des Ertaubungsverlaufs für postlingual ertaubte CI-Träger festgestellt wurde.

[11] Quelle: http://www.fh-hannover.de/etech/e06/p8softsim.htm (12.01.2004).

Input einzustellen. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Untersuchung der auf zentraler Ebene stattfindenden Verarbeitung des vom Cochlea-Implantat vermittelten akustischen Signals von großem Interesse.

2.4 Neuronale Reorganisation nach Cochlea-Implantation

Die Untersuchung der zentralen Mechanismen der Hörwahrnehmung und des Sprachverstehens bei CI-Trägern kann Aufschluss darüber geben, wie das Gehirn von den beschränkten akustischen Informationen eines Cochlea-Implantats Gebrauch macht und inwiefern es sich anpasst, um die vom normalen Input abweichenden Signale zu verarbeiten. Gleichzeitig lassen die funktionelle Organisation des Hörverstehens bei CI-Trägern sowie in diesem Zusammenhang beobachtbare neuronale Reorganisationsprozesse aber auch Rückschlüsse auf die generelle Funktionsweise des Gehirns und seine Fähigkeit zur Reorganisation zu.

Der Begriff der neuronalen Reorganisation ist dabei eng verbunden mit dem der neuronalen Plastizität. Dieser wird von Bavelier und Neville (2002) definiert als die Fähigkeit des Nervensystems zur Modifikation seiner Organisation, wobei solche Veränderungen die Folge vieler verschiedener Ereignisse sein können. Hierzu zählen die Autoren normale Entwicklungs- und Reifungsprozesse ebenso wie den Erwerb neuer Fähigkeiten sowohl vor als auch nach abgeschlossener Reifung des Organismus (Lernen). Neuronale Modifikationen treten Neville und Bavelier zufolge aber auch nach Schädigungen des Nervensystems sowie als Folge von sensorischer Deprivation auf. Hervorzuheben ist die Tatsache, dass plastische Veränderungen des zentralen Nervensystems nicht nur während der Hirnreifung möglich sind. Wie auch Preilowski (1996) anmerkt, herrscht mittlerweile Einigkeit darüber, dass auch erwachsene Gehirne ein überraschend hohes Maß an Plastizität aufweisen können.

Dieser Definition folgend, können bei CI-Trägern beobachtete neuronale Reorganisationsprozesse ihre Ursache zum einen in der Deprivation der auditorischen Modalität während der Gehörlosigkeit haben, zum anderen jedoch auch durch die Wiederherstellung der Hörfähigkeit sowie die damit verbundene Umstellung auf den veränderten akustischen Input bedingt sein. Im Folgenden soll, soweit eine Trennung der beiden Ursachen möglich ist, weniger auf die taubheitsinduzierten Aspekte der neuronalen Plastizität eingegangen werden als vielmehr auf Befunde zu neuronalen Reorganisationsprozessen, die als Folge der Cochlea-Implantation insbesondere bei postlingual Ertaubten beobachtet wurden.

Die strukturellen oder funktionalen Veränderungen, die mit der Wiederherstellung der Hörfähigkeit durch ein CI einhergehen, betreffen alle Ebenen der zentralen Hörverarbeitung von den Cochleariskernen bis hin zu nicht-auditorischen Hirnarealen, wobei Modifikationen von intrazellulären Komponenten ebenso wie Änderungen innerhalb weiträumiger kortikaler Netzwerke vorliegen können (vgl. Giraud, Truy & Frackowiak, 2001c). Von besonderem Interesse im Zusammenhang mit den im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Prozessen des Sprachverstehens bei CI-Trägern sind aber die Phänomene der neuronalen Plastizität im Bereich der primären Hörzentren und der nachgeordneten Bereiche, welche der kognitiven Verarbeitung von Sprache dienen.

Experimentelle Evidenz für neuronale Reorganisation bei CI-Trägern kommt bisher hauptsächlich von Studien, die sich bildgebender Verfahren bedient haben. Da die Methode der *funktionellen Kernspintomographie* (*fMRI*) bei CI-Trägern kontraindiziert ist[12], wurde zumeist mit dem Verfahren der *Positronenemissionstomographie* (*PET*) gearbeitet. Diese Methode erlaubt die Abbildung funktional bedingter neuronaler Stoffwechselvorgänge anhand von Änderungen der lokalen zerebralen Durchblutung (*regional Cerebral Blood Flow, rCBF*). Die Positronenemissionstomographie ist räumlich hochauflösend und kann damit Auskunft über funktionale Reorganisationsprozesse im Sinne neuroanatomischer Veränderungen innerhalb des Hörverstehenssystems geben. Der Nachteil der Methode ist in einer nur sehr geringen, im Minutenbereich angesiedelten zeitlichen Auflösung zu sehen, womit sie nicht dazu geeignet ist, die zeitliche Dimension der mit sehr hoher Geschwindigkeit ablaufenden sprachlichen Verarbeitungsprozessen adäquat abzubilden (vgl. z. B. Rugg, 1999).

Reorganisation im primären akustischen Kortex. Giraud et al. (2001c) beobachteten bei postlingual ertaubten CI-Trägern eine Abnahme der durch Geräusche induzierten Aktivierung im primären akustischen Kortex innerhalb des ersten Jahres nach Implantation. Nach einem Jahr wurde außerdem eine Beschränkung der Aktivierungen auf den auditorischen Kortex und damit verbunden eine Verringerung der Gesamtzahl der Aktivierungen festgestellt. Die Befunde werden von den Autoren als Lerneffekt im Sinne der verbesserten Effizienz synaptischer Verbindungen einhergehend mit einer Verringerung des Aufmerksamkeitsaufwands interpretiert.

[12] Die Untersuchung von Hörverstehensprozessen mittels dieser Methode ist bei CI-Trägern nicht möglich, da eine Messung bei gleichzeitiger CI-Stimulation technisch ausgeschlossen ist. Aber auch in Ruhe können die bei dieser Methode auftretenden hochmagnetischen Felder Schäden an den implantierten elektronischen Teilen des CI-Systems hervorrufen. Des Weiteren würde das Vorhandensein magnetisierbarer Elemente jedoch auch Artefakte in den MRI-Aufnahmen verursachen (vgl. Giraud et al., 2001c).

Reorganisation innerhalb des auditorischen Sprachverstehenssystems. In der bereits erwähnten Untersuchung von Giraud et al. (2001c) konnte eine spezifische Verarbeitung von akustisch präsentierten Wörtern, die sich in einer zunehmenden Aktivierung der klassischen links-hemisphärischen Sprachregionen zeigte, erst nach einjähriger CI-Tragedauer gefunden werden. Hingegen hatte die Verarbeitung dieser Stimuli kurz nach der Implantation lediglich den dem CI kontralateral befindlichen akustischen Kortex aktiviert. Eine deutlich links-lateralisierte Verarbeitung der Stimuli konnte letztlich aber nur für Patienten mit sehr guten Hörverstehensleistungen nach abgeschlossener Rehabilitationsphase nachgewiesen werden, wobei die Aktivierungen bei ihnen trotzdem noch eine insgesamt bilateralere Verteilung aufwiesen als bei Normalhörenden.

In einer weiteren Studie mit postlingual ertaubten CI-Trägern beobachteten Giraud, Price, Graham, Truy und Frackowiak (2001b), dass mit zunehmender CI-Hörerfahrung die durch bedeutungshaltige akustische Stimuli induzierte Aktivierung in den auditorischen Assoziationsfeldern (BA 21/22) anstieg. Solche von der CI-Tragedauer abhängigen Aktivierungsunterschiede in den mit der Verarbeitung sprachlicher Stimuli in Zusammenhang gebrachten auditorischen Assoziationsfeldern konnten in einer Studie von Naito et al. (1997) nicht gefunden werden. Sie berichten, dass sich die durch lautsprachliche Stimuli hervorgerufenen Aktivierungen in BA 21/22 bei postlingual ertaubten CI-Trägern nicht signifikant von denen bei Normalhörenden unterschieden. Hingegen waren Aktivierungen dieser Art bei prälingual ertaubten CI-Trägern wesentlich geringer ausgeprägt und es konnte kein Zusammenhang mit der CI-Tragedauer festgestellt werden. Giraud et al. (2001c) merken dazu an, dass in den entsprechenden experimentellen Designs die funktionale Eigenschaften der entsprechenden Regionen nicht genügend berücksichtigt wurden.

Eine Untersuchung der Hirnaktivierungsmuster bei CI-Trägern in Abhängigkeit von ihrem Sprachverständnis von Fujiki et al. (1999) konnte zwar keinen Zusammenhang zwischen Aktivierungsgrad und Sprachverständnis im primären auditorischen Kortex nachweisen, eine solche Korrelation bestand jedoch im auditorischen Assoziationsfeld, sie war links-hemisphärisch stärker ausgeprägt.

Von Naito et al. (1997) werden ebenso wie von Okazawa et al. (1996) Aktivierungen durch akustisch dargebotene Wörter im linken posterioren STG (Wernicke-Areal) bei postlingual ertaubten CI-Trägern berichtet, die sich nicht von denen bei Normalhörenden unterschieden. Allerdings konnten Giraud, Price, Graham und Frackowiak (2001a) zeigen, dass bei einer ähnlichen Patientengruppe Aktivierungen im Wernicke-Areal sowohl für lautsprachliche Stimuli als auch für bedeutungshaltige Umweltgeräusche zu beobach-

ten waren. Damit reagierte diese Region bei den Patienten weniger stimulusspezifisch als bei Normalhörenden, bei denen entsprechende Aktivierungen nur durch sprachliche Stimuli hervorgerufen werden konnten.

Die Befunde der verschiedenen Studien werden von Giraud et al. (2001c) dahingehend interpretiert, dass der Prozess des durch Gehörlosigkeit bedingten Verlusts an funktionaler Spezialisierung in den auditorischen Assoziationsfeldern durch Cochlea-Implantation bei postlingual Ertaubten rückgängig gemacht werden kann. Allerdings kann die Spezialisierung nur bis zu einem gewissen Grad wiedererworben werden und erreicht selbst bei erfahrenen CI-Trägern nicht die Genauigkeit wie bei Normalhörenden. Hierfür verantwortlich sein könnte die Tatsache, dass auf der Basis eines durch die CI-Übertragung eingeschränkten akustischen Inputs eine genauere Feinabstimmung nicht möglich ist.

Reorganisation innerhalb multimodaler Systeme. In einer weiteren Studie von Naito et al. (2000) wird berichtet, dass bei postlingual ertaubten CI-Trägern eine breitere kortikale Aktivierung für Hörverstehensprozesse zu beobachten war als bei Normalhörenden. Dies betraf nicht nur die temporalen Regionen, sondern auch frontale Anteile, u. a. das mit der Verarbeitung semantischer Information in Zusammenhang stehende Broca-Areal. Auch Giraud et al. (2000) beobachteten, dass bei CI-Trägern mehr kortikale Regionen am Sprachverstehen beteiligt waren als bei Normalhörenden.

Wong, Miyamoto, Pisoni, Sehgal und Hutchins (1999) stellten bei CI-Trägern eine stärkere Aktivierung in rechts-temporalen Regionen fest, was dahingehend interpretiert wurde, dass sich CI-Träger bei der Interpretation von komplexen sprachlichen Stimuli verstärkt auf suprasegmentale Informationen verlassen.

Für Regionen, die mit semantischer Verarbeitung in Zusammenhang stehen (linker inferior-temporaler Kortex, BA 21/39), beobachteten Giraud und Kollegen bei CI-Trägern geringere Aktivierungen bzw. eine größere interindividuelle Variabilität im Vergleich zu Normalhörenden (Giraud et al., 2000, 2001a). Diese Befunde werden von den Autoren als Hinweis darauf gewertet, dass bei CI-Trägern semantische Regionen weniger systematisch in die Sprachverstehensprozesse involviert sind. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass bei den Patienten Regionen im linken posterioren Hippocampus an der semantischen Verarbeitung beteiligt waren (Giraud et al., 2001a). Diese Strukturen werden von den Autoren mit Gedächtnisvorgängen in Verbindung gebrachten.

Generell waren bei postlingual ertaubten CI-Trägern beim Hören ebenso wie bereits in Erwartung akustischer Stimuli verstärkt Aktivierungen in Arealen zu beobachten, die

Aufmerksamkeitsprozesse unterstützen. Die Prozesse der Aufmerksamkeit wurden dabei anscheinend durch *top-down*-Mechanismen moduliert (Giraud et al., 2000).

Giraud et al. (2001c) fassen die Ergebnisse der verschiedenen Studien dahingehend zusammen, dass CI-Träger beim Hörverstehen andere neuronale Strategien als Normalhörende einsetzen. Während das semantische System weniger systematisch und in gewisser Weise auch unspezifischer am Sprachverstehen beteiligt ist als bei Normalhörenden, werden verstärkt sprachunspezifische Netzwerke wie Aufmerksamkeit und Gedächtnis in den Hörverstehensprozess einbezogen.

Crossmodale Reorganisationsprozesse. Neben Reorganisationsprozessen innerhalb der für die Sprachverarbeitung zuständigen Strukturen sowie innerhalb multimodaler Systeme konnte bei CI-Trägern auch Evidenz für crossmodale Plastizität gefunden werden. Die crossmodalen Reorganisationsprozesse traten hierbei nicht nur als taubheitsinduzierte Phänomene auf, d. h. in Folge des Fehlens von akustischem Input (vgl. hierzu Giraud et al., 2001c)[13], sondern sie ließen sich auch nach der Implantation bei CI-Trägern nachweisen.

So konnten Giraud und Kollegen in einer Serie von Experimenten zeigen, dass bei erfahrenen CI-Trägern der visuelle Kortex an der Verarbeitung aller potentiell bedeutungshaltigen Schallereignisse – bei Umweltgeräuschen also ebenso wie bei lautsprachlichen Stimuli – beteiligt war (Giraud et al., 2000, 2001b). Ein solcher Effekt war bei CI-Trägern zwar bereits wenige Tage nach der Implantation zu beobachten, er war bei ihnen aber geringer ausgeprägt und weniger konsistent als bei Patienten mit längerer CI-Erfahrung. Diese Befunde legen den Autoren zufolge nahe, dass die Beteiligung des visuellen Kortex bei der Verarbeitung bestimmter akustischer Stimuli weniger die Folge einer taubheitsinduzierten crossmodalen Plastizität ist als vielmehr ein funktional bedingter Aspekt, der sich beim und durch das Hören mit Cochlea-Implantat entwickelt. In einer weiteren Studie (Giraud & Truy, 2002) konnte außerdem festgestellt werden, dass bei den Patienten nicht nur der primäre visuelle Kortex, sondern auch höhere Ebenen der visuellen Verarbeitung beim Hören bedeutungshaltiger Stimuli aktiviert werden.

Die Einbeziehung visueller Areale in den Hörverstehensprozess bei CI-Trägern weist darauf hin, dass zusätzliche visuelle Informationen beispielsweise durch Lippenablesen erwartet werden, die das Sprachverstehen unterstützen können. Die Herausbildung der visuellen Kompensationsmechanismen erfolgt dabei stimulusspezifisch, womit sie einer-

[13] Für einen generellen Überblick über das Phänomen der crossmodalen Plastizität in Folge des Ausfalls einer sensorischen Modalität sei beispielsweise auf Bavelier und Neville (2002) verwiesen.

seits mit einer verbesserten Diskriminationsfähigkeit von Schallkategorien einhergeht und andererseits wiederum durch diese bedingt ist.

Insgesamt legen die hier berichteten Befunde einer Reihe von PET-Studien nahe, dass neuronale Reorganisation bei postlingual ertaubten CI-Trägern nicht nur die Folge von akustischer Deprivation während der der Implantation vorangegangenen Gehörlosigkeit ist, sondern sich auch auf Lernprozesse zurückführen lässt, die mit dem Wiedererwerb der Hörfähigkeit stattfinden. Die sich im Laufe der CI-Rehabilitation herausbildenden funktionellen Veränderungen betreffen dabei weniger den primären auditorischen Kortex als vielmehr die auditorischen Assoziationsfelder und nachgeordnete sprachliche Verarbeitungssysteme.

Bei postlingual ertaubten CI-Trägern sind im Wesentlichen die gleichen kortikalen Strukturen wie auch bei Normalhörenden an der Sprachverarbeitung beteiligt. Für die auditorischen Assoziationsareale konnte festgestellt werden, dass eine Wiederherstellung der stimulusspezifischen Spezialisierung dieser Region durch den Wiedererwerb der Hörfähigkeit bis zu einem gewissen Grad, jedoch nicht vollständig möglich ist. Weitere Änderungen sind vor allem hinsichtlich der zum Sprachverstehen verwendeten perzeptuellen Strategien zu beobachten. So erfolgt bei den CI-Trägern eine weniger systematische Involvierung der Regionen, welche die semantische Verarbeitung unterstützen, in den Sprachverstehensprozess, wobei gleichzeitig die für die prosodische Verarbeitung zuständigen Regionen verstärkt aktiviert werden. Auch Aufmerksamkeits- und Gedächtnisressourcen werden stärker genutzt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass beim Sprachverstehen von CI-Trägern auch visuelle Kompensationsmechanismen eine Rolle spielen, welche die Verarbeitung von akustischem Input im Verlauf der CI-Rehabilitation immer gezielter und stimulusspezifischer unterstützen.

2.5 Zusammenfassung

Mit Hilfe von Cochlea-Implantaten können gehörlose und hochgradig schwerhörige Patienten ihre Hörfähigkeit wiedererlangen. Aufgrund technologischer Beschränkungen kann ein CI jedoch die durch das gesunde Hörsystem geleistete sehr feine Frequenz-, Intensitäts- und Zeitauflösung nur teilweise ersetzen, so dass das Hören mit CI in hohem Maß vom normalen Hören verschieden ist. CI-Träger, deren Ertaubung erst nach abgeschlossenem Spracherwerb erfolgte, müssen sich also auf einen neuartigen, reduzierten akusti-

schen Input einstellen, der von den auf der Basis natürlicher Höreindrücke aufgebauten hör- und lautsprachlichen Repräsentationen abweicht.

In einer Reihe von Studien mit bildgebenden Verfahren konnte gezeigt werden, dass die Wiederherstellung der Hörfähigkeit bei CI-Trägern mit einer teilweisen Reorganisation der neuronalen Mechanismen des Sprachverstehens einhergeht. Eine neuroanatomische Reorganisation findet dabei hauptsächlich in funktioneller Hinsicht statt. Das bedeutet, dass auf vorhandene kognitive Strukturen zurückgegriffen wird, jedoch eine im Vergleich zu Normalhörenden stärkere oder geringere Aktivierung bestimmter Strukturen innerhalb des Sprachverarbeitungssystems ebenso beobachtet werden kann wie die verstärkte Einbeziehung von Aufmerksamkeits- und Gedächtnisressourcen und von visuellen Verarbeitungsstrukturen.

Es scheint sich hier um kompensatorische Mechanismen zu handeln, die es CI-Trägern erlauben, den durch das CI vermittelten reduzierten akustischen Input erfolgreich zu entschlüsseln. Insgesamt sind diese kompensatorischen Prozesse des Sprachverstehens bei CI-Trägern jedoch derzeit nur unvollständig erforscht. Bisherige Erkenntnisse betreffen vor allem die neuroanatomische Basis des Sprachverarbeitung. Dagegen wurden Besonderheiten im Sprachverstehen von CI-Trägern hinsichtlich prozessualer Eigenschaften bislang kaum untersucht. Entsprechende Aussagen lassen die zumeist zur Erforschung der Sprachverarbeitungsmechanismen von CI-Trägern eingesetzten bildgebenden Verfahren aufgrund ihrer geringen zeitlichen Auflösung allerdings auch nicht zu.

Kapitel 3
Der elektrophysiologische Ansatz

3.1 Ereigniskorrelierte Potentiale

Die Messung ereigniskorrelierter Hirnpotentiale (EKP) gilt als wichtiger methodischer Zugang bei der Erforschung kognitiver Prozesse. Während bildgebende Verfahren wie zum Beispiel PET auf der Messung hämodynamischer Eigenschaften des Gehirns basieren, werden mit ereigniskorrelierten Potentialen elektrodynamische Eigenschaften registriert. Bei der EKP-Methode handelt es sich um ein sogenanntes *online*-Verfahren, was bedeutet, dass kognitive Prozesse direkt während ihres Ablaufs erfasst werden können. Im Gegensatz zu den bildgebenden Verfahren bieten ereigniskorrelierte Potentiale den Vorteil einer hohen, im Millisekundenbereich liegenden zeitlichen Auflösung. Sie sind damit besonders geeignet, die mit hoher Geschwindigkeit ablaufenden Prozesse der kognitiven Verarbeitung von Sprache adäquat abzubilden (u. a. Birbaumer & Schmidt, 1991; Garnsey, 1993).

3.1.1 EEG und EKP

An der Kopfoberfläche messbare hirnelektrische Potentialverschiebungen werden im *Elektroenzephalogramm* (EEG) dargestellt, welches für den Menschen erstmals 1929 von Hans Berger beschrieben wurde. Die im EEG abgeleiteten Hirnströme reflektieren die Grundaktivität des Gehirns. Als *ereigniskorrelierte Potentiale* (EKP) werden hingegen die im EEG messbaren Potentialverschiebungen bezeichnet, welche vor, während oder nach sensorischen, motorischen oder psychischen Ereignissen auftreten (Birbaumer & Schmidt, 1991). Das EKP stellt damit einen bestimmten Abschnitt im EEG dar, der zeitlich an einen Reiz und die Reaktion des Gehirns darauf gebunden ist (Coles & Rugg, 1995). Da hirnelektrische Potentialverschiebungen nicht nur durch exogene Reize hervorgerufen werden, sondern beispielsweise auch in Erwartung eines bestimmten Ereignisses auftreten können, ist der häufig im medizinischen Bereich anzutreffende Begriff

der *evozierten Potentiale*, der die Bindung an einen externen Reiz impliziert, eine im Zusammenhang mit kognitiven Prozessen ungenaue Bezeichnung (ebd.).

Neurophysiologische Grundlagen. Die Zusammenhänge zwischen der neuronalen Aktivität und den im EEG aufgezeichneten Spannungsschwankungen sind nicht vollständig geklärt. Es besteht jedoch Übereinstimmung hinsichtlich der Tatsache, dass zur Entstehung eines elektrischen Feldes, dessen Spannungsänderungen an der Kopfoberfläche messbar werden, die synchrone Aktivität einer großen Anzahl von Neuronen (1000 bis 10 000 Zellen nach Kutas & Van Petten, 1994) notwendig ist. Die Funktion der zeitlichen Synchronisierung der neuronalen Aktivität wird dabei den Strukturen des Thalamus zugeschrieben (Birbaumer & Schmidt, 1991).

Damit sich die jeweiligen dipolaren Ladungen der einzelnen Neurone zu einem sogenannten *offenen Feld* mit einem gerichteten Stromfluss zwischen positiven und negativen Ladungen aufsummieren können, bedarf es zudem einer parallelen Anordnung der Neurone. Eine solche Konstellation ist innerhalb des Neokortex nur für die senkrecht ausgerichteten Pyramidenzellen gegeben, welche mit ihrem Zellkörper in den unteren Kortexschichten III, IV und V liegen und deren Dendriten apikal in die oberen Schichten I und II ragen. Sie gelten deshalb als die Generatoren der von der Kopfoberfläche ableitbaren Spannungsschwankungen. Die im EEG bzw. EKP dargestellten Spannungsänderungen resultieren dabei weniger aus Nervenaktionspotentialen als vielmehr aus postsynaptischen Potentialen (PSP) an den apikalen Dendriten (vgl. Birbaumer & Schmidt, 1991; Coles & Rugg, 1995; Kutas & Van Petten, 1994).

EKP-Mittelung. Die Amplituden von EKPs liegen im Bereich zwischen 1 μV und 30 μV. Sie werden damit überlagert von den wesentlich größeren Amplituden der Grundaktivität des Gehirns, welche bei etwa 1 μV bis 200 μV liegen (Birbaumer & Schmidt, 1991). Daher ist es erforderlich, die ereigniskorrelierte Hirnaktivität (*Signal*) durch entsprechende Mittelungstechniken von den Spannungsschwankungen der Grundaktivität (*Rauschen*) zu isolieren. Die hierzu verwendete Signalmittelungsprozedur (*Averaging*) basiert auf der Annahme, dass die EEG-Hintergrundaktivität in Bezug auf das zu untersuchende Ereignis zufällig verteilt ist, d. h. unsystematisch um die Nulllinie schwankt, während die ereigniskorrelierte Aktivität systematisch auftritt, da sie zeitlich und in ihrer Ausprägung reizgebunden ist. Eine Aufaddierung von mit identischen oder ähnlichen Ereignissen korrelierten EEG-Abschnitten bewirkt deshalb das Hervortreten der Amplituden der systematischen Aktivität bei gleichzeitiger Verringerung der Zufallsaktivität idealerweise gegen Null. Die Originalgröße der ereigniskorrelierten Aktivität wird anschließend durch

das arithmetische Mittel bestimmt (vgl. Birbaumer & Schmidt, 1991; Picton, Lins & Scherg, 1995). Das Signal-Rausch-Verhältnis in den auf diese Art errechneten EKPs ist abhängig von der Anzahl der Ereignisse (*Trials*), die in die Mittelung eingehen. Für EKP-Experimente zur Sprachverarbeitung werden bei einer Stichprobengröße von 15-20 Probanden in der Regel etwa 30-40 Trials in einer experimentellen Bedingung benötigt, um ein adäquates Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten (Kutas & Van Petten, 1994).

Die beschriebene Prozedur der Signalmittelung ermöglicht es, auch minimale Spannungsschwankungen sichtbar zu machen. Nachteilig ist allerdings, dass EKPs nicht für einzelne Ereignisse, sondern immer nur für eine Vielzahl von gleichen oder ähnlichen Ereignissen ermittelt werden können (vgl. Coles & Rugg, 1995).

3.1.2 Methodik der Datenerhebung

EEGs bzw. EKPs werden mit Hilfe von am Kopf befestigten Oberflächenelektroden gemessen. Die Positionierung der Elektroden erfolgt üblicherweise nach einer Erweiterung des 10-20-Systems von Jaspers (vgl. Sharbrough et al., 1991, siehe auch Abbildung 3.1), bei dem die Elektroden anhand festgelegter anatomischer Punkte am Kopf wie beispielsweise Nasion und Inion platziert werden. Die Benennung der einzelnen Elektrodenpositionen gibt neben der Hirnregion, über der die Elektroden liegen (F = frontal, C = zentral, P = parietal, O = okzipital sowie verschiedene Kombinationen) auch die entsprechende Hemisphäre an (gerade Ziffern = rechts, ungerade Ziffern = links, z = Mittellinie). In Studien zur Sprachverarbeitung finden sich mitunter auch Elektrodenbenennungen, welche sich auf sprachrelevante Regionen wie das Broca- oder das Wernicke-Areal beziehen.

Ereigniskorrelierte Potentiale werden immer als Spannungsdifferenzen, also Aktivitätsunterschiede zwischen zwei oder mehr Ableitungsorten gemessen. Man kann dabei unterscheiden zwischen einer *monopolaren Ableitung*, bei der die Referenzelektrode an einem elektrisch inaktiven und damit neutralen Ort angebracht ist (z. B. Mastoid), und einer *bipolaren Ableitung*, bei welcher Spannungsdifferenzen zwischen zwei elektrisch aktiven Orten gemessen werden. Der bei monopolarer Ableitung möglichen Verschiebung lateraler Effekte der aufgezeichneten Aktivität aufgrund der nicht-symmetrischen Lage der Referenzelektrode kann entgegengewirkt werden, indem nachträglich eine Re-Referenzierung durchgeführt wird. Bei einer Mastoidreferenz wird dazu häufig eine virtuelle Referenz errechnet, indem das Mittel aus der ursprünglichen Referenz und der Ableitung einer am gegenüberliegenden Mastoid befestigten Elektrode gebildet wird (vgl. Garnsey, 1993; Picton et al., 1995).

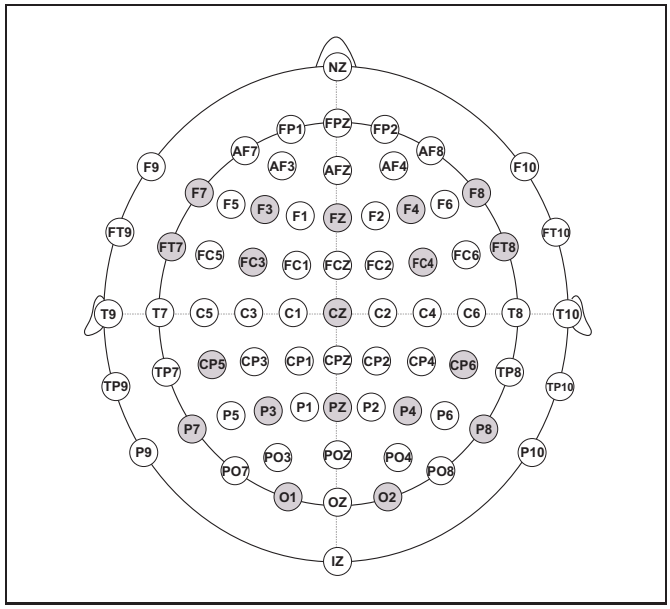

Abb. 3.1: *Schematische Darstellung der Elektrodenpositionen nach Sharbrough et al. (1991). Die in den Experimenten der vorliegenden Arbeit verwendeten Elektrodenpositionen sind grau unterlegt.*

Die EEG-Aufzeichnung erfolgt mittels eines Differenzverstärkers. Dieser dient der Verstärkung der sehr geringen Amplituden der gemessenen Spannungsdifferenzen. Durch eingebaute Filter sollen dabei gleichzeitig mögliche Störfrequenzen aus der Umgebung unterdrückt werden. Zur weiteren Bearbeitung wird das kontinuierlich aufgezeichnete EEG-Signal digitalisiert, d. h. in eine Abfolge von diskreten Datenpunkten umgewandelt, wobei die Anzahl der Datenpunkte pro Sekunde durch die Abtastrate (Einheit: Hz) festgelegt ist.

Durch die Filterung des EEG-Eingangssignals während der Aufzeichnung können zwar Störfrequenzen aus der Umgebung unterdrückt werden, Störungen werden jedoch auch durch Muskelbewegungen an Kopf oder Nacken und vor allem durch Augenbewegungen verursacht. Solche Artefakte können die EEG-Ableitung beträchtlich beeinflussen; aufgrund oft großer Amplituden mitteln sie sich bei einem Averaging in der Regel nicht heraus. Bewegungsartefakte besonders der Augen lassen sich aber auch bei entsprechender Instruktion der Probanden nicht vollständig vermeiden. Entsprechende Trials müssen deshalb von der Mittelungsprozedur und der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck wird üblicherweise bei EEG-Ableitungen im Rahmen von EKP-Experimenten zusätzlich ein sogenanntes *Elektrookulogramm* aufgezeichnet,

bei dem durch seitlich der Augen bzw. ober- und unterhalb des rechten Auges befestigte Elektroden horizontale (*Moves*) und vertikale (*Blinks*) Augenbewegungen registriert werden. Mit Hilfe des Elektrookulogramms kann ein automatischer Ausschluss von artefaktbehafteten Trials vorgenommen werden, wobei die automatische Bereinigung in der Regel einer manuellen Überprüfung bedarf (Garnsey, 1993). Unter Umständen ist es jedoch auch möglich, mit Hilfe spezieller Software eine manuelle Korrektur für Trials mit Augenbewegungsartefakten vorzunehmen (vgl. Picton et al., 1995). Dies kann erforderlich werden, wenn ungeübte Versuchspersonen am Experiment teilnehmen, die Probleme haben, ihre Augenbewegungen ausreichend zu kontrollieren. In einem solchen Fall müssten ohne die manuelle Korrektur zu viele Trials von der Mittelung ausgeschlossen werden, was eine zu starke Beeinträchtigung des Signal-Rausch-Verhältnisses zur Folge hätte.[1]

3.1.3 Komponenten im EKP

Ereigniskorrelierte Potentiale lassen sich beschreiben als eine komplexe zeitliche Abfolge von positiven und negativen Potentialschwankungen. EKP-Muster, die sich hinsichtlich bestimmter Parameter ähneln, werden als Komponenten bezeichnet.

Definition von Komponenten. Es wird in der Literatur kontrovers diskutiert, durch welche Parameter eine Komponente definiert ist. Nach Coles und Rugg (1995) lassen sich die verschiedenen Definitionsansätze grundsätzlich dahingehend unterscheiden, ob die Definition der Komponenten unter überwiegend physiologischen Gesichtspunkten erfolgt oder ob der Zusammenhang mit funktionalen Aspekten im Vordergrund steht. Von Donchin, Ritter und McCallum (1978) wird eine Definition vorgeschlagen, welche sowohl physiologische als auch funktionale Aspekte beinhaltet. Dieser Definition folgend kann die Bestimmung von EKP-Komponenten anhand ihrer Polarität, ihrer Latenz, ihrer Topographie sowie ihrer Sensitivität gegenüber charakteristischen experimentellen Manipulationen erfolgen.

- Die *Polarität* gibt die Richtung der Auslenkung eines Kurvenverlaufs an (Negativierung bzw. Positivierung). Die Angabe der Polarität kann dabei entweder relativ

[1] Für eine detaillierte Schilderung der hier nur in Kürze dargestellten Methodik der Datenerhebung im Rahmen von EKP-Experimenten sei unter anderem auf die Arbeiten von Fabiani, Gratton und Coles (2000), Garnsey (1993) und Picton et al. (1995) verwiesen. Eine ausführliche Darstellung der EEG-Ableitung im Allgemeinen findet sich beispielsweise bei Bösel (1996) oder bei Davidson, Jackson und Larson (2000).

zu einer *Baseline*[2] derselben Bedingung oder in Relation zum Kurvenverlauf einer Vergleichsbedingung erfolgen.

- Mit der *Latenz* wird der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn der Reizdarbietung und dem Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Ausprägung einer Komponente angegeben (*Peaklatenz*). Unter Umständen kann die Latenz jedoch auch die Zeit bis zum Einsetzen der Komponente beschreiben (*Onsetlatenz*).

- Die *Topographie* beschreibt die Verteilung der Komponente über die Elektrodenpositionen auf der Kopfoberfläche bzw. den Ort ihrer maximalen Ausprägung. Topographische Angaben beziehen sich dabei in der Regel auf größere, mehrere Elektrodenpositionen umfassende Regionen.

- Auch die *Sensitivität* gegenüber bestimmten experimentellen Manipulationen kann als Definitionsparameter zur Bestimmung von EKP-Komponenten herangezogen werden. Damit lassen sich Komponenten dahingehend differenzieren, ob die entsprechenden, mitunter ähnlich aussehenden Effekte im EKP unterschiedliche funktionelle Eigenschaften aufweisen, also beispielsweise nicht gleichermaßen sensibel auf eine experimentelle Manipulation reagieren. In einem solchen Fall können unterschiedliche EKP-Komponenten angenommen werden, da auf verschiedene zugrunde liegende kognitive Funktionen zu schließen ist.

Exogene und endogene Komponenten. Die im ereigniskorrelierten Potential auftretenden Komponenten können als exogen oder endogen klassifiziert werden. Endogene Potentiale treten zeitlich früher auf als exogene Potentiale. Die beiden Gruppen von Komponenten unterscheiden sich jedoch nicht nur hinsichtlich ihrer Latenz voneinander.

Exogene Potentiale sind in ihrer Charakteristik hauptsächlich von den physikalischen Eigenschaften des auslösenden Reizes, wie Intensität, Stimulushäufigkeit oder sensorischer Qualität des Reizes abhängig. Da ihr Auftreten obligatorisch an eine Reizdarbietung gebunden ist, handelt es sich bei ihnen tatsächlich um *evozierte* Potentiale (vgl. Abschnitt 3.1.1). Exogene Komponenten gelten als modalitätsspezifisch; man kann also beispielsweise zwischen akustisch und visuell evozierten Potentialen unterscheiden,

[2]Unter einer Baseline versteht man in diesem Zusammenhang den gewählten Zeitbereich im EEG-Signal, auf dessen mittlere Aktivität jeder gemessene Datenpunkt des Mittelungszeitraums bezogen wird. In einem experimentellen Design, bei dem die EKP-Verläufe zweier Bedingungen miteinander verglichen werden, erfolgt dadurch ein „Aufeinanderziehen“ der Potentialverläufe der beiden Bedingungen im festgelegten Zeitfenster, womit die nicht durch die experimentelle Manipulation bedingte Variation zwischen den Bedingungen minimiert werden soll. Als Baseline wird ein Zeitfenster gewählt, in welchem sich die experimentellen Bedingungen nicht systematisch voneinander unterscheiden und welches üblicherweise zeitlich kurz vor dem interessierenden Zeitbereich liegt (vgl. Kutas & Van Petten, 1994).

wobei im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich die akustisch evozierten Potentiale von Interesse sind. In der Literatur findet sich für die exogenen Komponenten bisweilen auch der Begriff der *sensorischen* Komponenten (u. a. Coles & Rugg, 1995; Garnsey, 1993; Kutas & Van Petten, 1994).

Im Gegensatz zu den exogenen Potentialen gelten endogene Komponenten als weitgehend unabhängig von physikalischen Reizeigenschaften. Ihre Charakteristik ebenso wie auch ihr Auftreten an sich sind vielmehr von psychologischen Zuständen abhängig, die durch Instruktion, Aufmerksamkeit oder Erwartung beeinflusst werden können. Aus diesem Grund werden endogene Potentiale mitunter auch als *kognitive* Komponenten bezeichnet. Endogene Komponenten treten weder obligatorisch nach jeder Reizdarbietung auf, noch ist ihre Existenz an das Vorhandensein eines externen Reizes gekoppelt. Des Weiteren sind sie weitgehend modalitätsunabhängig, weshalb beispielsweise die mit der Sprachverarbeitung in Zusammenhang stehenden endogenen Komponenten sowohl in visuellen als auch in akustischen experimentellen Paradigmen evoziert werden können (ebd.).

Die Unterscheidung zwischen exogenen und endogenen Komponenten ist nicht immer eindeutig. Während sich beispielsweise für primär exogene Komponenten mitunter auch ein Einfluss von kognitiven Faktoren feststellen lässt, können endogene Komponenten unter Umständen auch durch physikalische Reizeigenschaften wie die Reizmodalität beeinflusst werden. Aus diesem Grund schlagen Coles und Rugg (1995) für die Einteilung der Komponenten ein zeitliches Kontinuum zwischen exogen und endogen vor, wobei die in den ersten 100 ms nach Reizdarbietung erscheinenden Komponenten vorwiegend exogener, spätere Komponenten dagegen vorwiegend endogener Natur sind.

Generell gelten die kognitiven endogenen Potentiale als Korrelate von Verarbeitungsprozessen, die auf zentraler Ebene angesiedelt sind, die früheren exogenen Potentiale reflektieren dagegen eher die Übermittlung von sensorischer Information vom peripheren Sinnesorgan hin zum Kortex. Bezogen auf die Verarbeitung akustischer Reize sind also die akustisch evozierten exogenen Potentiale Korrelate der Anteile der Hörbahn. Für die akustisch evozierten exogenen Potentiale wird gemäß ihrer Latenz eine weitere Einteilung in frühe, mittlere und späte Potentiale vorgenommen (vgl. Lehnhardt, 1998).

Aufgrund dieser Eigenschaften sind für die Untersuchung kognitionswissenschaftlicher Fragestellungen eher die endogenen Potentiale relevant, akustisch evozierte exogene Potentiale kommen dagegen vor allem im Bereich der audiologischen Diagnostik zur Anwendung (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Benennung von Komponenten. Die Benennung von EKP-Komponenten ist nicht vollständig einheitlich geregelt. Während die frühen akustisch evozierten Potentiale entsprechend ihrer zeitlichen Abfolge mit römischen Zahlen gekennzeichnet werden (Wellen I bis V), sind alle nachfolgenden Komponenten in der Regel entsprechend ihrer Polarität (N oder P) sowie entweder ihrer ordinalen Position oder ihrer Latenz benannt. Bei den mittellatenten exogenen Potentialen ist die ordinale Position durch Kleinbuchstaben indiziert (z. B. Na, Nb etc.), bei den späteren Potentialen durch eine lateinische Ziffer (z. B. N1, P1 etc.), wobei der Ziffer zur weiteren Spezifizierung auch ein lateinischer Buchstabe nachgestellt sein kann (z. B. P3a oder P3b). Bei einer Kennzeichnung mittels der Latenz wird diese in Millisekunden angegeben (z. B. N400, P600). Für gut etablierte Komponenten wird dabei üblicherweise eine typische Latenz angegeben, welche aber in der experimentellen Praxis stark variieren kann. Beispielsweise bezeichnet die N400 eine Negativierung mit einer typischen maximalen Ausprägung bei 400 ms, die aber in verschiedenen experimentellen Kontexten unter Umständen auch bei 300 oder 600 ms liegen kann. Alternativ zu diesen Konventionen kann sich die Benennung von Komponenten auch an der topographischen Verteilung der Komponente orientieren (z. B. *Left Anterior Negativity*, LAN) oder sich auf funktionale Aspekte beziehen (z. B. *Mismatch Negativity*, MMN).

3.1.4 Möglichkeiten und Grenzen der EKP-Methode

Die Messung ereigniskorrelierter Potentiale ist eine etablierte Methode im Bereich der Kognitionsforschung, welche anderen Untersuchungsmethoden gegenüber eine Reihe von Vorzügen aufweist. Das Verfahren bietet die Möglichkeit der direkten und nicht-invasiven Untersuchung von kognitiven Prozessen und erlaubt die kontinuierliche Erfassung dieser Prozesse mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung. Damit steht mit der EKP-Methode ein Verfahren zur Verfügung, das es erlaubt, die mit hoher Geschwindigkeit stattfindenden Prozesse des Sprachverstehens in adäquater Weise abzubilden. Überdies erfordert eine EKP-Ableitung nicht obligatorisch die Bearbeitung einer zusätzlichen Aufgabe durch die Probanden, was die Untersuchung von weitgehend unbeeinträchtigten, also quasi „natürlich“ verlaufenden Sprachverarbeitungsprozessen ermöglicht[3]. Die Sensibilität von ereigniskorrelierten Potentialen gegenüber sprachlichen Verarbeitungsprozessen konnte in einer Vielzahl von Studien nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 3.3). Experi-

[3]EKP-Experimente beinhalten jedoch trotzdem häufig Aufgabenstellungen an die Probanden, welche hauptsächlich die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen sicherstellen sollen. Gleichzeitig kann damit bis zu einem gewissen Grad auch überprüft werden, wie bzw. ob die verwendeten experimentellen Stimuli verstanden wurden.

mentelle Manipulationen schlagen sich dabei nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ nieder, d. h. sie können sich in unterschiedlichen EKP-Parametern, wie Polarität, Latenz oder Amplitude widerspiegeln (vgl. Abschnitt 3.1.3), anstatt – wie dies beispielsweise bei Reaktionszeitmessungen der Fall ist – nur in einer Dimension sichtbar zu werden. Diese differentielle Sensibilität von ereigniskorrelierten Potentialen ermöglicht eine differenziertere Analyse des Sprachverstehens und seiner Teilprozesse.

Gleichwohl weist die EKP-Methode, so wie jedes andere Verfahren auch, einige methodische Probleme auf, die bei der Interpretation von EKP-Daten Berücksichtigung finden müssen. Eine Beschränkung der Methode liegt in ihrer relativen topographischen Ungenauigkeit. Bedingt durch die Leitfähigkeit des Gehirns können Potentialverschiebungen an der Kopfoberfläche auch in einiger Entfernung zu den eigentlichen neuronalen Generatoren abgeleitet werden. Aus diesem Grund kann aus der Verteilung einer Komponente nicht auf den Entstehungsort der zugrunde liegenden neuronalen Prozesse geschlossen werden; eine Lokalisation der Generatoren ist nur annäherungsweise möglich (Garnsey, 1993)[4]. Aus der nur ungenauen Bestimmbarkeit der Generatoren von ereigniskorrelierten Potentialen ergeben sich auch Unsicherheiten bei der Komponentendefinition. Während es zwar zulässig ist anzunehmen, dass ähnliche kognitive Prozesse ähnliche neuronale Generatoren aktivieren und die entsprechenden ereigniskorrelierten Potentiale eine ähnliche Verteilung aufweisen, ist eine Inversion dieses Schlusses nicht möglich, da die Verteilung einer Komponente keine genauen Rückschlüsse auf ihren Entstehungsort zulässt. Demzufolge kann allein aus der ähnlichen Verteilung von ereigniskorrelierten Potentialen nicht unbedingt auf ähnliche zugrunde liegende Prozesse gefolgert werden, ebenso wenig wie unterschiedliche Verteilungen zwangsläufig die Aktivität unterschiedlicher neuronaler Generatoren reflektieren müssen. Es ist bisher nicht geklärt, wie groß topographische Differenzen sein müssen, damit die Annahme verschiedener EKP-Komponenten gerechtfertigt ist, d. h. ab wann unterschiedliche neuronale Generatoren und damit unterschiedliche zugrunde liegende kognitive Prozesse unterstellt werden können (Rugg & Coles, 1995). Bei der Interpretation von EKP-Daten ist außerdem zu berücksichtigen, dass ereigniskorrelierte Potentiale immer nur einen Teil der tatsächlich vorhandenen neuronalen Aktivierungen reflektieren. Diese Selektivität ist bedingt durch die Tatsache, dass bestimmte neurophysiologische Voraussetzungen – nämlich die synchrone Aktivität hin-

[4] Die Lokalisation der neuronalen Generatoren einer EKP-Komponente ist in begrenztem Maße im Rahmen einer sogenannten Quellenanalyse möglich, bei der mathematisch-statistische Verfahren eingesetzt werden, um unter Ausnutzung der speziellen Eigenheiten der Dipolstruktur die Position der Generatoren anhand von Verteilung, Phasen und Polarisationswindungen der Potentiale unter Berücksichtigung der Windungen und Täler der Hirnrinde zu berechnen (vgl. Birbaumer & Schmidt, 1991).

reichend vieler Neuronen, die parallel angeordnet sind – erfüllt sein müssen, damit neuronale Aktivität in Form von ereigniskorrelierten Potentialen an der Kopfoberfläche messbar wird (vgl. Abschnitt 3.1.1). Aus der Tatsache, dass sich eine experimentelle Manipulation nicht im ereigniskorrelierten Potential niederschlägt, kann demzufolge nicht geschlussfolgert werden, dass keine Verarbeitung der betreffenden Manipulation stattgefunden hat, da ebenso möglicherweise zu wenige Neuronen aktiviert waren oder die erforderliche parallele Anordnung der Neuronen nicht gegeben war. Unklar ist des Weiteren bislang ebenfalls, in welcher Weise der zeitliche Verlauf von ereigniskorrelierten Potentialen zu interpretieren ist. Hier stellt sich die Frage, inwiefern Onset oder Peak einer Komponente bestimmte Phasen der zugrunde liegenden Prozesse widerspiegeln. So könnte der Peak einer Komponente beispielsweise ebenso das Überschreiten einer Aktivierungsschwelle und dadurch ausgelöste Verarbeitungsprozesse reflektieren wie auch den Abschluss von Verarbeitungsprozessen. Wenig ist auch darüber bekannt, was die Dauer einer Komponente aussagt (Garnsey, 1993; Rugg & Coles, 1995).

Auch wenn derzeit also noch einige Einschränkungen bei der Interpretation von ereigniskorrelierten Potentialen bestehen, handelt es sich bei der EKP-Methode insgesamt um einen vielversprechenden Ansatz zur Untersuchung der kognitiven Prozesse des Sprachverstehens. Neben der Verwendung speziellerer Auswertungstechniken verspricht dabei besonders die Kombination der Methode sowohl mit behavioralen als auch mit räumlich hochauflösenden bildgebenden Verfahren wie PET oder fMRI interessante Perspektiven.

3.2 Sprachunspezifische EKP-Komponenten

Bisherige Untersuchungen mit elektrophysiologischen Messmethoden bei CI-Trägern haben sich fast ausschließlich auf nicht-sprachspezifische EKP-Komponenten bezogen. An dieser Stelle soll deshalb zunächst ein kurzer Überblick über diese sprachunspezifischen Komponenten gegeben werden, bevor anschließend auf die für die Verarbeitung von Sprache spezifischen EKP-Komponenten eingegangen wird.

3.2.1 Exogene Komponenten

Die exogenen akustisch evozierten Potentiale kommen im Wesentlichen im Rahmen der elektrischen Reaktionsaudiometrie (ERA) in der audiologischen Diagnostik zur Anwendung. Sie reflektieren die Verarbeitung akustischer Signale auf den verschiedenen Ebe-

nen der Hörbahn. Neben der Ableitung von frühen, mittleren und späten akustisch evozierten Potentialen rechnet man auch die Ableitung von Reizantworten des Innenohres mittels otoakustischer Emissionen und die Elektrocochleographie zur elektrischen Reaktionsaudiometrie, auf letztere soll hier aber nicht näher eingegangen werden (für eine ausführliche Darstellung der elektrischen Reaktionsaudiometrie vgl. Lehnhardt, 1996a; Maurer, 1993).

Frühe akustisch evozierte Potentiale. Die Generatoren der auch als *Hirnstammpotentiale* bezeichneten frühen akustisch evozierten Potentiale sind, wie der Name bereits nahe legt, im Hörnerv und im Hirnstamm lokalisiert. Hirnstammpotentiale bestehen aus einer Abfolge von fünf Peaks bzw. Wellen, die innerhalb der ersten zehn Millisekunden nach Reizbeginn abgeleitet werden können. Die Amplituden dieser Peaks sind dabei abhängig von der Reizintensität (vgl. Lehnhardt, 1996a; Møller, 2000).

Mittlere akustisch evozierte Potentiale. Im Anschluss an die Hirnstammpotentiale sind die akustisch evozierten Potentiale mittlerer Latenz zu beobachten. Die zu diesen Potentialen zu rechnenden Komponenten No, Po, Na, Pa und Nb haben ihren Ursprung hauptsächlich in kortikalen und thalamischen Strukturen. Sie treten zwischen 10 und 50 ms nach Reizbeginn auf (vgl. Lehnhardt, 1996a).

Späte akustisch evozierte Potentiale. Die späten akustisch evozierten Potentiale werden in der audiologischen Praxis nach dem Ort ihrer Entstehung auch als *Hirnrindenpotentiale* bezeichnet. Als die wichtigsten späten akustisch evozierten Potentiale gelten die Komponenten N1 und P2, deren Latenz bei 100 bzw. 175 ms liegt. Die diesem Wellenkomplex vorausgehende P1-Komponente ist zumindest teilweise identisch mit der Pb-Komponente der mittellatenten akustisch evozierten Potentiale (Eggermont & Ponton, 2002). Im audiologischen Bereich wird auch das dem N1-P2-Komplex nachfolgende Potential N2 als Teil der späten akustisch evozierten Potentiale betrachtet, dieses soll aufgrund seiner Eigenschaften im Folgenden jedoch den endogenen Potentialen zugeordnet werden[5]. Als Entstehungsort der späten akustisch evozierten Potentiale gelten die Bereiche der primären und der sekundären Hörrinde (vgl. u. a. Lehnhardt, 1996a; Maurer, 1993). Die späten Potentiale können im Gegensatz zu den Hirnstammpotentialen zur

[5] Allerdings haben jüngere Untersuchungen gezeigt, dass auch die Zuordnung des N1-P2-Komplexes zu den exogenen Potentialen nicht eindeutig ist, da die Eigenschaften dieser Komponenten nicht allein von physikalischen Reiz- und Reaktionsbedingungen abhängig sind. Vielmehr konnte hier eine Modulation der Amplituden im Zusammenhang mit Aufmerksamkeitsveränderungen beobachtet werden (vgl. Böhme & Welzl-Müller, 1993).

frequenzabhängigen Bestimmung der Hörschwelle eingesetzt werden. Ihre Anwesenheit bestätigt die Stimulation der Hörbahn bis hin zum auditorischen Kortex.

3.2.2 Endogene Komponenten

Als die wichtigsten nicht-sprachspezifischen endogenen EKP-Komponenten seien hier die auch als *Mismatch Negativity* (MMN) bezeichnete N2a-Komponente sowie die P300-Komponente genannt. Beide Komponenten werden im Rahmen eines sogenannten *Oddball-Paradigmas* durch seltene abweichende Reize (*Deviants*) innerhalb einer Serie von gleichartigen, sich wiederholenden Reizen (*Standards*) evoziert.

Mismatch Negativity. Die mit der N2a-Komponente gleichzusetzende MMN wurde erstmalig von Näätänen, Gaillard und Mäntysalo (1978) beschrieben. Es handelt sich um eine fronto-zentrale Negativierung mit einem Maximum bei 100 bis 200 ms nach Reizbeginn, welche durch Unregelmäßigkeit in einer sich wiederholenden Abfolge akustischer Reize ausgelöst wird. Es kann sich dabei um einfache physikalische Abweichungen beispielsweise hinsichtlich Frequenz, Dauer oder Intensität handeln, ebenso aber auch um komplexere Abweichungen, wie sie beispielsweise vorliegen können, wenn ein abweichendes Phonem in einer Reihe andersartiger Phoneme auftritt oder wenn bestimmte Abfolgeregeln innerhalb einer Serie akustischer Reize nicht befolgt werden. Die Amplitude der MMN korreliert mit dem Abweichungsgrad des Deviants (für einen ausführlichen Überblick vgl. z. B. Näätänen, 1992; Schröger, 1998). Da es sich um eine Komponente handelt, welche nur in der akustischen Modalität evoziert werden kann, also modalitätsspezifisch ist, wird die MMN mitunter den exogenen Komponenten zugeordnet (z. B. Jacobson, Kraus & McGee, 1997). Die Mismatch Negativity tritt auch bei passivem Hören auf, also wenn das betreffende akustische Ereignisse außerhalb des Aufmerksamkeitsfokusses liegt. Sie konnte ebenfalls schon bei Koma-Patienten nachgewiesen werden (vgl. Näätänen, 2000). Es wird deshalb angenommen, dass die MMN das Korrelat eines automatischen, präattentiven Prozesses ist, welcher Unterschiede zwischen der neuronalen Repräsentation des akustischen Umfelds und einem davon abweichenden Reiz detektiert. Die Komponente ist damit ein objektives Maß für die Genauigkeit der auditiven Diskriminationsfähigkeit. Die Generatoren der MMN sind bilateral im auditorischen Kortex im Planum supratemporale lokalisiert (vgl. z. B. Näätänen, 2000; Näätänen, Tervaniemi, Sussman, Paavilainen & Winkler, 2001). Die MMN oder N2a ist abzugrenzen von einer weiteren Negativierung um 200 ms, der sogenannten N2b. Diese spiegelt vermutlich eher

aktive Diskriminationsprozesse wider und weist im Vergleich zur N2a eine breitere zentrale Verteilung auf. Im Gegensatz zur MMN kann die N2b auch in visuellen Aufgaben evoziert werden (vgl. Coles & Rugg, 1995; Opitz, 1999).

P300-Komponente. Die erstmals im Jahr von Sutton, Braren, Zubin und John (1965) beschriebene P300-Komponente wird wie die MMN durch abweichende Reize innerhalb eines Oddball-Paradigmas evoziert. Im Gegensatz zur MMN setzt sie aber aktive Diskriminationsleistungen seitens der Probanden voraus, zudem ist sie nicht modalitätsspezifisch. Die P300 ist eine sehr ausgeprägte Positivierung mit einer breiten zentroparietalen Verteilung und einer Peaklatenz von 300 bis 900 ms nach Reizbeginn. Die Amplitude der Komponente variiert in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit des Deviants. Ihre Latenz hingegen ist eine Funktion der Komplexität der zur Erfüllung der Diskriminationsaufgabe notwendigen Kategorisierung des Zielreizes (Coles & Rugg, 1995). Die P300 ist Teil eines Komplexes von positiven Auslenkungen, die bei aktiver Reizdiskrimination im Anschluss an die MMN zu beobachten sind und die in ihrer Gesamtheit die P3-Komponente bilden. Die klassische P300 ist dabei mit der Subkomponente P3b gleichzusetzen. Sie ist zu unterscheiden von der fronto-zentralen P3a, welche eine kürzere Latenz als die P3b aufweist. Während die P300 oder P3b im Zusammenhang mit abweichenden Reizen auftritt, welche für die Diskriminationsaufgabe relevant sind, kann die P3a als Reaktion auf aufgabenirrelevante Deviants beobachtet werden (vgl. z. B. Coles & Rugg, 1995; Fabiani et al., 2000). Über die funktionelle Bedeutung der P300 besteht derzeit noch keine Klarheit. Es wird vermutet, dass der Komponente kontextuelle Aktualisierungsprozesse zugrunde liegen, welche mit der Modifikation einer gegenwärtigen Umgebungsrepräsentation anhand neu hinzukommender Informationen in Zusammenhang stehen. Auch die Frage nach den neuronalen Generatoren der P300 ist noch nicht vollständig geklärt. Hier nimmt man die Beteiligung multipler kortikaler und subkortikaler Strukturen an (vgl. Fabiani et al., 2000).

3.3 Sprachspezifische EKP-Komponenten

Seit Kutas und Hillyard (1980a, 1980b) erstmalig eine mit der Verarbeitung von Sprache relatierte Komponente im ereigniskorrelierten Potential entdeckten, hat sich die Methode im Bereich der Untersuchung von Sprachverstehensprozessen als eine der fruchtbarsten etabliert. In einer Reihe von Studien, auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen werden soll, zeigte sich, dass ereigniskorrelierte Potentiale Verarbeitungs-

prozesse auf allen Repräsentationsebenen der Sprache abbilden können. Die nachfolgend dargestellten Korrelate sprachlicher Verarbeitungsprozesse rücken die Verarbeitung der sprachlichen Informationstypen in den Mittelpunkt, welche auch in den Experimenten mit CI-Trägern untersucht werden sollen. Es handelt sich hierbei um die Prozesse der semantisch-lexikalischen Verarbeitung sowie syntaktische, und dabei speziell phrasenstrukturelle, argumentstrukturelle und morphosyntaktische Verarbeitungsprozesse. Ereigniskorrelierte Potentiale haben sich jedoch nicht nur für diese sprachlichen Informationstypen als sensibel erwiesen. Es konnte beispielsweise ebenso gezeigt werden, dass sie die Verarbeitung phonologischer Informationen abbilden können (z. B. Dehaene-Lambertz, 1997; Näätänen et al., 1997). In jüngerer Zeit wurden auch neurophysiologische Korrelate prosodischer Verarbeitungsprozesse nachgewiesen (z. B. Steinhauer, Alter & Friederici, 1999; Steinhauer & Friederici, 2001; Steinhauer, 2003).

Viele der nachfolgend dargestellten Untersuchungen basieren auf dem erstmals von Kutas und Hillyard (1980a, 1980b) vorgestellten Paradigma, bei welchem die ereigniskorrelierten Potentiale auf korrekte Sätze mit den ereigniskorrelierten Potentialen auf Sätze, die hinsichtlich eines spezifischen sprachlichen Aspekts fehlerhaft sind, verglichen werden. Dieser Vergleich kann Aufschluss geben über die der Verarbeitung des entsprechenden Informationstyps zugrunde liegenden Prozesse. Er ermöglicht somit die systematische Identifikation der hirnelektrischen Korrelate bestimmter Teilprozesse des Sprachverstehens.

3.3.1 EKP-Korrelate semantischer Verarbeitung

Erstmalig wurde eine mit sprachlichen und speziell mit semantischen Manipulationen korrelierte EKP-Komponente von Kutas und Hillyard (1980a, 1980b) berichtet. Die Autoren kontrastierten Sätze, die ein syntaktisch korrektes, jedoch semantisch nicht in den vorangegangenen Satz passendes Wort wie in (1) enthielten mit korrekten Sätzen wie in (2).

(1) *He spread the warm bread with SOCKS.
(2) It was his first day at WORK.

Im Vergleich mit der ereigniskorrelierten Aktivität auf das semantisch passende Wort konnten sie für die Verarbeitung des semantisch unpassenden Wortes einen deutlich negativeren Verlauf des ereigniskorrelierten Potentials beobachten. Die Negativierung begann etwa 250 ms nach dem Beginn des kritischen Wortes und erreichte um 400 ms auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen ihr Maximum. Sie wurde deshalb von den Auto-

ren als *N400-Komponente* bezeichnet. Eine solche N400 ließ sich auch dann evozieren, wenn sich das mit dem Satzkontext nicht kompatible Wort in satzmedialer Position befand (Kutas & Hillyard, 1983).

Die Sprachspezifität der Komponente versuchten Kutas und Hillyard (1980a, 1980b) nachzuweisen, indem sie zusätzlich Sätze präsentierten, welche Wörter mit einer veränderten Schriftgröße und damit eine rein physikalische Abweichung vom Vorangegangenen enthielten. Für diese abweichenden Wörter wurde keine N400 sondern eine spätere Positivierung (P560) gefunden. Ebenso wenig konnte eine N400 beispielsweise für Inkongruenzen in Melodien (Besson & Macar, 1987) oder für rückwärts dargebotene Wörter beobachtet werden (Holcomb & Neville, 1990). Demzufolge wird die N400 in der Regel als sprachspezifische Komponente interpretiert und nicht als generelle Reaktion auf Abweichungen von Vorangegangenem.[6]

Die in den Studien von Kutas und Hillyard (1980a, 1980b) visuell evozierte N400 wurde von McCallum, Farmer und Pocock (1984) erstmals auch in der akustischen Modalität nachgewiesen. Wenn das letzte Wort eine physikalische Deviation vom Vorhergehenden darstellte, nämlich von einer weiblichen statt von einer männlichen Stimme gesprochen wurde, wurde dabei wiederum keine N400 beobachtet.

Mittlerweile konnte die N400 als Korrelat der Verarbeitung semantischer Verletzungen in einer Vielzahl von Studien für verschiedene Sprachen sowohl mit visuell als auch mit akustisch präsentiertem Stimulusmaterial repliziert werden (z. B. Ainsworth-Darnell, Shulman & Boland, 1998; Angrilli et al., 2002; Friederici, Pfeifer & Hahne, 1993; Friederici, Steinhauer & Frisch, 1999a; Gunter, Friederici & Hahne, 1999a; Hagoort, Wassenaar & Brown, 2003b; Hahne & Friederici, 2002; Neville, Nicol, Barss, Forster & Garrett, 1991; Osterhout & Nicol, 1999; Rösler, Friederici, Pütz & Hahne, 1993; für einen ausführlichen Überblick vgl. Kutas & Federmeier, 2000; Kutas & Van Petten, 1988, 1994; Van Petten, 1995). Unter anderem ließ sich die N400-Komponente auch für die amerikanische Gebärdensprache *ASL* nachweisen (Neville, 1985).

N400 als Indikator für kontextuelle Passung. Obwohl die N400 anfänglich vor allem im Rahmen von Verletzungsparadigmen untersucht wurde, konnte in nachfolgenden Stu-

[6] Die Ergebnisse neuerer Studien, in denen sich eine N400 auch für unpassende Zeichnungen von Objekten und damit nicht-sprachliches Material nachweisen ließ (Barrett & Rugg, 1990; Nigam, Hoffman & Simons, 1992), wurden teilweise dahingehend interpretiert, dass die N400 weniger ein sprachspezifisches als ein allgemeines kognitives Korrelat der Verarbeitung von Bedeutungsinhalten darstellt. Allerdings könnte die N400 zumindest in der Studie von Nigam et al. (1992), in welcher die Bilder in einen Satzkontext eingebettet waren, auch die Folge einer impliziten Versprachlichung des Bildmaterials darstellen (vgl. Holcomb & McPherson, 1994).

dien gezeigt werden, dass diese Komponente nicht nur im Zusammenhang mit der Verarbeitung semantischer Anomalien auftritt, sondern vielmehr die Verarbeitung von Wörtern oder wortähnlichen Stimuli auf einer allgemeineren Ebene reflektiert (vgl. Kutas & Federmeier, 2000). So demonstrierten Kutas und Kollegen (Kutas & Hillyard, 1984; Kutas, Lindamoon & Hillyard, 1984), dass auch semantisch kongruente Wörter in satzfinaler Position, welche aber eine niedrige *cloze probability*[7] aufwiesen, eine N400 elizitieren konnten. Die Amplitude der N400 erwies sich dabei als inverse Funktion der *cloze probability* in dem Sinne, dass sie mit abnehmender Erwartungswahrscheinlichkeit auf das satzfinale Wort zunahm. Für semantisch regelrecht inkorrekte Sätze waren die größten N400-Amplituden zu beobachten.

Eine größere N400-Amplitude bei einer niedrigeren *cloze probability* konnten Gunter, Friederici und Schriefers (2000) auch für Wörter mit einer satzmedialen Position berichten. Van Petten und Kutas (1990), welche die Zusammenhänge zwischen der N400 auf ein Wort und der Satzposition des betreffenden Wortes systematisch untersuchten, beobachteten allerdings, dass die Amplitude der Komponente für die einzelnen Wörter im Verlauf des Satzes abnahm. Die Autoren führten diesen Effekt auf die durch den Aufbau eines Satzkontextes herbeigeführten zunehmenden semantischen Restriktionen zurück.

Die N400 ist aber nicht nur auf Satzebene für kontextuelle Restriktionen sensibel. Vielmehr bildet sie auch die semantische Passung von Wörtern auf der globaleren Diskursebene ab. Beispielsweise konnten Van Berkum, Hagoort und Brown (1999) eine N400 für Wörter nachweisen, welche zwar in den lokalen Satzkontext passten, jedoch im Zusammenhang mit Informationen aus vorangegangenen Sätzen semantisch inkongruent waren.

N400-Modulationen durch semantisch-assoziative Verbindungen. Dass die Amplitude der N400 nicht nur in Abhängigkeit von der Erwartung auf ein bestimmtes Wort variiert, sondern dass dieser Effekt auch durch semantisch-assoziative Verbindungen beeinflussbar ist, wurde von Kutas und Kollegen (Kutas & Hillyard, 1984; Kutas et al., 1984) berichtetet. Die Autoren konnten feststellen, dass die N400 auf Wörter, welche zwar eine geringe *cloze probability* aufwiesen, aber mit den an der betreffenden Satzposition erwarteten Wörtern semantisch relatiert waren, eine geringere Amplitude aufwies als die N400 auf semantisch unrelatierte Wörter. Damit reflektierte die Amplitude der N400 nicht nur die semantische Passung eines Wortes in einen vorhandenen Kontext, sondern auch den

[7]Die *cloze probability* gilt als Maß dafür, wie hoch die Erwartung auf ein bestimmtes Wort ist. Sie wird im Rahmen einer sogenannten *cloze procedure* erhoben, bei der Satzfragmente von Probanden spontan vervollständigt werden sollen (vgl. Bloom & Fischler, 1980; Taylor, 1953).

Grad an Kongruenz zwischen Zielwort und Kontext, selbst wenn das Zielwort semantisch und pragmatisch unpassend war.

Ähnliches konnten auch Fischler, Bloom, Childers, Roucos und Perry (1983) zeigen, welche Sätze präsentierten, in denen aufgrund kategorieller Relationen entweder wie in (3) die jeweiligen Nomen semantisch stark miteinander assoziiert waren oder wie in (4) keine semantischen Assoziationen zwischen den Nomen bestanden. Die Nomen waren dabei jeweils in eine wahre und in eine unwahre Aussage eingebettet („*is*“ versus „*is not*“).

(3) A robin is / *is not a BIRD.

(4) A robin *is / is not a TREE.

Wie Fischler et al. (1983) berichteten, war für diejenigen Wörter, denen ein semantisch relatiertes Wort vorausging, eine reduzierte N400-Amplitude zu verzeichnen. Dies war interessanterweise sowohl für korrekte als auch für inkorrekte Aussagen der Fall. Damit erwies sich die Amplitude der N400-Komponente als sensibel für assoziative Relationen innerhalb von Sätzen, und zwar unabhängig vom Wahrheitsgehalt dieser Sätze.

Der Einfluss von semantisch-assoziativen Verbindungen auf die Amplitude der N400 zeigte sich jedoch nicht nur innerhalb von Sätzen sondern auch für paarweise dargebotene Wörter ohne Satzkontext (Bentin, McCarthy & Wood, 1985; Brown & Hagoort, 1993; Holcomb & Neville, 1990; Münte, Heinze & Mangun, 1993; Rugg, 1985, 1987).

N400-Modulationen durch Wortfrequenz und Wortwiederholung. Dass die Amplitude der N400 auch in Abhängigkeit von der Wortfrequenz[8] variiert, wurde in einer Reihe von Studien demonstriert. Die verschiedenen Autoren berichteten dabei übereinstimmend, dass die N400 auf niedrigfrequente Wörter im Vergleich zu hochfrequenten Wörtern eine größere Amplitude aufwies, was sowohl für Einzelwortdarbietung als auch für Satzkontexte galt (z. B. Besson, Kutas & Van Petten, 1992b; Smith & Halgren, 1987; Rugg, 1990).

Eine Interaktion der Wortfrequenz mit der Position des entsprechenden Wortes im Satz konnten Van Petten und Kutas (1990) feststellen. Die Autoren, welche ebenfalls für niedrigfrequente Wörter eine größere N400-Amplitude als für hochfrequente Wörter beobachteten, wiesen nach, dass dieser Effekt nur für frühzeitig im Satz erscheinende Wörter vorhanden war. Frequenzeffekte scheinen demzufolge nur dann relevant zu sein, wenn wenig semantischer Kontext zur Verfügung steht. Sie werden hingegen irrelevant

[8] Als Wortfrequenz gilt hierbei die Vorkommenshäufigkeit von Wörtern im Alltagsgebrauch einer Sprache.

für Wörter an späteren Satzpositionen, d. h. wenn kontextuelle Restriktionen stärker ausgeprägt sind.

Neben der Vorkommenshäufigkeit des kritischen Reizes hatte aber auch seine Wiederholungsrate innerhalb des Experimentes einen Einfluss auf die Amplitude der N400-Komponente. Dies konnten sowohl Smith und Halgren (1987) als auch Rugg (1990) feststellen. Die Autoren berichteten übereinstimmend, dass die größere N400-Amplitude für niedrigfrequente Wörter bei wiederholter Darbietung der Stimuli abnahm oder nicht mehr vorhanden war. Die Modulation der N400 durch Wiederholungseffekte innerhalb von Sätzen wurde von Besson und Kollegen (Besson et al., 1992b; Besson & Kutas, 1993) untersucht. Bei wiederholter Präsentation von semantischen Anomalien in identischen Satzkontexten konnten sie eine Reduzierung der N400-Amplitude beobachten (Besson et al., 1992b). Dies war jedoch nicht der Fall, wenn das entsprechende semantisch inkongruente Wort in variierenden Satzkontexten dargeboten wurde (Besson & Kutas, 1993).

Modulationen der N400-Amplitude durch die wiederholte Darbietung von Wörtern innerhalb kurzer Texte wurden von Van Petten, Kutas, Kluender, Mitchiner und McIsaac (1991) berichtet, die damit nachweisen konnten, dass die N400 auch auf Diskursebene für Wortwiederholungen sensibel ist.

N400 in der akustischen und der visuellen Modalität. Während die N400 in der visuellen Modalität in der Regel klar rechts-lateral stärker ausgeprägt war (Kutas, Van Petten & Besson, 1988), konnte verschiedentlich festgestellt werden, dass die akustisch evozierte N400 eine symmetrischere oder sogar links-lateral stärkere Verteilung aufwies (Hagoort & Brown, 2000b; Holcomb & Neville, 1990). Einige Autoren berichteten auch veränderte temporale Eigenschaften für die in der akustischen Modalität evozierte N400-Komponente (Friederici et al., 1993; Holcomb & Neville, 1990, 1991).

So beobachteten Holcomb und Neville (1990), welche die N400-Komponenten auf semantisch relatierte und unrelatierte Wortpaare in den beiden Modalitäten direkt miteinander verglichen, neben der leicht links-lateralisierten Verteilung der Komponente auch veränderte temporale Eigenschaften der akustisch evozierten N400 im Sinne eines früheren Beginns, d. h. einer kürzeren *Onsetlatenz* der Negativierung sowie eines längeren Anhaltens des Effektes. In der akustischen Modalität konnten die Autoren zudem eine größere Amplitude der N400 feststellen.

Connolly und Kollegen nahmen erstmals für die im Rahmen von Satzkontexten evozierte N400 einen direkten Vergleich von akustischer und visueller Modalität vor (Connolly & Phillips, 1994, visuell; Connolly, Phillips & Forbes, 1995, akustisch). Die Au-

toren stellten im Gegensatz zu Holcomb und Neville (1990) längere Latenzzeiten für die N400 in der akustischen Modalität fest, welche allerdings die *Peaklatenz* betrafen. Sie merkten dazu an, dass Holcomb und Neville (1990) zwar eine kürzere *Onsetlatenz* für die akustisch evozierte N400 festgestellt hätten, dass sich bei visueller Inspektion ihrer Daten aber gleichwohl ebenfalls eine längere *Peaklatenz* zeigte. In Übereinstimmung mit Holcomb und Neville (1990) berichteten Connolly und Mitarbeiter zudem geringere Amplituden der N400 in der visuellen Modalität (Connolly & Phillips, 1994; Connolly et al., 1995).

Altersabhängige N400-Modulationen. Da es sich bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit getesteten CI-Trägern und Kontrollprobanden um Probanden handelte, welche älter waren als die in den meisten EKP-Studien üblichen studentischen Teilnehmer, soll im Folgenden auch auf die Befunde einiger Studien eingegangen werden, die sich mit altersabhängigen Modulationen der N400 beschäftigten.

Der Einfluss von Alterseffekten auf die Eigenschaften der N400 wurde erstmalig von Harbin, Marsh und Harvey (1984) in einer visuellen semantischen Kategorisierungsaufgabe nachgewiesen. Die Autoren berichteten, dass bei den älteren Versuchsteilnehmern (Durchschnittsalter: 71 Jahre) für die in der semantisch inkongruenten Bedingung auftretende N400 längere Latenzen zu verzeichnen waren als bei den jüngeren Teilnehmern (Durchschnittsalter: 21 Jahre).

Woodward, Ford und Hammett (1993) untersuchten in einer Gruppe von jüngeren Probanden (Durchschnittsalter: 22 Jahre) und in einer Gruppe von älteren Probanden (Durchschnittsalter: 70 Jahre) die Verarbeitung satzfinaler semantischer Anomalien in der akustischen Modalität. Die Autoren konnten für beide Gruppen eine N400 beobachten, wobei die N400 bei den älteren Teilnehmern neben der bereits von Harbin et al. (1984) berichteten zeitlichen Verzögerung auch eine geringere Amplitude aufwies. Im Gegensatz zu den jüngeren Probanden, bei denen eine Reduzierung der N400-Amplitude in Folge einer wiederholten Darbietung der semantischen Anomalien zu beobachten war, zeigte sich für die älteren Versuchsteilnehmer kein solcher Wiederholungseffekt.

Für die Verarbeitung semantisch inkongruenter Sätze in der visuellen Modalität berichteten Gunter, Jackson und Mulder (1992, 1995, 1996) ebenfalls eine geringere Ausprägung sowie eine zeitliche Verzögerung der N400-Komponente bei älteren Probanden (Durchschnittsalter: 55 bzw. 58 Jahre) im Vergleich zu jüngeren Versuchsteilnehmern (Durchschnittsalter: 21 Jahre). Die Autoren konnten ausschließen, dass dieser Effekt auf eine verzögerte Signalaufnahme bei den älteren Versuchsteilnehmern zurückging,

da sich die Latenz des mit diesen Prozessen in Verbindung stehenden N1-P2-Komplexes für Jüngere und Ältere nicht voneinander unterschied (Gunter et al., 1992). Insgesamt argumentierten Gunter und Kollegen, die auch die Zusammenhänge zwischen Satzverarbeitung und Arbeitsgedächtnis bei den älteren Probanden untersuchten, dass Unterschiede in der Satzverarbeitung nicht unbedingt mit dem Alter an sich zu erklären sind, sondern vielmehr im Zusammenhang mit veränderten Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses stehen (Gunter et al., 1995).

Kutas und Iragui (1998) untersuchten systematisch, wie sich die Eigenschaften der N400 im Verlauf von sechs Lebensjahrzehnten verändern. Die N400 wurde dabei durch inkongruente Aussagen über kategorielle Zugehörigkeiten und antonymische Relationen evoziert. Die Autoren konnten keine altersabhängigen Veränderungen hinsichtlich der Verteilung der N400 feststellen. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Studien (z. B. auch Miyamoto, Katayama & Koyama, 1998) fanden sie aber eine Verringerung der N400-Amplitude ebenso wie eine verlängerte Onsetlatenz und eine verlängerte Peaklatenz bei zunehmendem Alter. Diese Befunde wurden von Kutas und Iragui (1998) dahingehend interpretiert, dass sich die Prozesse der semantischen Integration im Alter zwar hinsichtlich quantitativer Merkmale, nicht jedoch in qualitativer Weise verändern.

Interpretation der N400-Komponente. Insgesamt belegen die Befunde zur N400 eindeutig, dass diese Komponente mit der Verarbeitung von semantisch-lexikalischer Information beim Sprachverstehen relatiert ist. Die Spezifizierung der der N400 zugrunde liegenden semantischen Prozesse der Wortverarbeitung wird jedoch kontrovers diskutiert.

Üblicherweise wird in der psycholinguistischen Literatur ein dreistufiges Modell der auditiven Wortverarbeitung angenommen (z. B. Frauenfelder & Tyler, 1987; Marslen-Wilson, 1987; Zwitserlood, 1989). Während des *lexikalen Zugriffs* wird zunächst auf der Basis des physikalischen Signals eine mentale Repräsentation des Wortes erstellt, welche mit den entsprechenden Einträgen im mentalen Lexikon abgeglichen wird. Hieraus resultiert die Aktivierung einer Reihe von Einträgen im mentalen Lexikon. Durch die nachfolgende *Selektion* wird aus der aktivierten Gruppe von Einträgen der passendste Kandidat ausgewählt. Durch den post-lexikalischen Prozess der *Integration* wird das ausgewählte Wort anschließend in die vorhandene kontextuelle Repräsentation auf Satz- oder Diskursebene eingebettet. Die letzten beiden Stufen sind nicht scharf voneinander abgrenzbar. Während die Prozesse des lexikalen Zugriffs als automatisch gelten, werden für die lexikalische Integration eher kontrollierte Prozesse angenommen. Insofern ist für die Entscheidung, ob die N400 eher auf die Prozesse des lexikalen Zugriffs zurückgeht oder ob

sie vielmehr post-lexikalische Integrationsprozesse reflektiert, die Frage nach der Automatizität bzw. Kontrolliertheit der der N400 zugrunde liegenden Prozesse von zentraler Bedeutung (vgl. Brown & Hagoort, 1993; Chwilla, Brown & Hagoort, 1995; Friederici et al., 1999a).

Dieser Frage wurde in einer Reihe von semantischen *Priming-Experimenten*[9] nachgegangen, wobei die Ergebnisse anfänglich eher für eine Interpretation der N400 als Korrelat des automatischen lexikalen Zugriffs sprachen (vgl. Kutas & Van Petten, 1988). Beispielsweise berichtete Holcomb (1988) ein Priming-Experiment, in welchem über die Manipulation der Instruktion sowie des Anteils an relatierten Wortpaaren im Experiment eine unbewusste und damit automatische bzw. eine bewusste und damit kontrollierte Verarbeitung der semantischen Relationen herbeigeführt werden sollte. Er konnte nachweisen, dass eine N400-Komponente auch unter automatischen Verarbeitungsbedingungen auftrat. Kutas und Hillyard (1989) konnten für eine Buchstaben-Monitoringaufgabe, in welcher die bewusste Verarbeitung semantischer Information nicht unbedingt notwendig ist, eine N400 beobachten, welche in Amplitude, Latenz und Verteilung vergleichbar mit der aus früheren Studien bekannten N400 war. Auch Besson, Fischler, Boaz und Raney (1992a) fanden eine N400 in einer phonematischen Entscheidungsaufgabe, d. h. unter oberflächlichen, keine semantische Analyse erfordernden Verarbeitungsbedingungen. Die Autoren schlussfolgerten daraus, dass die N400 eher automatische Verarbeitungsprozesse reflektiert. Allerdings merken Brown und Hagoort (1993) an, dass eine bewusste Verarbeitung der semantischen Relationen in diesen Studien nicht völlig ausgeschlossen werden konnte.

Spätere Studien kamen hinsichtlich der Automatizität der N400 zu anderen Ergebnissen. So berichteten Brown und Hagoort (1993), dass bei maskierter Darbietung[10] der jeweiligen Prime-Wörter keine N400 ausgelöst werden konnte. Die Autoren interpretierten die Beobachtung dahingehend, dass die N400 nur bei bewusster Stimulusperzeption zu evozieren ist und somit einen kontrollierten Prozess reflektiert. Die Abhängigkeit der N400 von der Verarbeitungstiefe demonstrierten Chwilla et al. (1995), welche eine N400 zwar für eine lexikalische Entscheidungsaufgabe beobachteten, jedoch für eine Entscheidungsaufgabe hinsichtlich physikalischer Eigenschaften der präsentierten Wörter

[9] Der Begriff des *semantischen Primings* bezieht sich dabei auf die Tatsache, dass in der Regel eine erleichterte Worterkennung zu beobachten ist, wenn einem Zielwort ein semantisch relatiertes sogenanntes *Prime*-Wort vorausgeht. Entsprechende Primingeffekte können sich in verkürzten Reaktionszeiten oder einer verringerten N400-Amplitude zeigen.

[10] Für ein maskiertes Priming wird das Prime-Wort so kurz dargeboten, dass es nicht bewusst wahrgenommen werden kann, weshalb beispielsweise auch keine Benennung durch die Versuchspersonen möglich ist.

(Schriftgröße) das Fehlen einer N400 feststellen mussten. Auch Bentin, Kutas und Hillyard (1995) berichteten, dass sie nur dann einen N400-Effekt feststellen konnten, wenn die Aufgabenstellung eine semantische Verarbeitung der Prime-Wörter induzierte.

Aufgrund dieser Befunde, die auf das Vorliegen kontrollierter, von der bewussten semantischen Reizverarbeitung abhängiger Prozesse hinweisen, geht man gegenwärtig eher davon aus, dass der N400 weniger die Prozesse des lexikalen Zugriffs als vielmehr post-lexikalische semantische Integrationprozesse zugrunde liegen (Brown & Hagoort, 1993; Chwilla et al., 1995). Für die Annahme, dass die N400 das Korrelat post-lexikalischer Integrationsprozesse darstellt, spricht auch die starke Kontextabhängigkeit der Komponente. So zeigten die Befunde einer Reihe von Studien (siehe oben), dass die N400 für Restriktionen auf verschiedenen kontextuellen Ebenen sensibel ist (vgl. Kutas & Federmeier, 2000).

Obgleich also die der N400 zugrunde liegenden Prozesse noch nicht endgültig spezifiziert sind, kann zusammenfassend doch festgehalten werden, dass diese Komponente mit den Prozessen der semantischen Informationsverarbeitung beim Sprachverstehen relatiert ist. Die N400 scheint dabei die Probleme zu reflektieren, die beim Herleiten einer kohärenten Satzinterpretation entstehen, wenn die semantische Integration von Wörtern in den Satzkontext erschwert ist.

3.3.2 EKP-Korrelate syntaktischer Verarbeitung

Bei der Untersuchung der syntaktischen Aspekte des Satzverstehens ergab sich im Gegensatz zu den semantisch-lexikalischen Verarbeitungsprozessen ein wesentlich heterogeneres Bild, was jedoch nicht verwunderlich ist angesichts der Komplexität syntaktischer Phänomene, die auf die unterschiedlichste Weise kodiert sein können. Die bislang vorliegenden Studien haben gezeigt, dass es nicht nur *ein* Korrelat syntaktischer Verarbeitung gibt, sondern dass die Verarbeitung der verschiedenen syntaktischen Informationstypen sich vielmehr in unterschiedlichen EKP-Komponenten widerspiegelt. Als typisch für die Verarbeitung syntaktischer Satzaspekte gelten dabei einerseits links-anteriore Negativierungen, zu denen die *ELAN-Komponente* (*Early Left Anterior Negativity*) und die *LAN-Komponente* (*Left Anterior Negativity*) zählen, sowie andererseits eine späte Positivierung, die sogenannte *P600-Komponente* oder auch *SPS* (*Syntactic Positive Shift*) (vgl. Friederici, 2002). Während sich ursprünglich gezeigt hatte, dass die im vorigen Abschnitt beschriebene, für semantische Verarbeitungsprozesse typische N400-Komponente

für syntaktische Manipulationen nicht sensibel ist (Kutas & Hillyard, 1983), wurde diese Ansicht in neueren Studien relativiert (siehe Abschnitt 3.3.2.2).

Im Folgenden sollen die im Kontext dieser Arbeit relevanten syntaktischen Informationstypen zunächst getrennt behandelt werden, bevor abschließend ein zusammenfassender Überblick über die mit syntaktischer Verarbeitung relatierten EKP-Komponenten gegeben wird.

3.3.2.1 Verarbeitung der Phrasenstruktur

Phrasenstrukturverletzungen. Eine der ersten Studien, welche sich der Verarbeitung von Verletzungen der Phrasenstruktur widmete, wurde von Neville und Kollegen (1991) berichtet. Die Autoren präsentierten visuell Sätze, die wie in (5) eine inkorrekte Satzstruktur aufwiesen, mit einer sehr schnellen Wort-für-Wort-Präsentation.

(5) *The man admired Don's OF sketch the landscape.

Die inkorrekte Phrasenstruktur wurde dabei durch eine Wortvertauschung realisiert, wodurch auf ein possessiv gekennzeichnetes Nomen (*„Don's“*) eine Präposition und damit eine an dieser Stelle unzulässige Wortkategorie folgte. Die Autoren beobachteten für die inkorrekte Satzstruktur im Vergleich zu korrekten Sätzen eine frühe links-anteriore Negativierung, die von ihnen als *N125* bezeichnet wurde. Sie fanden des Weiteren zwischen 300 und 500 ms eine Negativierung im parietalen und temporalen Bereich der linken Hemisphäre sowie daran anschließend eine bilateral ausgeprägte okzipitale Positivierung.

Osterhout und Holcomb (1992, 1993) präsentierten ihren Probanden ebenfalls Sätze mit einer fehlerhaften Phrasenstruktur. In diesen Sätzen wurden wie in Beispiel (6) intransitive Verben verwendet, welche nicht passivierbar sind und somit keine Lesart mit reduziertem Relativsatz zulassen. Deshalb darf der Satz den englischen Phrasenstrukturregeln zufolge nicht wie in Beispiel (6) mit dem Auxiliar *„was“* fortgeführt werden, er weist also an dieser Stelle eine inkorrekte Phrasenstruktur auf.

(6) *The broker hoped to sell the stock WAS sent to jail.

Die Autoren beobachteten für die inkorrekte Satzstruktur sowohl in der visuellen (Osterhout & Holcomb, 1992) als auch in der akustischen Modalität (Osterhout & Holcomb, 1993) eine links-anteriore Negativierung zwischen 300 und 500 ms gefolgt von einer posterioren Positivierung, die sie als *P600-Komponente* bezeichneten.

Eine auditive Satzpräsentation wählten auch Friederici et al. (1993), die in ihrem Experiment Sätze mit einem Wortkategoriefehler wie in (7) verwendeten.

(7) *Der Mann wurde im BESUCHT.

In diesen Sätzen müsste die Präposition korrekterweise eine Präpositionalphrase einleiten und damit von einer Nominalphrase ergänzt werden. Mit dem stattdessen auf die Präposition folgenden Partizip wurde also eine an dieser Stelle unzulässige Wortkategorie realisiert. Friederici et al. (1993) stellten für das inkorrekte Partizip eine links-anteriore Negativierung mit einer Gipfellatenz von etwa 180 ms gefolgt von einer bilateral verteilten anterioren Negativierung zwischen 300 und 800 ms fest. Im Gegensatz zu den Studien von Osterhout und Holcomb (1992, 1993) und Neville et al. (1991) konnten sie allerdings keine parietale Positivierung beobachten.

Friederici, Hahne und Mecklinger (1996) berichteten ein Experiment, in welchem Sätze mit einer Phrasenstrukturverletzung mitten im Satz wie in (9) mit korrekten Sätzen wie in (8) verglichen wurden. Die Darbietung der Sätze erfolgte sowohl visuell als auch auditiv.

(8) Das Metall wurde zur VEREDELUNG geschmolzen von dem Goldschmied den man auszeichnete.

(9) *Das Metall wurde zur VEREDELT von dem Goldschmied den man auszeichnete.

Sowohl in der akustischen als auch in der visuellen Modalität ging die Verarbeitung der Phrasenstrukturverletzung im ereigniskorrelierten Potentiale mit einer frühen links-anterioren Negativierung sowie einer nachfolgenden P600-Komponente einher. Der frühe Negativierungseffekt wurde bei akustischer Satzpräsentation zwischen 400 und 600 ms beobachtet, in der visuellen Modalität jedoch bereits zwischen 350 und 500 ms. Hierzu merkt Hahne (1998) an, dass die Wortkategorie des kritischen Wortes erst auf dem jeweiligen Suffix erkennbar wurde und dass diese Information in der akustischen Modalität später verfügbar ist. Bei einem Vergleich der Latenzen der anterioren Negativierung in den beiden Modalitäten unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Erkennenszeitpunkt des kritischen Wortes in den akustisch präsentierten Sätzen gegenüber den visuell präsentierten Sätzen relativ spät lag, wäre jedoch ein früheres Auftreten der Komponente in der akustischen Modalität festzustellen (vgl. Hahne, 1998).

Die bisherigen Studien zusammenfassend ist festzuhalten, dass die meisten Autoren für die Verarbeitung von inkorrekten Phrasenstrukturen ein Datenmuster aus links-anteriorer Negativierung und nachfolgender Positivierung berichteten (z. B. auch Gunter et al., 1999a; Hahne, 2001; Hahne & Friederici, 1999, 2002). Die Latenz der links-anterioren Negativierung variierte zwischen den Studien, tendenziell scheint die Kompo-

nente aber in der akustischen Modalität früher aufzutreten (ELAN) als in der visuellen Modalität (LAN). Gunter et al. (1999a) beobachteten für die visuelle Modalität des Weiteren eine Abhängigkeit der Latenz der frühen Negativierung von den visuellen Input-Bedingungen. Bei einer geringen Bildschirmauflösung ebenso wie bei einer sehr langsamen Wort-für-Wort-Präsentation konnten sie eine längere Latenz der links-anterioren Negativierung feststellen.

In verschiedenen Studien gelang es, durch weitergehende experimentelle Manipulationen die Prozesse bei der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation zu spezifizieren. So berichteten Hahne und Jescheniak (2001), dass sich ein Datenmuster aus ELAN und P600 für Phrasenstrukturverletzungen auch dann nachweisen ließ, wenn die dargebotenen Sätze wie in Beispiel (10) aus nicht-existierenden Pseudowörtern bestanden. In solchen sogenannten *Jabberwocky-Sätzen* werden alle Inhaltswörter durch Pseudowörter ersetzt, wobei morphologische Markierungen und damit die Satzstruktur aber vollständig erhalten bleiben.

(10) *Das Fiehm wurde im GEROTTERT.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die durch die ELAN und die P600 reflektierte syntaktische Verarbeitung unabhängig davon stattfindet, ob semantisch-lexikalische Informationen verfügbar sind.

Die Automatizität bzw. Kontrolliertheit der bei der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation stattfindenden Prozesse überprüften Hahne und Friederici (1999) in einem Experiment, in welchem sie die Vorkommenshäufigkeit der phrasenstrukturell inkorrekten Sätze variierten. Dem lag die Annahme zugrunde, dass die Vorkommenshäufigkeit das strategische Verhalten der Versuchspersonen beeinflussen würde. Somit wäre nur ein automatisch und unbewusst ablaufender Prozess stabil gegenüber dem Faktor Vorkommenshäufigkeit, wohingegen ein bewusster und kontrollierter Prozess sich beeinflussbar zeigen müsste. Hahne und Friederici (1999) berichteten für dieses Experiment, dass zwar sowohl bei einem hohen als auch bei einem niedrigen Anteil fehlerhafter Sätze eine ELAN-Komponente evoziert werden konnte, dass bei einem hohen Anteil inkorrekter Sätze jedoch keine P600-Komponente zu beobachten war. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die ELAN automatische Prozesse reflektiert, während die P600 auf strategisch beeinflussbare und damit kontrollierte syntaktische Verarbeitungsprozesse zurückgeht.

Friederici et al. (1999a) präsentierten ihren Probanden Sätze, welche wie in (11) sowohl eine Verletzung hinsichtlich semantischer Selektionsbeschränkungen als auch eine inkorrekte Phrasenstruktur aufwiesen.

(11) *Der Priester wurde vom GEBAUT.

Für diese kombinierten semantischen und syntaktischen Verletzungen berichteten die Autoren eine frühe anteriore Negativierung (ELAN) sowie eine P600-Komponente. Sie konnten jedoch keine auf semantische Verarbeitungsprozesse hindeutende N400 feststellen. Friederici et al. (1999a) interpretierten das Ausbleiben einer N400 in solchen semantisch und syntaktisch inkongruenten Sätzen dahingehend, dass die sich in der ELAN reflektierenden Prozesse der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation auch die Prozesse der semantisch-lexikalischen Integration beeinflussen können.

In einer Studie von Hahne und Friederici (2002) wurden ähnliche Sätze wie bei Friederici et al. (1999a) verwendet. Die Autoren konnten zunächst die Ergebnisse von Friederici et al. (1999a) hinsichtlich der Verarbeitung von kombinierten semantischen und syntaktischen Inkongruenzen replizieren. Zusätzlich beobachteten sie, dass bei einer Instruktion an die Probanden, die Sätze lediglich hinsichtlich ihrer semantischen Kohärenz zu beurteilen und dabei syntaktische Aspekte außer Acht zu lassen, neben einer frühen Negativierung auch eine N400 zu beobachten war. Sie konnten bei einer solchen Aufgabenstellung allerdings keine P600 nachweisen. Die Tatsache, dass die ELAN-Komponente sich auch durch eine Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf semantische Aspekte des Satzes nicht beeinflussen ließ, bestätigte die Annahme, dass sie einen automatischen Prozess reflektiert. Wiederum zeigte sich, dass die P600-Komponente dagegen auf kontrollierte Verarbeitungsprozesse zurückgeht.

Nicht-präferierte Phrasenstrukturen. Mit der Frage, ob sich die Verarbeitung von nicht-präferierten Phrasenstrukturen die gleichen EKP-Komponenten beobachten lassen wie für Verletzungen der Phrasenstruktur, haben sich verschiedene Studien beschäftigt. In entsprechenden Experimenten werden häufig sogenannte *Garden-Path-Sätze* verwendet. Diese Art von Sätzen lässt bis zu einem bestimmten Punkt theoretisch mehrere syntaktische Strukturen zu, wobei aber meistens eine von ihnen höherfrequent ist oder eine geringere Komplexität aufweist und deshalb präferiert wird. Erfolgt dann eine strukturelle Disambiguierung zu Gunsten der nicht-präferierten Satzstruktur, wird eine Revision der bis dahin aufgebauten syntaktischen Struktur des Satzes notwendig.

Solche Prozesse der Revision oder Reanalyse untersuchten beispielsweise Osterhout und Holcomb (1992, 1993), welche neben den bereits besprochenen Phrasenstrukturverletzungen auch Garden-Path-Sätze wie in (12) präsentierten.

(12) The broker persuaded TO sell the stock was sent to jail.

In diesen Sätzen wird das auf die erste Nominalphrase folgende Verb *„persuaded“* zunächst aufgrund von strukturellen Präferenzen als Verb des Hauptsatzes interpretiert. Dieses transitive Verb erlaubt jedoch auch eine komplexere Passivlesart nach welcher es als Teil eines eingeschobenen reduzierten Relativsatzes zu interpretieren wäre. Auf dem Wort *„to“* erfolgt letztlich die Disambiguierung der Satzstruktur zu Gunsten der komplexeren und deshalb bisher nicht-präferierten Lesart eines eingeschobenen Relativsatzes. Auf diesem disambiguierenden Element fanden Osterhout und Holcomb (1992, 1993) eine späte parietale Positivierung um 600 ms (P600-Komponente).

Mecklinger, Schriefers, Steinhauer und Friederici (1995) präsentierten Sätze mit einer ambigen Satzstruktur, welche erst auf dem satzfinalen Verb aufgelöst wurde, wie die Beispiele (13) und (14) zeigen.

(13) Das ist die Managerin, die die Arbeiterinnen gesehen HAT.

(14) Das ist die Managerin, die die Arbeiterinnen gesehen HABEN.

In solchen Sätzen wird eine präferierte Lesart als Subjektrelativsatz wie in (13) vorhergesagt, die aber in Sätzen wie (14) auf dem satzfinalen Auxiliar zu Gunsten eines Objektrelativsatzes revidiert werden muss. Die Autoren beobachteten auf dem disambiguierenden Element ebenso wie Osterhout und Holcomb (1992, 1993) eine parietale Positivierung, die ihren Peak allerdings schon relativ zeitig bei etwa 345 ms erreichte, weshalb sie als *P345* bezeichnet wurde. Die im Vergleich zu anderen Studien frühere Latenz der Positivierung erklärten Mecklinger et al. (1995) damit, dass für die von ihnen verwendeten Sätze keine Reanalyse im Sinne einer generellen Veränderung der Phrasenstruktur erforderlich war, sondern lediglich eine veränderte Zuweisung der Nominalphrasen zu ihren strukturellen Positionen.

Eine P600 für eine Verletzung der präferierten Phrasenstruktur berichteten auch Hagoort, Brown und Groothusen (1993) für das Niederländische. Diese Autoren präsentierten Sätze mit einer fehlerhaften Phrasenstruktur in Folge einer inkorrekten Abfolge von Adjektiv und Adverb innerhalb einer Nominalphrase wie in Beispiel (15).

(15) *De echtgenoot schrikt van de EMOTIONELE NOGAL REACTIE van zijn vrouw.
(Der Ehemann ist über die emotionale ziemlich Reaktion seiner Frau erschrocken.)

Obwohl die Autoren damit zwar Sätze mit einer inkorrekten Phrasenstruktur präsentierten, wurden mit der von ihnen vorgenommenen Mittelung, die auf dem Adverb begann, eher die Prozesse der Verarbeitung einer unerwarteten Phrasenstruktur erfasst, da zu diesem Zeitpunkt noch eine legale aber ungewöhnliche Satzstruktur möglich gewesen wäre. Dies führten Hagoort et al. (1993) auch selbst als Erklärung dafür an, dass sie in

ihrer Studie nur eine P600 (von den Autoren als *SPS* bezeichnet) und keine links-anteriore Negativierung feststellen konnten (vgl. auch Hagoort & Brown, 2000a).

Eine P600 im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Verletzungen einer präferierten Phrasenstruktur wurde ebenso wie in den hier exemplarisch beschriebenen Studien auch von weiteren Autoren berichtet (z. B. Friederici et al., 1996; Friederici, Steinhauer, Mecklinger & Meyer, 1998b; Friederici, Mecklinger, Spencer, Steinhauer & Donchin, 2001; Osterhout, Holcomb & Swinney, 1994).

Zusammenfassend wurden für Phrasenstrukturverletzungen in den meisten Studien eine frühe links-anteriore Negativierung (ELAN) sowie eine spätere parietale Positivierung (P600) beobachtet. Hingegen wurde für nicht-präferierte Phrasenstrukturen in der Regel lediglich eine P600 festgestellt. Es fand sich des Weiteren Evidenz dafür, dass die ELAN auf automatische Verarbeitungsprozesse zurückgeht, während die P600 Prozesse reflektiert, die der bewussten strategischen Kontrolle unterliegen (für eine weitergehende Interpretation vgl. Abschnitt 3.3.2.4).

3.3.2.2 Verarbeitung der Verbargumentstruktur

Ein Reihe von Studien hat sich mittlerweile auch mit der Verarbeitung von Subkategorisierungsinformation von Verben beschäftigt. Die Subkategorisierungseigenschaften eines Verbs bestimmen, welche Argumentstruktur das Verb erfordert bzw. zulässt. Durch sie ist also beispielsweise die Anzahl und die Art der vom Verb lizenzierten Argumente festgelegt. Es wird angenommen, dass die entsprechenden Informationen über die Verbargumentstruktur im lexikalen Eintrag des Verbs gespeichert sind (vgl. Chomsky, 1965, 1981). Die Prozesse der Verarbeitung von Subkategorisierungsaspekten können als Prozesse betrachtet werden, die an der Schnittstelle von semantischer und syntaktischer Verarbeitung angesiedelt sind, da die Argumentstruktur eines Verbs sowohl durch syntaktische Aspekte, wie beispielsweise die Anzahl der Argumentpositionen, als auch durch semantische Aspekte, wie beispielsweise die Belebtheit der Argumente, determiniert ist. Im Folgenden sollen zwar hauptsächlich Studien zur Verarbeitung von Stelligkeitsinformationen[11] berichtet werden, da eine solche experimentelle Manipulation auch in einem der Experimente zur Anwendung kam, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, es wird jedoch auch auf Studien zur Kasusverarbeitung eingegangen werden[12].

[11] Die Stelligkeit eines Verbs gibt die Anzahl der Argumente an, die dieses Verb lizenziert.

[12] Es ist anzumerken, dass die der Kasusinformation zugrunde liegenden Verarbeitungsprozesse auch unter dem Gesichtspunkt der morphosyntaktischen Verarbeitung betrachtet werden können, da Kasusinformation

Rösler et al. (1993) berichteten ein Experiment, in welchem sie Sätze mit einer Subkategorisierungsverletzung wie in (16) visuell präsentierten.

(16) *Der Lehrer wurde GEFALLEN.

(17) Der Präsident wurde BEGRÜSST.

Die inkorrekte Verbargumentstruktur wurde dadurch realisiert, dass einem satzfinalen intransitiven Verb durch Passivierung eine Nominalphrase als Objekt-Argument zugeordnet wurde, obwohl intransitive Verben korrekterweise nur ein Subjekt-Argument lizenzieren. Im Vergleich zu korrekten Sätzen mit transitiven Verben wie in (17) beobachteten Rösler et al. (1993) auf dem satzfinalen Partizip eine links-anteriore Negativierung zwischen 400 und 700 ms (LAN) sowie eine parietale Positivierung, welche allerdings keine statistische Signifikanz erreichte. Indem sie einen direkten Vergleich mit einer durch eine semantische Verletzung evozierten N400 vornahmen, der eine unterschiedliche topographische Verteilung der beiden Effekte aufzeigte, konnten die Autoren zudem nachweisen, dass die von ihnen beobachtete LAN eine von der N400 verschiedene Komponente darstellte.

Die Verarbeitung von inkorrekten Verbargumentstrukturen wurde auch in der bereits erwähnten Studie von Hagoort et al. (1993) untersucht. Die Autoren kontrastierten in ihrem visuell durchgeführten Experiment inkorrekte Sätze wie in (18) mit korrekten Sätzen wie in (19).

(18) *De zoon van de rijke industrieel pocht de AUTO van zijn vader.
(Der Sohn des reichen Industriellen prahlt das Auto seines Vaters.)

(19) De zoon van de rijke industrieel leent de AUTO van zijn vader.
(Der Sohn des reichen Industriellen leiht das Auto seines Vaters.)

Die in den inkorrekten Sätzen verwendeten intransitiven Verben erlauben korrekterweise kein direktes Objekt, bekamen jedoch ein solches zugewiesen, womit eine Verletzung der Verbargumentstruktur vorlag. Hagoort et al. (1993) konnten in diesem Experiment bis auf eine geringe, statistisch jedoch nicht signifikante Positivierung keinen Effekt auf dem kritischen Wort feststellen. Dies wird von Friederici und Frisch (2000) allerdings auf methodische Mängel im Experimentaldesign zurückgeführt, da beispielsweise strategische Effekte nicht auszuschließen waren.

Mit einer weiteren Studie wollten Hagoort und Brown (2000a) überprüfen, ob sich der Befund, dass die Subkategorisierungsverletzung in der Studie von Hagoort et al. (1993)

häufig auf der morphematischen Ebene kodiert ist. Gleichwohl soll die Verarbeitung von Kasusinformation hier gemeinsam mit den Prozessen der Verarbeitung von Verbargumentstrukturen betrachtet werden.

keinen reliablen EKP-Effekt hervorrief, auch unter veränderten Präsentationsbedingungen nachweisen ließ. Hagoort und Brown (2000a) präsentierten deshalb die gleichen Sätze wie Hagoort et al. (1993), wobei sie allerdings in der visuellen Modalität mit einer schnelleren Präsentationsrate arbeiteten sowie zusätzlich ein Experiment durchführten, in welchem die Sätze akustisch als natürlich gesprochene Sprache dargeboten wurden. Die Autoren berichteten, dass sie in der visuellen Modalität unter den veränderten Input-Bedingungen eine posteriore Positivierung (P600) nachweisen konnten. Deskriptiv wurde des Weiteren eine anteriore Negativierung sichtbar, welche sich allerdings als statistisch nicht reliabel erwies. Bei akustischer Satzpräsentation fanden Hagoort und Brown (2000a) für die Argumentstrukturverletzung sowohl eine reliable links-anteriore Negativierung (LAN) als auch eine nachfolgende P600.

Osterhout et al. (1994) berichteten ein Experiment, in welchem neben argumentstrukturell korrekten (zum Teil ambigen) Sätzen wie in (20) bis (22) auch Sätze enthalten waren, die wie in (23) eine Subkategorisierungsverletzung enthielten. Die Stimulussätze wurden dabei visuell präsentiert.

(20) The doctor hoped the patient WAS lying.
(21) The doctor believed the patient WAS lying.
(22) The doctor charged the patient WAS lying.
(23) *The doctor forced the patient WAS lying.

In den inkorrekten Sätzen wurden obligatorisch transitive Verben verwendet, welche keine Komplementlesart erlauben, weshalb die nachfolgende Nominalphrase als direktes Objekt-Argument interpretiert werden musste. Mit dem wiederum anschließenden Auxiliar wurde eine an dieser Stelle unzulässige Wortkategorie realisiert, die somit auf die Subkategorisierungseigenschaften des Verbs zurückging. Auf dem kritischen Auxiliar der inkorrekten Sätze fanden Osterhout et al. (1994) im Vergleich zu allen drei korrekten Bedingungen eine N400 gefolgt von einer P600.

Auch Friederici und Frisch (2000) untersuchten die Verarbeitung von Verletzungen der Argumentstruktur des Verbs in der visuellen Modalität. Sie verwendeten dazu Aktivsatzkonstruktionen, in denen ein intransitives Verb mit einem nicht-lizenzierten Objekt-Argument verbunden war wie in Beispiel (24).

(24) *Anna weiß, dass der Kommissar den Banker ABREISTE und wegging.

Die Autoren berichteten, dass auf dem inkorrekten Partizip des intransitiven Verbs ebenso wie in der Studie von Osterhout et al. (1994) ein biphasisches Muster aus N400 und nachfolgender P600 festzustellen war.

In den meisten der bisher berichteten Studien wurde für die Verarbeitung von Stelligkeitsinformation von Verben also neben einer P600 eine Negativierung im Zeitbereich der N400-Komponente gefunden, wobei die Negativierung unterschiedliche Verteilungen aufwies und deshalb entweder als LAN oder als N400 interpretiert wurde.

Ähnliche biphasische EKP-Muster konnten auch für die Verarbeitung von Kasusverletzungen beobachtet werden. So präsentierten Friederici und Frisch (2000) in ihrer bereits erwähnten Studie auch Sätze mit Kasusverletzungen wie in Beispiel (25). In diesen Sätzen stimmte die Subkategorisierungsinformation des Verbs nicht mit der Kasusmarkierung der Argumente überein. Die Verarbeitung solcher Kasusverletzungen ging im ereigniskorrelierten Potential mit einer links-anterioren Negativierung (LAN) einher, die von einer P600 gefolgt wurde.

(25) *Anna weiß, dass der Kommissar den Banker BEISTAND und wegging.

Coulson, King und Kutas (1998), die ihren Probanden Sätze wie in (26) präsentierten, fanden für die Kasusverletzungen ebenfalls ein Muster aus links-anteriorer Negativierung (LAN) und nachfolgender Positivierung.

(26) *The plane took WE to paradise and back.

Ein durch die Verarbeitung von Kasusmarkierungen evoziertes biphasisches Muster aus N400 oder LAN und nachfolgender P600 wurde auch von anderen Autoren berichtet (z. B. Frisch, 2000; Münte & Heinze, 1994; Rösler, Pechmann, Streb, Röder & Hennighausen, 1998).

Zusammenfassend haben Verletzungen der Verbargumentstruktur in der Regel ein biphasisches Muster entweder aus LAN und P600 oder aus N400 und P600 ausgelöst. Friederici und Frisch (2000) konnten dabei zeigen, dass die unterschiedlichen Negativierungseffekte auf die Art der untersuchten Subkategorisierungsinformation zurückgingen. Während eine N400 von ihnen in Verbindung mit der Verarbeitung von Information über die Anzahl der lizenzierten Verbargumente beobachtet wurde, war die LAN eher mit der Verarbeitung von Kasusmarkierungen relatiert. Das Auftreten einer normalerweise durch semantische Verletzungen elizitierten N400 für Subkategorisierungsverletzungen wurde von Friederici und Frisch (2000) als Indikator für hier entstehende thematisch-semantische Integrationsprobleme interpretiert. Für die LAN wurden hingegen eher syntaktische Verarbeitungsprozesse diskutiert, obwohl Coulson et al. (1998) diese Komponente beispielsweise auch mit einer erhöhten Arbeitsgedächtnisbelastung in Verbindung brachten. Die bereits auch für die Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation beobach-

tete P600 zeigt wiederum das Vorliegen syntaktischer Reanalyse- und Korrekturprozesse an (für eine weitergehende Interpretation vgl. Abschnitt 3.3.2.4).

3.3.2.3 Verarbeitung morphosyntaktischer Informationen

Morphosyntaktische Verarbeitungsprozesse wurden bereits in einer Vielzahl von Studien untersucht. So präsentierten Kutas und Hillyard (1983) ihren Probanden in einer der ersten Studien zur syntaktischen Informationsverarbeitung Sätze mit verschiedenen Arten von morphosyntaktischen Verletzungen. Es handelte sich dabei um Sätze, welche wie in (27) einen inkorrekten Numerus eines Nomens, wie in (28) eine durch eine fehlerhafte Verbflexion bedingte Inkongruenz zwischen Subjekt und Verb oder wie in (29) eine inkorrekte Tempusmarkierung enthielten.

(27) *In Africa there is a small soft shelled TORTOISES that lives among rocks.
(28) *It's shell may VARIES from light brown to black.
(29) *This allows them to STAYED under water for a longer period.

Die Autoren stellten fest, dass alle Arten von morphosyntaktischen Verletzungen eine links-anteriore Negativierung (LAN) elizitierten. Des Weiteren konnte auch eine späte parietale Positivierung (P600) nachgewiesen werden (vgl. Kutas & Van Petten, 1994).

Ein solches Muster aus LAN und P600 wurde auch in der Folge von verschiedenen Autoren für verschiedene Arten von morphosyntaktischen Verletzungen berichtet. Beispielsweise untersuchten Osterhout und Mobley (1995) die Verarbeitung von Sätzen, in denen in Bezug auf den Numerus wie in Beispiel (30) keine morphologische Kongruenz zwischen Subjekt und Verb gegeben war.

(30) *The elected officials HOPES to succeed.

Die Autoren konnten für die Kongruenzverletzung eine links-anteriore Negativierung zwischen 300 und 500 ms sowie eine P600-Komponente nachweisen, wobei die LAN allerdings nur dann beobachtbar war, wenn die Probanden ein Akzeptabilitätsurteil abzugeben hatten, nicht jedoch bei einer reinen Leseaufgabe.

In Übereinstimmung mit den Befunden dieser Studien konnten Coulson et al. (1998), die in ihrer bereits erwähnten Studie auch Sätze mit inkorrekten Verbflexionen wie in (31) und (32) präsentierten, auf dem kritischen Wort ebenfalls eine LAN gefolgt von einer P600 beobachten.

(31) *They SUNS themselves on the beach.
(32) *Every monday he MOW the lawn.

Dass die Verarbeitung von Subjekt-Verb-Inkongruenzen mit einem aus LAN und P600 bestehenden EKP-Muster einherging, wurde auch von anderen Autoren berichtet (z. B. Gunter, Stowe & Mulder, 1997; Vos, Gunter, Kolg & Mulder, 2001).

Münte, Matzke und Johannes (1997a) konnten zudem zeigen, dass sich die LAN auch in Pseudowort-Sätzen für morphologische Inkongruenzen zwischen Subjekt und Verb wie in (33) oder (34) evozieren lässt.

(33) *Das Klenk FRUNEN den Wech.
(34) *Manche Verzinker TRÖGELT den Blotz.

Das Auftreten einer LAN unter diesen Bedingungen weist auf das Vorliegen morphosyntaktischer Verarbeitungsprozesse auch bei Abwesenheit von semantischer Information hin. Allerdings ließ sich für die inkorrekten Verbflexionen in den Pseudowort-Sätzen keine P600-Komponente nachweisen.

Während die Präsentation der Stimulussätze in allen bisher vorgestellten Studien visuell erfolgte, untersuchten Friederici et al. (1993) die Verarbeitung von morphologisch bedingten Verbflexionsfehlern wie in (35) in der auditiven Modalität.

(35) *Das Parkett wurde BOHNERE.

Sie konnten feststellen, dass inkorrekte Verbflexionen auch bei akustischer Satzpräsentation eine anteriore Negativierung sowie eine nachfolgende P600 hervorriefen. Allerdings wies der Negativierungseffekt nicht die sonst für die LAN typische stärkere Ausprägung über der linken Hemisphäre auf.

Inkorrekte Verbflexionen wurden auch von Penke et al. (1997) untersucht. Die Autoren präsentierten korrekte und inkorrekte Partizipformen von regelmäßigen und von unregelmäßigen Verben. Diese Partizipien waren entweder in Sätze eingebettet oder wurden im Kontext von Wortlisten oder kurzen Erzählungen dargeboten. Während regelmäßige Verben im Deutschen ihr Partizip korrekterweise mit dem Suffix „*-t*“ bilden, wird die Partizipform von unregelmäßigen Verben korrekterweise mit dem Suffix „*-en*“ gebildet. Die inkorrekten Partizipformen wurden erzeugt, indem die regulären Verben wie in (36) mit dem Suffix „*-en*“ irregularisiert wurden, die irregulären Verben wurden dagegen wie in (37) mit dem Suffix „*-t*“ regularisiert.

(36) durchgetanzt / *durchgetanzen
(37) aufgeladen / *aufgeladet

Bei einem Vergleich der inkorrekten Partizipformen mit den jeweiligen korrekten Partizipien zeigte sich für die irregulären Verben, welche wie in (37) mit dem Suffix „*-t*“

regularisiert worden waren, eine links-anteriore Negativierung zwischen 250 und 500 ms, die von den Autoren als LAN interpretiert wurde. Für die inkorrekten Partizipien regulärer Verben wie in (36) war hingegen kein EKP-Effekt festzustellen. Die Autoren schlussfolgerten hieraus, dass der Verarbeitung von regulären und irregulären Verben unterschiedliche Mechanismen zugrunde liegen[13].

Im Gegensatz zu den bisher berichteten Studien, in denen morphologische Inkongruenzen über die Verbflexion realisiert wurden, beschäftigte sich eine Studie von Weyerts et al. (1997) mit der Verarbeitung von inkorrekten Pluralformen von Nomen. In dem Experiment von Weyerts et al. (1997) waren in visuell präsentierten Sätzen entweder korrekte oder inkorrekte reguläre Pluralformen wie in (38) bzw. korrekte oder inkorrekte irreguläre Pluralformen wie in (39) enthalten. Während reguläre Pluralformen im Deutschen korrekterweise mit dem Pluralsuffix *„-s“* gebildet werden, kann zur Bildung von irregulären Pluralformen unter anderem das Suffix *„-(e)n“* verwendet werden. Die jeweiligen inkorrekten Formen wurden – ähnlich wie bei Penke et al. (1997) – erzeugt, indem die regulären Pluralformen irregularisiert und die irregulären Pluralformen regularisiert wurden.

(38) Karussells / *Karussellen

(39) Muskeln / *Muskels

Für die Verarbeitung der jeweiligen inkorrekten Pluralmorpheme ergaben sich unterschiedliche EKP-Muster für reguläre und irreguläre Pluralformen. Reguläre Plurale, welche wie in (38) inkorrekterweise mit dem irregulären Pluralmorphem *„-en“* versehen worden waren, zeigten gegenüber korrekten regulären Pluralen einen Negativierungseffekt auf den zentralen Elektrodenpositionen (N400). Demgegenüber riefen inkorrekterweise mit dem regulären Pluralsuffix *„-s“* gebildete irreguläre Plurale wie in (39) gegenüber korrekten irregulären Pluralen einen links-anterioren Negativierungseffekt (LAN) hervor. Die Autoren interpretierten ihre Ergebnisse ebenso wie Penke et al. (1997) im Rahmen von psycholinguistischen Modellen, die unterschiedliche Verarbeitungsprozesse für regulär und irregulär flektierte Wörter annehmen (vgl. Fußnote 13). Ebenso wie die Autoren aller zuvor berichteten Studien brachten sie die LAN dabei aber mit der Verarbeitung morphosyntaktischer Information in Verbindung.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Lück, Hahne und Clahsen (2001a, 2001b), welche ihren Probanden vergleichbare Sätze wie bei Weyerts et al. (1997) akustisch präsentierten.

[13] Die Annahmen des *dual route*-Modells (vgl. Clahsen, 1999; Marcus, Brinkmann, Clahsen, Wiese & Pinker, 1995; Pinker, 1991; Pinker & Prince, 1991), auf welche die Studie von Penke et al. (1997) ebenso wie auch die nachfolgend vorgestellte Studie von Weyerts, Penke, Dohrn, Clahsen und Münte (1997) zurückgehen, sollen an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Es sei hier auf das Kapitel 9 (Experiment V) verwiesen, in welchem auf diese Modellvorstellungen ausführlicher eingegangen werden wird.

Auch sie konnten feststellen, dass die Verarbeitung von inkorrekterweise irregularisierten Pluralnomen mit einer N400-Komponente einherging, während inkorrekte reguläre Pluralmorpheme an Nomen eine LAN evozierten. Für die morphosyntaktische Verarbeitung der inkorrekterweise regularisierten Pluralnomen beobachteten die Autoren neben der LAN auch eine P600-Komponente.

In den bisher vorgestellten Studien konnte damit im Zusammenhang mit morphosyntaktischen Verarbeitungsprozessen relativ konsistent eine P600-Komponente beobachtet werden. Eine Ausnahme stellten dabei die Arbeiten von Penke et al. (1997) und Weyerts et al. (1997) sowie von Münte et al. (1997a) dar. Von allen Autoren wurde jedoch übereinstimmend eine LAN berichtet, die durch verschiedene Arten von syntaktischen Verletzungen ausgelöst wurde. Nur in wenigen Studien, die sich mit der Verarbeitung morphosyntaktischer Information beschäftigten, konnte keine LAN gefunden werden.

So berichteten Münte, Szentkuti, Wieringa, Matzke und Johannes (1997b), die in ihrem Experiment Sätze mit inkorrekten Verbflexionen wie in (40) und (41) präsentierten, dass sie auf dem kritischen Verb lediglich eine P600 beobachten konnten.

(40) Der Opa hat zwei Maikäfer gefunden. Sie *BRUMMT / BRUMMEN beim Fliegen laut.

(41) Zwei Maikäfer, die beim Fliegen laut *BRUMMT / BRUMMEN, hat der Opa gefunden.

Wie aus den Beispielen ersichtlich wird, waren die Sätze allerdings so gestaltet, dass auf dem kritischen Wort lokal gar keine direkte Inkongruenz zwischen dem Verb und dem Pronomen *„sie“* bzw. dem Relativpronomen *„die“* vorlag, da beide Pronomen sowohl als Pluralform als auch als (feminine) Singularform interpretiert werden können. Eine Ungrammatikalität ergab sich für die in diesem Experiment verwendeten Sätze demzufolge erst bei einem Abgleich des Pronomens mit dem Bezugselement im vorhergehenden Satz (40) oder im Hauptsatz (41), weshalb für die experimentelle Manipulation in dieser Studie nicht von der Verarbeitung einer ausgesprochenen morphosyntaktischen Verletzung ausgegangen werden kann. Dies könnte wiederum das Ausbleiben der in einer Vielzahl von anderen Studie festgestellten LAN erklären.

Auch Osterhout und Nicol (1999), welche die Verarbeitung von inkorrekten Verbflexionen wie in (42) untersuchten, berichteten lediglich eine P600-Komponente.

(42) *The cat won't EATING the food that Mary leaves them.

Die Autoren konnten zwar auch einen geringen, links-anterior ausgeprägten Negativierungseffekt beobachten, sie interpretierten diese Negativierung allerdings letztendlich als N400-Komponente.

Hagoort et al. (1993) präsentierten in ihrer bereits mehrfach erwähnten Studie den Probanden auch Sätze, in denen hinsichtlich des Numerus keine Subjekt-Verb-Kongruenz gegeben war. Es wurden dabei sowohl Sätze mit einer Subjekt-Verb-Objekt-Abfolge wie in (43) als auch Sätze mit einer Verb-Subjekt-Objekt-Abfolge wie in (44) verwendet. Die morphologische Inkongruenz wurde dabei entweder wie in (43) auf dem Verb oder wie in (44) auf dem Subjektnomen realisiert.

(43) *Het verwende kind GOOIEN het speelgoed op de grond.
(Das verwöhnte Kind schmeißen das Spielzeug auf den Fußboden.)

(44) *Na afloop van het feest bestelt de GASTEN een taxi.
(Am Ende der Party bestellt die Gäste ein Taxi.)

Auch Hagoort et al. (1993) berichteten für die in den Stimulussätzen enthaltenen morphosyntaktischen Verletzungen lediglich eine späte parietale Positivierung.

Die Befunde der verschiedenen Studien zusammenfassend, wurde für die Verarbeitung von morphosyntaktischen Verletzungen in der Regel ein biphasisches Muster beobachtet, das aus einer links-anterioren Negativierung (LAN) und einer nachfolgenden P600-Komponente bestand. Gleichwohl berichteten einige Autoren, dass sie entweder lediglich eine LAN oder nur eine P600 feststellen konnten. Die Annahme, dass morphosyntaktische Verarbeitungsprozesse im ereigniskorrelierten Potential mit einem LAN-P600-Muster einhergehen, wird jedoch gestützt durch die Befunde zur Kasusverarbeitung, welche – wie im vorigen Abschnitt dargelegt wurde – auch unter dem Gesichtspunkt der morphosyntaktischen Verarbeitung betrachtet werden können. Auch für inkorrekte Kasusmarkierungen wurde häufig ein biphasisches Muster aus LAN und P600 berichtet (vgl. Abschnitt 3.3.2.2).

3.3.2.4 Überblick über die EKP-Korrelate syntaktischer Verarbeitungsprozesse

Wie die vorangegangenen Abschnitte gezeigt haben, korrelierte die Verarbeitung von syntaktischer Information im EKP systematisch mit links-anterioren Negativierungen und späten Positivierungen (P600), wobei diese Komponenten sowohl einzeln als auch in Kombination miteinander auftraten.

Links-anteriore Negativierungen. Links-anteriore Negativierungen waren entweder in einem sehr frühen Zeitfenster zu beobachten oder traten etwas später in einem ähnlichen Zeitbereich wie die N400 in Erscheinung. Die frühe links-anteriore Negativierung, welche in der Literatur als *Early Left Anterior Negativity (ELAN)* diskutiert wird, wur-

de vor allem im Zusammenhang mit Verletzungen der Phrasenstruktur berichtet. In der Regel waren für diese Negativierung Latenzen von unter 300 ms zu beobachten. Die ELAN gilt als das Korrelat der Verarbeitung von Wortkategorieinformation, welche in einer sehr frühen Phase des Sprachverstehens durch hochautomatische Prozesse analysiert wird (z. B. Hahne & Friederici, 1999, 2002). Es konnte zudem gezeigt werden, dass die sich in der ELAN reflektierenden syntaktischen Analyseprozesse die zeitlich nachgeordneten Prozesse der semantischen Integration blockieren können (z. B. Friederici et al., 1999a).

Die zeitlich nachgeordnete links-anteriore Negativierung, welche in der Literatur als *Left Anterior Negativity (LAN)* bezeichnet wird, ist in der Regel in einem Zeitfenster zwischen 300 und 500 ms zu beobachten. Eine LAN wurde am häufigsten für morphosyntaktische Verletzungen wie beispielsweise Verletzungen der Subjekt-Verb-Kongruenz (Gunter et al., 1997) oder Genus-Verletzungen (Gunter et al., 2000; Deutsch & Bentin, 2001) berichtet, weshalb sie zumeist als Korrelat morphosyntaktischer Verarbeitungsprozesse interpretiert wird (Friederici, 1995). Da links-anteriore Negativierungen jedoch zuweilen auch in Folge von erhöhten Belastungen des sprachlichen Arbeitsgedächtnisses beobachtet werden konnten (Kluender & Kutas, 1993, 1998), ist die Interpretation der LAN nicht immer eindeutig. So argumentierten beispielsweise Coulson et al. (1998), dass die von ihnen im Zusammenhang mit Kasusverletzungen beobachtete LAN als Indikator für eine erhöhte Arbeitsgedächtnisbelastung zu betrachten sei. Allerdings konnten Kluender und Kutas (1998) die Dissoziierbarkeit der beiden LAN-Effekte nachweisen, indem sie für morphosyntaktische Verarbeitungsprozesse eine lokale LAN (*local LAN*) beobachteten, für erhöhte Belastungen des verbalen Arbeitsgedächtnisses hingegen eine globalere, anhaltende LAN (*sustained LAN*). Eine anhaltende links-anteriore Negativierung als Funktion der Arbeitsgedächtnisbelastung wurde auch von Fiebach, Schlesewsky und Friederici (2002) berichtet.

P600-Komponente. Eine späte Positivierung wurde im Zusammenhang mit syntaktischen Verarbeitungsprozessen am häufigsten beschrieben. Die in der Regel als *P600* oder auch *Syntactic Positive Shift (SPS)* bezeichnete Komponente konnte in zahlreichen Studien repliziert werden und gilt damit als ein relativ stabiler Effekt. Es ist bislang noch nicht vollständig geklärt, welche Prozesse der späten Positivierung zugrunde liegen. Eine P600 wurde für syntaktische Anomalien ebenso wie für zeitweilig ambige Satzstrukturen berichtet (vgl. die vorangegangenen Abschnitte 3.3.2.1 bis 3.3.2.3), sie konnte jedoch auch im Zusammenhang mit erhöhter syntaktischer Komplexität festgestellt werden (Friederi-

ci, Hahne & Saddy, 2002; Kaan, Harris, Gibson & Holcomb, 2000). Auf der Basis dieser Befunde nimmt man gegenwärtig an, dass die späte Positivierung kein einheitliches Phänomen darstellt, sondern vielmehr mit verschiedenen Subtypen von syntaktischer Informationsverarbeitung korreliert. So werden für die der P600 zugrunde liegenden Prozesse nicht nur syntaktische Revisionsprozesse wie die Reanalyse bzw. Korrektur von ambigen oder anomalen Satzstrukturen in Betracht gezogen, sondern es wird ebenfalls diskutiert, dass die P600 syntaktische Integrationsschwierigkeiten bei erhöhter syntaktischer Komplexität eines Satzes widerspiegelt (vgl. Friederici, 2002; Friederici et al., 1998b, 2001). Es besteht des Weiteren Evidenz dafür, dass die P600 nicht nur den Versuch der Beseitigung eines bereits aufgetretenen syntaktischen Verarbeitungsproblems reflektiert, sondern auch die Detektion potentieller Verarbeitungsschwierigkeiten widerspiegeln kann (z. B. Frisch, Schlesewsky, Saddy & Alpermann, 2002). Die verschiedenen syntaktischen Verarbeitungsaspekte scheinen sich sowohl in unterschiedlichen Latenzen als auch in unterschiedlichen Verteilungen der späten Positivierung niederzuschlagen. So konnte gezeigt werden, dass die auf syntaktische Korrekturprozesse zurückgehende P600 eine zentro-parietale Verteilung aufweist, während die mit der syntaktischen Komplexität korrelierende P600 eher fronto-zentral ausgeprägt ist (Friederici et al., 2001, 2002). Syntaktische Diagnoseprozesse wiederum riefen eine P600 mit einer geringeren Latenz hervor als Prozesse der strukturellen Revision (Friederici et al., 2001). Unabhängig von diesen Spezifizierungen kann die P600-Komponente allgemein als ein Indikator generelller Probleme bei der Verarbeitung syntaktischer Information gelten. Sie scheint dabei auf bewusste und kontrollierte Verarbeitungsprozesse zurückzugehen (Gunter et al., 1997; Hahne & Friederici, 1999, 2002). Obwohl die P600 in der Regel im Zusammenhang mit der Verarbeitung syntaktischer Information berichtet wird, hat sie sich verschiedentlich auch schon für semantische Manipulationen als sensibel erwiesen, wie beispielsweise Gunter et al. (1997) oder Münte, Heinze, Matzke, Wieringa und Johannes (1998) berichteten. Die Variation der P600 in Abhängigkeit von semantischen Aspekten konnten Gunter et al. (2000) in einem Experiment, in dem sie Manipulationen der *cloze probability* mit syntaktischen Verletzungen kombinierten, auf eine Interaktion von semantischen und syntaktischen Verarbeitungsprozessen zurückführen. Der Argumentation der Autoren folgend, kann die P600 deshalb auch als Korrelat der globaleren Integration von verschiedenen Arten von sprachlicher Information interpretiert werden.

Dass die P600 eine für die Verarbeitung von Sprache spezifische Komponente darstellt, wurde zuweilen angezweifelt. Vor allem Coulson et al. (1998) argumentierten dafür, die P600 als eine verzögerte P3b-Komponente und damit als Teil des P300-Komplexes

(vgl. Abschnitt 3.2.2) zu betrachten. Gegenevidenz zu dieser Hypothese kommt beispielsweise aus einer Studie von Osterhout, McKinnon, Bersick und Corey (1996, vgl. hierzu Osterhout & Nicol, 1999; Osterhout & Hagoort, 1999) sowie aus einer neueren Untersuchung von Frisch, Kotz, von Cramon und Friederici (2003), in der bei aphasischen Patienten unterschiedliche neuronale Generatoren für die P3b und die P600 nachgewiesen werden konnten. Obgleich die Frage, ob die P600 ein Teil des P3-Komplexes ist, bislang nicht abschließend geklärt werden konnte, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die P600 Auskunft über die Prozesse der syntaktischen Informationsverarbeitung geben kann.

N400 für Subkategorisierungsverletzungen. Die N400-Komponente hat sich in einer Vielzahl von Studien als Korrelat semantisch-lexikalischer Integrationsprozesse erwiesen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Gleichwohl konnte eine N400 auch für Verletzungen der Subkategorisierungseigenschaften von Verben beobachtet werden, d. h. wenn die Anzahl der Argumente in einem Satz nicht mit der im Lexikoneintrag des Verbs spezifizierten Verbargumentstruktur übereinstimmte (z. B. Friederici & Frisch, 2000). Das Auftreten der N400 in einem solchen Zusammenhang wurde jedoch nicht im Sinne eines syntaktischen Verarbeitungsprozesses interpretiert. Vielmehr wurde davon ausgegangen, dass diese N400 die semantischen Integrationsschwierigkeiten reflektiert, welche bei der Interpretation einer solchen inkorrekten Satzstruktur entstehen (vgl. hierzu auch Frisch, 2000). Die Tatsache, dass eine N400 auch für inkorrekte Verbargumentstrukturen berichtet wurde, macht es deshalb nicht erforderlich, von der Annahme der N400 als einer für die semantische Verarbeitung spezifischen Komponente abzurücken[14].

3.3.3 Modell des Satzverstehens bei Hörgesunden

Die teilweise heterogen erscheinenden Befunde der hier vorgestellten EKP-Studien ebenso wie die experimentellen Befunde einer Reihe weiterer Studien wurden von Friederici (1995, 2002; vgl. auch Friederici, im Druck) in ein neurokognitives Modell des Satzverstehens integriert, welches sowohl die temporalen als auch die neuroanatomischen Parameter der Teilprozesse des Satzverstehens beschreibt und auch mit Daten aus der Aphasieforschung kompatibel ist (z. B. Friederici, Hahne & von Cramon, 1998a; Friederici,

[14] Gleichwohl hat sich mittlerweile gezeigt, dass die N400 auch für Probleme bei der thematischen Interpretation von Argumentrelationen sensibel ist, wie Frisch und Schlesewsky (2001) durch die Manipulation der Animatheit von Argumenten nachweisen konnten. Die Befunde von Frisch und Schlesewsky (2001) legen eine Erweiterung der Interpretation der N400 in dem Sinne nahe, dass diese Komponente auch als Korrelat des Aufbaus einer thematischen Hierarchie auftreten kann.

von Cramon & Kotz, 1999b). Hinsichtlich der prozessualen Charakteristik des Satzverstehens, auf welche im Folgenden fokussiert werden soll, postuliert dieses Modell im Wesentlichen drei Phasen.

In einer sehr frühen Verarbeitungsphase (Phase I: 100-300 ms) erstellt das sprachliche Verarbeitungssystem – der *Parser* – eine initiale syntaktische Satzstruktur. Jedes neu erscheinende Wort wird vom Parser allein auf der Basis von Wortkategorieinformation in die bereits aufgebaute Struktur integriert. Es handelt sich dabei also um einen autonomen Verarbeitungsprozess, der semantische Informationen ebenso wenig berücksichtigt wie anderweitige syntaktische Informationen. Kann ein eintreffendes Wort aufgrund einer inkongruenten Wortkategorie nicht in die vorhandene Satzstruktur integriert werden, reflektiert sich das im EKP in einer ELAN-Komponente.

In der zweiten Phase des Satzverstehens (Phase II: 300-500 ms), welche eine thematische Rollenzuweisung zum Ziel hat, finden parallel und unabhängig voneinander (Gunter et al., 2000) lexikalisch-semantische und syntaktische Verarbeitungsprozesse statt. Die Prozesse der syntaktischen Verarbeitung involvieren dabei morphosyntaktische Informationen, welche die Beziehungen zwischen den Elementen des Satzes determinieren ebenso wie die im Lexikoneintrag gespeicherten idiosynkratischen syntaktischen Informationen, wie beispielsweise Genus oder Verbargumentstruktur. Ergeben sich in der zweiten Verarbeitungsphase Probleme hinsichtlich der lexikalisch-semantischen Integration eines Wortes in den vorangegangenen Kontext, spiegelt sich dies im EKP in einer N400-Komponente wider. Hingegen rufen Probleme hinsichtlich der Verarbeitung der beschriebenen syntaktischen Informationstypen im EKP eine LAN-Komponente hervor.

Während einer dritten Verarbeitungsphase (Phase III: 500-100 ms) erfolgt ein Abgleich der strukturellen, semantischen und thematischen Repräsentationen, die in den vorangegangenen Verarbeitungsphasen erstellt wurden. Können diese Informationen nicht erfolgreich aufeinander abgebildet werden, so werden Prozesse der strukturellen Reanalyse oder wenn nötig Korrektur eingeleitet. Solche Reanalyse- oder Korrekturprozesse korrelieren im ereigniskorrelierten Potential mit einer P600-Komponente.

Während in dem beschriebenen dreistufigen Modell des Satzverstehens für die frühe Phase des syntaktischen Strukturaufbaus ein modularer Charakter angenommen wird, treten in der späten Verarbeitungsphase Interaktionen zwischen semantischen und syntaktischen Informationen auf. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass es sich bei dem in der ersten Phase stattfindenden Prozess des Aufbaus einer initialen Satzstruktur um einen automatischen Prozess handelt, wohingegen die Prozesse der Revision in der späten Phase einen eher kontrollierten Charakter aufweisen.

Friederici (2002) postuliert in ihrem Modell zudem eine Interaktion von prosodischen und syntaktischen Informationen beim auditiven Satzverstehen (Steinhauer et al., 1999), wobei die temporale Struktur dieser Prozesse allerdings noch einer genauen Aufklärung bedarf.

3.4 Elektrophysiologische Befunde bei CI-Trägern

Bei CI-Patienten wurden ereigniskorrelierte Potentiale bislang kaum zur Untersuchung der Prozesse des Sprachverstehens eingesetzt. Die bisherigen EKP-Studien mit CI-Trägern beziehen sich ausschließlich auf sprachunspezifische Komponenten im EKP (für einen Überblick über diese Komponenten vgl. Abschnitt 3.2), von denen jedoch nur die endogenen Komponenten MMN und P300 in gewissem Maße Aussagen über sprachliche Verarbeitungsprozesse zulassen, indem mit ihrer Hilfe diskriminative Prozesse auf Phonemebene untersucht werden können. Primär dienten ereigniskorrelierte Potentiale bei CI-Trägern bisher aber eher zur Untersuchung der allgemeinen Hörverarbeitung von akustischen Reizen auf den dem Sprachverstehen untergeordneten Ebenen der Frequenz-, Intensitäts- oder Tondauerwahrnehmung.

Die exogenen, akustisch evozierten Potentiale kommen in der Regel hauptsächlich im Rahmen objektiver audiologischer Testverfahren zum Einsatz. Beispielsweise werden Hirnstammpotentiale ebenso wie mittellatente akustisch evozierte Potentiale in der präoperativen Diagnostik eingesetzt, um die potentielle Erregbarkeit des auditorischen Systems sicherzustellen (vgl. Deggouj & Gersdorff, 1998). Nach der Implantation können akustisch evozierte Potentiale zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des CI-Systems dienen und die Einstellung des Sprachprozessors erleichtern[15]. Besonders hilfreich ist der Einsatz akustisch evozierter Potentiale in diesem Zusammenhang, wenn Patienten nicht auf behaviorale Testparadigmen antworten können, wie dies bei Kindern, neurologisch oder psychiatrisch Erkrankten oder anästhesierten Patienten der Fall ist, oder wenn beispielsweise aufgrund mangelnder Hörerfahrung keine zuverlässigen Aussagen zu erwarten sind. In diesen Fällen werden akustisch evozierte Potentiale äquivalent zu Tonaudiogrammen zur Hörschwellenbestimmung eingesetzt (Picton, 1995). Neben dieser diagnostischen Verwendung der exogenen akustisch evozierten Potentiale wurden verschiedentlich auch schon Studien durchgeführt, in denen geprüft wurde, ob und wie sich die Eigen-

[15] Hier sei beispielsweise auf die Arbeit von Hoth (1998) verwiesen, in welcher über eine Objektivierung der Sprachprozessor-Anpassung durch die Verwendung von späten akustisch evozierten Potentialen berichtet wurde.

schaften besonders der späten Potentiale N1 und P2 bei CI-Trägern von denen Hörgesunder unterscheiden, um daraus Rückschlüsse auf eventuelle funktionelle Veränderungen der zentralen Hörverarbeitung bei CI-Trägern abzuleiten.

Da die Effektivität des Hörens mit CI jedoch nicht nur anhand der absoluten Hörschwelle zu beurteilen ist, sondern vielmehr auch die Diskriminationsfähigkeit für Sprache eine entscheidende Rolle spielt, kommen bei der Überprüfung des Hörvermögens von CI-Trägern mittlerweile auch die kognitiven Potentiale MMN und P300 verstärkt zur Anwendung. Diese erlauben zum einen Rückschlüsse auf die für das Lautsprachverstehen entscheidende Fähigkeit zur Diskrimination einfacher akustischer Reize hinsichtlich solcher Parameter wie Frequenz oder Intensität, geprüft werden kann aber auch die Diskriminationsfähigkeit für komplexere sprachliche Reize in Form von Phonemen oder Phonemkombinationen (vgl. Abschnitt 3.2.2). In diesem Zusammenhang erscheint speziell die Messung der aufmerksamkeitsunabhängig evozierbaren MMN als potentiell hilfreiche Ergänzung der diagnostischen Methoden. Dies gilt besonders, wenn Patienten aus den oben erwähnten Gründen nicht in der Lage sind, auf die im Rahmen der herkömmlichen Sprachaudiometrie[16] üblichen behavioralen Testparadigmen zuverlässig zu antworten (vgl. Picton, 1995). Ebenso wie die späten Potentiale N1 und P2 werden die endogenen Komponenten MMN und P300 aber auch zunehmend eingesetzt, um der Frage nachzugehen, wie die generelle Wahrnehmung, Verarbeitung und Integration von akustischen Signalen erfolgt, die durch ein Cochlea-Implantat vermittelt werden. Neben dem Vergleich mit Normalhörenden wurde dabei in verschiedenen Studien auch der Versuch unternommen, einen Zusammenhang zwischen den individuellen Sprachperzeptionsleistungen der Patienten und den Eigenschaften der Komponenten MMN oder P300 herzustellen.

N1 und P2. In einer Reihe von Studien konnte gezeigt werden, dass sich die späten akustisch evozierten Potentiale N1 und P2 bei CI-Trägern in der Regel unabhängig von der Art der verwendeten Stimuli problemlos auslösen ließen (u. a. Makhdoum, Groenen, Snik & van den Broek, 1998a; Makhdoum, Hinderink, Snik, Groenen & van den Broek, 1998b; Okusa, Shiraishi, Kubo & Nageishi, 1999; Oviatt & Kileny, 1991; Wable, van der Abbeele, Gallégo & Frachet, 2000). Nach Untersuchungen von Ponton, Don, Waring, Eggermont und Masuda (1993, 1994) waren die Dipole zur Generierung des N1-P2-Komplexes bei CI-Trägern dabei ähnlich wie bei Normalhörenden im auditorischen

[16] Ein ausführlicher Überblick über die Verfahren der Sprachaudiometrie findet sich beispielsweise bei Lehnhardt (1996b), Plath (1992) oder Sendlmaier (1992).

Kortex in der oberen Hälfte des Temporallappens lokalisiert. Der N1-P2-Komplex ließ sich bei CI-Trägern allerdings nicht evozieren, wenn die CI-Stimulation bei den Patienten zu keiner Hörwahrnehmung führte (Deggouj, de Tourtchaninoff, Gersdorff & Guerit, 1994). Ponton et al. (1993, 1994) beobachteten für einen solchen Fall auch abweichende Dipolstrukturen.

Makhdoum et al. (1998b), welche reproduzierbare N1- und P2-Komponenten sowohl für prä- als auch für postlingual ertaubte erwachsene CI-Träger nachweisen konnten, berichteten über längere Latenzen der Potentiale in beiden Patientengruppen im Vergleich zu hinsichtlich des Alters übereinstimmenden hörgesunden Kontrollprobanden. Das galt sowohl für die durch reine Töne evozierten Potentiale als auch für Potentiale, welche durch sprachliche Stimuli in Form von Vokalphonemen ausgelöst wurden. Für Patienten mit einem intra-cochleären CI-System konnte zudem eine im Vergleich zu Normalhörenden geringere Amplitude der durch die sprachlichen Reize evozierten N1-Komponente festgestellt werden. Die Autoren berichteten in dieser Arbeit ebenso wie in einer weiteren Studie (Makhdoum et al., 1998a), dass die Eigenschaften des N1-P2-Komplexes mit den sprachlichen Verstehensleistungen der Patienten korrelierten. Ihren Beobachtungen zufolge ging ein besseres Sprachverständnis mit geringeren Latenzen der N1-Komponente (Makhdoum et al., 1998b) und der P2-Komponente (Makhdoum et al., 1998a) sowie mit größeren Amplituden beider Potentiale (Makhdoum et al., 1998a, 1998b) einher. Auch Groenen et al. (1996a) konnten bei postlingual ertaubten erwachsenen CI-Trägern Unterschiede in der Ausprägung der Potentiale N1 und P2 in Abhängigkeit von den Sprachverstehensleistungen feststellen. Während bei CI-Trägern mit gutem Sprachverstehen die Potentiale sowohl hinsichtlich Amplitude als auch Latenz mit denen Normalhörender vergleichbar waren, wurden für Patienten mit mäßigem Sprachverständnis signifikant geringere Amplituden als bei Hörgesunden beobachtet. Für die Gesamtgruppe der CI-Träger wurde in dieser Studie eine im Vergleich zur Kontrollgruppe längere Latenz der P2-Komponente festgestellt. In einer weiteren Studie konnten Groenen, Beynon, Snik und van den Broek (2001) nachweisen, dass die Amplituden, nicht jedoch die Latenzen der Potentiale N1 und P2 bei CI-Trägern auch in Abhängigkeit von der Art der verwendeten akustischen Stimuli variierten. Dabei wurde eine im Vergleich zu Hörgesunden geringere Amplitude der N1 für verschiedene Arten von sprachlichen Reizen (Vokalphoneme und Konsonant-Vokal-Phonemverbindungen) festgestellt, wohingegen eine verringerte Amplitude der P2 bei den Patienten nur für die Konsonantenphoneme auftrat. Die Latenzen der Potentiale N1 und P2 waren wiederum länger als bei Hörgesunden Kontrollprobanden. Über bei CI-Trägern teilweise beobachtbare längere Latenzen und verringerte Am-

plituden des N1-P2-Komplexes berichteten auch Deggouj et al. (1994). Hingegen waren in einer Studie von Micco et al. (1995) keine Unterschiede in den Latenzen der späten Potentiale N1 und P2 bei CI-Trägern und Normalhörenden festzustellen, wobei es sich bei den untersuchten Patienten nach Angaben der Autoren überwiegend um CI-Träger mit gutem Sprachverstehen handelte. Dessen ungeachtet wurde für die Patienten eine verringerte Amplitude der N1-Komponente festgestellt.

Der Frage, ob und in welcher Weise sich die Eigenschaften des N1-P2-Komplexes bei CI-Trägern im Laufe des individuellen Rehabilitationsprozesses verändern, gingen Jordan et al. (1997) nach. Die Autoren konnten feststellen, dass sich im ersten halben Jahr nach der Implantation sowohl bei prälingual als auch bei postlingual ertaubten CI-Trägern die Latenz der N1-Komponente verkürzte und den Werten für Normalhörende anglich. Allerdings war der Effekt der Latenzverkürzung bei den prälingual ertaubten Patienten schwächer ausgeprägt und weniger stabil. Zudem wies die N1-Komponente bei allen CI-Trägern eine breitere Verteilung auf als bei Hörgesunden, was die Autoren als breite Aktivierung des Kortex auf einen unvertrauten Stimulus interpretierten.

Die späten Potentiale N1 und P2 konnten auch bei Kindern mit Cochlea-Implantat nachgewiesen werden (Kileney, 1991; Kileny, Boerst & Zwolan, 1997). Ebenso wie bei erwachsenen CI-Trägern (vgl. Groenen et al., 2001) variierten die Latenzen der Komponenten dabei in Abhängigkeit von der Art der verwendeten Stimuli (Kileny et al., 1997). Allerdings berichteten andere Autoren, dass sich der N1-P2-Komplex bei CI-Kindern nicht evozieren ließ (z. B. Eggermont, Ponton, Don, Waring & Kwong, 1997; Ponton, Don, Eggermont, Waring & Masuda, 1996b).[17]

Die Ergebnisse der Studien lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass die späten Potentiale N1 und P2 in der Regel auch bei CI-Trägern evozierbar sind. Des Weiteren konnte in verschiedenen Studien übereinstimmend gezeigt werden, dass im Vergleich zu Normalhörenden beobachtbare Abweichungen hinsichtlich Latenz und Amplitude der Komponenten in Zusammenhang mit den Hörverstehensfähigkeiten der Patienten stehen. Dementsprechend konnten für CI-Träger mit sehr gutem Hörverstehen Potentiale nachgewiesen werden, welche sich nicht von denen Normalhörender unterschieden, während für weniger erfolgreiche Patienten längere Latenzen und geringere Amplituden zu verzeichnen waren.

[17] Weitere Befunde zum P1-N1-P2-Komplexes bei Kindern mit Cochlea-Implantat sowie Implikationen für Reifung und Plastizität des menschlichen Hörsystems sind unter anderem in den Arbeiten von Ponton und Kollegen (Ponton et al., 1996a, 1996b; Ponton, Moore & Eggermont, 1999; Ponton & Eggermont, 2001) sowie von Sharma und Kollegen (Sharma, Dorman & Spahr, 2002a; Sharma, Dorman, Spahr & Todd, 2002b) dargestellt.

Mismatch Negativity. Verschiedentlich konnte bei CI-Trägern bereits auch die mit höheren kognitiven Prozessen in Zusammenhang stehende Mismatch Negativity beobachtet werden. Jedoch ließ sich die Komponente, welche als Anzeichen für automatische auditive Diskriminationsleistungen des Gehirns gilt (vgl. Abschnitt 3.2.2), nicht gleichermaßen zuverlässig evozieren wie dies für den N1-P2-Komplex der Fall war. So berichteten Groenen, Snik und van den Broek (1996b), dass sie mit Konsonantenkontrasten innerhalb von Konsonant-Vokal-Phonemverbindungen bei postlingual ertaubten CI-Trägern mit gutem Sprachverständnis eine Mismatch Negativity evozieren konnten, während sich eine solche Komponente für Patienten mit mäßigem Sprachverständnis nicht nachweisen ließ. Die MMN wies bei den CI-Trägern eine geringere Amplitude auf als bei hörgesunden Kontrollprobanden, es zeigten sich jedoch keine Abweichungen hinsichtlich der Latenz. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Kraus et al. (1993). Die Autoren konnten eine durch Konsonantenkontraste evozierte MMN ebenfalls nur bei CI-Trägern mit guter Sprachperzeption beobachten, hinsichtlich der Eigenschaften der Komponente waren dabei keine Unterschiede zu normalhörenden Kontrollprobanden festzustellen. Bei CI-Trägern mit geringerem Sprachverständnis löste ein solcher Reizkontrast dagegen keine MMN aus. Allerdings konnte auch für die weniger erfolgreichen CI-Träger eine MMN nachgewiesen werden, wenn ein für diese Patienten problemloser zu diskriminierender Vokalkontrast innerhalb von Konsonant-Vokal-Phonemverbindungen verwendet wurde (Kraus, McGee, Carrell & Sharma, 1995). Einen Einfluss der Schwierigkeit der Reizdiskrimination auf die MMN bei postlingual ertaubten CI-Trägern konnten auch Okusa et al. (1999) feststellen, die für postlingual ertaubte CI-Träger berichteten, dass die mit geringeren Frequenzdifferenzen verbundene verminderte Diskriminierbarkeit von reinen Tonreizen mit längeren Latenzen der MMN einhergingen.

Im Gegensatz zu diesen Studien, bei denen die akustische Reizpräsentation im Freifeld erfolgte, führten Ponton und Don (1995) eine Untersuchung durch, bei der die implantierten Elektroden direkt mit unterschiedlichen Reizmustern angesteuert wurden. Die Autoren berichteten, dass sowohl durch Differenzen hinsichtlich der Stimulusdauer als auch hinsichtlich unterschiedlicher angesteuerter Elektroden und damit der wahrgenommenen Tonhöhe eine Mismatch Negativity evozierbar war. Allerdings waren hier für die Patienten zeitlich früher auftretende Peaks der Komponente zu verzeichnen, was die Autoren auf eine mögliche mit der direkten elektrischen Stimulation einhergehende synchronere Aktivierung von Neuronen zurückführen. Auch Wable et al. (2000), die eine Studie berichteten, in welcher die Frequenzdiskrimination mittels der direkten Ansteuerung unterschiedlicher Elektroden geprüft wurde, konnten eine MMN für diese Art der

Stimulation nachweisen, wobei aber keine Korrelationen mit dem Sprachverständnis der Patienten festzustellen waren.

Auch bei Kindern mit Cochlea-Implantat konnte die Mismatch Negativity bereits evoziert werden (z. B. Ponton & Don, 1995; Ponton et al., 2000). Ebenso wie bei erwachsenen CI-Trägern zeigte sich dabei in verschiedenen Studien ein Einfluss der Diskriminierbarkeit der akustischen Reize auf die Ausprägung der Komponente. So stellten Kraus et al. (1995) in einer Fallstudie für ein CI-Kind fest, dass sich eine MMN zwar durch einen auf unterschiedlichen temporalen Merkmalen beruhenden Konsonantenkontrast auslösen ließ, dies war jedoch nicht der Fall für einen auf spektraler Information beruhenden Konsonantenkontrast[18]. Kileny et al. (1997) berichteten dagegen, dass die Komplexität akustischer Reize bei CI-Kindern mit der Latenz der MMN korrelierte. Die durch Vokalkontraste innerhalb einsilbiger Wörter evozierte MMN wies dabei längere Latenzen auf als die MMN, welche durch Frequenz- und Lautstärkekontraste in reinen Tönen evoziert wurde. In dieser Studie konnte des Weiteren festgestellt werden, dass ein besseres Sprachverständnis der CI-Kinder mit einer größeren Amplitude sowie einer kürzeren Latenz einherging, wobei dieser Effekt für die Diskrimination abweichender Frequenzen am ausgeprägtesten war.

Zusammenfassend zeigen die bislang vorliegenden Studien, dass sich eine Mismatch Negativity als Korrelat auditiver Diskriminationsprozesse auch bei CI-Trägern evozieren lässt. Es wurde mehrfach berichtet, dass das Auftreten der MMN dabei mit den individuellen Hörverstehensleistungen der Patienten korreliert war. Für Patienten mit geringeren Perzeptionsfähigkeiten wurden entweder längere Latenzen und eine verminderte Amplitude der MMN beobachtet oder es lag eine generelle Abwesenheit der Komponente vor. Die Ausprägung der Komponente war jedoch nicht nur mit dem Sprachverständnis der Patienten relatiert, sondern korrelierte auch mit der Diskriminierbarkeit der akustischen Reize, wobei eine verminderte Reizdiskriminierbarkeit wiederum sowohl die Veränderung der Charakteristika der MMN als auch die Abwesenheit der Komponente zur Folge haben konnte.

P300. Auch die als Anzeichen für aktive Reizdiskriminationsprozesse geltende P300-Komponente konnte bereits in einigen Studien bei CI-Trägern nachgewiesen werden. Obwohl mehrfach berichtet wurde, dass sich die Komponente – ebenso wie dies bei der MMN der Fall gewesen war – bei vereinzelten CI-Trägern mit geringerem Hörverständnis

[18]Die temporalen Merkmale wurden in diesem Fall über den Beginn der Stimmhaftigkeit des Konsonanten manipuliert, wohingegen die Unterschiede hinsichtlich der spektralen Information auf die Änderung des Artikulationsortes des Konsonanten zurückgingen.

nicht beobachten ließ (z. B. Groenen et al., 1996a, 2001; Jordan et al., 1997; Kileney, 1991; Makhdoum et al., 1998b; Micco et al., 1995), konnte in der Regel jedoch sowohl bei CI-Trägern mit gutem Sprachverständnis als auch bei weniger erfolgreichen Patienten eine P300 evoziert werden.

So berichteten Groenen et al. (1996a), dass sie durch einen Frequenzkontrast sowohl bei Patienten mit gutem Sprachverstehen als auch bei Patienten mit mäßigem Sprachverstehen eine P300-Komponente evozieren konnten. Allerdings war für die weniger erfolgreichen CI-Träger im Vergleich zu normalhörenden Kontrollprobanden ebenso wie im Vergleich zu den Patienten mit besserem Sprachverständnis eine längere Latenz der Komponente festzustellen. Kubo et al. (2001) konnten ebenfalls feststellen, dass die bei postlingual ertaubten CI-Trägern mit gutem Sprachverständnis evozierte P300 keine Unterschiede zu Normalhörenden aufwies, während die Latenzen für Patienten mit mäßigem Sprachverständnis signifikant länger waren. Eine verlängerte Latenz der P300 bei postlingual ertaubten CI-Trägern beobachteten auch Makhdoum et al. (1998b), welche die Komponente bei den Patienten sowohl mit Frequenzkontrasten als auch mit Vokalkontrasten evozieren konnten. In dieser Untersuchung war die Latenz der P300 zwar nicht mit den sprachperzeptiven Fähigkeiten der CI-Träger relatiert, jedoch konnte für die Patienten, welche mit dem heutzutage gebräuchlicheren intra-cochleären CI-System versorgt waren, eine Korrelation des Sprachverständnisses mit der Amplitude der Komponente festgestellt werden. Die Art der verwendeten Stimuli korrelierte weder mit der Amplitude noch mit der Latenz der P300. Im Gegensatz zu diesen Studien, welche übereinstimmend Abweichungen in der Ausprägung der P300 bei CI-Trägern im Vergleich zu Normalhörenden berichteten, konnten Micco et al. (1995) feststellen, dass eine durch Vokalkontraste innerhalb von Konsonant-Vokal-Phonemverbindungen ausgelöste P300 bei CI-Trägern in Latenz und Amplitude mit den Werten für Hörgesunde vergleichbar war. Die Eigenschaften der Komponente variierten dabei ebenso wie bei den Kontrollprobanden in Abhängigkeit vom Alter der Probanden. Allerdings wurden in dieser Studie keine Verbindungen zu den perzeptuellen Fähigkeiten der Patienten hergestellt.

Groenen et al. (2001) berichteten wiederum längere P300-Latenzen für eine Gruppe von postlingual ertaubten CI-Trägern im Vergleich zu normalhörenden Kontrollprobanden. Dies galt sowohl für Frequenzkontraste in reinen Tönen als auch für Vokalkontraste sowie für auf unterschiedlichen spektralen oder temporalen Informationen beruhende Konsonantenkontraste[19] innerhalb von Konsonant-Vokal-Phonemverbindungen. Die

[19]Die Manipulation der temporalen bzw. spektralen Merkmale erfolgte dabei ebenso wie bei Kraus et al. (1995) durch eine Veränderung der Stimmhaftigkeit bzw. des Artikulationsortes des Konsonanten (vgl. hierzu Fußnote 18).

durch den spektralen Konsonantenkontrast evozierte P300 wies bei den Patienten außerdem eine geringere Amplitude als bei Hörgesunden auf. Eine Korrelation der Amplitude der P300 mit den perzeptuellen Leistungen der Patienten ließ sich für den Frequenzkontrast und für den Vokalkontrast feststellen. Damit konnte in dieser Studie neben einer mit dem Sprachverständnis der CI-Träger relatierten Variation der Eigenschaften der P300-Komponente auch ein Zusammenhang dieser Eigenschaften mit der Diskriminierbarkeit der akustischen Stimuli nachgewiesen werden. Dieser Befund wurde zusätzlich dadurch bestätigt, dass für die nach Aussage der CI-Träger am schwierigsten zu diskriminierenden Konsonantenkontraste nicht bei allen Patienten eine P300 evoziert werden konnte. Oviatt und Kileny (1991) konnten ebenfalls beobachten, dass die Charakteristika der bei CI-Trägern evozierten P300-Komponente in Abhängigkeit von der Diskriminierbarkeit der verwendeten akustischen Stimuli variierten. Die Autoren berichteten, dass bei den Patienten für geringe Frequenzdifferenzen längere Latenzen der P300 zu verzeichnen waren als für größere und damit besser zu diskriminierende Frequenzdifferenzen. Für die untersuchten Normalhörenden ließ sich eine solche Abhängigkeit der Latenz der P300-Komponente von der Größe der Frequenzabweichung nicht nachweisen. Insgesamt waren die Latenzen der P300 für geringe Frequenzdifferenzen bei den Patienten länger als bei den Hörgesunden, für den größten Frequenzkontrast konnten hingegen keine Unterschiede beobachtet werden.

Kaga, Kodera, Hirota und Tsuzuku (1991) berichteten in einer Einzelfallstudie über Veränderungen der P300-Komponente bei zunehmender CI-Tragedauer. Während drei Monate nach der Operation bei dem Patienten sowohl für Frequenzdifferenzen als auch für eine sprachliche Kontrastbedingung (kurze Wörter) nur leichte Anzeichen für das Vorhandensein der Komponente zu beobachten waren, zeigte sich ein halbes Jahr nach der Implantation für beide Stimulusarten eine klar identifizierbare Komponente, die mit einer Verbesserung des Sprachverständnisses der Patienten einherging. Von Kubo et al. (2001) konnte des Weiteren gezeigt werden, dass eine für CI-Träger zu beobachtende Korrelation zwischen Sprachverständnis und P300-Latenz (siehe oben) im Verlauf der CI-Rehabilitation nicht nur bestehen blieb sondern sich auch verstärkte. Die Veränderung der P300 in Abhängigkeit von der CI-Tragedauer wurde auch in einer Studie von Jordan et al. (1997) untersucht. Die Autoren konnten sowohl bei postlingual ertaubten CI-Trägern als auch bei prälingual ertaubten Patienten eine P300 evozieren, welche eine breitere Streuung als bei Normalhörenden aufwies. Die breitere Verteilung der Komponente blieb zumeist auch mit zunehmender Zeit nach der Implantation und bei steigenden perzeptuellen Fähigkeiten der Patienten erhalten.

Die P300-Komponente konnte auch bei Kindern mit CI beobachtet werden (Kileney, 1991; Kileny et al., 1997). Von Kileney (1991) wurde berichtet, dass die Komponente dabei bei einem CI-Kind eine ausgeprägtere Amplitude und eine längere Latenz aufwies. Kileny et al. (1997) konnten feststellen, dass bei CI-Kindern sowohl durch Frequenz- und Lautstärkekontraste in reinen Tönen als auch durch Vokalkontraste innerhalb einsilbiger Wörter eine P300 evoziert werden konnte, wobei die sprachevozierten Potentiale aber im Vergleich zu den tonevozierten Potentialen verlängerte Latenzen aufwiesen. Einen solchen Effekt berichteten die Autoren auch für normalhörende Erwachsene. Des Weiteren beobachteten Kileny et al. (1997), dass die individuellen Sprachverstehensfähigkeiten der Kinder mit den Eigenschaften der P300 korrelierten, wobei bessere perzeptuelle Leistungen mit einer kürzeren Latenz und einer größeren Amplitude einhergingen.

Insgesamt zeigen die Befunde der einzelnen Studien, dass sich die P300 als Korrelat aktiver auditorischer Diskriminationsprozesse sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen mit CI evozieren lässt. Die Daten lassen den Schluss zu, dass Latenz und Amplitude der Komponente mit den Perzeptionsfähigkeiten der Patienten relatiert sind. So wurde mehrfach berichtet, dass ein geringeres Sprachverstehen bei CI-Trägern mit einer gegenüber Normalhörenden verlängerten Latenz sowie einer verminderten Ausprägung der Amplitude der P300 einhergehen kann. Die mangelnde Fähigkeit zur Identifikation von abweichenden Reizen bei CI-Trägern kann sich jedoch auch in der Abwesenheit der Komponente widerspiegeln. In verschiedenen Studien zeigte sich überdies, dass auch die Diskriminierbarkeit der akustischen Reize einen Einfluss auf die Ausprägung der P300 bei CI-Trägern hat.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ereigniskorrelierte Potentiale bei Cochlea-Implantat-Trägern bisher primär zur Untersuchung der Hörwahrnehmung mit CI im Sinne der Verarbeitung einfacher akustischer Parameter wie Frequenz, Intensität oder Dauer eingesetzt wurden, wobei einige Studien sich bereits auch mit höheren Prozessen wie der Phonemdiskrimination beschäftigt haben. Sowohl die exogenen Potentiale N1 und P2 als auch die endogenen Komponenten MMN und P300 konnten bei CI-Patienten evoziert werden. Das weist darauf hin, dass die Prozesse, die der Wahrnehmung und Diskrimination akustischer Reize zugrunde liegen, bei CI-Trägern trotz des veränderten akustischen Inputs die gleichen sein können wie bei Hörgesunden. Allerdings ließ sich verschiedentlich feststellen, dass bei einigen CI-Trägern die EKP-Korrelate der auditorischen Verarbeitungsprozesse nicht ausgelöst werden konnten, was besonders die kognitiven Komponenten MMN und P300 betraf. Verschiedene Studien berichteten zudem

veränderte Latenzen oder Amplituden sowohl des N1-P2-Komplexes als auch der Mismatch Negativity und der P300 insbesondere bei CI-Trägern, welche über ein eher eingeschränktes Hörverständnis verfügen. Hierin deuten sich Abweichungen hinsichtlich der der Hörverarbeitung zugrunde liegenden Mechanismen bei diesen Patienten an, die aber eher quantitativer Natur – beispielsweise im Sinne längerer Verarbeitungszeiten – sind.

Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass die Prozesse der Wahrnehmung und Verarbeitung einfacher akustischer Reize bei CI-Trägern in Abhängigkeit von den individuellen Hörverstehensfähigkeiten verändert sein können, wobei ereigniskorrelierte Potentiale prinzipiell in der Lage zu sein scheinen, diese interindividuellen Unterschiede zwischen den Patienten zu reflektieren.

3.5 Zusammenfassung

Die mit hoher Geschwindigkeit ablaufenden Prozesse der kognitiven Informationsverarbeitung können durch die Messung ereigniskorrelierter Potentiale in adäquater Weise erfasst und abgebildet werden. Die EKP-Methode hat sich in einer Vielzahl von Studien auch für die Prozesse des Sprachverstehens als sensibel erwiesen, wobei die hohe Zeitauflösung der ereigniskorrelierten Potentiale es ermöglichte, die hirnelektrischen Korrelate der einzelnen Teilprozesse des Satzverstehens zu identifizieren und ihre funktionellen Charakteristika zu spezifizieren. Es konnte gezeigt werden, dass ereigniskorrelierte Potentiale sowohl systematisch mit der Verarbeitung semantischer Informationen variieren (N400) als auch mit der Verarbeitung syntaktischer Informationen korreliert sind (ELAN / LAN; P600).

Bei CI-Trägern wurden ereigniskorrelierte Potentiale bislang hauptsächlich zur Erforschung der primären auditiven Hörverarbeitungsprozesse eingesetzt, d. h. es wurde vor allem die Hörwahrnehmung mit CI im Sinne der Verarbeitung einfacher akustischer Parameter wie Frequenz oder Intensität untersucht. Einige Studien haben sich aber auch schon mit der Verarbeitung komplexerer Reize auf der Phonemebene befasst. Es konnte demonstriert werden, dass sich die Hörverarbeitung von CI-Trägern von der Hörverarbeitung Normalhörender unterscheiden kann, was sich in abweichenden Latenzen oder Amplituden sowohl der exogenen ereigniskorrelierten Potentiale N1 und P2 als auch der kognitiven Potentiale MMN und P300 widerspiegelte.

Da sich damit gezeigt hat, dass ereigniskorrelierte Potentiale in der Lage sind, abweichende Muster der auditiven Verarbeitung bei CI-Trägern aufzuzeigen, kann die Methode

auch als potentiell erfolgversprechend zur Erfassung der Mechanismen des *Satzverstehens* bei CI-Trägern gelten. Nachfolgend sollen fünf Experimente vorgestellt werden, in denen die Prozesse der Satzverarbeitung bei postlingual ertaubten erwachsenen CI-Trägern mit Hilfe ereigniskorrelierter Hirnpotentiale untersucht wurden. Vergleichbare Studien, welche sich bereits mit dieser Thematik befasst haben, wurden in der Literatur bislang nicht berichtet.

Kapitel 4
Überblick über die Experimente I bis V

Ziel der nachfolgend berichteten Experimente war es, anhand der Messung ereigniskorrelierter Hirnpotentiale zu untersuchen, welche Mechanismen dem Sprachverstehen bei postlingual ertaubten erwachsenen CI-Trägern zugrunde liegen. Wie im zweiten Kapitel dieser Arbeit aufgezeigt wurde, kann ein Cochlea-Implantat die hochkomplexe Arbeitsweise des gesunden Hörorgans nur annäherungsweise ersetzen. Die Kodierung des akustischen Sprachsignals in elektrische Impulse geht deshalb immer mit einem Verlust an akustischer Information einher, weshalb selbst für sehr erfolgreiche CI-Träger eine eingeschränkte Hörwahrnehmung angenommen werden muss. Es ist zu vermuten, dass eine derart eingeschränkte Hörwahrnehmung auch Veränderungen im Prozess des auditiven Sprachverstehens nach sich zieht. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse einer Pilotstudie gestützt, in der für CI-Träger hinsichtlich der Verarbeitung syntaktischer Informationen Abweichungen gegenüber Normalhörenden im Sinne einer vorrangig semantisch-lexikalischen Verarbeitung festgestellt wurden (Hahne, Wolf, Kiefer & Müller, 2001; Wolf, 2000).

Die Prozesse des Satzverstehens bei CI-Trägern sollten durch die systematische Variation verschiedener sprachlicher Informationstypen nun genauer untersucht werden. Im Mittelpunkt aller Experimente stand dabei die Frage nach der Verarbeitung *syntaktischer* Information. Diese Schwerpunktsetzung ging zum einen auf die Befunde der Pilotstudie zurück. Sie basierte aber auch auf der Überlegung, dass von der durch die CI-Technik bedingten Reduzierung des akustischen Inputs vor allem die akustisch nur wenig salienten Elemente der gesprochenen Sprache betroffen sind, welche wiederum häufig syntaktische Informationen kodieren (z. B. unbetonte Präpositionen, Flexionen etc.). Als zentrale Hypothese dieser Arbeit galt somit die Annahme, dass Abweichungen im Prozess des Satzverstehens bei CI-Trägern vorrangig diejenigen Teilprozesse des Sprachverstehens betreffen sollten, welche die Wahrnehmung von im akustischen Sprachsignal nur wenig prominenten Elementen voraussetzen. Unterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden wurden damit eher auf syntaktischer Ebene als auf semantischer Ebene er-

wartet. Des Weiteren sollten syntaktische Informationen, welche für die Patienten leichter aus dem akustischen Sprachsignal zu extrahieren sind, möglicherweise eher ähnlich wie bei Hörgesunden verarbeitet werden als syntaktische Informationstypen, deren auditive Perzeption den Patienten größere Probleme bereitet. Zur Überprüfung dieser Annahmen wurden insgesamt fünf Experimente durchgeführt, in denen die Verarbeitung von semantischer Information sowie von verschiedenen, im akustischen Sprachsignal unterschiedlich prominenten syntaktischen Informationstypen getestet wurde.

Experiment I geht der Frage nach, ob sich für die auditive Verarbeitung von syntaktischer Information über die Phrasenstruktur anhand abweichender Muster im EKP Unterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden nachweisen lassen. Des Weiteren wird überprüft, ob entsprechend der eingangs formulierten Hypothesen vergleichbare EKP-Muster für CI-Träger und Hörgesunde für die auditive Verarbeitung von semantischer Information zu beobachten sind.

Experiment II dient als Vergleichsexperiment zu Experiment I, indem die Stimuli aus diesem Experiment visuell präsentiert werden. Damit soll geprüft werden, ob Abweichungen im Satzverstehensprozess bei CI-Trägern auf die akustische Modalität beschränkt sind oder ob der eingeschränkte akustische Input modalitätsübergreifende Veränderungen im Sprachverstehenssystem zur Folge haben kann.

Experiment III soll die Mechanismen bei der auditiven Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation spezifizieren. Durch die Verwendung von Pseudowort-Sätzen soll dabei die vorrangige Verarbeitung von semantisch-lexikalischer Information, wie sie sich für die CI-Träger in der Pilotstudie angedeutet hatte, unterbunden werden. Fraglich ist, ob die Nicht-Interpretierbarkeit der Sätze auf der semantischen Ebene dazu führt, dass die Verarbeitung der Phrasenstrukturinformation bei den CI-Trägern in ähnlicher Weise wie bei Normalhörenden stattfindet. In diesem Fall wären vergleichbare EKP-Muster für CI-Träger und Normalhörende zu erwarten.

Experiment IV testet mit der auditiven Verarbeitung von Subkategorisierungsinformation von Verben – welche in Form von Stelligkeitsinformation untersucht wird – einen weiteren Aspekt syntaktischer Informationsverarbeitung bei CI-Trägern. Da es sich hierbei um einen akustisch eindeutigeren syntaktischen Informationstyp handelt als bei der in den Experimenten I und III untersuchten Phrasenstrukturinformation, sollte die relevante syntaktische Information für die Patienten leichter aus dem akustischen Sprachsignal zu extrahieren sein. Dementsprechend wären bei ihnen ähnliche Verarbeitungsprozesse wie bei Normalhörenden zu erwarten. Das Experiment hat außerdem zum Ziel, die Prozesse der semantischen Informationsverarbeitung zu spezifizieren. Hierzu wird überprüft, ob

sich die Befunde aus Experiment I hinsichtlich der Verarbeitung semantischer Anomalien replizieren lassen und ob sich auch hinsichtlich des Einflusses der Vorhersagbarkeit bzw. der kontextuellen Passung eines Wortes ähnliche Verarbeitungsprozesse für CI-Träger und Normalhörende nachweisen lassen.

Experiment V untersucht mit der Verarbeitung von Pluralmarkierungen an Nomen einen syntaktischen Verarbeitungsprozess auf Morphemebene. Ausgehend von der Hypothese, dass abweichende Verarbeitungsprozesse bei CI-Trägern vor allem syntaktische Informationstypen betreffen, deren auditive Perzeption den CI-Trägern Probleme bereitet, sind für die Verarbeitung der im akustischen Sprachsignal nur wenig prominenten Pluralmarkierungen Unterschiede zwischen CI-Trägern und Hörgesunden zu erwarten.

Da die Spezifizierung der Prozesse der Satzverarbeitung bei CI-Trägern auf der Basis eines Vergleichs mit Normalhörenden erfolgen sollte, wurden neben den Daten für die Patientengruppe auch die Daten für eine Gruppe von normalhörenden, hinsichtlich ihres Alters mit den Patienten übereinstimmenden Kontrollprobanden erhoben. Um dabei für die Kontrollgruppe möglichst genaue Vorhersagen treffen zu können, kamen nur Experimente zum Einsatz, die in dieser oder ähnlicher Form zuvor bereits mit hörgesunden studentischen Probanden durchgeführt worden waren[1].

Es wurde versucht, die Methodik der Datenerhebung und -auswertung für alle Experimente vergleichbar zu halten. Die entsprechenden Parameter werden für das Experiment I ausführlich beschrieben, für die folgenden Experimente werden dementsprechend nur noch Abweichungen gegenüber diesen Parametern ausführlich dargestellt.

[1] Das Material für die Experimente I bis IV wurde mir von Anja Hahne zur Verfügung gestellt, bei der ich mich dafür herzlich bedanken möchte. Das Material für Experiment V wurde mir von Monika Lück zur Verfügung gestellt, ihr gilt ebenfalls mein herzlicher Dank.

Kapitel 5
Experiment I: Auditive Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation und von semantischer Information

5.1 Fragestellung und Hypothesen

Das Experiment I zielte darauf ab, die Prozesse der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation während des auditiven Satzverstehens bei CI-Trägern zu untersuchen. Zusätzlich sollte geprüft werden, ob mögliche Abweichungen hinsichtlich der Mechanismen des Satzverstehens bei den Patienten auch die Verarbeitung semantischer Information betreffen. Dementsprechend wurden in dem Experiment Sätze präsentiert, welche entweder eine Verletzung der Phrasenstruktur oder eine semantische Anomalie enthielten.

In einer früheren Pilotstudie (Hahne et al., 2001; Wolf, 2000) hatte sich angedeutet, dass die Patienten beim auditiven Satzverstehen möglicherweise weniger auf Informationen über die Phrasenstruktur zurückgreifen. Darauf ließ das Fehlen der bei normalhörenden Probanden als hirnelektrisches Korrelat syntaktischer Korrektur- bzw. Reanalyseprozesse beobachtbaren P600-Komponente schließen[1]. Eine stattdessen aufgetretene N400-ähnliche Negativierung war als Anzeichen für semantische Kompensationsprozesse, die durch die Verständnisprobleme mit einem Cochlea-Implantat bedingt sind, gewertet worden. Im vorliegenden Experiment sollte diese bisher nur unvollständig belegte Annahme nun anhand einer hinreichend großen Patientenstichprobe überprüft werden.

Für die Kontrollprobanden wurde eine Replikation der aus früheren Studien (z. B. Hahne & Friederici, 1999) bekannten Effekte erwartet. Damit sollte in dieser Gruppe durch die semantische Verletzung eine N400-Komponente evoziert werden, wohingegen die Verarbeitung der Phrasenstrukturverletzung mit einer frühen links-anterioren Nega-

[1] Wie in Abschnitt 5.3.2.3 ausführlich dargelegt werden wird, kann über das Vorhandensein einer ELAN-Komponente bei CI-Trägern aufgrund einer nur eingeschränkt möglichen Auswertung der EKP-Daten bei diesen Patienten (vgl. Abschnitt 5.2.4) keine Aussage getroffen werden.

tivierung (ELAN) sowie einer nachfolgenden P600-Komponente einhergehen sollte. Als Korrelat der semantischen Verarbeitung bei den CI-Trägern wurde ebenso wie bei Hörgesunden eine N400-Komponente vorhergesagt. Diese Annahme basierte auf der Überlegung, dass die Detektion der in diesen Sätzen enthaltenen semantischen Verletzungen, welche auf der Verbposition (siehe Abschnitt 5.2.1) und damit auf einem betonten Satzelement realisiert wurden, für die Patienten relativ unproblematisch sein sollte. Somit wären auch keine Abweichungen hinsichtlich der Verarbeitung der semantisch inkorrekten Sätze zu erwarten. Hingegen war aufgrund der Daten der Pilotstudie fraglich, ob die Phrasenstrukturverletzung bei den Patienten eine P600-Komponente evozieren würde. Wenn sich die früheren Ergebnisse bestätigen ließen, sollte bei den CI-Trägern für diese syntaktisch inkorrekten Sätze vielmehr eine N400-ähnliche Negativierung beobachtbar sein.

5.2 Methoden

5.2.1 Stimulusmaterial

Das Experiment, in welchem das Stimulusmaterial aus einer Studie von Hahne (2001) zum Einsatz kam, umfasste drei experimentelle Bedingungen. Neben (a) korrekten Sätzen wurden (b) semantisch inkorrekte Sätze sowie (c) syntaktisch inkorrekte Sätze präsentiert (vgl. Tabelle 5.1). Die semantisch inkorrekten Sätze wurden dabei durch eine Verletzung der semantischen Selektionsbeschränkung des jeweiligen Verbs realisiert. Hingegen bestand die syntaktische Verletzung in einer Fehlerhaftigkeit der Phrasenstruktur. In diesen Sätzen hätte die auf das Auxiliar („*wurde*“) folgende Präposition korrekterweise eine vollständige, aus Präposition und Nominalphrase bestehende Präpositionalphrase einleiten müssen. Da nach der Präposition jedoch anstelle der erwarteten Nominalphrase ein Partizip realisiert wurde, lag hier eine unvollständige Präpositionalphrase vor, womit es sich um eine inkorrekte Phrasenstruktur handelte. In allen experimentellen Bedingungen stellte das Partizip am Satzende das kritische Wort dar, welches über die Korrektheit bzw. Inkorrektheit des jeweiligen Satzes entschied. Im Experiment wurden neben den Sätzen der experimentellen Bedingungen auch (d) Füllsätze mit vollständigen Präpositionalphrasen verwendet. Damit wurde sichergestellt, dass nicht bereits auf der Präposition erkennbar war, ob es sich um einen korrekten oder inkorrekten Satz handelt. In die Auswertung wurden nur die experimentellen Bedingungen (a) bis (c) einbezogen.

Zur Erfassung der Prozesse der semantischen Informationsverarbeitung sollten die auf dem kritischen Wort der semantisch inkorrekten Sätze gemessenen ereigniskorrelierten

Tab. 5.1: *Übersicht über die in Experiment I vorkommenden Bedingungen und Beispielsätze. Das kritische Wort für die experimentellen Sätze ist durch Unterstreichung gekennzeichnet.*

Experimentelle Sätze		
(a)	korrekt	*Das Brot wurde gegessen.*
(b)	semantisch inkorrekt	**Der Vulkan wurde gegessen.*
(c)	syntaktisch inkorrekt	**Das Eis wurde im gegessen.*
Füllsätze		
(d)	korrekt (mit vollständiger PP)	*Die Pizza wurde im Restaurant gegessen.*

Potentiale mit der hirnelektrischen Aktivität auf das kritische Wort der korrekten Sätze verglichen werden. Auf diesen Vergleich soll im Folgenden auch als *semantische Bedingung* referiert werden. Die Prozesse der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation sollten dagegen durch den Vergleich der auf dem kritischen Wort der syntaktisch inkorrekten Sätzen gemessenen ereigniskorrelierten Aktivität mit den hirnelektrischen Potentialen auf das kritische Wort der korrekten Sätzen erfasst werden. Dieser Vergleich soll im Folgenden auch als *syntaktische Bedingung* bezeichnet werden.

Jede der vier Bedingungen enthielt insgesamt 96 Sätze mit unterschiedlichen Partizipien transitiver Verben, wobei die verwendeten Partizipien, welche alle mit *„ge-“* begannen, über die Bedingungen hinweg identisch waren. Die Stimulussätze waren so auf zwei Listen verteilt, dass keiner der Sätze in beiden Listen enthalten war. Jeder Proband bekam im Experiment jeweils die Sätze einer Liste dargeboten. Damit hörte jeder Teilnehmer 48 Sätze pro Bedingung, wobei jedes der Partizipien nur zweimal und zwar jeweils in einer korrekten und in einer inkorrekten Bedingung vorkam[2].

Die Sätze wurden in randomisierter Reihenfolge von einer geübten Sprecherin mit normaler Sprechgeschwindigkeit eingesprochen. Die Aufnahme des gesamten Stimulusmaterials erfolgte zunächst im DAT-Format. Zur anschließenden Weiterbearbeitung wurden die Sätze digitalisiert (Sampling Rate: 44,1 kHz bei 16 bit) und in separaten Dateien

[2]Für die ersten zehn getesteten Patienten war im Experiment noch eine zusätzliche Bedingung mit einer kombinierten semantischen und syntaktischen Verletzung (Beispiel: *„*Das Türschloss wurde im gegessen.“*) enthalten. Um einen annähernd gleichen Anteil von korrekten und inkorrekten Sätzen zu gewährleisten sowie aus Gründen der Ausbalanciertheit der Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Auxiliar und Partizip bzw. Präposition gestaltete sich die Itemverteilung der in dieser Version des Experiments präsentierten Sätze folgendermaßen: 60 korrekte Items, 50 semantisch inkorrekte Items, 40 syntaktisch inkorrekte Items, 40 semantisch-syntaktisch inkorrekte Items sowie 50 Füllsätze. In die Auswertung gingen pro Bedingung 40 Items ein (vgl. Hahne & Friederici, 2002). Bei den nachfolgend getesteten Patienten wurde aus zeitlichen Gründen auf die Präsentation der semantisch-syntaktisch inkorrekten Bedingung verzichtet und das Experiment in der oben beschriebenen Form durchgeführt. Um die Ergebnisse der beiden Versionen vergleichbar zu halten, flossen jedoch auch für diese Patienten nur je 40 Items pro Bedingung in die Auswertung ein, und zwar die gleichen wie in der vorherigen Version des Experiments.

gespeichert. Jedes Wort innerhalb der Sätze wurde zuvor mit einer Markierung versehen, was eine exakte zeitliche Koordination von EEG-Aufzeichnung und Stimuluspräsentation gewährleistete. Die Sätze der syntaktisch inkorrekten Bedingung waren zur Vermeidung von prosodischen Effekten zunächst als Sätze mit einer vollständigen Präpositionalphrase gesprochen worden. Das Nomen der Präpositionalphrase wurde dann in der anschließenden digitalen Bearbeitung herausgeschnitten. Indem für diese Prozedur nur Nomen verwendet wurden, welche wie die kritischen Partizipien mit „*ge-*“ begannen, sollte verhindert werden, dass die akustischen Manipulationen durch unpassende Koartikulationseffekte erkennbar wurden (für eine genauere Beschreibung dieser Prozedur vgl. Hahne & Friederici, 1999).

5.2.2 Probanden

Am Experiment nahmen 30 CI-Träger mit gutem freiem Sprachverständnis sowie 30 hörgesunde Kontrollprobanden teil. Die Patienten (15 weiblich, 15 männlich) waren zum Zeitpunkt des Experiments zwischen 34 und 77 Jahren alt (Mittel 55 Jahre), die CI-Tragedauer betrug 0.8 bis 7.0 Jahre (Mittel 2.10 Jahre). Alle CI-Träger waren postlingual ertaubt. Genauere Angaben zu den einzelnen Patienten sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen[3]. Die Patienten wurden über eine Kooperation mit der HNO-Klinik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg (Dr. Joachim Müller) bzw. dem Zentrum für HNO der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt/Main (Dr. Jan Kiefer) rekrutiert. Die Kontrollprobanden entsprachen den CI-Trägern hinsichtlich des Geschlechts, des Alters ($\pm$ 3 Jahre) und soweit möglich auch hinsichtlich des Bildungsstands. Bei allen Versuchspersonen handelte es sich um deutsche Muttersprachler. Sowohl die CI-Träger als auch die Kontrollprobanden erhielten für ihre Teilnahme am Experiment eine Vergütung von 13 DM bzw. 7 EUR pro Stunde.

5.2.3 Versuchsdurchführung

Allgemein. Die Stimulussätze wurden den Probanden in einer schallisolierten Kabine akustisch über Lautsprecher präsentiert. Bei den CI-Trägern wurde die Lautstärke dabei individuell angepasst, um ein möglichst optimales Sprachverständnis zu erreichen. Für

[3]Da die Ertaubung bei vielen der CI-Träger auf einen progredienten Hörverlust zurückging, dessen Verlauf sich zeitlich häufig nur ungenau zurückverfolgen ließ, soll bei der Zusammenstellung der Patientendaten auf die Angabe des Ertaubungsalters verzichtet werden. Es kann jedoch angemerkt werden, dass ein hochgradiger Hörverlust bei allen Patienten erst nach der Pubertät einsetzte.

Tab. 5.2: *Zusammenfassung der Angaben zu den einzelnen CI-Trägern, die an den Experimenten 1 - 5 teilnahmen.*

VP	*Geschlecht*	*Alter*	*Ätiologie*	*CI-Typ*	*Kodierungs-strategie*	*CI-Seite*	*Alter bei Implantation*	*CI-Tragedauer in Monaten*	*Experimente*				
									1	*2*	*3*	*4*	*5*
01	m	63	Otosklerose	Nucleus CI 24m	CIS	re	62	16	X	X	X		
02	w	56	Hörsturz	Nucleus CI 24m	ACE	li	54	24	X	X	X		
03	m	57	evtl. Mittelohrentzündung	Nucleus CI 24m	ACE	li	55	18	X	X	X		
04	w	60	unbekannt	MED-EL Kombi40	CIS	re	59	8	X	X	X		
05	m	61	Neuroborelliose	MED-EL Kombi40	CIS	re	58	36	X	X			
06	m	58	Schädel-Hirn-Trauma	MED-EL Kombi40	CIS	re	53	60	X	X	X		
07	w	47	Hörsturz	Nucleus CI 24m	ACE	li	46	14	X	X	X	X	
08	w	44	erblich bedingt	MED-EL Kombi40+	CIS	li	42	24	X	X	X	X	
10	m	52	Hörsturz	MED-EL Kombi40	CIS	li (re: HG[a])	51	8	X	X	X	X	
11	m	51	Hörsturz	MED-EL Kombi40	CIS	bilateral	47	li: 48 / re: 5	X	X	X	X	X
13	m	35	Meningitis	MED-EL Kombi40	CIS	re	29	54	X		X		
14	w	40	re evtl. angeboren, beidseitig Hörstürze	MED-EL Kombi40	CIS	bilateral	36	li: 52 / re: 21	X	X	X		
15	m	48	Otosklerose	MED-EL Kombi40	CIS	bilateral	46	re: 29 / li: 17	X	X	X	X	X
16	w	34	S. aquaeductus vestibuli	MED-EL Kombi40	CIS	re (li: HG[a])	33	9	X	X	X	X	X
17	w	41	re evtl. angeboren, Meningitis	MED-EL Kombi40+	CIS	re (li: HG[a])	38	34	X	X	X	X	X
18	w	52	idiopathisch	MED-EL Kombi40	CIS	re	50	26	X				X
19	w	44	Otosklerose	MED-EL Kombi40	CIS	li	43	14	X	X		X	X
20	m	53	Meningitis	MED-EL Kombi40+	CIS	li	47	66	X			X	
21	m	63	Otosklerose	MED-EL Kombi40	CIS	bilateral	56	li: 84 / re: 72	X	X	X	X	X
23	w	52	unbekannt	MED-EL Kombi40+	CIS	li	48	48	X		X	X	X
24	m	65	unbekannt	MED-EL Kombi40+	CIS	re	60	54	X		X		X
25	w	63	unbekannt	MED-EL Kombi40+	CIS	li	60	32	X		X	X	X
26	m	74	M. menière	MED-EL Kombi40+	CIS	li	73	15	X		X		X
27	m	53	M. menière	MED-EL Kombi40+	CIS	li (re: HG[a])	53	9	X		X	X	X
28	w	77	M. menière	MED-EL Kombi40+	CIS	re	70	81	X		X		X
29	w	67	Hörsturz	MED-EL Kombi40+	CIS	re	64	38	X		X	X	
30	w	52	Meningitis bzw. Hörsturz	MED-EL Kombi40+	CIS	li	51	15	X		X		X
31	w	50	unbekannt	MED-EL Kombi40+	CIS	li	47	35	X		X	X	X
32	m	72	Hörsturz	MED-EL Kombi40+	CIS	li	keine Angabe	keine Angabe	X				
33	m	63	Otosklerose	MED-EL Kombi40+	CIS	re	59	45	X		X	X	X

[a] HG=Hörgerät

die Kontrollprobanden erfolgte die Präsentation hingegen einheitlich mit einer mittleren Lautstärke. Jeder Proband hörte 48 Sätze pro Bedingung. Die insgesamt 192 Sätze wurden blockweise in pseudorandomisierter Reihenfolge dargeboten, die Sätze waren dabei auf vier Blöcke zu je 48 Sätzen verteilt[4].

Die Probanden hatten die Aufgabe, nach jedem Satz mittels Tastendruck an einer Tastatur über die Korrektheit des Satzes zu urteilen. Damit sollte die Aufmerksamkeit der Teilnehmer auf die Stimulussätze sichergestellt werden. Gleichzeitig erlaubte die Auswertung dieser Daten auch eine Beurteilung der Verständnisleistungen insbesondere der Patienten. Sowohl CI-Träger als auch Kontrollprobanden erhielten vor Beginn des Experiments eine schriftliche Instruktion mit Beispielsätzen. Auf diese Weise konnte gewährleistet werden, dass auch die CI-Träger die Aufgabe vollständig erfasst hatten. Die Probanden wurden vor Beginn des Experiments instruiert, sich während der Präsentation der Sätze möglichst nicht zu bewegen. In der Regel erfolgte jedoch keine spezielle Instruktion hinsichtlich der Vermeidung von Augenbewegungen, da vor allem die CI-Träger ihre volle Aufmerksamkeit auf das Verstehen der Sätze richten sollten. Allerdings wurden die Probanden gebeten, ein auf einem Bildschirm eingeblendetes Zeichen ($*$) zu fixieren, wodurch die Augenbewegungen zumindest teilweise kontrollierbar blieben. Das Fixationszeichen erschien 500 ms vor Beginn jedes Satzes bis 3000 ms nach Satzende auf dem Monitor, welcher auf Augenhöhe in etwa 130 cm Abstand zum Probanden positioniert war. Im Anschluss wurde für 2000 ms ein Antwortbild eingeblendet, welches die Probanden dazu aufforderte, ihr Korrektheitsurteil abzugeben. Die Reaktionszeiten wurden ab dem Beginn der Einblendung des Antwortbildes gemessen. Die beiden Icons, aus denen sich das Antwortbild (☺ ☹) zusammensetzte, erinnerten daran, dass für korrekte Sätze die rechte Taste und für inkorrekte Sätze die linke Taste zu drücken war. Nach einem Interstimulusintervall von 1500 ms folgte der nächste Trial. Die Präsentation wurde ebenso wie in allen folgenden Experimenten mit Hilfe der Experimentalsoftware *ERTS*[5] gesteuert.

Zu Beginn des Experiments wurden den Probanden 15 Beispielsätze präsentiert, um sie mit dem Versuchsablauf vertraut zu machen. Die Beispielsätze wurden wenn nötig wiederholt. Anschließend bearbeiteten die Probanden die experimentellen Blöcke. Zwischen den Blöcken bestand die Gelegenheit zu kurzen Erholungspausen. Das Experiment dauerte ohne die EEG-Vorbereitung etwa 45 Minuten.

[4] In der mit den ersten zehn CI-Trägern durchgeführten Version des Experiments, welche zusätzlich die kombiniert semantisch-syntaktische Bedingung enthielt (vgl. Fußnote 2), wurden die insgesamt 240 Sätze in fünf Blöcken mit jeweils 48 Sätzen dargeboten.

[5] *Experimental Run Time System* (Beringer, 1993).

Elektrophysiologische Ableitung. Das EEG wurde mit Silber/Silberchlorid-Elektroden abgeleitet, die in einer Haube der Firma *Electro Cap International* befestigt waren. Die Ableitung erfolgte von 19 Skalpelektroden, wobei entsprechend der Erweiterung des 10-20-Systems von Jaspers nach den Konventionen der American Electroencephalographic Society (AESN) die Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, F3, F4, F7, F8, BL, BR, ATL, ATR, WL, WR, P3, P4, P7, P8, O1 und O2 verwendet wurden (vgl. Abbildung 3.1). Die auf ihre Lage über der Broca- bzw. der Wernicke-Region referierenden Positionsbezeichnungen BL, BR, WL, WR, ATL und ATR entsprechen dabei in etwa den Positionen FC3 bzw. FC4 (BL bzw. BR), CP5 bzw. CP6 (WL bzw. WR) und FT7 bzw. FT8 (ATL bzw. ATR) nach AESN. Der Widerstand zwischen Elektrode und Kopfhaut wurde unter 5 kΩ gehalten. Zur EEG-Aufzeichnung wurden zwei Gleichspannungsverstärker der Firma *Neuroscan* mit integriertem 40 Hz-Tiefpass-Filter verwendet, die Ableitung erfolgte monopolar mit einer Abtastrate von 250 Hz.

Als Referenz diente bei den Kontrollprobanden der linke Mastoid; zusätzlich fand eine Ableitung über dem rechten Mastoid statt, was eine anschließende Re-Referenzierung über die beiden Mastoid-Ableitungen erlaubte (vgl. Abschnitt 3.1.2). Bei den CI-Trägern befand sich die Referenz jeweils auf dem Mastoid der dem CI gegenüberliegenden Seite. Hier konnte keine Re-Referenzierung vorgenommen werden, da eine Mastoid-Ableitung in unmittelbarer Nähe des CI-Systems in der Regel nicht möglich war. Allerdings war für die Gesamtgruppe der CI-Träger in etwa eine Gleichverteilung von linker bzw. rechter Mastoid-Referenz gegeben, womit eine Beeinflussung der Lateralisierung von Effekten weitgehend ausgeschlossen werden kann.

Zur Kontrolle von Augenbewegungen und Lidschlagaktivität wurde zusätzlich eine bipolares Elektrookulogramm (EOG) aufgezeichnet. Die Messung horizontaler Augenbewegungen (EOGH) erfolgte dabei mit Hilfe zweier Elektroden, die am äußeren Rand des linken bzw. des rechten Auges angebracht waren, die Elektroden zur Erfassung der vertikalen Augenaktivität (EOGV) wurden dagegen in Pupillenhöhe ober- bzw. unterhalb des rechten Auges befestigt.

5.2.4 Datenanalyse

Verhaltensdaten. Es wurden zunächst für jede Bedingung die mittleren Reaktionszeiten sowie die mittlere Fehlerzahl, d. h. die mittlere Anzahl der inkorrekten Reaktionen in der Beurteilungsaufgabe pro Bedingung berechnet. Die Berechnung dieser Werte erfolgte getrennt für die Gruppe der CI-Träger und die Kontrollgruppe. In die Mittelwertberech-

nung für die Reaktionszeiten flossen dabei nur korrekt beantwortete Trials ein. Von der Analyse wurden auch Extremwerte ausgeschlossen, welche die 1,5-fache Standardabweichung innerhalb einer Versuchsperson oder innerhalb einer Bedingung überschritten.

Zur weiteren Auswertung von Reaktionszeiten und Fehlerzahlen wurden separat für die beiden Gruppen einfaktorielle Varianzanalysen mit dem Faktor BEDINGUNG gerechnet. Dieser Faktor war entsprechend der experimentellen Bedingungen dreifach gestuft (korrekt / semantisch inkorrekt / syntaktisch inkorrekt). Ergab sich dabei ein signifikanter oder marginal signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG ($p < .05$ bzw. $p < .10$), wurde im Rahmen von t-Tests geprüft, welche der Bedingungen sich signifikant voneinander unterschieden. Anschließend wurden Reaktionszeiten und Fehlerzahlen im Rahmen einer zweifaktoriellen Varianzanalyse auf Gruppenunterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollprobanden überprüft. Diese Analysen enthielten mit den Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE jeweils zwei unabhängige Variablen, wobei der Faktor BEDINGUNG wiederum dreifach gestuft war (korrekt / semantisch inkorrekt / syntaktisch inkorrekt), der Faktor GRUPPE hingegen war zweifach gestuft (CI-Träger / Kontrollen). Konnten in dieser Analyse signifikante oder marginal signifikante Effekte des Faktors GRUPPE festgestellt werden, so wurde in einer weiteren F-Statistik geprüft, auf welche Bedingungen sich diese Gruppenunterschiede zurückführen ließen. Die statistische Analyse der behavioralen Daten wurde mit Hilfe des Softwarepakets *SPSS* vorgenommen.

EKP-Daten. Die EEG-Rohdaten wurden zunächst einem Verfahren unterzogen, durch welches eine automatische Kennzeichnung aller artefaktbehafteten Abschnitte im EEG erfolgte. Da für die Probanden keine Instruktion auf Vermeidung von Augenbewegungen erfolgt war (vgl. 5.2.3), waren die meisten experimentellen Trials durch Augenbewegungsartefakte beeinflusst. Aus diesem Grund wurde für jeden Probanden einzeln eine manuelle Korrektur der durch Augenbewegungsartefakte beeinflussten Trials vorgenommen. Trials, die nicht-korrigierbare Augenbewegungsartefakte oder anderweitig verursachte Artefakte (z. B. durch Kopfbewegungen) enthielten, wurden ebenso wie Trials mit inkorrekten Antworten in der Beurteilungsaufgabe von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Die ereigniskorrelierten Potentiale wurden für 1500 ms ab dem Beginn des kritischen Wortes gemittelt. Die Mittelung erfolgte pro Bedingung pro Elektrode zunächst für die einzelnen Probanden und im Anschluss über alle Probanden einer Gruppe (*Grand Average*). Alle Mittelungen wurden relativ zu einer 100 ms poststimulus-Baseline[6] vorgenommen. Zur

[6]Da sich die dem kritischen Wort (Partizip) vorausgehenden Wörter hinsichtlich ihrer Wortkategorie unterschieden, erschien eine sonst übliche prästimulus-Baseline hier nicht geeignet. Eine solche poststimulus-Baseline wurde bereits in früheren Studien verwendet (vgl. z. B. Hahne & Friederici, 1999, 2002; Neville et al., 1991).

Bearbeitung der EEG/EKP-Daten wurde ebenso wie in allen nachfolgenden Experimenten die Software *EEP 3.0-3.2/Unix*[7] genutzt.

Für die quantitative Analyse der gemittelten ereigniskorrelierten Potentiale wurden Varianzanalysen über die Amplitudenmittelwerte in festgelegten Zeitbereichen gerechnet. Die Bestimmung der Zeitfenster erfolgte auf der Basis der deskriptiven Analyse, sie orientierte sich aber ebenfalls an den in der Literatur berichteten Zeitfenstern für die entsprechenden Verletzungen. Um zu prüfen, ob reliable Mittelwertsunterschiede zwischen den miteinander zu vergleichenden experimentellen Bedingungen (korrekt vs. semantisch inkorrekt bzw. korrekt vs. syntaktisch inkorrekt) vorlagen, wurde streng hierarchisch vorgegangen.

Für die Kontrollgruppe wurde zunächst eine statistische Analyse vorgenommen, welche alle gemessenen Elektrodenpositionen umfasste. Dabei erfolgte die Auswertung für die Mittellinienelektroden getrennt von der für die lateralen Elektrodenpositionen. Für die lateralen Elektroden wurde eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren BEDINGUNG (zweifach gestuft: korrekt / semantisch inkorrekt bzw. korrekt / syntaktisch inkorrekt), REGION (zweifach gestuft: anterior / posterior) und HEMISPHÄRE (zweifach gestuft: links / rechts) gerechnet. Durch Kreuzung der beiden topographischen Faktoren ergaben sich vier *Regions of Interest* (ROIs) mit jeweils vier Elektroden: links-anterior (F7, F3, ATL, BL), rechts-anterior (F8, F4, ATR, BR), links-posterior (WL, P7, P3, O1) und rechts-posterior (WR, P8, P4, O2), wobei die einzelnen *Regions of Interest* im Folgenden auch als Quadranten bezeichnet werden. Erreichte eine der Interaktionen, welche den Faktor BEDINGUNG einschlossen, in dieser globalen Analyse Signifikanzniveau ($p < .05$) oder wurde marginal signifikant ($p < .10$), so wurden weitere Analysen auf Quadrantenebene durchgeführt. In diesem Fall wurden für jeden der vier Quadranten separate zweifaktorielle Varianzanalysen gerechnet, welche die Faktoren BEDINGUNG (zweifach gestuft: korrekt / semantisch inkorrekt bzw. korrekt / syntaktisch inkorrekt) und ELEKTRODE (vierfach gestuft: F7 / F3 / ATL / BL bzw. F8 / F4 / ATR / BR bzw. WL / P7 / P3 / O1 bzw. WR / P8 / P4 / O2) enthielten. Traten dabei signifikante oder marginal signifikante Interaktionen zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE auf, wurden für die einzelnen Elektrodenpositionen des jeweiligen Quadranten t-Tests für den Vergleich der korrekten mit der semantisch bzw. syntaktisch inkorrekten Bedingung gerechnet. Für die Mittellinienelektroden wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, welche die Faktoren BEDINGUNG (zweifach gestuft: korrekt / semantisch inkorrekt bzw. korrekt / syntaktisch inkorrekt) und ELEKTRODE (dreifach gestuft: FZ / CZ / PZ) enthielt. Bei

[7] *EEP - ERP Evaluation Package* (Pfeifer, Nowagk & Grigutsch, 1996-2002).

signifikanter oder marginal signifikanter Interaktion der beiden Faktoren wurden wiederum t-Tests für die einzelnen Elektrodenpositionen der Mittellinie berechnet.

Für die Gruppe der CI-Träger konnten nicht alle der gemessenen Elektrodenpositionen in die quantitative Analyse der gemittelten EKP-Daten einbezogen werden. Das war durch den Umstand bedingt, dass die Ableitung auf den lateralen Elektroden, welche sich über der implantierten Hemisphäre befanden, häufig durch die Nähe zum Implantat gestört war. Die im folgenden als CI-Artefakte bezeichneten Störungen traten allerdings nicht bei allen CI-Trägern gleichermaßen auf. Es ist bisher ungeklärt, ob die CI-Artefakte durch das von Senderspule zu Empfängerspule übertragene Hochfrequenzsignal hervorgerufen werden oder ob als ihre Ursache eher die von der intracochleären Elektrode ausgesandten Stromimpulse in Betracht zu ziehen sind. Ähnliche Probleme bei der EEG-Ableitung bei CI-Trägern sind auch aus anderen Forschergruppen bekannt (Michael Dorman, pers. Mitteilung). In die statistische Analyse für die Gruppe der CI-Träger konnten aus diesem Grund nur die Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 einbezogen werden. Es wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse gerechnet, welche die Faktoren BEDINGUNG (zweifach gestuft: korrekt / semantisch inkorrekt bzw. korrekt / syntaktisch inkorrekt) und ELEKTRODE (fünffach gestuft: FZ / CZ / PZ / O1 / O2) enthielt. Bei einer mindestens marginal signifikanten Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE wurde diese mittels entsprechender t-Tests aufgelöst. Eine solche nur fünf Elektrodenpositionen beinhaltende Analyse wurde ebenfalls zusätzlich für die Kontrollgruppe durchgeführt. Damit sollte überprüft werden, ob sich die fraglichen Effekte auch nachweisen lassen, wenn nur die Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 in die Auswertung eingehen,

Alle statistischen Analysen wurden über ungefilterte EKP-Daten gerechnet, die gemittelten EKPs wurden in den nachfolgenden Abbildungen lediglich zu Darstellungszwecken einer 8 Hz-Tiefpass-Filterung unterzogen. Des Weiteren ist anzumerken, dass im Folgenden nur Haupteffekte oder Interaktionen berichtet werden, die den Faktor BEDINGUNG enthielten, da Haupteffekte oder Interaktionen, die sich nur auf topographische Faktoren bezogen, für die Dateninterpretation nicht von Interesse waren. Bei Berechnungen von Effekten, in die Faktoren mit mehr als einem Zählerfreiheitsgrad eingingen, wurde zur Kompensation von Verletzungen der Zirkularitätsannahme, die als Voraussetzung der Varianzanalyse gilt, eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Geisser und Greenhouse (1958) vorgenommen. Alle statistischen Analysen für die EKP-Daten erfolgten unter Zuhilfenahme des Softwarepakets *SAS*.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Verhaltensdaten

Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Fehlerraten und Reaktionszeiten in der Kontrollgruppe und in der Gruppe der CI-Träger sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tab. 5.3: *Mittlere Reaktionszeiten in Millisekunden und prozentuale Fehlerraten für die einzelnen Bedingungen im Vergleich für CI-Träger und normalhörende Kontrollprobanden. Die jeweiligen Standardabweichungen sind in Klammern angegeben.*

	Kontrollen		CI-Träger	
	Reaktionszeit	*Fehlerrate*	*Reaktionszeit*	*Fehlerrate*
korrekt	465(146)	1.2 (1.9)	477(166)	8.2 (7.5)
semantisch inkorrekt	478(167)	3.2 (4.2)	497(173)	8.6 (7.8)
syntaktisch inkorrekt	466(162)	2.5 (6.0)	534(212)	30.0 (26.0)

Für die Kontrollgruppe konnte in der Varianzanalyse über die Fehlerdaten kein signifikanter Effekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt werden ($F(2,58) = 1,61, p = .21, MS_e = 19$), jedoch ergab sich für die Reaktionszeiten ein tendenziell signifikanter Haupteffekt dieses Faktors ($F(2,58) = 2,58, p = .09, MS_e = 575$). Dieser ließ sich darauf zurückführen, dass die Reaktionszeiten auf semantisch inkorrekte Sätze signifikant länger waren im Vergleich zu syntaktisch inkorrekten Sätzen ($t(29) = 2,07, p < .05$) sowie tendenziell länger im Vergleich zu korrekten Sätzen ($t(29) = 1,89, p = .07$).

Im Gegensatz zur Kontrollgruppe zeigte sich für die CI-Gruppe in der Varianzanalyse über die Fehlerzahlen ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG ($F(2,58) = 21,85, p < .001, MS_e = 212$), was darauf zurückging, dass in der syntaktisch inkorrekten Bedingung signifikant mehr Fehler zu verzeichnen waren als in der korrekten Bedingung ($t(29) = 4,75, p < .001$) und in der semantisch inkorrekten Bedingung ($t(29) = 4,94, p < .001$). Auch in der Analyse über die Reaktionszeiten ergab sich ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG ($F(2,58) = 4,93, p < .05, MS_e = 4971$). Dieser konnte darauf zurückgeführt werde, dass im Vergleich zu korrekten Sätzen sowohl für semantisch inkorrekte Sätze längere Reaktionszeiten zu verzeichnen waren ($t(29) = 1,79, p = .08$) als auch für syntaktisch inkorrekte Sätze ($t(29) = 2,35, p < .05$). Die Reaktionszeiten auf syntaktisch inkorrekte Sätze waren wiederum verlängert gegenüber semantisch inkorrekten Sätzen ($t(29) = 2,11, p < .05$).

Im Vergleich der beiden Gruppen konnte nachgewiesen werden, dass die CI-Träger über alle Bedingungen hinweg eine signifikant höhere Fehlerrate aufwiesen als die Hörgesunden ($F(1,58) = 41,09, p < .001, MS_e = 194$). Signifikant höhere Fehlerzahlen in der CI-Gruppe waren für alle drei experimentellen Bedingungen zu verzeichnen (kor-

rekt: $F(1,58) = 24,69, p < .001, MS_e = 30$; semantisch inkorrekt: $F(1,58) = 11,30, p < .01, MS_e = 39$; syntaktisch inkorrekt: $F(1,58) = 31,72, p < .001, MS_e = 357$). Außerdem zeigte sich für die Fehlerzahlen eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE ($F(2,116) = 19,51, p < .001, MS_e = 116$), was sich auf die bereits in den Einzelanalysen festgestellte Tatsache zurückführen ließ, dass für die Patientengruppe ein signifikanter Bedingungseffekt vorlag, während dies für die Kontrollprobanden nicht der Fall war. Für die Reaktionszeiten war im Gruppenvergleich kein Effekt des Faktors GRUPPE festzustellen ($F(1,58) < 1$). Die signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE ($F(2,116) = 4,91, p < .01, MS_e = 2773$) ging auf die für die Reaktionszeiten in den beiden Gruppen unterschiedlich ausgeprägten Bedingungseffekte zurück.

Insgesamt bestätigen die Daten die Aussagen der CI-Träger, die nach dem Experiment häufig angaben, dass die Sätze und dabei besonders die syntaktisch inkorrekten Sätze schwierig zu verstehen gewesen seien. Allerdings konnte auch festgestellt werden, dass sich gerade in der syntaktischen Bedingung die Fehlerraten der einzelnen CI-Träger deutlich voneinander unterschieden, wie aus dem Wert der Standardabweichung hervorgeht.

Auf die Interpretation von Reaktionszeitunterschieden soll hier und im folgenden verzichtet werden, da es sich bei diesen Daten um *off-line*-Messungen handelt, die ab 3000 ms nach Satzende gemessen wurden und somit wenig aussagekräftig sind.

5.3.2 EKP-Daten

5.3.2.1 Semantische Bedingung: Kontrollgruppe

In Abbildung 5.1 ist der Verlauf der ereigniskorrelierten Potentiale für die korrekten und die semantisch inkorrekten Sätze für die Gruppe der Kontrollprobanden dargestellt. Es zeigt sich ein deutlich negativerer Potentialverlauf der semantisch inkorrekten Bedingung gegenüber der korrekten Bedingung zwischen etwa 300 und 700 ms nach Beginn des Partizips. Die Negativierung ist vor allem auf zentro-parietalen Elektrodenpositionen zu beobachten. Damit entspricht der Effekt der N400-Komponente, welche in der Regel durch Verletzungen semantischer Selektionsbeschränkungen ausgelöst wird.

N400-Komponente (300 bis 700 ms). Für die inferenzstatistische Analyse zur statistischen Absicherung des beobachteten Effektes wurde auf Basis der visuellen Inspektion ein Zeitfenster von 300 bis 700 ms festgelegt. Das Zeitfenster entspricht damit annähernd dem zeitlichen Bereich, für welchen auch in anderen Studien die N400-Komponente be-

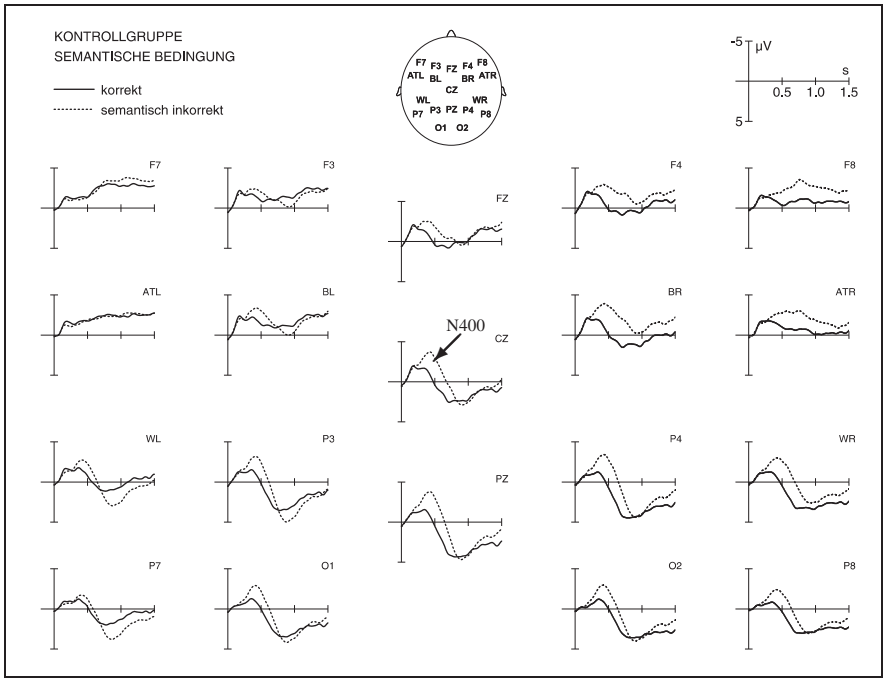

Abb. 5.1: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung.*

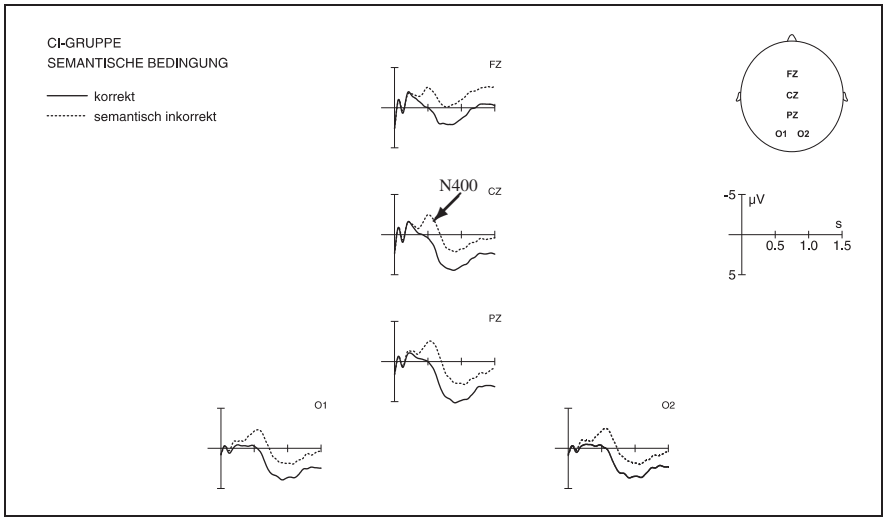

Abb. 5.2: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung.*

richtet wurde (z. B. Hahne, 2001: 400 bis 700 ms; Kutas & Hillyard, 1980b: 300 bis 600 ms). Wie der Tabelle 5.4 zu entnehmen ist, zeigte sich in der globalen Analyse in diesem Zeitfenster ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Außerdem ergaben sich signifikante Interaktionen des Faktors BEDINGUNG mit den Faktoren REGION und HEMISPHÄRE sowie eine signifikante Dreifachinteraktion der Faktoren BEDINGUNG, REGION und HEMISPHÄRE.

Tab. 5.4: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	40.75	$<.0001$	3.23
BEDINGUNG × REGION	1,29	7.18	$<.05$	0.92
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,29	41.45	$<.0001$	0.62
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,29	13.66	$<.001$	0.10

In den aufgrund dieser Interaktionen durchgeführten Analysen auf Quadrantenebene zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG für die beiden posterioren Quadranten sowie für den rechts-anterioren Quadranten. In allen vier Quadranten lag eine Interaktion des Faktors BEDINGUNG mit dem Faktor ELEKTRODE vor.

Tab. 5.5: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,29	1.27	.27	5.58
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	10.86	$<.001$	0.46
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,29	53.54	$<.0001$	4.29
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	16.75	$<.0001$	0.40
posterior-links				
BEDINGUNG	1,29	24.21	$<.0001$	4.24
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	15.10	$<.0001$	0.38
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,29	59.91	$<.0001$	5.38
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	21.86	$<.0001$	0.16

Zur Auflösung dieser Interaktionen wurden t-Tests für die einzelnen Elektrodenpositionen durchgeführt. Für den links-anterioren Quadranten zeigten sich dabei leicht gegenläufige Effekte, statistische Signifikanz erreichte jedoch nur die Negativierung auf der Elektrodenposition BL. Dagegen wurde die Komponente rechts-anterior trotz der Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE auf allen Elektrodenpositionen hochsignifikant. Die t-Tests für den links-posterioren Quadranten zeigten eine stärkere Ausprägung des Effekts auf den zentraler gelegenen Elektrodenpositionen P3 und O1, allerdings erreichte er auch auf den lateraler gelegenen Elektrodenpositionen WL und P7 statistische Signifikanz. Im rechts-posterioren Quadranten wiederum wurde der be-

obachtete Effekt trotz der Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE auf allen Elektrodenpositionen hochsignifikant.

Tab. 5.6: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
anterior-links			
F7	1,29	-0.28	.60
F3	1,29	2.68	.11
ATL	1,29	-0.11	.74
BL	1,29	7.31	.01
anterior-rechts			
F8	1,29	25.42	$<.0001$
F4	1,29	35.15	$<.0001$
ATR	1,29	49.19	$<.0001$
BR	1,29	67.63	$<.0001$
posterior-links			
WL	1,29	10.69	$<.01$
P7	1,29	6.16	$<.05$
P3	1,29	32.24	$<.0001$
O1	1,29	31.05	$<.0001$
posterior-rechts			
WR	1,29	78.33	$<.0001$
P8	1,29	45.95	$<.0001$
P4	1,29	62.67	$<.0001$
O2	1,29	38.14	$<.0001$

In der zweifaktoriellen Varianzanalyse für die drei Mittellinienelektroden ergab sich neben einem signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG auch eine Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 5.7: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	43.38	$<.0001$	5.19
BEDINGUNG $\times$ ELEKTRODE	2,58	10.03	$<.01$	0.62

Wie die nachfolgend durchgeführten t-Tests zeigten, reflektierte die Interaktion die Tatsache, dass der Effekt zwar auf allen drei Mittellinienelektroden statistisch signifikant wurde, auf der anterioren Elektrodenposition FZ jedoch etwas schwächer ausgeprägt war als auf den zentro-parietalen Elektroden CZ und PZ.

Tab. 5.8: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	t	p
FZ	1,29	18.34	$<.001$
CZ	1,29	33.59	$<.0001$
PZ	1,29	59.82	$<.0001$

Der Effekt konnte ebenfalls in der zusätzlich durchgeführten Analyse, welche nur die auch für die CI-Träger auswertbaren fünf Elektrodenpositionen umfasste, statistisch klar

abgesichert werden. Hier ergaben sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG und eine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 5.9: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	45.94	$<.0001$	6.96
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,116	6.87	$<.01$	0.58

Diese Interaktion beruhte wiederum auf der etwas schwächeren Ausprägung des Effekts auf der anterioren Elektrodenposition FZ verglichen mit den zentro-parietalen Elektroden CZ, PZ, O1 und O2.

Tab. 5.10: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	t	p
FZ	1,29	18.34	$<.001$
CZ	1,29	33.59	$<.0001$
PZ	1,29	59.82	$<.0001$
O1	1,29	31.05	$<.0001$
O2	1,29	38.14	$<.0001$

Zusammenfassend konnte damit für die Kontrollgruppe in der semantischen Bedingung eine N400-Komponente nachgewiesen werden, welche sich im Zeitfenster zwischen 300 und 700 ms nach Beginn des kritischen Worts besonders auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen manifestierte.

5.3.2.2 Semantische Bedingung: CI-Gruppe

Die EKP-Verläufe für die semantisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den korrekten Sätzen für die Gruppe der CI-Träger sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Bei einer deskriptiven Analyse dieser Daten zeigt sich deutlich, dass die semantisch inkorrekten Sätze auch bei den Patienten eine N400-Komponente auslösten.

N400-Komponente (300 bis 700 ms). Auf Basis der visuellen Inspektion der Potentialverläufe sowie in Übereinstimmung mit der Analyse für semantische Bedingung in der Kontrollgruppe wurde für die statistische Analyse das Zeitfenster 300 bis 700 ms gewählt. In diesem Zeitfenster ergab sich für die fünf auswertbaren Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, jedoch keine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 5.11: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	48.84	$<.0001$	5.77
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,116	1.35	.27	0.57

Somit konnte auch für die Gruppe der CI-Patienten in der semantischen Bedingung eine N400-Komponente im Zeitfenster zwischen 300 und 700 ms nach Beginn des kritischen Worts nachgewiesen werden.

5.3.2.3 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe

Wie die in Abbildung 5.3 dargestellten Potentialverläufe der korrekten und der syntaktisch inkorrekten Bedingung zeigen, evozierten die Phrasenstrukturverletzungen bei den Kontrollprobanden eine anteriore Negativierung im Zeitbereich zwischen 100 und 300 ms nach Beginn des kritischen Wortes, gefolgt von einer mehr posterior verteilten Positivierung zwischen 400 und 1000 ms. Die beiden Effekte entsprechen hinsichtlich Latenz, Polarität und Verteilung dem für diese Art von syntaktischer Verletzung bereits früher berichteten EKP-Muster aus ELAN-Komponente und P600-Komponente (vgl. Abschnitt 3.3.2.1). Neben diesen beiden Effekten wird in der deskriptiven Analyse auf den rechts-anterioren Elektrodenpositionen zusätzlich ein an die frühe Negativierung anschließender, bis zum Mittelungsende bei 1500 ms anhaltender Negativierungseffekt sichtbar.

Frühe anteriore Negativierung (100 bis 300 ms). Für die statistische Überprüfung der frühen anterioren Negativierung wurde auf Basis der visuellen Inspektion ein Zeitfenster von 100 bis 300 ms festgelegt, welches damit annähernd dem auch in anderen Studien berichteten Zeitfenster für die ELAN entsprach (Hahne, 2001: 100 bis 250 ms). In der globalen Analyse ergab sich kein reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, jedoch eine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und REGION, worin sich die anteriore Verteilung des Negativierungseffekts widerspiegelt.

Tab. 5.12: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	2.09	.16	2.12
BEDINGUNG × REGION	1,29	8.12	$<.01$	0.58
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,29	<1		
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,29	<1		

In der aufgrund dieser Interaktion durchgeführten Analyse auf Quadrantenebene zeigte sich dementsprechend ein Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG für die beiden ante-

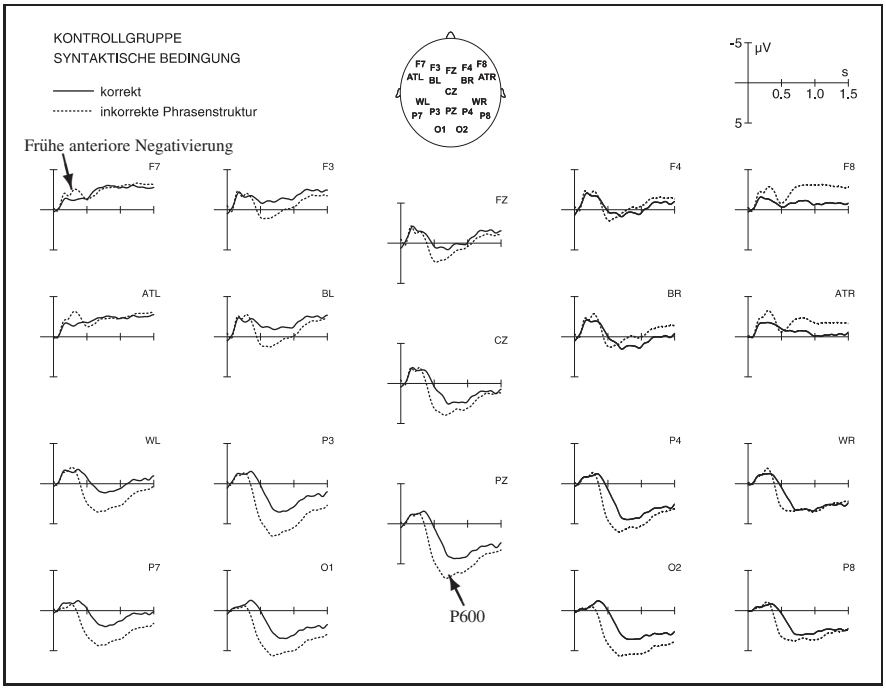

Abb. 5.3: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung.*

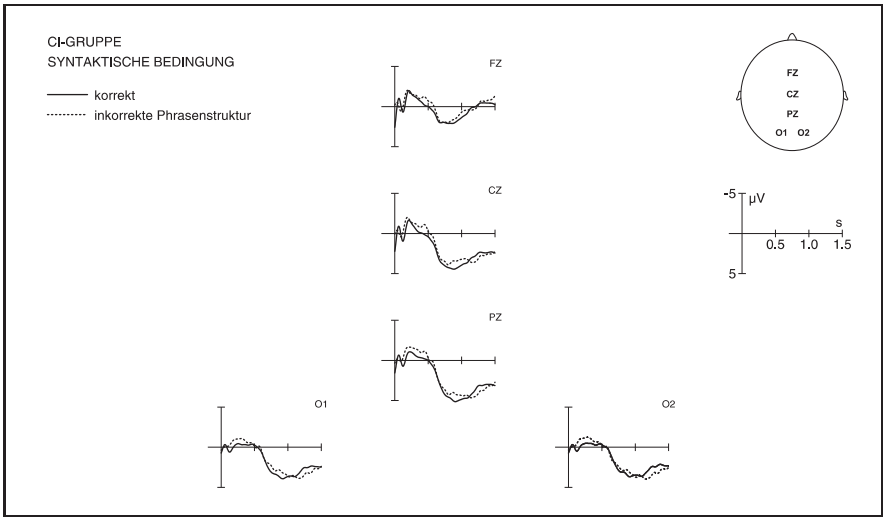

Abb. 5.4: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung.*

rioren, nicht jedoch für die beiden posterioren Quadranten. Eine Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE wurde sowohl für die beiden anterioren als auch für den links-posterioren Quadranten festgestellt.

Tab. 5.13: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,29	6.81	$<.05$	2.22
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	4.48	$<.05$	0.20
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,29	6.63	$<.05$	3.27
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	3.62	$<.05$	0.23
posterior-links				
BEDINGUNG	1,29	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	4.00	$<.05$	0.18
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,29	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	1.27	.29	0.13

Entsprechende t-Tests ergaben einen statistisch signifikanten Effekt der beobachteten Negativierung für die anterior jeweils lateraler gelegenen Elektrodenpositionen F7 und ATL sowie F8 und ATR. Im links-anterioren Quadranten zeigte sich außerdem ein marginal signifikanter Effekt auf der Elektrodenposition BL. Die für den links-posterioren Quadranten festgestellte Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE ließ sich auf gegenläufige, jedoch jeweils nicht signifikant werdende Effekte zurückführen.

Tab. 5.14: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,29	9.83	$<.01$
F3	1,29	0.59	.45
ATL	1,29	19.37	$<.001$
BL	1,29	3.27	.08
anterior-rechts			
F8	1,29	10.73	$<.01$
F4	1,29	1.78	.19
ATR	1,29	10.76	$<.01$
BR	1,29	2.75	.11
posterior-links			
WL	1,29	0.31	.58
P7	1,29	-2.66	.11
P3	1,29	-0.00	.95
O1	1,29	-0.26	.62

In der Analyse für die Mittellinienelektroden ließ sich weder ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG noch eine Interaktion mit dem Faktor ELEKTRODE nachweisen. Dieses Ergebnis reflektiert die rein laterale Verteilung des frühen Negativierungseffekts.

Tab. 5.15: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,58	< 1		

In der nur die Mittellinienelektroden sowie O1 und O2 umfassenden Analyse konnte eine statistische Signifikanz der frühen Negativierung – entsprechend ihrer lateralen Verteilung – nicht mehr nachgewiesen werden. Es zeigte sich weder ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG noch eine Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 5.16: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,116	< 1		

Bei dem frühen anterioren Negativierungseffekt handelt es sich damit also um eine Komponente, über deren Vorhandensein bei den CI-Trägern aufgrund der CI-Artefakte auf den entsprechenden Elektrodenpositionen keine Aussage zu machen sein wird.

P600-Komponente (400 bis 1000 ms). Für den neben der frühen anterioren Negativierung beobachteten späteren Positivierungseffekt wurde eine inferenzstatistische Analyse im Zeitfenster zwischen 400 und 1000 ms gerechnet. Das Zeitfenster ergab sich auf Grund der Beobachtungen in der deskriptiven Analyse, ähnliche Zeitbereiche für die P600-Komponente wurden aber bereits auch in anderen Studien berichtet (z. B. Hahne & Friederici, 1999: 500 bis 1000 ms). Die globale Analyse ergab einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Statistische Signifikanz erreichten auch die Interaktionen des Faktors BEDINGUNG mit dem Faktor REGION und mit dem Faktor HEMISPHÄRE sowie die Dreifachinteraktion von BEDINGUNG, REGION und HEMISPHÄRE.

Tab. 5.17: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	21.89	$< .0001$	3.71
BEDINGUNG × REGION	1,29	36.57	$< .0001$	1.75
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,29	29.06	$< .0001$	0.82
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,29	8.34	$< .01$	0.17

Zur Aufklärung dieser Interaktionen wurden Analysen auf Quadrantenebene durchgeführt. Hierbei zeigte sich ein hochsignifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG für die beiden posterioren Quadranten. Links-anterior war ein geringer ausgeprägter Bedingungseffekt zu verzeichnen. Rechts-anterior lag ein marginal signifikanter Haupteffekt

des Faktors BEDINGUNG vor, der hier allerdings auf die bereits in der deskriptiven Analyse festgestellte anhaltende Negativierung zurückging. Für alle vier Quadranten wurde eine Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE festgestellt.

Tab. 5.18: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,29	8.93	$<.01$	5.64
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	12.32	$<.001$	0.88
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,29	3.68	.07	6.92
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	11.64	$<.0001$	0.56
posterior-links				
BEDINGUNG	1,29	60.51	$<.0001$	7.06
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	3.81	$<.05$	0.47
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,29	28.86	$<.0001$	6.17
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,87	26.34	$<.0001$	0.40

Tab. 5.19: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
anterior-links			
F7	1,29	-0.19	.66
F3	1,29	-14.40	$<.001$
ATL	1,29	-0.71	.41
BL	1,29	-14.82	$<.001$
anterior-rechts			
F8	1,29	12.50	$<.01$
F4	1,29	-0.00	.95
ATR	1,29	9.78	$<.01$
BR	1,29	0.42	.52
posterior-links			
WL	1,29	-48.94	$<.0001$
P7	1,29	-49.11	$<.0001$
P3	1,29	-54.30	$<.0001$
O1	1,29	-50.70	$<.0001$
posterior-rechts			
WR	1,29	-5.46	$<.05$
P8	1,29	-19.79	$<.001$
P4	1,29	-25.69	$<.0001$
O2	1,29	-60.41	$<.0001$

Dementsprechend gerechnete t-Tests zeigten – wie aus Tabelle 5.19 hervorgeht – dass die Positivierung im linken anterioren Quadranten nur auf den zentraler gelegenen Elektrodenpositionen F3 und BL statistische Signifikanz erreicht. Rechts-anterior ging die Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE auf einen signifikanten Negativierungseffekt zurück, welcher nur die beiden lateraler gelegenen Elektrodenpositionen F8 und ATR betraf. Trotz der auch links-posterior festgestellten Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE, welche auf eine Ausprägung der beobachteten Komponente hinweist, wurde die Positivierung hier auf allen Elektrodenpositionen hochsignifikant. Im rechts-

posterioren Quadranten erreichte sie dagegen auf den parietaler gelegenen Elektrodenpositionen P4, P8 und O2 eine stärkere Signifikanz als auf WR. In der Analyse für die Mittellinienelektroden ergaben sich sowohl ein reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG als auch eine Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 5.20: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	17.05	$<.001$	8.88
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,58	17.65	$<.0001$	0.60

Diese Interaktion reflektierte, wie nachfolgend durchgeführte t-Tests zeigen, die bereits für die lateralen Elektroden festgestellte stärkere posteriore Verteilung der P600-Komponente. Die Signifikanz des Effektes war auf der frontalen Mittellinienelektrode FZ geringer ausgeprägt als auf den zentro-parietalen Elektroden CZ und PZ.

Tab. 5.21: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	t	p
FZ	1,29	-7.00	$<.05$
CZ	1,29	-9.37	$<.01$
PZ	1,29	-35.75	$<.0001$

Die P600-Komponente ließ sich ebenfalls statistisch nachweisen, wenn nur die fünf auch für die Patientengruppe auswertbaren Elektrodenpositionen in die Analyse einbezogen wurden. Hier ergab sich ein hochsignifikanter Haupteffekt BEDINGUNG. Zudem wurde auch die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE signifikant.

Tab. 5.22: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	35.43	$<.0001$	9.96
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,116	8.46	$<.01$	1.00

Die Interaktion beruhte hier wiederum auf der Tatsache der stärkeren parietalen Ausprägung des Positivierungseffekts (vgl. Tabelle 5.23).

Tab. 5.23: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	t	p
FZ	1,29	-7.00	$<.05$
CZ	1,29	-9.37	$<.01$
PZ	1,29	-35.75	$<.0001$
O1	1,29	-50.70	$<.0001$
O2	1,29	-60.41	$<.0001$

Zusammenfassend konnte somit gezeigt werden, dass die Phrasenstrukturanomalien bei den Kontrollprobanden sowohl eine bilateral verteilte frühe anteriore Negativierung zwischen 100 und 300 ms (ELAN) als auch eine parietale Positivierung zwischen 400 und 1000 ms (P600) evozierten. Zusätzlich wurde rechts-anterior ein bis zum Mittelungsende bei 1500 ms anhaltender Negativierungseffekt festgestellt. Die frühe anteriore Negativierung wurde nur auf Elektrodenpositionen manifest, welche bei den CI-Trägern nicht auswertbar waren.

5.3.2.4 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe

Der Verlauf der ereigniskorrelierten Potentiale für die korrekten und die syntaktisch inkorrekten Sätze für die Gruppe der CI-Träger ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Wie in der Auswertung der Daten für die syntaktische Bedingung für die Kontrollgruppe deutlich wurde, kann für die CI-Gruppe keine Aussage über das Vorhandensein der nur auf den lateralen Elektrodenpositionen nachweisbaren ELAN-Komponente getroffen werden, da bei den Patienten die betreffenden Elektroden aufgrund von CI-Artefakten nicht ausgewertet werden konnten (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.2.4). Für die CI-Träger ist aber auch kein Positivierungseffekt zu beobachten, obwohl für die Kontrollgruppe gezeigt werden konnte, dass dieser Effekt sich auch auf den für die Patienten auswertbaren Elektrodenpositionen nachweisen lässt. Bei visueller Inspektion der ereigniskorrelierten Potentiale ist dagegen ein leicht negativerer Verlauf für die syntaktisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den korrekten Sätzen festzustellen. Hier lässt sich vermuten, dass die Phrasenstrukturverletzung bei den CI-Trägern mit einer N400-ähnlichen Negativierung einhergeht. Eine solche Komponente war für eine wesentlich geringere Anzahl von Patienten bereits früher beobachtet worden (Hahne et al., 2001; Wolf, 2000). Da der im vorliegenden Experiment beobachtete negativere Potentialverlauf jedoch eine sehr geringe Ausprägung aufweist, ist seine Reliabilität zweifelhaft. Diesen Beobachtungen entsprechend wurde eine Analyse durchgeführt, welche das Vorhandensein von unterschiedlichen Potentialverläufen für korrekte und syntaktisch inkorrekte Sätze sowohl im Zeitfenster der P600 (400 bis 1000 ms) als auch im Zeitfenster der N400 (300 bis 700 ms) statistisch überprüfte.

P600-Komponente (400 bis 1000 ms). Es wurde zunächst eine inferenzstatistische Analyse im Zeitfenster zwischen 400 bis 1000 ms gerechnet, in welchem bei den Normalhörenden die P600-Komponente nachweisbar war. Wie Tabelle 5.24 zeigt, ergab sich hier jedoch weder ein Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG noch eine Interaktion zwischen den Faktoren und BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 5.24: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,116	< 1		

N400-ähnliche Negativierung (300 bis 700 ms). Die darauffolgende Analyse wurde über ein Zeitfenster von 300 bis 700 ms gerechnet. Der Wahl dieses Zeitfensters lag die Überlegung zugrunde, dass es sich bei einer bei den CI-Trägern feststellbaren, durch syntaktische Verletzungen ausgelösten Negativierung entsprechend der Beobachtungen in der Pilotstudie (Hahne et al., 2001; Wolf, 2000) um eine Komponente handeln würde, die der durch die semantischen Verletzungen evozierten N400 vergleichbar ist. Sie müsste demzufolge im gleichen Zeitfenster auftreten. Die Analyse ergab jedoch weder einen reliablen Haupteffekt BEDINGUNG noch eine Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 5.25: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,29	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,116	< 1		

Damit wurde zunächst festgestellt, dass sich die Potentialverläufe der korrekten Bedingung und der syntaktisch inkorrekten Bedingung für die Gesamtgruppe der CI-Träger weder im Zeitfenster der N400-Komponente noch im Zeitfenster der P600-Komponente voneinander unterschieden. Bei den Patienten konnte für die Phrasenstrukturverletzung also weder eine P600-Komponente wie bei Normalhörenden nachgewiesen werden, noch ging die Verarbeitung dieses syntaktischen Fehlers mit einer N400-ähnlichen Negativierung einher, wie es in einer Pilotstudie der Fall gewesen war (Hahne et al., 2001).

5.3.2.5 Syntaktische Bedingung: Gruppenanalysen für CI-Träger

Da sich in den Verhaltensdaten – und dabei besonders in der syntaktisch inkorrekten Bedingung – eine hohe Fehlervarianz für die CI-Träger gezeigt hatte, welche als Hinweis auf interindividuelle Verarbeitungsunterschiede gelten konnte, sollte durch weitergehende Gruppenanalysen geprüft werden, ob sich die Abwesenheit eines Bedingungseffekts in der syntaktischen Bedingung für die Gesamtgruppe der CI-Träger möglicherweise auf interindividuell unterschiedliche EKP-Muster für die einzelnen Patienten zurückführen ließ. Die Gruppenbildung orientierte sich dabei an den Fehlerzahlen der CI-Träger in

der syntaktisch inkorrekten Bedingung, was auf die Überlegung zurückzuführen war, dass die vermuteten unterschiedlichen Verarbeitungsprozesse in Zusammenhang mit dem Verständnis dieser syntaktischen Verletzung standen.

Es wurde zunächst eine Gruppe gebildet, welche die sechs CI-Träger mit der geringsten Fehlerrate in der syntaktisch inkorrekten Bedingung (kleiner 8 Prozent) umfasste. Bei einer deskriptiven Analyse der ereigniskorrelierten Potentiale für diese Gruppe, welche in Abbildung 5.5 dargestellt sind, ist ein deutlich positiverer Potentialverlauf für syntaktisch inkorrekte Sätze verglichen mit korrekten Sätzen zu erkennen (P600). Die Reliabilität dieses Effekts wurde in einer statistischen Analyse überprüft.

P600-Komponente für 6 CI-Träger mit geringer Fehlerrate (400 bis 1000 ms). Die Analyse, welche auf der Basis der visuellen Inspektion und in Übereinstimmung mit der bei den Kontrollprobanden nachgewiesenen P600-Komponente im Zeitfenster 400 bis 1000 ms gerechnet wurde, ergab einen signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Damit ließ sich der beobachtete Positivierungseffekt für eine Gruppe von sechs CI-Trägern, deren Verständnis der syntaktisch inkorrekten Sätze überdurchschnittlich gut war, statistisch klar absichern.

Tab. 5.26: *Globale ANOVA für 6 CI-Träger mit geringer Fehlerrate für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,5	7.37	$< .05$	9.34
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,20	< 1		

Analog zu dieser Gruppe „guter“ CI-Träger wurde eine weitere Untergruppe gebildet, welche die sechs CI-Träger mit der höchsten Fehlerrate in der syntaktischen Bedingung (größer 60 Prozent) umfasste. Für diese Patienten, deren EKPs der Abbildung 5.6 zu entnehmen sind, war eine deutliche Negativierung erkennbar (N400-ähnliche Negativierung). Auch hier wurde varianzanalytisch geprüft, ob es sich um eine reliable Komponente handelte.

N400-ähnliche Negativierung für 6 CI-Träger mit hoher Fehlerrate (300 bis 700 ms). Die statistische Analyse wurde in Übereinstimmung mit der in der semantischen Bedingung nachgewiesenen N400 im Zeitfenster zwischen 300 und 700 ms durchgeführt. Der beobachtete Negativierungseffekt ließ sich dabei durch einen signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG klar absichern (vgl. Tabelle 5.27).

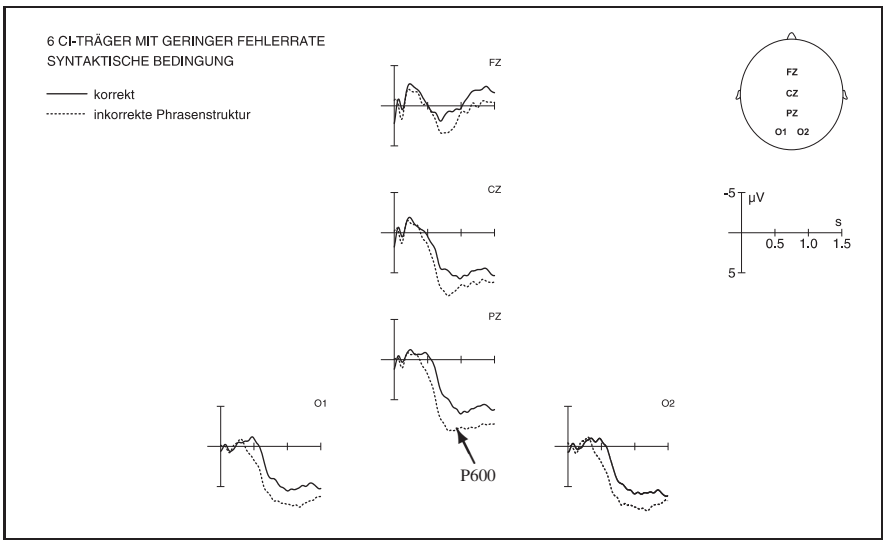

Abb. 5.5: *Grand Average EKP für sechs CI-Träger mit geringer Fehlerrate (kleiner 8 Prozent) für die syntaktische Bedingung.*

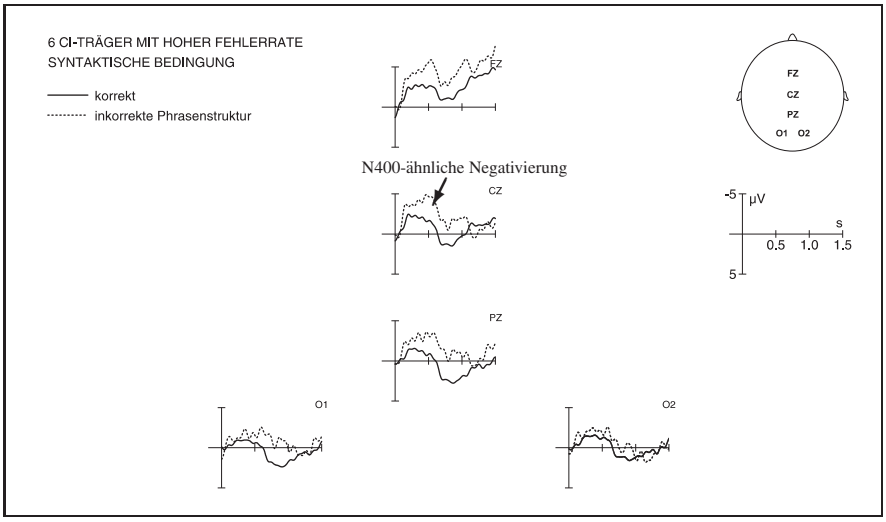

Abb. 5.6: *Grand Average EKP für sechs CI-Träger mit hoher Fehlerrate (größer 60 Prozent) für die syntaktische Bedingung.*

Tab. 5.27: *Globale ANOVA für 6 CI-Träger mit hoher Fehlerrate für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,5	6.83	$<.05$	8.22
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,20	<1		

Nachdem in die Gruppenanalysen zunächst nur jeweils die sechs Patienten mit den geringsten bzw. höchsten Fehlerraten in der syntaktischen Bedingung einbezogen worden waren, sollten weitergehende Analysen zeigen, ob sich die Beobachtungen auch für erweiterte Patientengruppen bestätigen ließen. Dazu wurde zunächst die Gruppe der CI-Träger mit sehr gutem Sprachverständnis auf acht CI-Träger mit geringen Fehlerraten in der syntaktischen Bedingung (kleiner 10 Prozent) erweitert. In den ereigniskorrelierten Potentialen für diese Gruppe, welche in Abbildung 5.7 dargestellt sind, zeigt sich in der deskriptiven Analyse ein positiverer Verlauf für die syntaktisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den korrekten Sätzen.

P600-Komponente für 8 CI-Träger mit geringer Fehlerrate (400 bis 1000 ms). Im Gegensatz zur deskriptiven Analyse ergab die im Zeitfenster 400 bis 1000 ms gerechnete statistische Analyse jedoch, wie Tabelle 5.28 zeigt, dass es sich hierbei nicht um einen statistisch reliablen Effekt handelte.

Tab. 5.28: *Globale ANOVA für 8 CI-Träger mit geringer Fehlerrate für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,7	1.94	.21	14.58
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,28	<1		

Damit konnte die P600-Komponente nur für die Gruppe der sechs CI-Träger mit den geringsten Fehlerraten in der syntaktischen Bedingung nachgewiesen werden. Hier lag die Vermutung nahe, dass eine N400-ähnliche Negativierung für alle getesteten Patienten mit Ausnahme dieser sechs CI-Träger mit herausragend gutem Sprachverständnis zu beobachten sein würde. Um diese Annahme zu überprüfen, wurde für eine weitere Analyse eine Gruppe gebildet, welche 24 CI-Träger mit durchschnittlicher bis hoher Fehlerrate in der syntaktischen Bedingung (größer 8 Prozent) umfasste. Eine deskriptive Analyse der Potentialverläufe für diese Gruppe zeigt eine deutliche Negativierung für die syntaktisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den syntaktisch korrekten Sätzen (vgl. Abbildung 5.8).

N400-ähnliche Negativierung für 24 CI-Träger mit durchschnittlicher bis hoher Fehlerrate (300 bis 700 ms). Wie aus Tabelle 5.29 ersichtlich wird, ergab sich in der inferenzstatistischen Analyse im Zeitfenster 300 bis 700 ms ein tendenziell signifikanter

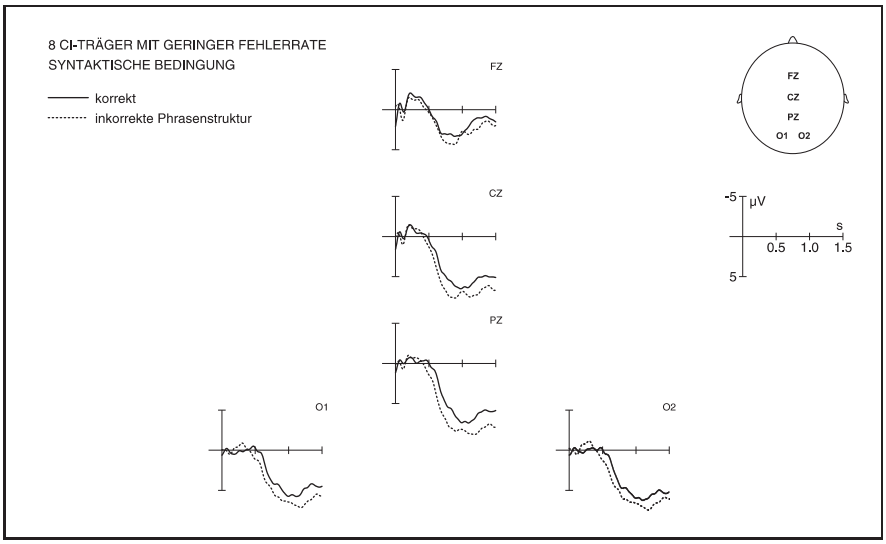

Abb. 5.7: *Grand Average EKP für acht CI-Träger mit geringer Fehlerrate (kleiner 10 Prozent) für die syntaktische Bedingung.*

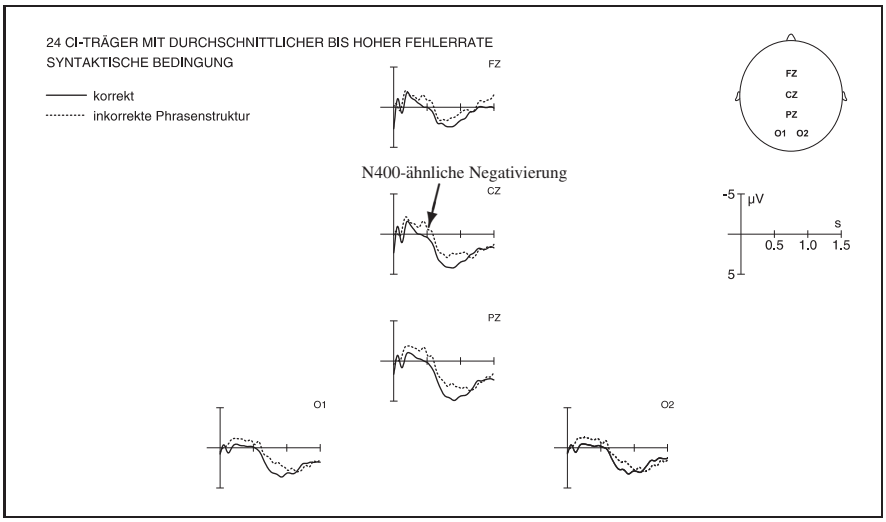

Abb. 5.8: *Grand Average EKP für 24 CI-Träger mit durchschnittlicher bis hoher Fehlerrate (größer 8 Prozent) für die syntaktische Bedingung.*

Haupteffekt BEDINGUNG. Eine N400-ähnliche Komponente konnte damit auch für eine Patientengruppe, welche mit Ausnahme der CI-Träger mit herausragend gutem Sprachverständnis alle getesteten CI-Träger umfasste, nachgewiesen werden.

Tab. 5.29: *Globale ANOVA für 24 CI-Träger mit durchschnittlicher bis hoher Fehlerrate für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,23	4.03	.06	12.58
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,92	< 1		

Insgesamt zeigte sich damit in der syntaktischen Bedingung für die Gesamtgruppe der CI-Träger kein einheitlicher Effekt. Für eine geringe Anzahl der getesteten Patienten ($N = 6$) konnte im Zeitfenster zwischen 400 und 1000 ms eine P600-Komponente nachgewiesen werden, während die syntaktische Verletzung bei allen anderen Patienten ($N = 24$) eine N400-ähnliche Negativierung zwischen 300 und 700 ms hervorrief.

5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Mit Experiment I sollte der Frage nachgegangen werden, ob sich für CI-Träger für die auditive Verarbeitung von syntaktischen Informationen über die Phrasenstruktur abweichende EKP-Muster im Vergleich zu normalhörenden Kontrollprobanden nachweisen lassen. Weiterhin sollte auch die Annahme, dass die Prozesse der semantischen Informationsverarbeitung von derartigen Abweichungen nicht betroffen sind, experimentell überprüft werden. Zu diesem Zweck wurden im Experiment Sätze akustisch präsentiert, welche entweder korrekt waren oder eine Phrasenstrukturverletzung oder eine semantische Verletzung enthielten.

Zunächst gelang es, für die normalhörenden Kontrollprobanden die aus früheren Studien bekannten Effekte für die Verarbeitung der beiden Verletzungstypen zu replizieren. In der semantischen Bedingung wurde für die Kontrollgruppe eine N400-Komponente beobachtet. Die Latenz der im Zeitfenster zwischen 300 und 700 ms auftretenden Komponente entsprach der in früheren Studien mit studentischen Teilnehmern beobachteten N400 (z. B. Friederici et al., 1993; Hahne, 2001). Eine verzögerte Latenz der N400 für ältere Probanden, wie sie beispielsweise von Gunter et al. (1992) berichtet wurde, konnte damit im vorliegenden Experiment nicht bestätigt werden, wobei allerdings auch kein direkter Vergleich mit jüngeren Probanden vorgenommen wurde.

Für die Phrasenstrukturverletzungen konnte für die Kontrollgruppe ebenfalls das vorhergesagte EKP-Muster nachgewiesen werden. Hier zeigte sich eine frühe anteriore Ne-

gativierung (ELAN-Komponente), die von einer Positivierung auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen (P600-Komponente) gefolgt wurde. Es ist anzumerken, dass sich die frühe Negativierung im Gegensatz zu anderen Studien (z. B. Hahne & Friederici, 1999) nicht auf die anterioren Elektrodenpositionen der linken Hemisphäre beschränkte, sondern dass sie auf den lateralen anterioren Elektrodenpositionen beider Hemisphären gleichermaßen ausgeprägt war. Eine solche bilaterale Verteilung wurde jedoch auch schon von anderen Autoren berichtet (z. B. Hahne & Jescheniak, 2001). Da sich zeigte, dass diese Komponente nur auf Elektrodenpositionen auftrat, welche bei den CI-Trägern nicht in die Auswertung einbezogen werden konnten, soll von einer weiterführenden Diskussion der ELAN-Komponente an dieser Stelle jedoch Abstand genommen werden.

Für die Kontrollprobanden wurde zusätzlich zu diesen beiden erwarteten Effekten rechts-anterior eine langanhaltende Negativierung festgestellt[8]. Vergleichbare langanhaltende anteriore Negativierungseffekte, allerdings mit variierender lateraler Ausprägung, sind auch in den EKP-Daten für die Kontrollgruppen in Patientenstudien von Friederici et al. (1999b) sowie von Friederici, Kotz, Werheid, Hein und von Cramon (2003) deskriptiv erkennbar, allerdings wurde in den jeweiligen Studien auf diesen Effekt nicht eingegangen. Der im vorliegenden Experiment beobachtete langanhaltende rechts-anteriore Negativierungseffekt soll im Rahmen der Gesamtdiskussion unter Berücksichtigung der Befunde der nachfolgenden Experimente ausführlicher diskutiert werden.

Für die CI-Gruppe war erwartet worden, dass die semantische Verletzung ein ähnliches Datenmuster wie bei den Kontrollprobanden evozierte, während für die Phrasenstrukturverletzung Abweichungen vorhergesagt worden waren. Diese Hypothesen beruhten auf der Überlegung, dass die semantischen Verletzungen aufgrund ihrer größeren akustischen Salienz von den CI-Trägern besser erkannt und dementsprechend verarbeitet werden sollten als die akustisch nur wenig salienten Phrasenstrukturverletzungen. Die Verhaltensdaten zeigten deutlich, dass dies auch der Fall war. Hier waren für die CI-Träger zwar über alle Bedingungen hinweg signifikant mehr Fehler zu verzeichnen als für die Kontrollprobanden, jedoch wiesen die Patienten in der syntaktisch inkorrekten Bedingung wiederum signifikant höhere Fehlerraten auf als in den beiden anderen Bedingungen. Ein solcher Bedingungseffekt war für die Kontrollgruppe nicht festzustellen. Damit bestätigten die Verhaltensdaten zunächst die Annahme, dass die in den Stimulussätzen enthaltene semantische Information für die CI-Träger besser aus dem akustischen Signal zu extrahieren war als die syntaktische Phrasenstrukturinformation.

[8]Die Reliabilität diese Effekts hatte sich im Rahmen der statistischen Analyse für die P600-Komponente gezeigt.

Diese Befunde ließen sich durch die EKP-Daten bestätigen. Erwartungsgemäß konnte für die CI-Patienten in der semantischen Bedingung ebenso wie bei den Kontrollprobanden eine N400-Komponente nachgewiesen werden. Ebenfalls wie vorhergesagt zeigte sich in der syntaktischen Bedingung bei den CI-Trägern ein Datenmuster, welches sich von dem für die Normalhörenden beobachteten unterschied. Allerdings ließ sich hier zunächst weder die in der Kontrollgruppe durch die Phrasenstrukturverletzung ausgelöste P600-Komponente feststellen, noch war eine N400-ähnliche Negativierung beobachtbar, wie sie aufgrund früherer Befunde (vgl. Hahne et al., 2001; Wolf, 2000) vermutet werden konnte. Vielmehr ergab sich für die Gesamtgruppe der CI-Träger kein reliabler Unterschied zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen auf die syntaktisch inkorrekten Sätze und den ereigniskorrelierten Potentialen für die korrekten Sätze. Weitergehende Analysen zeigten jedoch interindividuell verschiedene Effekte in der CI-Gruppe, deren Gegenläufigkeit dazu führte, dass im Gesamtmittel kein Effekt im ereigniskorrelierten Potential sichtbar wurde.

Die zu den Gruppenanalysen führende Annahme von divergierenden EKP-Effekten in der syntaktischen Bedingung in der Patientengruppe beruhte unter anderem darauf, dass sich in dieser Gruppe bereits in den Fehlerraten für die syntaktisch inkorrekten Sätze erhebliche interindividuelle Unterschiede gezeigt hatten. Diesen Beobachtungen entsprechend orientierten sich die Subanalysen für die syntaktische Bedingung an den Fehlerraten für die syntaktisch inkorrekten Sätze. In der Gruppenanalyse zeigte sich, dass die Phrasenstrukturverletzung bei einer kleinen Anzahl von CI-Trägern ($N = 6$), welche die syntaktisch inkorrekten Sätze überdurchschnittlich gut erkannten, wie bei den normalhörenden Kontrollprobanden eine P600-Komponente auslöste. Hingegen war für alle anderen Patienten für die syntaktische Verletzung die erwartete N400-ähnliche Negativierung zu beobachten. Dass sich Unterschiede im Sprachverständnis bei CI-Trägern auch im ereigniskorrelierten Potential niederschlagen können, hatte sich bereits in anderen EKP-Studien mit CI-Patienten, welche sich allerdings nur auf die Untersuchung sprachunspezifischer EKP-Komponenten bezogen, gezeigt (vgl. Abschnitt 3.4).

Insgesamt konnte also bei den CI-Trägern für die Verarbeitung von semantischer Information das auch bei den Normalhörenden auftretende EKP-Korrelat semantisch-lexikalischer Integrationsprozesse beobachtet werden, was darauf hinweist, dass hinsichtlich der semantischen Informationsverarbeitung keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden bestehen.

Für die Prozesse der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation bei CI-Patienten ergab sich demgegenüber ein heterogenes Bild. Hier traten deutliche Unterschiede zwi-

schen einigen wenigen CI-Trägern mit sehr gutem Sprachverständnis und der Mehrzahl der CI-Träger mit demgegenüber weniger gutem Sprachverständnis zutage. Eine P600-Komponente als das Korrelat eines syntaktischen Reanalyse- oder Korrekturprozesses konnte nur bei wenigen sehr guten CI-Trägern, denen das Verstehen der syntaktisch inkorrekten Sätze kaum Schwierigkeiten bereitete, beobachtet werden. Für die meisten der getesteten CI-Träger wurde jedoch eine N400-ähnliche Negativierung festgestellt. Eine solche Negativierung konnte bei Hörgesunden in vergleichbaren phrasenstrukturell inkorrekten Sätzen selbst dann nicht hervorgerufen werden, wenn der Fokus der Aufmerksamkeit durch Instruktion auf semantische Aspekte des Satzes gelenkt wurde (Hahne & Friederici, 2002, Experiment 2). Allerdings war eine N400-ähnliche Negativierung im Zusammenhang mit der Verarbeitung syntaktischer Anomalien mitunter bereits in Studien beobachtet worden, welche die Prozesse der Satzverarbeitung bei Zweitsprachlernern untersuchten (z. B. Hahne & Friederici, 2001; Osterhout & McLaughlin, 2000).

Eine N400-Komponente wird üblicherweise als das Korrelat semantischer Integrationsprozesse betrachtet (vgl. Abschnitt 3.3.1). Das Auftreten einer N400-ähnlichen Negativierung im Zusammenhang mit den Phrasenstrukturverletzungen deutet daher möglicherweise auf semantisch basierte Kompensationsprozesse, die durch die akustischen Verständnisschwierigkeiten der CI-Träger bedingt sind. Eine Interpretation des Negativierungseffekts in diesem Sinn wird auch durch die Aussagen der Patienten im Anschluss an das Experiment gestützt. Die meisten CI-Träger gaben an, dass sie bei den syntaktisch inkorrekten Sätzen zwar ein unbetontes Element wahrgenommen hätten, sich über seinen Charakter jedoch nicht sicher gewesen seien (z. B. *„am“* als Präposition vs. *„an-“* als Teil eines Partikelverbs). Eine Integration des fraglichen sprachlichen Elements auf semantisch-lexikalischem Wege erscheint hier durchaus sinnvoll. Sie ist dabei zum einen dahingehend vorstellbar, dass sich die fraglichen Satzelemente in den syntaktisch inkorrekten Sätzen nicht zu einem existierenden Partikelverb „umdenken“ ließen (z. B. *„*am gebaut“ / „angebaut“*, aber *„*beim geplant“ / ?*)[9], was zu einer erfolglosen Suche eines passenden Eintrags im mentalen Lexikon führte, die sich wiederum in einer N400-Komponente widerspiegelte. Eine semantisch-lexikalische Integration konnte jedoch auch in den Fällen, in welchen sich durch die akustischen Verständnisschwierigkeiten sinnvolle Partikelverben ergaben, erfolgreich sein, weil auch dann durchaus die semantische Passung des Wortes in den entsprechenden Kontext nicht immer gegeben war (z. B. *„*Das*

[9]Eine unter diesem Gesichtspunkt nachträglich vorgenommene Sichtung des Stimulusmaterials ergab, dass derartige Partikelverb-Konstruktionen für die Präpositionen bzw. Verben in etwa 20 % aller präsentierten syntaktisch inkorrekten Sätze möglich waren.

*Geschäft wurde am geschlossen.“ / „*Das Geschäft wurde angeschlossen.“*), was im EKP wiederum mit einer N400 einhergehen würde. Diese Beispiele zeigen, dass eine semantisch basierte Verstehensstrategie den CI-Trägern helfen kann, mit ihren akustischen Verständnisschwierigkeiten umzugehen. Das Verstehen von Sprache auf der Basis kontextueller Information ist auch nach Aussagen der CI-Träger selbst eine Strategie, auf die Hörgeschädigte im Alltag häufig angewiesen sind. Allerdings zeigen die Fehlerraten der Patienten im Experiment auf, dass diese semantische Kompensationsstrategie immer nur begrenzt erfolgreich sein kann.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse des Experiments, dass bei den meisten CI-Trägern aufgrund von akustischen Verständnisproblemen bei der Verarbeitung von syntaktischen Informationen über die Phrasenstruktur semantische Kompensationsstrategien zum Einsatz kommen. Eine Verarbeitung von syntaktischer Information, die dem bei Normalhörenden beobachtbaren Verarbeitungsprozess vergleichbar ist, konnte nur bei einigen wenigen CI-Trägern mit herausragend gutem Sprachverständnis festgestellt werden. Die Prozesse der semantischen Informationsverarbeitung sind von den durch den reduzierten akustischen CI-Input verursachten Abweichungen im Sprachverstehensprozess nicht betroffen.

Kapitel 6
Experiment II: Visuelle Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation und von semantischer Information

6.1 Fragestellung und Hypothesen

In Experiment II wurden die Prozesse der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation bei CI-Trägern in der visuellen Modalität untersucht. Es sollte damit geprüft werden, ob sich die in Experiment I bei den CI-Trägern beobachteten Abweichungen hinsichtlich der Verarbeitung dieses Informationstyps auf die auditive Modalität beschränken oder ob sie genereller Natur sind. Ausgehend von der Überlegung, dass es sich bei den im Rahmen dieser Arbeit getesteten postlingual ertaubten CI-Trägern um Patienten mit einem bereits vor der Ertaubung abgeschlossenen Spracherwerb handelte, deren Sprachverstehenssystem sich damit zunächst normal entwickelt hatte, wurde angenommen, dass nachträgliche, durch einen eingeschränkten akustischen Input bedingte Modifikationen des sprachlichen Systems nur die auditive Modalität betreffen. Aus diesem Grund sollten im vorliegenden visuellen Experiment keine Unterschiede zwischen Patienten und Kontrollprobanden beobachtbar sein. Um das Experiment mit Experiment I vergleichbar zu halten, wurde wiederum eine Bedingung einbezogen, welche der Untersuchung der semantischen Informationsverarbeitung diente. Insgesamt kann das Experiment II damit als visuelles Kontrollexperiment zu Experiment I gelten.

Dass die Prozesse der Satzverarbeitung bei Normalhörenden in der visuellen und in der auditiven Modalität ähnlich verlaufen, hatte sich bereits in früheren Studien gezeigt (Gunter et al., 1999a). Dementsprechend war für die Gruppe der hörgesunden Kontrollprobanden eine Replikation der Ergebnisse aus dem Experiment I vorhergesagt worden. In dieser Gruppe sollte die Phrasenstrukturverletzung ein Muster aus früher anteriorer Negativierung (ELAN) und nachfolgender P600-Komponente hervorrufen, während für

semantische Verletzung eine N400-Komponente erwartet wurde. Aufgrund der Annahme, dass Abweichungen im Sprachverstehensprozess bei postlingual ertaubten CI-Trägern nur die auditive, nicht jedoch die visuelle Modalität betreffen, wurden für die Patientengruppe die gleichen Effekte wie für die Kontrollgruppe erwartet. Auch hier sollte für die Phrasenstrukturverletzung ein Muster aus ELAN[1] und nachfolgender P600 beobachtbar sein. Da hinsichtlich der Verarbeitung semantischer Information bereits in der auditiven Modalität keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden bestanden, wurde hier für die Patienten ebenfalls eine N400-Komponente erwartet.

6.2 Methoden

6.2.1 Stimulusmaterial

Das im vorliegenden Experiment visuell präsentierte Stimulusmaterial war identisch mit den in Experiment I verwendeten Stimuli. Das Experiment umfasste damit ebenfalls (a) eine korrekte Bedingung, (b) eine semantisch inkorrekte Bedingung, welche durch die Verletzung der semantischen Selektionsbeschränkungen des Verbs realisiert wurde, sowie (c) eine syntaktisch inkorrekte Bedingung, welche auf eine fehlerhafte Phrasenstruktur infolge einer unvollständigen Präpositionalphrase zurückging (vgl. Tabelle 6.1). Neben diesen drei experimentellen Bedingungen wurden wiederum (d) Füllsätze mit einer korrekten Präpositionalphrase präsentiert, um auszuschließen, dass die Fehlerhaftigkeit eines Satzes bereits auf der Präposition erkennbar war. In allen experimentellen Bedingungen stellte das Partizip am Satzende das kritische Wort dar, auf welchem sich die Korrektheit des Satzes entschied.

Wie dies bereits für das Experiment I beschrieben wurde, enthielt das Stimulusmaterial für jede der vier Bedingungen insgesamt 96 Sätze, welche auf zwei Listen verteilt waren (vgl. Abschnitt 5.2.1). Somit war es möglich, den CI-Trägern, die bereits an Experiment I teilgenommen hatten, jeweils eine Liste mit bisher unbekannten Sätzen zu präsentieren. Es konnte also sichergestellt werden, dass jeder Patient in Experiment II andere Sätze als in Experiment I dargeboten bekam.

Im vorliegenden Experiment sollten ebenso wie in Experiment I die ereigniskorrelierten Potentiale auf dem kritischen Wort der korrekten Sätze mit denen auf dem kritischen

[1] Wie in Abschnitt 6.2.4 dargelegt werden wird, ist im vorliegenden Experiment II aufgrund der visuellen Stimulusdarbietung auch für die Patienten eine Aussage über das Vorhandensein einer ELAN-Komponente möglich.

Tab. 6.1: *Übersicht über die in Experiment II vorkommenden Bedingungen und Beispielsätze. Das kritische Wort für die experimentellen Sätze ist durch Unterstreichung gekennzeichnet.*

Experimentelle Sätze		
(a)	korrekt	*Das Brot wurde gegessen.*
(b)	semantisch inkorrekt	**Der Vulkan wurde gegessen.*
(c)	syntaktisch inkorrekt	**Das Eis wurde im gegessen.*
Füllsätze		
(d)	korrekt (mit vollständiger PP)	*Die Pizza wurde im Restaurant gegessen.*

Wort der semantisch inkorrekten Sätze bzw. auf dem kritischen Wort der syntaktisch inkorrekten Sätze verglichen werden. Im Folgenden werden die jeweiligen Vergleiche auch als *semantische Bedingung* bzw. *syntaktische Bedingung* bezeichnet.

6.2.2 Probanden

Am Experiment nahmen 16 CI-Träger sowie 16 hörgesunde Kontrollprobanden teil. Die Patienten (8 weiblich, 8 männlich) waren zum Zeitpunkt des Experiments zwischen 34 und 63 Jahren alt (Mittel 52 Jahre), die CI-Tragedauer betrug 0.8 bis 7.0 Jahre (Mittel 2.6 Jahre). Alle CI-Träger waren postlingual ertaubt. Genauere Angaben zu den einzelnen Patienten sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Die Rekrutierung der Patienten erfolgte über eine Kooperation mit der HNO-Klinik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg (Dr. Joachim Müller) bzw. dem Zentrum für HNO der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt/Main (Dr. Jan Kiefer). Die Kontrollprobanden entsprachen den CI-Trägern hinsichtlich des Geschlechts, des Alters ($\pm$ 3 Jahre) und soweit möglich auch hinsichtlich des Bildungsstands. Bei allen Versuchspersonen handelte es sich um deutsche Muttersprachler. Die Teilnahme am Experiment wurde mit 13 DM bzw. 7 EUR pro Stunde vergütet.

6.2.3 Versuchsdurchführung

Allgemein. Die Präsentation der Sätze erfolgte visuell über einen Monitor. Jeder Proband bekam 48 Sätze jeder Bedingung dargeboten, wobei für die CI-Träger, welche bereits an Experiment I teilgenommen hatten, die jeweilige Liste mit den bisher unbekannten Sätzen verwendet wurde. Die insgesamt 192 Sätze waren in pseudorandomisierter Reihenfolge auf 4 Blöcke mit jeweils 48 Sätzen verteilt.

Die Probanden hatten in diesem Experiment wiederum die Aufgabe, nach jedem Satz über eine Tastatur ein Urteil über die Korrektheit des Satzes abzugeben. Vor Beginn des Experiments erhielten alle Teilnehmer eine schriftliche Instruktion mit Beispielsätzen sowie einer genauen Beschreibung der Aufgabe. Damit wurde sichergestellt, dass auch die CI-Träger die Aufgabe vollständig verstanden hatten. Wie in Experiment I wurde zwar darauf hingewiesen, dass die Probanden sich während der Satzdarbietung möglichst nicht bewegen sollten, jedoch erfolgte keine spezielle Instruktion auf Vermeidung von Augenbewegungen. Vor Beginn eines jeden Satzes erschien für 400 ms ein Fixationskreuz ($\times$) auf dem Monitor, was den Beginn des Satzes ankündigte. Anschließend wurde der jeweilige Stimulussatz wortweise mit einer Wortpräsentationszeit von 600 ms sowie Pausen von 500 ms zwischen den Wörtern dargeboten[2]. Nach jedem Satz erschien nach einer Pause von 2000 ms für 4000 ms ein Antwortbild mit zwei Icons (☺ ☹), welches die Probanden dazu aufforderte, ihr Korrektheitsurteil abzugeben. Der nächste Trial folgte nach einem Interstimulusintervall von 200 ms. Die einzelnen Worte wurden als schwarze Schrift (RGB 0 0 0) vor einem grauen Hintergrund (RGB 85 85 80) präsentiert. Es wurde ein 17”-Monitor verwendet, der in etwa 130 cm Entfernung auf Augenhöhe der Versuchsteilnehmer positioniert war.

Zu Beginn des Experiments wurde ein Trainingsblock mit sechs Beispielsätzen präsentiert, um die Probanden mit dem Versuchsablauf vertraut zu machen. Eine Wiederholung der Beispielsätze war bei keinem der Teilnehmer nötig. Nach dem Trainingsblock bearbeiteten die Probanden die vier experimentellen Blöcke, wobei zwischen den Blöcken Gelegenheit zu kurzen Erholungspausen bestand. Das Experiment dauerte ohne EEG-Vorbereitung zwischen 45 und 60 Minuten.

Elektrophysiologische Ableitung. In der Methodik der elektrophysiologischen Ableitung ergaben sich keine Veränderungen gegenüber der für das Experiment I ausführlich beschriebenen EEG-Ableitung (vgl. 5.2.3).

6.2.4 Datenanalyse

Verhaltensdaten. Die Analyse der Verhaltensdaten erfolgte in vergleichbarer Weise wie in Experiment I (vgl. Abschnitt 5.2.4). Da im vorliegenden visuellen Experiment die

[2]Die im Vergleich zu anderen visuellen Experimenten relativ langen Wortpräsentations- und Pausenzeiten wurden gewählt, nachdem sich in ersten Tests herausgestellt hatte, dass eine schnellere Wortabfolge den Versuchsteilnehmern Probleme bereitete, was möglicherweise durch das gegenüber den studentischen Probanden in herkömmlichen Studien höhere Alter der Versuchsteilnehmer bedingt war.

gleichen experimentellen Bedingungen wie im akustischen Experiment enthalten waren, ergab sich in den Analysen für den Faktor BEDINGUNG wiederum eine dreifache Stufung (korrekt / semantisch inkorrekt / syntaktisch inkorrekt).

EKP-Daten. Die Bearbeitung der EEG-Rohdaten entsprach der in 5.2.4 (Experiment I) beschriebenen. Die Mittelung der ereigniskorrelierten Potentiale erfolgte beginnend bei 200 ms vor dem kritischen Wort bis 1500 ms nach Beginn des kritischen Wortes, wobei als Baseline der Zeitbereich von -200 ms bis 0 ms relativ zum kritischen Wort gewählt wurde. Von der Mittelung ausgeschlossen wurden Trials, welche nicht-korrigierbare Augenbewegungsartefakte oder anderweitige Störungen im EEG enthielten ebenso wie Trials mit inkorrekten Antworten in der Beurteilungsaufgabe.

In der quantitativen Analyse der gemittelten ereigniskorrelierten Potentiale wurde entsprechend der für das Experiment I beschriebenen hierarchischen Auswertungsabfolge vorgegangen. Allerdings konnten im vorliegenden Experiment sowohl für CI-Träger als auch für Kontrollprobanden alle gemessenen Elektrodenpositionen in die statistische Analyse einbezogen werden, da durch die visuelle Darbietung der Stimulussätze keine CI-Artefakte auftraten, welche die EEG-Ableitung auf den lateralen Elektrodenpositionen beeinträchtigt hätten. Damit wurden für CI-Träger ebenso wie für Kontrollprobanden separate Analysen für die 16 lateralen Elektrodenpositionen und für die drei Elektroden der Mittellinie durchgeführt. Die in Experiment I durchgeführten Analysen über fünf Elektrodenpositionen entfielen.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Verhaltensdaten

Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Fehlerraten und Reaktionszeiten für die Kontrollgruppe und die CI-Gruppe sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tab. 6.2: *Mittlere Reaktionszeiten in Millisekunden und prozentuale Fehlerraten für die einzelnen Bedingungen im Vergleich für CI-Träger und normalhörende Kontrollprobanden. Die jeweiligen Standardabweichungen sind in Klammern angegeben.*

	Kontrollen		CI-Träger	
	Reaktionszeit	*Fehlerrate*	*Reaktionszeit*	*Fehlerrate*
korrekt	555(176)	0.5 (1.6)	641(183)	2.0 (2.8)
semantisch inkorrekt	570(158)	2.7 (3.5)	687(245)	1.3 (1.7)
syntaktisch inkorrekt	512(139)	1.3 (2.4)	672(213)	2.5 (8.3)

Für die Kontrollgruppe ergab sich in der Varianzanalyse über die Fehlerdaten ein signifikanter Effekt des Faktors BEDINGUNG ($F(2,30) = 4,09, p < .05, MS_e = 5$). Dieser ging darauf zurück, dass für semantisch inkorrekte Sätze signifikant mehr Fehler als für korrekte Sätze ($t(15) = 2,35, p < .05$) sowie tendenziell mehr Fehler im Vergleich zu syntaktisch inkorrekten Sätzen ($t(15) = 1,90, p = .08$) zu verzeichnen waren. Auch für die Reaktionszeiten wurde in der Kontrollgruppe ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt ($F(2,30) = 9,02, p < .01, MS_e = 1605$), was sich darauf zurückführen ließ, dass die Reaktionszeiten auf Sätze der syntaktisch inkorrekten Bedingung signifikant kürzer waren sowohl im Vergleich mit der korrekten Bedingung ($t(15) = 2,42, p < .05$) als auch mit der semantisch inkorrekten Bedingung ($t(15) = 5,25, p < .001$).

Für die CI-Träger zeigte sich im Gegensatz zu den Kontrollprobanden ein Effekt des Faktors BEDINGUNG weder in der Varianzanalyse über die Fehlerraten ($F(2,30) < 1$) noch in der Analyse über die Reaktionszeiten ($F(2,30) = 1,69, p = .20, MS_e = 5329$).

Bei einem Vergleich von CI-Trägern und Kontrollprobanden konnte für die Fehlerraten weder ein Haupteffekt des Faktors GRUPPE ($F(1,30) < 1$) noch eine Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE ($F(2,60) = 1,66, p = .20, MS_e = 12$) nachgewiesen werden. Ein marginal signifikanter Haupteffekt des Faktors Gruppe ergab sich jedoch für den Vergleich der Reaktionszeiten über alle Bedingungen hinweg ($F(1,30) = 3,53, p = .07, MS_e = 99976$). Eine weitergehende Analyse zeigte, dass für die CI-Träger auf syntaktisch inkorrekte Sätze signifikant längere Reaktionszeiten im Vergleich zu Normalhörenden zu beobachten waren ($F(1,30) = 6,36, p < .05, MS_e = 32333$). Für die Reaktionszeiten ergab sich auch eine Interaktion der Faktoren GRUPPE und BEDINGUNG ($F(2,60) = 3,23, p < .05, MS_e = 3467$), die zurückging auf die in den Einzelanalysen nachgewiesene Tatsache, dass in der Reaktionszeitanalyse für Kontrollprobanden, nicht jedoch für CI-Träger ein signifikanter Bedingungseffekt festgestellt werden konnte.

Zusammenfassend zeigen die Daten deutlich, dass hinsichtlich des Satzverständnisses keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollprobanden bestanden. Leichte Abweichungen deuteten sich lediglich in den Reaktionszeiten auf die syntaktisch inkorrekten Sätze an. Da es sich hierbei jedoch um *off-line*-Daten handelte, die ab 2000 ms nach Satzende gemessen wurden, soll hier keine Interpretation von Reaktionszeitunterschieden erfolgen.

6.3.2 EKP-Daten

6.3.2.1 Semantische Bedingung: Kontrollgruppe

Die ereigniskorrelierten Potentiale der semantisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den korrekten Sätzen für die Kontrollgruppe sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Wie zu erkennen ist, löste die semantische Verletzung eine deutliche N400-Komponente aus.

N400-Komponente (300 bis 700 ms). Die statistische Absicherung der N400 erfolgte auf der Basis der visuellen Inspektion und in Übereinstimmung mit der in Experiment I für die Kontrollprobanden beobachteten N400 in einem Zeitfenster von 300 bis 700 ms nach Beginn des kritischen Wortes. In diesem Zeitfenster ergab sich in der globalen Analyse ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Es zeigte sich außerdem eine Interaktion zwischen BEDINGUNG und HEMISPHÄRE sowie eine Dreifachinteraktion von BEDINGUNG, REGION und HEMISPHÄRE.

Tab. 6.3: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	8.93	$<.01$	3.39
BEDINGUNG × REGION	1,15	1.61	.22	0.28
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	36.17	$<.0001$	0.16
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	9.56	$<.01$	0.11

Die aufgrund dieser signifikanten Interaktionen gerechneten Analysen auf Quadrantenebene ergaben eine statistische Signifikanz des Haupteffekts BEDINGUNG für den anterioren und den posterioren Quadranten der rechten Hemisphäre. Die Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE interagierten links-anterior und rechts-posterior miteinander, für den linken posterioren Quadranten war eine tendenziell signifikante Interaktion der Faktoren zu verzeichnen.

Tab. 6.4: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	2.21	.16	3.43
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.65	$<.05$	0.64
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	24.52	$<.001$	3.77
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	2.67	.12	4.47
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.22	.07	0.27
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	9.33	$<.01$	4.13
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	5.16	$<.01$	0.24

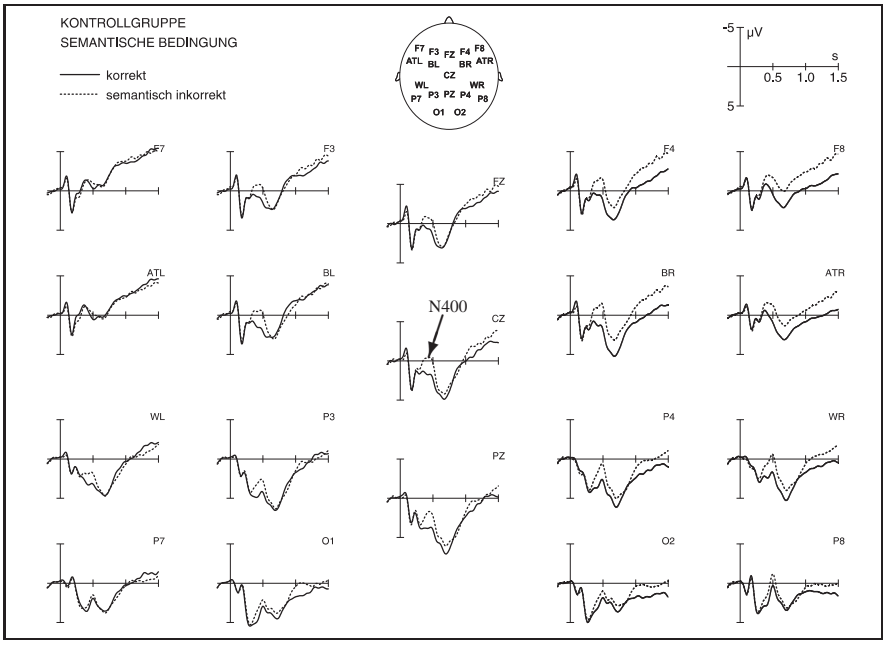

Abb. 6.1: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung.*

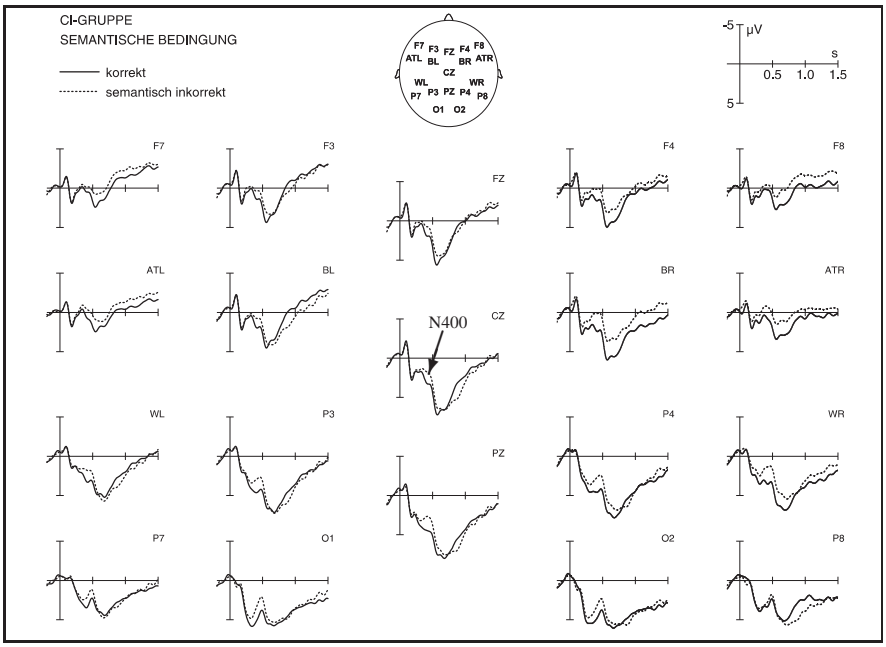

Abb. 6.2: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung.*

In den entsprechenden Analysen auf Elektrodenebene zeigte sich, dass der beobachtete Negativierungseffekt links-anterior auf der Elektrodenposition BL signifikant wurde. Im linken posterioren Quadranten erreichte der Effekt auf der Elektrodenposition P3 statistische Signifikanz, auf den Positionen WL und O1 wurde er nur marginal signifikant und für die am lateralsten gelegene Elektrodenposition P7 ließ er sich nicht nachweisen. Die Interaktion im rechts-posterioren Quadranten reflektierte die Tatsache, dass die Negativierung auf der Elektrodenposition O2 nur marginal signifikant wurde, auf den Elektrodenpositionen WR, P4 und P8 jedoch eine reliable Signifikanz vorlag.

Tab. 6.5: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	0.00	.95
F3	1,15	3.01	.10
ATL	1,15	0.00	.95
BL	1,15	8.12	$<.05$
posterior-links			
WL	1,15	3.61	.08
P7	1,15	0.12	.74
P3	1,15	4.55	$<.05$
O1	1,15	3.08	.10
posterior-rechts			
WR	1,15	13.32	$<.01$
P8	1,15	11.63	$<.01$
P4	1,15	7.72	$<.05$
O2	1,15	3.20	.09

In der getrennt gerechneten Analyse für die Mittellinienelektroden ergab sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, die Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE interagierten aber nicht miteinander.

Tab. 6.6: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	4.93	$<.05$	5.86
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	<1		

Zusammenfassend wurde damit in der Kontrollgruppe für die semantische Bedingung eine N400-Komponente zwischen 300 und 700 ms nachgewiesen, welche rechtshemisphärisch stärker ausgeprägt war.

6.3.2.2 Semantische Bedingung: CI-Gruppe

Wie aus Abbildung 6.2 ersichtlich ist, lässt sich für die Gruppe der CI-Träger ebenfalls eine N400-Komponente für den Vergleich der Potentialverläufe für semantisch inkorrekte Sätzen mit den EKPs für korrekte Sätzen feststellen.

N400-Komponente (300 bis 700 ms). Da die N400 bei den CI-Trägern im gleichen Zeitfenster wie bei den Kontrollprobanden zu beobachten war, wurde auch hier eine Analyse zwischen 300 und 700 ms gerechnet. Es ergaben sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG und eine Interaktion zwischen BEDINGUNG und HEMISPHÄRE.

Tab. 6.7: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	5.93	$<.05$	5.27
BEDINGUNG × REGION	1,15	<1		
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	6.81	$<.05$	0.35
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	1.62	.22	0.22

Auf Quadrantenebene zeigte sich ein reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG nur für die beiden Quadranten der rechten Hemisphäre. In den beiden posterioren Quadranten interagierte der Faktor BEDINGUNG mit dem Faktor ELEKTRODE.

Tab. 6.8: *Quadrantenanalyse für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.92	.19	8.55
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.88	.18	0.23
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	16.98	$<.001$	4.09
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.79	.19	0.60
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	2.34	.15	6.95
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.74	$<.05$	0.16
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	6.52	$<.05$	5.43
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	4.28	$<.05$	0.81

Entsprechende t-Tests ergaben, dass die beobachtete Negativierung links-posterior nur auf der Elektrodenposition O1 signifikant wurde, rechts-posterior erreichte er dagegen auf den Elektrodenpositionen WR und P4 sowie marginal auf der Position O2 statistische Signifikanz.

Tab. 6.9: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
posterior-links			
WL	1,15	1.07	.32
P7	1,15	1.24	.28
P3	1,15	2.31	.15
O1	1,15	4.99	$<.05$
posterior-rechts			
WR	1,15	18.33	$<.001$
P8	1,15	0.09	.77
P4	1,15	8.09	$<.05$
O2	1,15	3.31	.09

Wie aus Tabelle 6.10 ersichtlich ist, konnte für die Mittellinienelektroden kein reliabler Negativierungseffekt nachgewiesen werden.

Tab. 6.10: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-700 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	2.01	.18	8.36
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	1.28	.29	0.24

Insgesamt konnte somit für die semantische Bedingung bei den CI-Trägern ebenso wie bei den Kontrollprobanden zwischen 300 und 700 ms nach Beginn des kritischen Worts eine rechts-hemisphärisch stärker ausgeprägte N400-Komponente nachgewiesen werden.

6.3.2.3 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe

In Abbildung 6.3 ist der Verlauf der ereigniskorrelierten Potentiale für die Sätze der korrekten und der syntaktisch inkorrekten Bedingung für die Gruppe der Kontrollprobanden zu sehen. Die syntaktisch inkorrekten Sätze lösten in diesem Experiment bei den Kontrollprobanden eine P600-Komponente aus. Es wird ebenfalls eine frühere anteriore Negativierung sichtbar, welche allerdings nur sehr gering ausgeprägt ist. Diese Negativierung tritt zwischen 350 und 500 ms und damit in einem im Vergleich zum in der akustischen Modalität beobachteten frühen Negativierungseffekt etwas späteren Zeitfenster auf; sie ist im Gegensatz zu diesem Effekt nur auf rechts-lateralen Elektrodenpositionen beobachtbar.

Anteriore Negativierung (350 bis 500 ms). Da sich bei der visuellen Inspektion der Daten ergeben hatte, dass die erwartete frühe anteriore Negativierung für syntaktisch inkorrekte Sätze im Vergleich zu korrekten Sätzen in einem späteren Zeitfenster als die ELAN in Experiment I auftrat, wurde zur Überprüfung der statistischen Reliabilität dieses Effekts das spätere Zeitfenster 350 bis 500 ms gewählt.

Tab. 6.11: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	1.62	.22	6.87
BEDINGUNG × REGION	1,15	<1		
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	7.76	$<.05$	0.61
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	6.82	$<.05$	0.28

Wie aus Tabelle 6.11 hervorgeht, konnte in der entsprechenden Analyse über die lateralen Elektrodenpositionen zwar kein Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG festge-

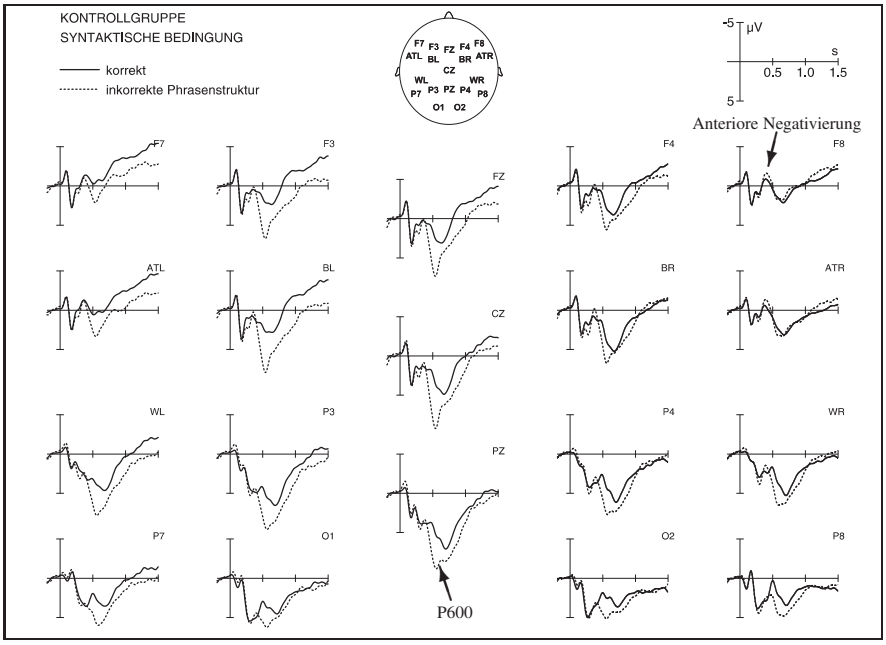

Abb. 6.3: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung.*

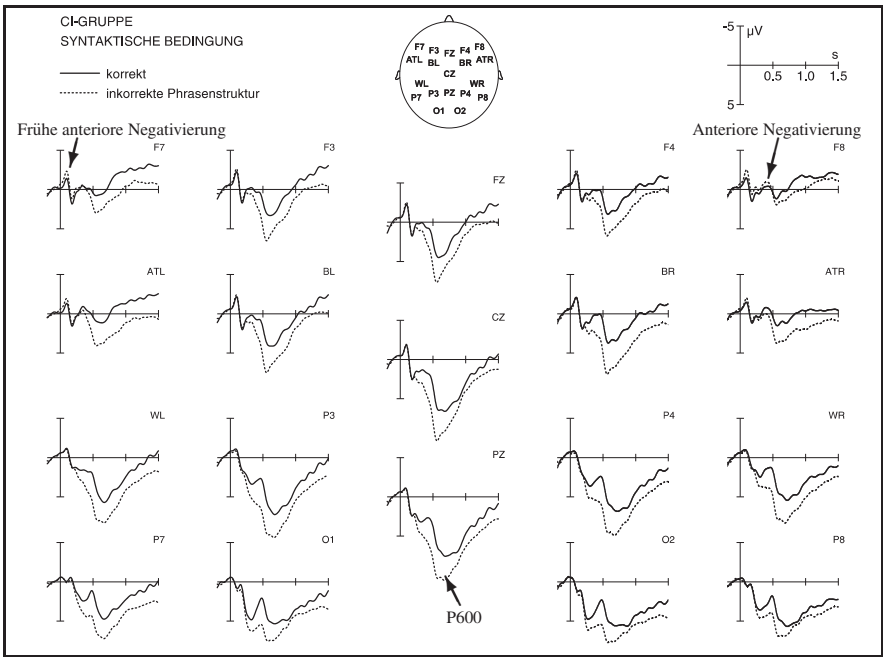

Abb. 6.4: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung.*

stellt werden, jedoch war sowohl eine Interaktion dieses Faktors mit dem Faktor HEMISPHÄRE feststellbar als auch eine signifikante Dreifachinteraktion von BEDINGUNG, HEMISPHÄRE und REGION.

Die dementsprechend durchgeführten Analysen auf Quadrantenebene zeigten, dass im festgelegten Zeitfenster ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG im links-anterioren Quadranten vorlag, welcher allerdings auf den bereits bei etwa 400 ms einsetzenden Positivierungseffekt zurückging. Es wurde jedoch auch eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE im rechts-anterioren Quadranten festgestellt.

Tab. 6.12: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	5.81	$<.05$	8.09
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.13	.33	0.77
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	4.32	$<.05$	0.84
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	2.13	.16	8.12
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.02	.37	0.36
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.06	.36	0.35

Die rechts-anterior nachgewiesene Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE wurde mittels t-Tests für die einzelnen Elektroden aufgelöst, wobei sich zeigte, dass auf der Elektrodenpositionen F8 ein signifikanter Negativierungseffekt zu verzeichnen war.

Tab. 6.13: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
anterior-rechts			
F8	1,15	5.73	$<.05$
F4	1,15	-1.00	.33
ATR	1,15	2.45	.14
BR	1,15	-0.25	.63

In der separaten Analyse für die Mittellinienelektroden ergab sich ebenfalls ein signifikanter Effekt des Faktors BEDINGUNG, der aber wiederum auf die bereits bei 400 ms einsetzende Positivierung zurückging.

Tab. 6.14: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	5.26	$<.05$	12.71
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	2.31	.14	0.43

P600-Komponente (400 bis 1000 ms). Die inferenzstatistische Analyse für die den Positivierungseffekt wurde auf Basis der deskriptiven Analyse und in Übereinstimmung mit der in Experiment I beobachteten P600 im Zeitfenster 400 bis 1000 ms gerechnet. Es ergaben sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG sowie eine reliable Interaktion von BEDINGUNG und HEMISPHÄRE. Auch die Dreifachinteraktion der Faktoren BEDINGUNG, REGION und HEMISPHÄRE erreichte statistische Signifikanz.

Tab. 6.15: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	15.06	$<.01$	5.09
BEDINGUNG × REGION	1,15	<1		
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	17.61	$<.001$	0.57
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	21.53	$<.001$	0.17

In der zur Auflösung der reliablen Interaktionen gerechneten Analyse auf Quadrantenebene zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG für den links-anterioren Quadranten und für die beiden posterioren Quadranten. Der Faktor BEDINGUNG interagierte mit dem Faktor ELEKTRODE in den beiden anterioren Quadranten sowie im links-posterioren Quadranten.

Tab. 6.16: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	57.83	$<.0001$	3.25
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	7.55	$<.01$	0.71
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	1.95	.18	6.43
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	6.67	$<.01$	0.95
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	13.47	$<.01$	7.63
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	9.03	$<.001$	0.30
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	6.23	$<.05$	9.40
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		

Nachfolgend durchgeführte t-Tests zeigten, dass die Interaktion im links-anterioren Quadranten sich auf eine etwas geringere Ausprägung der beobachteten Positivierung auf den lateraler gelegenen Elektrodenpositionen F7 und ATL im Vergleich zu den zentraler gelegenen Elektroden F3 und BL zurückführen ließ. Rechts-anterior erreichte der Effekt dagegen nur auf der Elektrodenposition F4 statistische Signifikanz. Die Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE im links-anterioren Quadranten ging auf die Tatsache zurück, dass die Negativierung auf der Elektrodenposition WL stärker signifikant wurde als auf den Positionen P7 und P3 und wiederum auf der Elektrodenposition O1 nur marginale Signifikanz vorlag.

Tab. 6.17: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	-25.26	$< .001$
F3	1,15	-46.36	$< .0001$
ATL	1,15	-25.40	$< .001$
BL	1,15	-43.70	$< .0001$
anterior-rechts			
F8	1,15	0.76	.40
F4	1,15	-5.97	$< .05$
ATR	1,15	-0.00	.95
BR	1,15	-2.84	.11
posterior-links			
WL	1,15	-20.11	$< .001$
P7	1,15	-14.63	$< .01$
P3	1,15	-14.47	$< .01$
O1	1,15	-4.05	.06

Die Analyse für die Mittellinienelektroden ergab einen signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, jedoch keine Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 6.18: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	17.21	$< .001$	9.19
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	< 1		

Zusammenfassend wurde in der syntaktischen Bedingung für die Kontrollgruppe eine anteriore Negativierung zwischen 350 und 500 ms festgestellt, welche sich allerdings auf die Elektrodenposition F8 beschränkte. Des Weiteren konnte für das Zeitfenster zwischen 400 und 1000 ms nach Beginn des kritischen Worts eine P600-Komponente nachgewiesen werden.

6.3.2.4 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe

Die Potentialverläufe der CI-Träger für die korrekte und die syntaktisch inkorrekte Bedingung sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Für die syntaktisch inkorrekten Sätze ist auf den lateral gelegenen anterioren Elektrodenpositionen zunächst ein leicht negativerer Verlauf im Vergleich zu den korrekten Sätzen erkennbar, welcher sich zwischen 100 und 300 ms nach Beginn des kritischen Wortes beobachten lässt. Das Zeitfenster für diese frühe anteriore Negativierung entspricht demjenigen der bei den Kontrollprobanden in Experiment I festgestellten akustischen ELAN-Komponente. Neben dieser frühen Negativierung wird in den EKP-Daten der Patienten auch im Zeitfenster zwischen 350 und 500 ms, in welchem im vorliegenden Experiment für die Kontrollgruppe eine anteriore Negativie-

rung nachgewiesen wurde, ein solcher anteriorer Negativierungseffekt manifest. Dieser ist ebenso wie in der Kontrollgruppe allerdings nur rechts-lateral zu beobachten. Des Weiteren zeigen die EKP-Verläufe der Patienten im Zeitbereich der P600-Komponente für die syntaktisch inkorrekte Bedingung eine deutliche Positivierung im Vergleich zur korrekten Bedingung.

Frühe anteriore Negativierung (100-300 ms). Es wurde zunächst geprüft, ob es sich bei der frühen anterioren Negativierung um einen reliablen Effekt handelte, wofür entsprechend der visuellen Dateninspektion ein Zeitfenster von 100 bis 300 ms nach Beginn des kritischen Wortes gewählt wurde. Die entsprechende inferenzstatistische Analyse ergab zwar keinen Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, jedoch eine Interaktion von BEDINGUNG und REGION.

Tab. 6.19: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	< 1		
BEDINGUNG × REGION	1,15	7.63	$< .05$	0.66
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	1.96	.18	0.27
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	< 1		

In einer daraufhin durchgeführten Analyse auf Quadrantenebene zeigte sich, dass in keinem der vier Quadranten ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG vorlag. Für die beiden anterioren Quadranten konnte jedoch eine marginal signifikante Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE festgestellt werden.

Tab. 6.20: *Quadrantenanalyse für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.18	.29	3.77
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.10	.07	0.23
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	2.36	.15	6.56
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.25	.07	0.43
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.56	.23	2.63
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	< 1		0.10
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	¡ 1		2.38
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	< 1		0.47

Die dementsprechende Analyse auf Elektrodenebene ergab, dass der beobachtete Negativierungseffekt auf den lateralsten frontalen Elektrodenpositionen F7 und F8 statistische Signifikanz erreichte.

Tab. 6.21: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	5.39	$<.05$
F3	1,15	0.49	.50
ATL	1,15	1.57	.23
BL	1,15	0.01	.93
anterior-rechts			
F8	1,15	8.36	$<.05$
F4	1,15	1.40	.26
ATR	1,15	1.59	.23
BR	1,15	0.27	.61

Die Analyse für die Mittellinienelektroden ergab keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE wurde jedoch marginal signifikant.

Tab. 6.22: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	3.24	.05	0.25

Wie entsprechende t-Tests zeigten, ging die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE auf den Mittellinienelektroden auf gegenläufige, jedoch jeweils nicht signifikante Effekte zurück.

Tab. 6.23: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	0.14	.71
CZ	1,15	-0.64	.44
PZ	1,15	-0.96	.34

Anteriore Negativierung (350-500 ms). Eine weitere Analyse prüfte die Reliabilität der rechts-lateral zwischen 350 und 500 ms beobachtbaren anterioren Negativierung.

Tab. 6.24: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	1.87	.19	8.94
BEDINGUNG × REGION	1,15	10.98	$<.01$	0.52
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	8.40	$<.05$	0.23
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	1.57	.23	0.20

Wie die Tabelle 6.24 zeigt, ergab sich hierbei in der globalen Analyse über die lateralen Elektrodenpositionen zwar kein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG,

jedoch erreichte sowohl die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und REGION als auch die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und HEMISPHÄRE statistische Signifikanz.

In der nachfolgend gerechneten Analyse auf Quadrantenebene konnte für beide anteriore Quadranten eine reliable Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE nachgewiesen werden. Der signifikante Haupteffekt BEDINGUNG im linken posterioren Quadranten ebenso wie der marginal signifikante Haupteffekt dieses Faktors rechts-posterior ging auf die bereits bei 400 ms einsetzende Positivierung zurück.

Tab. 6.25: *Quadrantenanalyse für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.31	.27	10.15
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	4.09	$<.05$	0.82
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	<1		9.83
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	5.71	$<.01$	0.88
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	5.28	$<.05$	10.07
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.45	.25	0.43
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	3.37	.09	9.50
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		0.71

Die für die Elektrodenpositionen der beiden anterioren Quadranten durchgeführten t-Tests ergaben, dass der beobachtete Negativierungseffekt im rechts-anterioren Quadranten auf der Elektrodenposition F8 signifikant wurde. Die links-anterior festgestellte Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE ließ sich hingegen auf gegenläufige, jedoch jeweils nicht signifikant werdende Effekte zurückführen.

Tab. 6.26: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
anterior-links			
F7	1,15	0.04	.84
F3	1,15	-2.69	.12
ATL	1,15	-0.37	.55
BL	1,15	-2.64	.12
anterior-rechts			
F8	1,15	5.20	$<.05$
F4	1,15	-0.43	.52
ATR	1,15	0.29	.60
BR	1,15	-1.11	.31

Wie der Tabelle 6.27 zu entnehmen ist, wurde in der separat gerechneten Analyse für die Mittellinienelektroden ein marginal signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt, welchem allerdings die bereits einsetzende Positivierung zugrunde lag.

Tab. 6.27: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 350-500 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	3.83	.07	14.41
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	2.15	.14	0.49

P600-Komponente (400 bis 1000 ms). Die inferenzstatistische Analyse zur Überprüfung der bei visueller Inspektion der EKP-Daten erkennbaren P600-Komponente wurde wie bei den Kontrollprobanden im Zeitfenster 400 bis 1000 ms vorgenommen. Es zeigte sich, dass im entsprechenden Zeitfenster ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG zu verzeichnen war. Auch die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und HEMISPHÄRE wurde statistisch signifikant, tendenzielle Signifikanz lag für die Interaktion von BEDINGUNG und REGION vor.

Tab. 6.28: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	10.64	$<.01$	7.90
BEDINGUNG × REGION	1,15	3.45	.08	1.09
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	14.15	$<.01$	0.50
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	2.03	.17	0.52

In der Analyse auf Quadrantenebene zeigte sich für den links-anterioren Quadranten sowie für die beiden posterioren Quadranten ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE lag in den beiden anterioren Quadranten sowie im links-posterioren Quadranten vor.

Tab. 6.29: *Quadrantenanalyse für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	10.28	$<.01$	11.62
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	6.94	$<.01$	0.73
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	1.71	.21	7.32
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.63	$<.05$	1.26
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	14.10	$<.01$	11.53
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	6.92	$<.01$	0.51
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	9.35	$<.01$	9.56
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		

Die nachfolgend durchgeführten t-Tests ergaben, dass sich die Interaktion im links-anterioren Quadranten auf eine unterschiedlich starke Ausprägung des beobachteten Positivierungseffekts zurückführen ließ. Der Effekt wurde auf den beiden zentraler gelegenen Elektrodenpositionen F3 und BL stärker signifikant als auf ATL und erreichte kein Si-

gnifikanzniveau auf der Position F7. Rechts-anterior ließ sich statistische Signifikanz nur für die beiden zentraler gelegenen Elektrodenpositionen F4 und BR nachweisen. Im links-posterioren Quadranten war für alle Elektrodenpositionen eine statistische Signifikanz der Positivierung zu verzeichnen, die allerdings auf der Position O1 geringer ausgeprägt war.

Tab. 6.30: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	-2.37	.14
F3	1,15	-17.78	$<.001$
ATL	1,15	-4.99	$<.05$
BL	1,15	-17.02	$<.001$
anterior-rechts			
F8	1,15	0.47	.50
F4	1,15	-5.14	$<.05$
ATR	1,15	-0.42	.53
BR	1,15	-6.15	$<.05$
posterior-links			
WL	1,15	-17.12	$<.001$
P7	1,15	-15.68	$<.01$
P3	1,15	-13.68	$<.01$
O1	1,15	-5.10	$<.05$

In der für die Mittellinienelektroden getrennt durchgeführten Analyse ergab sich ein reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, jedoch ohne Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 6.31: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-1000 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	12.27	$<.01$	10.41
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	2.01	.15	0.65

Insgesamt zeigte sich bei den CI-Trägern in der syntaktischen Bedingung somit eine anteriore Negativierung zwischen 100 und 300 ms, die allerdings lediglich auf den Elektrodenpositionen F7 und F8 manifest wurde, wobei die Berechnung der entsprechenden t-Tests auf die Auflösung nur marginal signifikanter Interaktionen zurückging. Bei den Patienten konnten des Weiteren eine signifikante Negativierung zwischen 350 und 500 ms auf der rechts-anterioren Elektrodenposition F8 sowie eine breiter verteilte parietale P600-Komponente zwischen 400 und 100 ms nachgewiesen werden.

6.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Experiment II sollte die Hypothese geprüft werden, dass der eingeschränkte akustische Input bei postlingual ertaubten CI-Trägern keine modalitätsüberschreitenden Abweichungen im Sprachverstehensprozess zur Folge hat. Dazu wurden die Stimuli aus Experiment I visuell dargeboten, d. h. es wurden Sätze präsentiert, welche entweder korrekt waren oder eine semantische Verletzung oder eine Phrasenstrukturanomalie enthielten.

Für die normalhörenden Kontrollprobanden war eine Replikation der Befunde aus Experiment I erwartet worden, da sich schon in früheren Studien gezeigt hatte, dass die untersuchten sprachlichen Informationstypen in der visuellen Modalität die gleichen Effekte hervorrufen wie in der akustischen Modalität (z. B. Gunter et al., 1999a). In der semantischen Bedingung bestätigten sich diese Erwartungen. Die semantisch inkorrekten Sätze lösten gegenüber den korrekten Sätzen eine N400-Komponente aus, die hinsichtlich ihrer Latenz der im akustischen Experiment I beobachteten N400 ähnelte. Im Gegensatz zu der akustisch evozierten N400 wies der Negativierungseffekt im vorliegenden Experiment jedoch eine stärkere rechts-laterale Ausprägung auf. Diese Beobachtung steht in Übereinstimmung mit den Befunden früherer Studien zu Modalitätsunterschieden für die N400 (Kutas et al., 1988).

Für die Verarbeitung der Phrasenstrukturinformationen in der syntaktischen Bedingung konnte bei den Kontrollprobanden zwar wie vorhergesagt eine P600-Komponente nachgewiesen werden, ein der in Experiment I beobachteten ELAN-Komponente vergleichbarer früher anteriorer Negativierungseffekt ließ sich im entsprechenden Zeitfenster jedoch nicht feststellen. Stattdessen wurde eine spätere anteriore Negativierung beobachtet, welche zwischen 350 und 500 ms und damit etwa im Zeitfenster der LAN-Komponente auftrat. Es handelte sich dabei aber um einen nur sehr gering ausgeprägten Effekt, der nur auf einer einzelnen rechts-lateralen Elektrodenposition zu beobachten war.

Für das spätere Auftreten der anterioren Negativierung bei den Kontrollprobanden bieten sich mehrere Erklärungen an. Zunächst sind hier die im vorliegenden Experiment verwendeten relativ langen Präsentationszeiten anzuführen, welche mit Sicherheit einen Einfluss auf die Prozesse der schnellen automatischen Wortkategorieverarbeitung hatten[3]. Des Weiteren kann zur Erklärung möglicherweise auch das höhere Durchschnittsalter der

[3] Beispielsweise verwendeten Neville et al. (1991) in einer visuellen Studie, in der sie eine ELAN als Korrelat der Verarbeitung von Phrasenstrukturverletzungen nachweisen konnten, Präsentationszeiten von 200 ms für die Wortpräsentation und 300 ms ISI. Dagegen wurde im vorliegenden Experiment mit einer Wortpräsentationszeit von 600 ms und einem ISI von 500 ms gearbeitet, also bei Präsentationsraten, welche das Stattfinden von automatischen Verarbeitungsprozessen normalerweise verhindern.

Probanden herangezogen werden. Ein genereller Einfluss des Alters auf die frühen syntaktischen Verarbeitungsprozesse ist dabei aber auszuschließen. Dass die automatischen Prozesse der Wortkategorieverarbeitung nicht prinzipiell vom Alter beeinflusst werden, hatten Gunter, Vos und Friederici (1999b) in einer Studie zeigen können, in welcher sie sowohl jüngere als auch ältere Probanden testeten. Die Autoren berichteten, dass akustisch präsentierte Wortkategorieverletzungen bei den älteren Probanden ebenso wie bei den jüngeren eine ELAN evozierten, wobei sich der Effekt in seiner Ausprägung für die beiden Gruppen nicht voneinander unterschied. Für das vorliegende visuelle Experiment wäre ein Zusammenhang zwischen dem Alter der Probanden und den Prozessen der frühen syntaktischen Verarbeitung allerdings dahingehend vorstellbar, dass sich eine altersbedingte Verminderung der visuellen Diskriminationsfähigkeit auf die Prozesse der visuellen Sprachverarbeitung auswirkte. So konnte in einer Studie von Gunter et al. (1999a) eine sich in der Latenz der frühen anterioren Negativierung widerspiegelnde Verlangsamung der frühen Prozesse der Phrasenstrukturverarbeitung in Abhängigkeit von den visuellen Input-Bedingungen experimentell nachgewiesen werden. Während die visuelle Diskriminierbarkeit in dieser Untersuchung jedoch über die physikalischen Reizeigenschaften manipuliert wurde, wäre für das vorliegende Experiment eher ein Zusammenhang mit den möglicherweise altersbedingt verminderten individuellen Diskriminationsfähigkeiten der Probanden anzunehmen.

Die bei den Kontrollprobanden beobachtete anteriore Negativierung war allerdings nicht nur in einem späteren Zeitfenster als erwartet zu beobachten, sondern sie wies auch eine ungewöhnliche Verteilung auf. In der Literatur werden im Zusammenhang mit visuell präsentierten Phrasenstrukturverletzungen in der Regel eher links-anteriore Negativierungen berichtet (z. B. Neville et al., 1991); in akustischen Experimenten wurde verschiedentlich auch eine schon bilaterale Verteilung der anterioren Negativierung gefunden (Hahne & Jescheniak, 2001, beispielsweise aber auch Experiment I der vorliegenden Arbeit). Die Negativierung im vorliegenden Experiment manifestierte sich im Gegensatz zu den aus der Literatur bekannten Befunden jedoch lediglich rechts-hemisphärisch. Es handelte sich zudem um einen äußerst gering ausgeprägten, nur für eine einzelne laterale rechts-anteriore Elektrodenposition nachweisbaren Effekt. Eine rechts-anteriore Negativierung als Korrelat von phrasenstrukturellen Verarbeitungsprozessen wurde in der Literatur bisher noch nicht berichtet. Insofern ist fraglich, ob der im vorliegenden Experiment beobachtete Negativierungseffekt im Sinne einer verzögerten ELAN-Komponente interpretiert werden kann, oder ob nicht vielmehr die bereits oben zur Erklärung der Verzögerung

des Effekts angeführten Gründe bei den Kontrollprobanden zum völligen Ausbleiben der frühen und automatischen Prozesse der Phrasenstrukturverarbeitung geführt haben. Es ist allerdings derzeit unklar, welche spezifischen Verarbeitungsprozesse sich in diesem Fall in der rechts-anterioren Negativierung widerspiegeln.

Für die CI-Gruppe konnte zunächst gezeigt werden, dass hinsichtlich der Fehlerraten keine signifikanten Unterschiede gegenüber den Kontrollprobanden vorlagen, d. h. dass die inkorrekten Sätze von den CI-Trägern ebenso gut wie von Hörgesunden erkannt wurden. Den Hypothesen folgend sollten sich für die Patienten auch in den ereigniskorrelierten Potentialen sowohl in der semantischen als auch in der syntaktischen Bedingung keine Unterschiede gegenüber den hörgesunden Kontrollprobanden ergeben. Diesen Erwartungen entsprechend riefen die semantischen Verletzungen bei den CI-Patienten eine N400-Komponente hervor, welche ebenso wie bei den Kontrollprobanden eine stärkere rechts-laterale Verteilung aufwies. In der syntaktischen Bedingung konnte in der CI-Gruppe ebenso wie in der Kontrollgruppe eine rechts-anteriore Negativierung zwischen 350 und 500 ms nachgewiesen werden, die von einer P600-Komponente gefolgt wurde. Im Gegensatz zu den Normalhörenden wurde bei den Patienten zusätzlich eine bilateral verteilte frühere anteriore Negativierung in einem Zeitfenster zwischen 100 und 300 ms beobachtet. Die Latenz dieser frühen Negativierung entsprach damit zwar der in anderen Studien beobachteten ELAN-Komponente (z. B. Neville et al., 1991), allerdings wurde die Reliabilität des Effekts lediglich im Rahmen einer Analyse auf Elektrodenebene, welche auf eine nur marginal signifikante Interaktion zurückging, nachgewiesen. Aufgrund dieser Tatsache ebenso wie aufgrund der bilateralen Verteilung der Komponente erscheint es fraglich, ob es sich bei der zwischen 100 und 300 ms auftretenden Negativierung um eine ELAN als das Korrelat von frühen, automatischen Prozessen der Wortkategorieverarbeitung handelt. Fraglich ist aber auch, ob sich diese Prozesse in der zwischen 350 und 500 ms nachgewiesenen anterioren Negativierung widerspiegeln. Da dieser Negativierungseffekt ebenso wie in der Kontrollgruppe nur rechts-lateral zutage trat, erscheint es – wie bereits für die Kontrollgruppe dargelegt – eher unplausibel, ihn im Sinne eines verzögerten Korrelats der frühen automatischen Wortkategorieverarbeitung zu interpretieren.

Insgesamt sprechen die Daten eher dafür, dass bei den Patienten ähnlich wie bei den Kontrollprobanden keine schnellen syntaktischen Verarbeitungsprozesse stattfanden, was sich wiederum sowohl mit den sehr langsamen Präsentationsraten im vorliegenden Experiment als auch eventuell mit einer altersbedingt verminderten visuellen Diskriminati-

onsfähigkeit der Patienten erklären ließe (s. o.). Falls es sich bei der zwischen 100 und 300 ms beobachteten Negativierung jedoch tatsächlich um einen reliablen Effekt handeln sollte – wobei diese Reliabilität durch eine eindeutige Replikation des Effekts in weiteren Studien nachgewiesen werden müsste – würde dieser Befund auf einen Unterschied zwischen CI-Trägern und Kontrollprobanden hinsichtlich der frühen Prozesse der Wortkategorieverarbeitung in der visuellen Modalität hindeuten. Ein solcher Unterschied könnte sich möglicherweise darauf zurückführen lassen, dass die Beeinträchtigung der akustischen Modalität bei den CI-Trägern mit einer Steigerung des Leistungsvermögens in der visuellen Modalität einhergeht. Evidenz für eine solche Annahme kommt aus behavioralen Studien (Rettenbach, Diller & Sireteanu, 1999) ebenso wie aus EKP-Studien (z. B. Neville & Lawson, 1987a, 1987b, 1987c), die für kongenital taube Probanden eine im Vergleich zu Hörgesunden effizientere Verarbeitung visueller Reize nachweisen konnten. Für CI-Träger hatte sich in einer Reihe von PET-Studien gezeigt, dass bei ihnen visuelle Verarbeitungsstrukturen verstärkt in den auditiven Sprachverstehensprozess involviert werden (Giraud et al., 2000, 2001b; Giraud & Truy, 2002, vgl. auch Abschnitt 2.4), wobei die in der akustischen Modalität zum Einsatz kommende visuelle Kompensationsstrategie dabei möglicherweise auch eine generelle Steigerung des visuellen Leistungsvermögens bewirkt. Die Annahme einer Steigerung des visuellen Leistungsvermögens bei den CI-Trägern, welche sich auch auf die Verarbeitung visuell präsentierter Sätze auswirkt, kann auf der Basis der vorliegenden Befunde allerdings nur spekulativ bleiben.

Unabhängig davon, ob hinsichtlich der frühen und automatischen Prozesse des initialen Phrasenstrukturaufbaus Unterschiede zwischen CI-Patienten und Normalhörenden auftraten, ist jedoch festzustellen, dass die Phasenstrukturverletzung im vorliegenden Experiment in beiden Gruppen eindeutig eine P600-Komponente hervorrief. Damit konnte auch bei den CI-Patienten das Korrelat syntaktischer Reanalyse- und Korrekturprozesse beobachtet werden, Anzeichen für eine mit semantischer Verarbeitung einhergehende N400-ähnliche Negativierung ließen sich hingegen nicht feststellen. Diese Befunde bestätigten die Vermutung, dass semantische Kompensationsstrategien, wie sie in Experiment I festgestellt wurden, auf die akustische Modalität beschränkt sind.

Zusammenfassend weisen die Daten des visuellen Experiments darauf hin, dass bei der Satzverarbeitung in dieser Modalität keine wesentlichen Unterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden bestehen. Für die visuelle Sprachverarbeitung konnten bei den Patienten sowohl eine N400 als Korrelat semantischer Integrationsprozesse als auch eine P600-Komponente als Korrelat syntaktischer Verarbeitungsprozesse nachgewiesen

werden. Ob die CI-Patienten möglicherweise über visuelle Verarbeitungsvorteile gegenüber den Hörgesunden verfügen, welche sich im Hinblick auf die frühen automatischen Prozesse der Wortkategorieverarbeitung bemerkbar machen, muss zum jetzigen Zeitpunkt dahingestellt bleiben. Eine Beantwortung dieser Frage bedarf weiterführender Untersuchungen.

Kapitel 7
Experiment III: Auditive Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation in Pseudowort-Sätzen

7.1 Fragestellung und Hypothesen

In Experiment III wurde wiederum der Frage nach der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation nachgegangen. Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Experimenten wurden hier jedoch Pseudowort-Sätze – sogenannte Jabberwocky-Sätze – eingesetzt. Solche Sätze werden aus Pseudowörtern anstelle von Inhaltswörtern gebildet, morphologische Markierungen bleiben dabei aber vollständig erhalten. Damit handelt es sich um strukturell intakte Sätze, welche jedoch auf der semantischen Ebene nicht interpretierbar sind. Durch die Verwendung dieser Jabberwocky-Sätze sollte untersucht werden, wie die Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation bei CI-Trägern vonstatten geht, wenn eine vorrangige Verarbeitung von semantisch-lexikalischer Information, wie sie in Experiment I beobachtet worden war, nicht möglich ist.

In einer Studie von Hahne und Jescheniak (2001) hatte gezeigt werden können, dass Phrasenstrukturverletzungen in Jabberwocky-Sätzen bei normalhörenden Probanden ein nahezu identisches EKP-Muster wie analoge Sätze mit real existierenden Wörtern hervorriefen. Es war hier eine frühe anteriore Negativierung beobachtet worden, die von einer P600-Komponente gefolgt wurde. Dementsprechend war das Auftreten dieser Komponenten auch im vorliegenden Experiment für die Gruppe der hörgesunden Kontrollprobanden erwartet worden.

Fraglich war, ob ein ähnliches EKP-Muster auch bei den CI-Trägern auftreten würde[1]. Eine semantisch-basierte Verstehensstrategie, wie sie für die meisten CI-Träger für die

[1] Das Interesse galt dabei wiederum besonders der Existenz der P600-Komponente. Über eine frühe Negativierung würde voraussichtlich keine Aussage möglich sein, da sich diese Komponente, wie auch Experiment I gezeigt hat, häufig auf den lateralen, für CI-Träger nicht auswertbaren Elektroden manifestiert.

Verarbeitung von satzstruktureller Information beim auditiven Sprachverstehen festgestellt worden war, erschien im vorliegenden Experiment nicht angezeigt. Es war deshalb erwartet worden, dass der Fokus der Aufmerksamkeit auf die syntaktischen Struktur des Satzes gerichtet sein würde. In diesem Fall wären bei den Patienten syntaktische Verarbeitungsprozesse vorherzusagen, welche sich im ereigniskorrelierten Potential ebenso wie bei Normalhörenden in einer P600-Komponente niederschlagen sollten.

7.2 Methoden

7.2.1 Stimulusmaterial

Im Experiment III wurde das Stimulusmaterial aus einer Studie von Hahne und Jescheniak (2001) präsentiert. Die im Experiment verwendeten Jabberwocky-Sätze wurden konstruiert, indem in Sätzen, welche dem Muster der in Experiment 1 verwendeten Sätze entsprachen, alle Nomen und Partizipien durch phonotaktisch legale Pseudowörter ersetzt wurden. Die Konstruktion der Pseudowort-Partizipien erfolgte dabei unter Verwendung der entsprechenden morphologischen Markierungen, d. h. es wurden *„ge-“* als Präfix sowie *„-en“* oder *„-t“* als Suffix angefügt.

Die Pseudowort-Sätze wurden (a) in einer korrekten Bedingung und (b) in einer syntaktisch inkorrekten Bedingung (vgl. Tabelle 7.1) präsentiert. Die syntaktisch fehlerhaften Sätze wiesen dabei analog zu Experiment I eine Verletzung der Phrasenstruktur auf, die realisiert wurde, indem das Partizip unmittelbar auf eine Präposition folgte. In beiden Bedingungen stellte das Partizip am Satzende das kritische Wort dar, auf welchem sich die Korrektheit bzw. Inkorrektheit des Satzes entschied. Zusätzlich waren im Stimulusmaterial (c) Füllsätze enthalten, welche eine vollständige Präpositionalphrase aufwiesen, womit verhindert werden sollte, dass die Probanden die Inkorrektheit eines Satzes bereits auf der Präposition erkennen konnten. Es wurden außerdem (d) korrekte Füllsätze ohne Präpositionalphrase nach dem Prinzip der Sätze in der korrekten experimentellen Bedingung erstellt. Damit konnten die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen dem Auxiliar (*„wurde“*) und der Präposition bzw. dem kritischem Partizip gleich gehalten werden. In die Auswertung gingen nur die beiden experimentellen Bedingungen (a) und (b) ein.

Die Prozesse der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation in den Jabberwocky-Sätzen sollten erfasst werden, indem die auf dem kritischen Wort der syntaktisch inkorrekten Sätze gemessenen ereigniskorrelierten Potentiale mit der hirnelektrischen Aktivität

Tab. 7.1: *Übersicht über die in Experiment III vorkommenden Bedingungen und Beispielsätze. Das kritische Wort für die experimentellen Sätze ist durch Unterstreichung gekennzeichnet.*

Experimentelle Sätze		
(a)	korrekt	*Die Fiebe wurde gerottert.*
(b)	syntaktisch inkorrekt	**Das Fiehm wurde im gerottert.*
Füllsätze		
(c)	korrekt (mit vollständiger PP)	*Der Lömper wurde im Rastel gerottert.*
(d)	korrekt (ohne PP)	*Die Glabbe wurde gerottert.*

auf das kritische Wort der korrekten Sätzen verglichen wurden. Auf diesen Vergleich soll im Folgenden auch als *syntaktische Bedingung* referiert werden.

Im Experiment wurden insgesamt 96 verschiedene Pseudowort-Partizipien verwendet, mit deren Hilfe für jede der vier Bedingungen (a) bis (d) jeweils 96 Sätze konstruiert wurden. Die insgesamt 384 Stimulussätze wurden auf zwei Listen verteilt, jede Liste umfasste 48 Sätze jeder Bedingung. Pro Liste trat damit jedes Partizip zweimal und zwar in jeweils unterschiedlichen Bedingungen auf.

Das Stimulusmaterial wurde von einer geübten Sprecherin in pseudorandomisierter Reihenfolge mit natürlicher Sprechgeschwindigkeit eingesprochen. Die Prozedur der digitalen Weiterbearbeitung ebenso wie die spezielle Erstellung der syntaktisch inkorrekten Sätze war identisch mit der unter 5.2.1 beschriebenen Vorgehensweise.

7.2.2 Probanden

Am Experiment nahmen 25 CI-Träger mit gutem freiem Sprachverständnis und 25 hörgesunde Kontrollprobanden teil. Die Patienten (13 weiblich, 12 männlich) waren zum Zeitpunkt des Experiments zwischen 34 und 77 Jahren alt (Mittel 55 Jahre), die CI-Tragedauer betrug 0.8 bis 7.0 Jahre (Mittel 2.10 Jahre). Alle CI-Träger waren postlingual ertaubt. Genauere Angaben zu den einzelnen Patienten sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Die Rekrutierung der Patienten erfolgte über eine Kooperation mit der HNO-Klinik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg (Dr. Joachim Müller) bzw. dem Zentrum für HNO der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt/Main (Dr. Jan Kiefer). Die Kontrollprobanden entsprachen den CI-Trägern hinsichtlich des Geschlechts, des Alters ($\pm$ 3 Jahre) und soweit möglich auch hinsichtlich des Bildungsstands. Bei allen Versuchspersonen handelte es sich um deutsche Muttersprachler. Die Teilnahme am Experiment wurde mit 13 DM bzw. 7 EUR pro Stunde vergütet.

7.2.3 Versuchsdurchführung

Allgemein. Die Präsentation der Stimulussätze erfolgte in einer schallisolierten Kabine akustisch über Lautsprecher, wobei die Lautstärke für die CI-Träger individuell eingestellt wurde, um ihnen ein optimales Satzverständnis zu ermöglichen. Für die Kontrollprobanden wurden die Sätze einheitlich mit einer mittleren Lautstärke dargeboten. Jeder Versuchsteilnehmer hörte 48 Sätze aus jeder der vier Bedingungen. Die insgesamt 192 Sätze waren in pseudorandomisierter Reihenfolge auf vier Experimentalblöcke verteilt, jeder Block enthielt 48 Sätze.

Wie in den beiden vorangegangenen Experimenten bestand für die Probanden die Aufgabe während des Experiments darin, nach jedem Satzende durch einen Tastendruck eine Korrektheitsbeurteilung über den Satz abzugeben. Alle Versuchsteilnehmer erhielten vor Beginn des Experiments eine Instruktion in schriftlicher Form, in welcher ihnen die Aufgabe erklärt wurde. In dieser Instruktion wurde auch explizit darauf hingewiesen, dass es sich bei den im Experiment verwendeten Sätzen um aus Pseudowörtern bestehende Sätze handelte, was anhand von Beispielsätzen verdeutlicht wurde. Damit sollte sichergestellt werden, dass die CI-Träger realisierten, dass ein sinnhaftes Verstehen der Stimulussätze aufgrund der Verwendung nicht-existierender Wörter unmöglich war. Wie in den beiden vorangegangenen Experimenten wurde in der Instruktion nur allgemein auf die Vermeidung störender Bewegungen während des Experiments hingewiesen. Indem die Probanden jedoch ein auf einem Monitor erscheinendes Zeichen ($*$) fixieren sollten, sollten überflüssige Augenbewegungen zumindest teilweise unterbunden werden. Das Fixationszeichen erschien 500 ms vor Beginn jeden Satzes auf dem Monitor, welcher in Augenhöhe etwa 130 cm vor dem Probanden positioniert war und blieb bis 1500 ms nach Satzende sichtbar. Danach wurde für 2000 ms ein Antwortbild (☺ ☹) eingeblendet, womit die Probanden zur Abgabe ihres Korrektheitsurteils aufgefordert wurden. Der nächste Trial begann nach einem Interstimulusintervall von 1500 ms.

Um die Versuchsteilnehmer mit dem Stimulusmaterial vertraut zu machen, wurden vor dem Experiment 15 Beispielsätze präsentiert. Anschließend erfolgte die Bearbeitung der vier Experimentalblöcke. Das Experiment dauerte ohne EEG-Vorbereitung etwa 45 Minuten.

Elektrophysiologische Ableitung. Die EEG-Ableitung erfolgte entsprechend der in Abschnitt 5.2.3 für das Experiment I beschriebenen Methodik.

7.2.4 Datenanalyse

Verhaltensdaten. Die Verhaltensdaten wurden in ähnlicher Weise ausgewertet, wie dies für das Experiment I ausführlich beschrieben wurde (vgl. Abschnitt 5.2.4). Allerdings war der Faktor BEDINGUNG dabei in allen Analysen nur zweifach gestuft (korrekt / syntaktisch inkorrekt), da das vorliegende Experiment nur diese beiden experimentellen Bedingungen enthielt.

EKP-Daten. Die Bearbeitung der EEG-Rohdaten ebenso wie die quantitative Analyse der gemittelten ereigniskorrelierten Potentiale erfolgten entsprechend der in Abschnitt 5.2.4 für das Experiment I beschriebenen Vorgehensweise. Die ereigniskorrelierten Potentiale wurden ab dem Beginn des kritischen Wortes für 1500 ms gemittelt. Die Mittelung erfolgte relativ zu einer 100 ms poststimulus-Baseline[2].

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Verhaltensdaten

Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Fehlerraten und Reaktionszeiten für Kontrollgruppe und CI-Träger sind der Tabelle 7.2 zu entnehmen.

Tab. 7.2: *Mittlere Reaktionszeiten in Millisekunden und prozentuale Fehlerraten für die einzelnen Bedingungen im Vergleich für CI-Träger und normalhörende Kontrollprobanden. Die jeweiligen Standardabweichungen sind in Klammern angegeben.*

	Kontrollen		CI-Träger	
	Reaktionszeit	*Fehlerrate*	*Reaktionszeit*	*Fehlerrate*
korrekt	537(181)	1.4 (3.5)	628(235)	12.5 (20.7)
syntaktisch inkorrekt	497(169)	6.7 (10.3)	599(209)	21.3 (18.6)

Für die Kontrollprobanden konnte in der Analyse über die Fehlerraten ein signifikanter Effekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt werden ($F(1,24) = 7,77, p < .05, MS_e = 44$), der durch die signifikant höhere Fehlerrate für die syntaktisch inkorrekten Sätze bedingt war ($t(24) = 2,79, p < .05$). Für die Reaktionszeiten zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Bedingungseffekt ($F(1,24) = 6,84, p < .05, MS_e = 2891$), welcher durch die signifikant kürzeren Reaktionszeiten in der syntaktisch inkorrekten Bedingung verursacht wurde ($t(24) = 2,61, p < .05$).

[2]Ebenso wie in Experiment I erschien eine prästimulus-Baseline hier nicht geeignet, da sich die dem kritischen Partizip vorausgehenden Wörter hinsichtlich ihrer Wortkategorie unterschieden (für eine ähnliche Vorgehensweise vgl. z. B. Hahne & Jescheniak, 2001).

Für die CI-Träger wurde in der Analyse über die Fehlerraten ebenso wie in der Kontrollgruppe ein signifikanter Effekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt ($F(1,24) = 6,43$, $p < .05, MS_e = 152$), der auf eine höhere Fehlerzahl in der syntaktisch inkorrekten Bedingung zurückging ($t(24) = 2,53, p < .05$). Allerdings war in der CI-Gruppe für die Reaktionszeiten kein Bedingungseffekt zu beobachten ($F(1,24) < 1$).

Beim Vergleich der Patientengruppe mit der Kontrollgruppe ergab sich ein signifikanter Effekt des Faktors GRUPPE ($F(1,48) = 11,89, p < .01, MS_e = 349$), der durch die Tatsache bedingt war, dass eine signifikant höhere Fehlerrate für CI-Träger sowohl in der korrekten Bedingung ($F(1,48) = 6,96, p < .05, MS_e = 221$) als auch in der syntaktisch inkorrekten Bedingung ($F(1,48) = 11,90, p < .01, MS_e = 226$) zu verzeichnen war. Da für die Fehlerraten der Bedingungseffekt in beiden Gruppen gleichermaßen vorhanden war, wie sich auch in den Einzelanalysen gezeigt hatte, konnte im Gruppenvergleich über die Fehlerdaten auch keine Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE festgestellt werden ($F(1,48) < 1$). Für die Reaktionszeiten wurde ein marginal signifikanter Gruppeneffekt festgestellt ($F(1,48) = 3,24, p = .08, MS_e = 72318$), welcher auf tendenziell längere Reaktionszeiten der Patienten auf syntaktisch inkorrekte Sätze zurückging ($F(1,48) = 3,62, p = .06, MS_e = 36125$). Die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE wurde in der Reaktionszeitanalyse nicht signifikant ($F(1,48) < 1$).

Die Daten bestätigen insgesamt die Aussagen der CI-Träger, welche im Anschluss an das Experiment übereinstimmend über große Verständnisprobleme der dargebotenen Sätze berichtet hatten. Sie zeigen allerdings ebenfalls, dass auch für die Kontrollprobanden das Erkennen der syntaktisch inkorrekten Sätze nicht vollkommen problemlos war.

7.3.2 EKP-Daten

7.3.2.1 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe

Die EKP-Daten für korrekte und syntaktisch inkorrekte Sätze für die Kontrollgruppe sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Im Potentialverlauf sind sowohl eine frühe Negativierung als auch eine spätere, mehr parietal verteilte Positivierung zu erkennen. Die frühe Negativierung weist eine sehr breite, nicht nur auf die anterioren Elektrodenpositionen beschränkte Verteilung auf, scheint aber frontal stärker ausgeprägt zu sein. Die nachfolgende P600-Komponente zeigt eine stärkere Ausprägung über der linken Hemisphäre. Zusätzlich zu diesen erwarteten Effekten zeigt sich eine langanhaltende Negativierung im Potentialverlauf der syntaktisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den korrekten Sätzen. Dieser Effekt

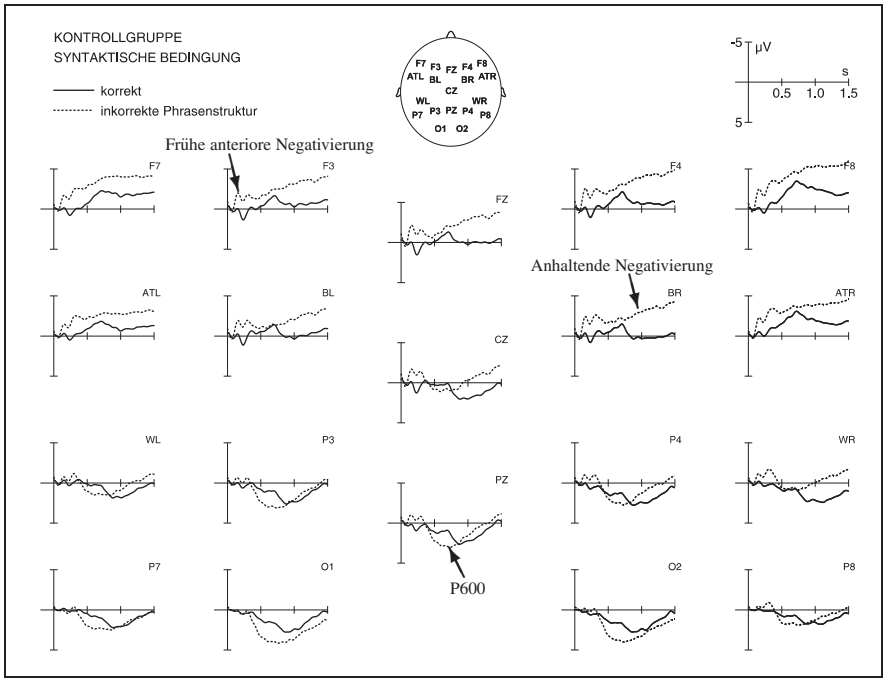

Abb. 7.1: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung.*

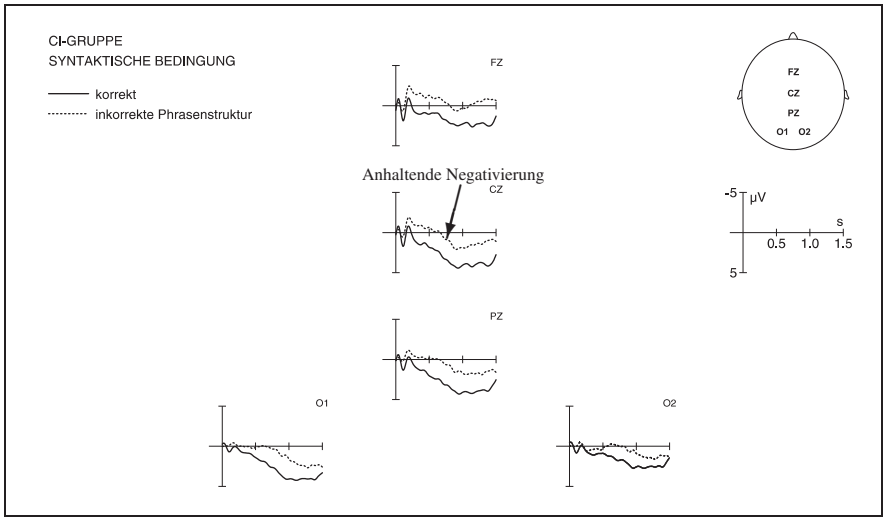

Abb. 7.2: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung.*

ist global beobachtbar, manifestiert sich jedoch besonders auf den anterioren Elektrodenpositionen der rechten Hemisphäre. Für den posterioren Bereich ist allerdings auch die Möglichkeit einer Überlagerung mit der P600-Komponente in Erwägung zu ziehen, was die vergleichsweise eher geringe Ausprägung dieser Komponente erklären könnte.

Frühe anteriore Negativierung (100 bis 300 ms). Die statistische Überprüfung der in der deskriptiven Analyse beobachteten frühen Negativierung für die syntaktisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den korrekten Sätzen wurde für das Zeitfenster 100 bis 300 ms vorgenommen. Die Bestimmung dieses Zeitfensters erfolgte auf Basis der visuellen Inspektion und in Übereinstimmung mit der in Experiment I für die Kontrollprobanden nachgewiesenen ELAN-Komponente. In der globalen Analyse ergab sich ein reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Weiterhin zeigten sich eine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und REGION sowie eine tendenziell signifikante Interaktion von BEDINGUNG und HEMISPHÄRE.

Tab. 7.3: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,24	18.83	$<.001$	3.98
BEDINGUNG × REGION	1,24	28.12	$<.0001$	0.77
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,24	3.99	.06	0.43
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,24	1.83	.19	0.09

In der nachfolgend durchgeführten Quadrantenanalyse konnte ein Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG für die beiden anterioren Quadranten und für den rechts-posterioren Quadranten nachgewiesen werden. Die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE wurde in den beiden posterioren Quadranten signifikant, links-anterior lag eine tendenzielle Signifikanz vor.

Tab. 7.4: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,24	28.96	$<.0001$	5.31
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	3.46	.05	0.20
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,24	25.38	$<.0001$	7.98
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	2.47	.10	0.25
posterior-links				
BEDINGUNG	1,24	1.30	.27	4.04
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	9.83	$<.001$	0.17
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,24	8.71	$<.01$	3.73
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	12.26	$<.0001$	0.15

Die Analyse auf Elektrodenebene ergab einen signifikanten Effekt auf allen Elektrodenpositionen im links-anterioren Quadranten. Links-posterior konnte der Effekt nur für die Elektrodenposition P3 sowie tendenziell für WL nachgewiesen werden, rechts-posterior erreichte er dagegen auf WR, P8 und P4 statistische Signifikanz.

Tab. 7.5: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,24	33.39	$<.0001$
F3	1,24	29.07	$<.0001$
ATL	1,24	22.19	$<.0001$
BL	1,24	22.01	$<.0001$
posterior-links			
WL	1,24	3.55	.07
P7	1,24	0.05	.83
P3	1,24	4.99	$<.05$
O1	1,24	0.09	.76
posterior-rechts			
WR	1,24	14.74	$<.001$
P8	1,24	4.46	$<.05$
P4	1,24	12.23	$<.01$
O2	1,24	2.28	.14

In der Analyse für die Elektrodenpositionen der Mittellinie ergaben sich ein hochsignifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG sowie eine reliable Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 7.6: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,24	22.17	$<.0001$	4.80
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,48	11.17	$<.001$	0.24

In daraufhin gerechneten t-Tests für die Mittellinienelektroden zeigte sich, dass eine statistische Signifikanz des Negativierungseffekts auf allen drei Elektrodenpositionen vorlag. Der Effekt war aber frontal stärker ausgeprägt als parietal.

Tab. 7.7: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,24	29.19	$<.0001$
CZ	1,24	20.65	$<.001$
PZ	1,24	11.65	$<.01$

Eine statistische Absicherung der frühen Negativierung war ebenfalls möglich, wenn nur die fünf auch bei CI-Trägern auswertbaren Elektrodenpositionen in die Analyse einbezogen wurden. Hier ergaben sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG sowie eine hochsignifikante Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 7.8: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,24	13.02	$<.01$	5.97
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,96	23.66	$<.0001$	0.38

Entsprechende t-Tests zeigten einen reliablen Effekt auf den drei Mittellinienelektroden, nicht jedoch auf den Positionen O1 und O2.

Tab. 7.9: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 100-300 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	t	p
FZ	1,24	29.19	$<.0001$
CZ	1,24	20.65	$<.001$
PZ	1,24	11.65	$<.01$
O1	1,24	0.09	.76
O2	1,24	2.28	.14

P600-Komponente (400 bis 800 ms). Die bei den Kontrollprobanden beobachtete P600-Komponente wies im Gegensatz zur in den beiden vorigen Experimenten nachgewiesenen P600-Komponente eine geringere Ausprägung auf. Die Positivierung im Potentialverlauf der syntaktisch inkorrekten Sätzen begann zwar auch bei etwa 400 ms, dauerte jedoch nur bis etwa 800 ms an. Die statistische Überprüfung erfolgte daher nicht wie in den beiden vorherigen Experimenten im Zeitfenster 400 bis 1000 ms, sondern auf Basis der visuellen Inspektion im Zeitfenster 400 bis 800 ms. Es ist anzumerken, dass sich in diesem Zeitfenster neben der parietal beobachtbaren P600-Komponente auf den anterioren Elektrodenpositionen bereits der unmittelbar an die frühe Negativierung anschließende langanhaltende Negativierungseffekt manifestiert. In der globalen statistischen Analyse konnte dementsprechend zwar kein reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG nachgewiesen werden, jedoch eine hochsignifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und REGION, welche die Tatsache des Vorliegens zweier entgegengesetzter, regional unterschiedlich verteilter Effekte im gleichen Zeitfenster reflektierte.

Tab. 7.10: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,24	<1		
BEDINGUNG × REGION	1,24	36.44	$<.0001$	1.81
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,24	2.83	.11	0.79
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,24	1.88	.18	0.39

Eine Analyse auf Quadrantenebene ergab, dass sich die Potentialverläufe der korrekten und der syntaktisch inkorrekten Sätze in allen Quadranten signifikant bzw. tendenziell signifikant voneinander unterschieden. Ein signifikanter Haupteffekt des Faktors

BEDINGUNG lag im links-posterioren Quadranten vor, rechts-posterior wurde der Effekt marginal signifikant. Auch für die beiden anterioren Quadranten wurde ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt, welcher sich hier allerdings auf die in der deskriptiven Analyse festgestellte Negativierung zurückführen lässt. In den beiden posterioren Quadranten sowie im links-anterioren Quadranten interagierten die Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE miteinander.

Tab. 7.11: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,24	5.69	$<.05$	11.53
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	5.37	$<.05$	0.71
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,24	8.05	$<.01$	10.89
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	1.48	.24	0.67
posterior-links				
BEDINGUNG	1,24	8.58	$<.01$	11.30
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	8.54	$<.001$	0.36
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,24	3.89	.06	6.81
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	25.44	$<.0001$	0.35

Tab. 7.12: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-800 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
anterior-links			
F7	1,24	10.76	$<.01$
F3	1,24	4.72	$<.05$
ATL	1,24	6.25	$<.05$
BL	1,24	0.72	.41
posterior-links			
WL	1,24	-2.74	.11
P7	1,24	-7.01	$<.05$
P3	1,24	-8.87	$<.01$
O1	1,24	-14.82	$<.001$
posterior-rechts			
WR	1,24	0.76	.39
P8	1,24	-6.86	$<.05$
P4	1,24	-2.51	.13
O2	1,24	-15.44	$<.001$

Wie aus der Tabelle 7.12 hervorgeht, zeigten dementsprechend durchgeführte t-Tests, dass die Positivierung links-posterior auf den Elektrodenpositionen P7, P3 und O1 signifikant wurde, rechts-posterior erreicht sie dagegen nur auf den Positionen P8 und O2 statistische Signifikanz. Die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE im links-anterioren Quadranten spiegelte die Tatsache wider, dass die hier vorliegende Negativierung auf der Elektrodenposition F7 stärker ausgeprägt war als auf den Positionen F3 und ATL, wohingegen für die Elektrodenposition BL kein Effekt nachgewiesen werden konnte. In der getrennt durchgeführten Analyse für die Mittellinienelektroden ergab sich kein

reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, jedoch interagierten die Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE signifikant miteinander.

Tab. 7.13: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-800 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,24	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,48	21.36	$< .0001$	0.66

Die nachfolgend gerechneten t-Tests zeigten, dass sich diese Interaktion wiederum auf das Vorliegen zweier entgegengesetzter Effekte zurückführen ließ. Bei der auf der parietalen Elektrodenposition PZ beobachtbaren Positivierung handelte es sich um einen signifikanten Effekt, während die sich auf der frontalen Elektrodenposition FZ manifestierende Negativierung nur tendenziell signifikant wurde.

Tab. 7.14: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-800 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,24	3.21	.09
CZ	1,24	-0.35	.56
PZ	1,24	-5.05	$< .05$

Die Positivierung ließ sich statistisch auch nachweisen, wenn die Analyse nur die auch bei den CI-Trägern in die Auswertung eingehenden Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 umfasste. Hier ergaben sich ein tendenziell signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG sowie eine hochsignifikante Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 7.15: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 400-800 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,24	3.51	.07	14.55
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,96	19.19	$< .0001$	0.89

Wie die entsprechenden t-Tests zeigen, ging die Interaktion auf die Gegenläufigkeit der vorliegenden Effekte zurück. Während sich auf der frontalen Elektrodenposition FZ eine marginale Signifikanz des hier auftretenden Negativierungseffekts zeigte, wurde auf den parietalen Elektroden PZ, O1 und O2 die P600-Komponente statistisch signifikant.

Tab. 7.16: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 400-800 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,24	3.21	.09
CZ	1,24	-0.35	.56
PZ	1,24	-5.05	$< .05$
O1	1,24	-14.82	$< .001$
O2	1,24	-15.44	$< .001$

Anhaltende Negativierung (800-1500 ms). Es hatte sich bereits in der vorangegangenen Analyse für die P600 gezeigt, dass im Zeitfenster 400 bis 800 ms nicht nur diese Positivierung signifikant wurde, sondern dass auch für die auf den anterioren Elektrodenpositionen beobachtete Negativierung statistische Signifikanz vorlag. Dieser sich unmittelbar an die frühe Negativierung anschließende, langanhaltende Negativierungseffekt dauerte jedoch nicht nur bis 800 ms an, sondern hielt sich bis zum Mittelungsende bei 1500 ms. Eine statistische Analyse im Zeitfenster 800 bis 1500 ms sollte zeigen, ob für den zwischen 400 und 800 ms bereits nachgewiesenen Effekt auch nach 800 ms statistische Signifikanz zu verzeichnen war. In der globalen Analyse ergab sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Weiterhin zeigte sich, dass der Faktor BEDINGUNG sowohl mit dem Faktor REGION als auch mit dem Faktor HEMISPHÄRE signifikant interagierte.

Tab. 7.17: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 800-1500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,24	9.50	$<.01$	11.68
BEDINGUNG × REGION	1,24	35.21	$<.0001$	1.62
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,24	11.07	$<.01$	0.67
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,24	<1		

In der zur Auflösung dieser Interaktionen durchgeführten Analyse auf Quadrantenebene ließ sich für die beiden anterioren Quadranten ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG nachweisen. Ein tendenziell signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG ergab sich für den rechts-posterioren Quadranten. Die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE wurde in den beiden posterioren Quadranten hochsignifikant, rechts-anterior war eine marginal signifikante Interaktion zu verzeichnen.

Tab. 7.18: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 800-1500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,24	12.69	$<.01$	18.69
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	1.20	.30	1.19
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,24	25.04	$<.0001$	17.21
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	3.26	.06	1.15
posterior-links				
BEDINGUNG	1,24	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	12.92	$<.0001$	0.66
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,24	3.47	.07	9.55
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,72	32.19	$<.0001$	0.65

In den dementsprechenden t-Test für die einzelnen Elektrodenpositionen zeigte sich für den rechts-anterioren Quadranten ein signifikanter Effekt auf allen Elektroden, der je-

doch auf den zentraler gelegenen Elektrodenpositionen F4 und BR stärker ausgeprägt war. Im linken posterioren Quadranten ließ sich die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE auf gegenläufige Effekte zurückführen, wobei aber nur der auf der Elektrodenposition O1 länger anhaltende Positivierungseffekt der vorangegangenen P600-Komponente signifikant wurde. Eine tendenziell signifikante Positivierung war ebenfalls für die rechts-posteriore Elektrodenposition O2 zu verzeichnen. Signifikante bzw. tendenziell signifikante Negativierungseffekte ergaben sich dagegen auf den Elektrodenpositionen WR und P8 im rechts-posterioren Quadranten.

Tab. 7.19: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 800-1500 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-rechts			
F8	1,24	14.49	$<.001$
F4	1,24	30.39	$<.0001$
ATR	1,24	16.44	$<.001$
BR	1,24	27.22	$<.0001$
posterior-links			
WL	1,24	2.01	.17
P7	1,24	-0.00	.98
P3	1,24	0.26	.61
O1	1,24	-4.77	$<.05$
posterior-rechts			
WR	1,24	18.34	$<.001$
P8	1,24	1.80	.19
P4	1,24	4.25	.05
O2	1,24	-3.72	.07

Die Analyse für die Mittellinienelektroden ergab einen signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG sowie eine hochsignifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 7.20: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 800-1500 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,24	7.74	$<.05$	16.90
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,48	13.83	$<.0001$	1.15

In den t-Tests für die Mittellinienelektroden zeigte sich, dass die Negativierung auf den fronto-zentralen Elektrodenpositionen FZ und CZ signifikant wurde, sie war jedoch auf CZ schwächer ausgeprägt. Auf der Position PZ lag kein signifikanter Effekt vor.

Tab. 7.21: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 800-1500 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,24	19.59	$<.001$
CZ	1,24	6.31	$<.05$
PZ	1,24	0.99	.33

In der nur die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 umfassenden Analyse zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt des Faktors Bedingung. Allerdings war eine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE zu verzeichnen. Diese Interaktion spiegelte die Tatsache wieder, dass auf den verschiedenen Elektrodenpositionen gegenläufige Effekte auftraten.

Tab. 7.22: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 800-1500 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,24	1.97	.17	18.05
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,96	24.37	$<.0001$	1.52

Dementsprechend wurde in t-Tests neben der Negativierung auf den Elektrodenpositionen FZ und CZ auch eine Positivierung auf den Positionen O1 und O2 signifikant.

Tab. 7.23: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 800-1500 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	t	p
FZ	1,24	19.59	$<.001$
CZ	1,24	6.31	$<.05$
PZ	1,24	0.99	.33
O1	1,24	-4.77	$<.05$
O2	1,24	-3.72	.07

Zusammenfassend zeigte sich bei den Kontrollprobanden somit für die syntaktisch inkorrekte Bedingung im Vergleich zur korrekten Bedingung eine frühe anteriore Negativierung zwischen 100 und 300 ms, welche sich bis auf zentrale Elektrodenpositionen erstreckte. Diese frühe Negativierung wurde von einer parietalen Positivierung zwischen etwa 400 und 800 ms gefolgt (P600-Komponente). Ebenfalls beginnend bei etwa 400 ms manifestierte sich auf den anterioren Elektrodenpositionen ein anhaltender Negativierungseffekt, der bis zum Mittelungsende bei 1500 ms andauerte.

7.3.2.2 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe

Wie in den in der Abbildung 7.2 dargestellten EKP-Daten für die CI-Träger zu sehen ist, evozierten die syntaktisch inkorrekten Jabberwocky-Sätze einen anhaltend negativeren Potentialverlauf verglichen mit den korrekten Sätzen. Es wird aber weder eine anteriore, von der langanhaltenden Negativierung deutlich abgrenzbare frühere Negativierung sichtbar, wie das bei den Normalhörenden der Fall war, noch zeigt sich eine parietale Positivierung. Der negativere Potentialverlauf der syntaktisch inkorrekten Sätze beginnt bei etwa 100 ms nach Beginn des kritischen Wortes und hält bis zum Mittelungsende bei 1500 ms an.

Anhaltende Negativierung (100 bis 1500 ms). Der anhaltende Negativierungseffekt wurde entsprechend der Beobachtungen in der deskriptiven Analyse im Zeitfenster 100 bis 1500 ms auf seine Reliabilität geprüft. In der globalen Analyse über die fünf auswertbaren Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 ergab sich dabei ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Die nicht-signifikante Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE ließ den Schluss zu, dass der Effekt auf allen fünf Elektrodenpositionen gleichermaßen ausgeprägt war.

Tab. 7.24: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 100-1500 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,24	17.14	$<.001$	11.91
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,96	1.77	.19	1.59

Damit konnte für die Phrasenstrukturanomalien in Jabberwocky-Sätzen für die Gruppe der CI-Träger lediglich ein langanhaltender Negativierungseffekt zwischen 100 und 1500 ms nachgewiesen werden.

7.4 Zusammenfassung und Diskussion

Mit Experiment III sollte getestet werden, ob sich bei CI-Trägern die bei Normalhörenden beobachtbaren Prozesse der Verarbeitung von Information über die Phrasenstruktur nachweisen lassen, wenn die zu verstehenden Sätze auf der semantischen Ebene nicht interpretierbar sind. Die bei den Patienten in Experiment I festgestellte vorrangige Verarbeitung von semantischer Information sollte dabei unterbunden werden, indem Jabberwocky-Sätze präsentiert wurden, welche aus nicht-existierenden Wörtern bestehen.

Für die Kontrollprobanden war vorhergesagt worden, dass die phrasenstrukturell inkorrekten Jabberwocky-Sätze ebenso wie die Sätze mit real existierenden Wörtern in Experiment I ein EKP-Muster aus früher anteriorer Negativierung (ELAN) und nachfolgender P600-Komponente hervorrufen sollten. Diese Effekte konnten auch erwartungsgemäß nachgewiesen werden. Die frühe anteriore Negativierung wies dabei ebenso wie in Experiment I eine bilaterale Verteilung auf, sie war allerdings nicht auf anteriore Elektrodenpositionen beschränkt, sondern erstreckte sich auch auf zentrale und parietale Elektrodenpositionen. Eine solche relativ breite Verteilung der frühen Negativierung war auch von Hahne und Jescheniak (2001) berichtet worden, welche die Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation in Jabberwocky-Sätzen bei einer studentischen Probandengruppe untersucht hatten. Die im vorliegenden Experiment für die Kontrollgruppe ebenfalls nachweisbare

P600-Komponente war relativ gering ausgeprägt und trat in einem kleineren Zeitfenster zutage als die in Experiment I beobachtete P600. Ein Grund hierfür könnte die langanhaltende Negativierung gewesen sein, welche zusätzlich zu den beiden erwarteten Effekten festgestellt wurde. Dieser Negativierungseffekt manifestierte sich zwar vor allem auf den anterioren Elektrodenpositionen, möglicherweise handelte es sich hierbei aber auch um einen globaleren Effekt. Eine in diesem Fall anzunehmende Überlagerung mit der P600 könnte die vergleichsweise geringe Ausprägung dieser Komponente erklären. Die langanhaltende Negativierung, welche sich direkt an die frühe anteriore Negativierung anschloss und bis zum Mittelungsende bei 1500 ms anhielt, war nicht erwartet worden, allerdings konnte eine vergleichbare anhaltende Negativierung bei den Kontrollprobanden bereits im Zusammenhang mit der Phrasenstrukturverletzung in Experiment I beobachtet werden. Der Effekt soll gemeinsam mit den Befunden für die CI-Träger bzw. im Rahmen der Gesamtdiskussion erörtert werden.

Da die präsentierten Sätze auf der semantischen Ebene nicht interpretierbar waren und deshalb eine semantische Kompensationsstrategie nicht angezeigt erschien, war für die CI-Träger angenommen worden, dass die Korrelate der syntaktischen Informationsverarbeitung in einem solchen Fall möglicherweise eher zu beobachten sein sollten. Es zeigte sich jedoch bereits in den Fehlerraten, dass es den Patienten das Erkennen der syntaktisch inkorrekten Sätze nicht erleichterte, wenn sie ihre volle Aufmerksamkeit auf die syntaktischen Aspekte des Satzes richten konnten. Für die CI-Gruppe waren sowohl in der korrekten als auch in der syntaktisch inkorrekten Bedingung signifikant höhere Fehlerraten zu verzeichnen als für die Kontrollgruppe, wobei in der inkorrekten Bedingung in beiden Gruppen höhere Fehlerzahlen auftraten. In den ereigniskorrelierten Potentialen konnte bei den CI-Trägern für die Phrasenstrukturverletzung lediglich ein anhaltend negativerer Potentialverlauf im Vergleich zur korrekten Bedingung nachgewiesen werden. Es war jedoch weder eine P600-Komponente zu beobachten, noch konnte eine von der langanhaltenden Negativierung deutlich abgrenzbare frühere Negativierung identifiziert werden. Dies war jedoch in der Kontrollgruppe selbst dann der Fall, wenn sich die Auswertung auf die auch bei den Patienten auswertbaren Elektrodenpositionen beschränkte.

Die vorliegenden Daten zeigen zunächst eindeutig, dass sich die hirnelektrischen Korrelate der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation bei CI-Trägern auch dann nicht nachweisen lassen, wenn eine semantische Interpretation der Sätze nicht möglich ist und die Aufmerksamkeit der CI-Träger deshalb auf syntaktische Aspekte gerichtet sein müsste. Über die Herkunft der stattdessen beobachteten Negativierung kann auf der Basis der bisherigen Befundlage nur spekuliert werden. Ein ähnlicher Effekt war neben ei-

ner frühen anterioren Negativierung und einer P600-Komponente auch bei den Kontrollprobanden beobachtet worden, wobei das spätere Auftreten des Effekts in dieser Gruppe vermutlich auf Modifikationen zurückgeht, die durch Interferenzen mit der anterioren Negativierung und der nachfolgenden P600 bedingt sind. Insgesamt liegt jedoch die Vermutung nahe, dass der bei den CI-Trägern beobachtbaren langanhaltenden Negativierung ähnliche Prozesse zugrunde liegen wie dem für die Kontrollgruppe nachgewiesenen anhaltenden Negativierungseffekt. Da ein solcher Effekt in einem vergleichbaren Jabberwocky-Experiment mit studentischen Versuchsteilnehmern nicht aufgetreten war (Hahne & Jescheniak, 2001) kann zunächst ausgeschlossen werden, dass die langanhaltende Negativierung ein für die Verarbeitung von Pseudowort-Sätzen spezifisches hirnelektrisches Korrelat darstellt. Zudem war ein ähnlicher langanhaltender Negativierungseffekt bei den Kontrollprobanden auch in Experiment I in der syntaktischen Bedingung beobachtet worden, ebenso wie er – wie bereits in der Diskussion für Experiment I ausgeführt (vgl. Abschnitt 5.4) – auch in früheren Studien schon aufgetreten war (Friederici et al., 1999b, 2003; Hahne & Friederici, 1999), in welchen er aber nicht diskutiert wurde.

Die anhaltende Negativierung zeigte sich bislang zumeist im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Phrasenstrukturverletzungen, wobei sie jedoch nicht nur wie in den Studien von Friederici et al. (1999b) und Friederici et al. (2003) bei älteren Probanden zu beobachten war, sondern auch bei jüngeren Versuchspersonen auftrat (Hahne & Friederici, 1999). In der Studie von Hahne und Friederici (1999) konnte die fragliche Negativierung allerdings nur dann festgestellt werden, wenn ein hoher Anteil (80 %) der im Experiment präsentierten Sätze eine Phrasenstrukturverletzung enthielt, nicht jedoch bei einer niedrigen Vorkommenshäufigkeit (20 %) von syntaktisch inkorrekten Sätzen. Dieser Befund lässt darauf schließen, dass dem anhaltenden Negativierungseffekt strategische Prozesse zugrunde liegen. Des Weiteren ist zu bemerken, dass die langanhaltende Negativierung bisher immer in Studien auftrat, welche die *auditive* Satzverarbeitung untersuchten, womit es sich um einen Effekt zu handeln scheint, der strategische auditive Verarbeitungsprozesse reflektiert. Möglicherweise geht die langanhaltende Negativierung dabei auf die Verarbeitung von prosodischen Merkmalen zurück.

Gestützt wird diese Vermutung durch die Befunde einer Studie von Alter et al. (2001, Experiment 3). In diesem Experiment präsentierten die Autoren hörgesunden studentischen Probanden Sätze, deren prosodische Struktur durch eine Verflachung der Grundfrequenz manipuliert war. Alter et al. (2001) fanden für diese Sätze im Vergleich zu Sätzen mit nicht-manipulierter Grundfrequenz eine anhaltende rechts-frontale Negativierung. Sie erklärten diesen Effekt mit dem Bestreben der Probanden, die fehlenden Grundfrequenz-

modulationen aus dem monoton klingenden Satzsignal zu extrahieren. In diesem Sinne würde die anhaltende Negativierung das Korrelat eines prosodischen Verarbeitungsprozesses darstellen[3].

Mit einer verstärkten prosodischen Verarbeitung könnte auch im Hinblick auf den im vorliegenden Experiment für die CI-Patienten beobachteten Negativierungseffekt argumentiert werden. In gewisser Weise stellt die hier präsentierte Phrasenstrukturverletzung durch das Fehlen eines Satzelements auch einen (rhythmischen) Bruch in der prosodischen Struktur des akustischen Satzsignals dar. Somit deutet sich in der für die CI-Gruppe nachgewiesenen anhaltenden Negativierung also möglicherweise an, dass die Patienten verstärkt rhythmisch-prosodische Informationen nutzten, um inkorrekte Satzstrukturen zu identifizieren[4]. Auf der Basis der vorhandenen Befundlage muss diese Erklärung jedoch derzeit als spekulativ betrachtet werden. Für eine weitergehende Interpretation wird es erforderlich sein, durch entsprechende experimentelle Manipulationen das Auftreten der langanhaltenden Negativierung systematisch zu erforschen, wobei beispielsweise auch genauer zu klären sein wird, in welchem Umfang und unter welchen Umständen entsprechende Prozesse auch bei normalhörenden Probanden auftreten können.

Zusammenfassend kann – trotz der bislang bestehenden Unklarheit über die Herkunft des beobachteten langanhaltenden Negativierungseffekts – festgestellt werden, dass sich bei CI-Trägern die bei Normalhörenden feststellbaren hirnelektrischen Korrelate der Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation auch dann nicht nachweisen lassen, wenn eine semantisch basierte Satzinterpretation nicht indiziert ist. Während eingangs vermutet wurde, dass die Aufmerksamkeit der Patienten in diesem Fall auf die syntaktischen Aspekte des Satzes gerichtet sein sollte, weshalb zumindest eine auf syntaktische Reanalyse- und Korrekturprozesse hinweisende P600-Komponente erwartet wurde, zeigte sich im vorliegenden Experiment kein vergleichbarer Effekt.

---

[3] Für Prozesse der prosodischen Revision berichteten auch Stolterfoht, Friederici, Alter und Steube (2003) einen Negativierungseffekt. Allerdings handelte es sich hierbei um ein visuelles Experiment, in welchem implizite prosodische Verarbeitungsprozesse untersucht wurden. Falls die in dieser Studie beobachtete Negativierung auf ähnliche Prozesse wie die von Alter et al. (2001) nachgewiesene langanhaltende rechts-frontale Negativierung zurückgehen sollte, könnte möglicherweise der Modalitätsunterschied für die – sowohl hinsichtlich der Latenz als auch der Verteilung - abweichende Charakteristik dieser Komponente verantwortlich sein.

[4] Eine dahingehende Interpretation erscheint auch plausibel im Hinblick auf die von den CI-Trägern im Anschluss an das Experiment berichtete Strategie, sich bei der Korrektheitsbeurteilung der Sätze an rhythmischen Merkmalen zu orientieren, da ihnen sowohl die Segmentation als auch die phonologische Dekodierung der Pseudowörter große Probleme bereitete.

Kapitel 8
Experiment IV: Auditive Verarbeitung von Argumentstrukturinformation und von semantischer Information

8.1 Fragestellung und Hypothesen

Experiment IV hatte zum Ziel, einen weiteren Aspekt der syntaktischen Informationsverarbeitung bei CI-Trägern zu untersuchen. Es sollte geprüft werden, ob bei den Patienten auch hinsichtlich der Verarbeitung von Informationen über die Argumentstruktur des Verbs Abweichungen gegenüber Hörgesunden zu beobachten sind. Dies wurde am Beispiel von Stelligkeitsinformation getestet, d. h. es wurden Sätze dargeboten, in denen intransitiven Verben durch Passivierung ein unzulässiges Objekt-Argument zugeordnet wurde. Um eine solche Struktur adäquat verarbeiten zu können, ist einerseits die korrekte Perzeption des Verbpartizips notwendig, da die relevante Stelligkeitsinformation im lexikalen Eintrag des Verbs gespeichert ist. Andererseits erfordert eine angemessene Verarbeitung der fehlerhaften Argumentstrukturen in diesen Sätzen aber auch, dass überhaupt erkannt wird, dass es sich hier um Passivkonstruktionen handelt, was wiederum nur durch ein korrektes Perzipieren des dem Partizip vorangehenden Auxiliars möglich ist. Beide Elemente sollten allerdings problemloser aus dem akustischen Satzsignal zu extrahieren sein als die in den Experimenten I und III notwendigerweise korrekt zu perzipierenden Präpositionen. Für das Verbpartizip ist dies anzunehmen, da es durch seine Eigenschaften als Inhaltswort eine relativ hohe akustische Salienz im Satzsignal aufweist. Aber auch das Auxiliar sollte aufgrund seiner Zweisilbigkeit leichter perzipierbar sein als die nur aus einer Silbe bestehenden Präpositionen. Insgesamt kann deshalb davon ausgegangen, dass die im vorliegenden Experiment zu verarbeitenden Argumentstrukturanomalien im akustischen Satzsignal prominenter sind als die zuvor untersuchten Phrasenstrukturverletzungen. Den Patienten sollte es deshalb leichter möglich sein, die argumentstrukturellen

Informationen bzw. die entsprechenden Verletzungen korrekt wahrzunehmen und adäquat zu verarbeiten. Sollten die in den vorherigen akustischen Experimenten für die CI-Träger beobachteten abweichenden syntaktischen Verarbeitungsprozesse wie vermutet auf die geringe akustische Salienz der Phrasenstrukturverletzungen zurückgehen, ist zu erwarten, dass für die leichter perzipierbare Argumentstrukturinformation im vorliegenden Experiment keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollprobanden beobachtbar sind.

Das Experiment enthielt mit einer *cloze probability*-Manipulation (*low probability* vs. *high probability*) sowie der Einbeziehung einer semantisch inkorrekten Bedingung weitere experimentelle Manipulationen, welche der Spezifizierung der semantischen Informationsverarbeitung dienen sollten. In Experiment I hatte sich gezeigt, dass hinsichtlich der Verarbeitung semantischer Selektionsbeschränkungen bei CI-Trägern keine Unterschiede gegenüber Normalhörenden zu beobachten sind. Dieser Befund sollte im vorliegenden Experiment nun zum einen repliziert werden, zum anderen sollte aber auch untersucht werden, ob die Erwartetheit bzw. die kontextuelle Passung eines Wortes in ähnlicher Weise wie bei Hörgesunden verarbeitet wird.

Für die Verarbeitung der Argumentstrukturverletzung war für die Kontrollgruppe ein biphasisches Muster bestehend aus einer N400 gefolgt von einer P600-Komponente erwartet worden. Ein solches Muster war für diese Art von Verletzung bereits in früheren Studien berichtet worden (z. B. Friederici & Frisch, 2000, vgl. Abschnitt 3.3.2.2). Dabei gilt die N400 als Korrelat der semantischen Integrationsprobleme, die eine solche Verletzung hervorruft, während das Auftreten der P600 durch die Tatsache bedingt ist, dass die syntaktische Struktur nicht mit der im Verbeintrag spezifizierten erforderlichen Argumentstruktur übereinstimmt (Friederici & Frisch, 2000).

Fraglich war, ob ein solches Muster und speziell die für den syntaktischen Reanalyseprozess stehende P600-Komponente auch bei den CI-Trägern zu beobachten sein würde. Wenn kompensatorische Strategien nur bei akustisch wenig salientem Input zum Einsatz kommen, dann sollte die Verarbeitung der akustisch eindeutigeren Argumentstrukturverletzung wie bei Normalhörenden mit einer syntaktischen Reanalyse einhergehen. Bei den Patienten müssten dann sowohl eine N400-Komponente als auch eine P600-Komponente auftreten. Falls semantische Kompensationsstrategien jedoch beim auditiven Sprachverstehen unabhängig von der akustischen Salienz bzw. der auditiven Perzipierbarkeit der relevanten syntaktischen Information zum Einsatz kommen, dann wäre zu erwarten, dass auch Argumentstrukturverletzungen nur auf der semantischen Ebene verarbeitet werden. In diesem Fall ist vorherzusagen, dass sich bei den Patienten neben der N400-Komponente keine P600-Komponente nachweisen lässt.

Für die *cloze probability*-Bedingung wurde für die Kontrollprobanden ebenso wie für die semantische Verletzung eine N400-Komponente vorhergesagt. Entsprechend der Beobachtungen in früheren Studien (Kutas & Hillyard, 1984; Kutas et al., 1984, vgl. Abschnitt 3.3.1) sollte die N400 auf Wörter mit einer niedrigen *cloze probability* eine geringere Ausprägung aufweisen als die durch eine ausgesprochene semantische Verletzung evozierte N400.

Für die CI-Träger, bei denen sich bislang keine Abweichungen hinsichtlich semantischer Verarbeitungsprozesse gezeigt hatten, war ein ähnliches Muster erwartet worden, d. h. eine N400 für *low probability*-Sätze und eine stärker ausgeprägte N400 für semantische Verletzungen. Möglicherweise betrifft die semantische Kompensationsstrategie bei den Patienten aber auch die semantische Verarbeitung, so dass semantisch unerwartete aber gleichwohl passende Wörter mit einem ähnlichen Aufwand verarbeitet werden wie semantisch unpassende Wörter. In diesem Fall sollte kein Unterschied zwischen der durch die *cloze probability*-Manipulation evozierten N400-Komponente und der N400 auf semantische Verletzungen nachweisbar sein.

8.2 Methoden

8.2.1 Stimulusmaterial

Das Experiment, in welchem das Stimulusmaterial aus einer Studie von Rösler et al. (1993) zum Einsatz kam, umfasste vier experimentelle Bedingungen. Neben (a) einer korrekten Bedingung mit einer hohen *cloze probability* und (b) einer korrekten Bedingung mit einer geringen *cloze probability* wurden (c) semantisch inkorrekte Sätze sowie (d) syntaktisch inkorrekte Sätze präsentiert (vgl. Tabelle 8.1). Die *cloze probability* in den Sätzen der beiden korrekten Bedingungen wurde dabei über die Erwartungshaltung auf das satzfinale Partizip manipuliert, d. h. es lagen unterschiedlich hohe Verbundwahrscheinlichkeiten zwischen Nominalphrase und Verb vor[1]. Der semantische Fehler wurde wie bereits in den Experimenten I und II über eine Verletzung der Selektionsbeschränkungen des Verbs realisiert. In den Bedingungen (a) bis (c) wurden zur Bildung von Passivsatzkonstruktionen die Partizipien transitiver Verben verwendet. Hingegen wurden die Sätze der (d) syntaktisch inkorrekten Bedingung unter Zuhilfenahme intransitiver Verben gebildet. Durch Passivierung dieser Verben, welche korrekterweise außer einem

[1] Die *cloze probability* für die satzfinalen Verben wurde ermittelt, indem die fraglichen Satzfragmente in einer Pilotstudie von 88 Probanden vervollständigt wurden (vgl. hierzu Rösler et al., 1993).

Tab. 8.1: *Übersicht über die in Experiment IV vorkommenden Bedingungen und Beispielsätze. Das kritische Wort für die experimentellen Sätze ist durch Unterstreichung gekennzeichnet.*

Experimentelle Sätze		
(a)	korrekt, *high probability*	*Der Tisch wurde gedeckt.*
(b)	korrekt, *low probability*	*Der Bruder wurde geimpft.*
(c)	semantisch inkorrekt	**Der Ozean wurde gestrickt.*
(d)	syntaktisch inkorrekt	**Der Hund wurde gebellt.*

Subjekt-Argument keine weiteren Argumente zulassen, wurde die im Satz auftretende Nominalphrase dem Verb als Objekt-Argument zugeordnet, womit eine Verletzung der Subkategorisierungsregeln des Verbs vorlag. Damit wurde in der syntaktisch inkorrekten Bedingung durch ein überzähliges, vom Verb nicht lizenziertes Argument eine fehlerhafte Verbargumentstruktur im Sinne einer Stelligkeitsverletzung realisiert. In allen vier Bedingungen entschied sich die Korrektheit des Satzes auf dem satzfinalen Partizip, welches damit das kritische Wort darstellte.

Zur Erfassung der Verarbeitung der *cloze probability*-Manipulation sollte ein Vergleich der ereigniskorrelierten Potentiale auf dem kritischen Wort der *low probability*-Bedingung mit der *high probability*-Bedingung vorgenommen werden, wobei auf diesen Vergleich im Folgenden auch als *probability-Bedingung* referiert werden soll. Die semantischen Verarbeitungsprozesse sollten dagegen erfasst werden, indem die ereigniskorrelierten Potentiale auf dem kritischen Partizip der semantisch inkorrekten Sätze mit der ereigniskorrelierten Aktivität auf dem kritischen Wort der korrekten Sätze der *high probability*-Bedingung verglichen wurden. Dieser Vergleich soll im Folgenden auch als *semantische Bedingung* bezeichnet werden. Durch den Vergleich der EKPs auf dem kritischen Wort in den Sätzen, welche eine fehlerhafte Verbargumentstruktur enthielten, mit den EKPs auf das kritische Wort in den korrekten Sätzen der *high probability*-Bedingung sollten die Prozesse der Argumentstrukturverarbeitung erfasst werden. Der entsprechende Vergleich soll im Folgenden als *syntaktische Bedingung* bezeichnet werden.

Für jede Bedingung wurden 42 Sätze konstruiert. In allen Bedingungen wurden dabei unterschiedliche Partizipien verwendet, so dass im Experiment insgesamt 168 verschiedene Verben vorkamen, wobei alle Verben ihr Partizip mit dem Präfix *„ge-“* bildeten. Die Sätze wurden in randomisierter Reihenfolge von einer trainierten Sprecherin eingesprochen, die Weiterbearbeitung erfolgte entsprechend der für das Experiment I beschriebenen Prozedur (vgl. Abschnitt 5.2.1).

8.2.2 Probanden

Am Experiment nahmen 16 CI-Träger mit gutem freiem Sprachverständnis und 16 hörgesunde Kontrollprobanden teil. Die Patienten (9 weiblich, 7 männlich) waren zum Zeitpunkt des Experiments zwischen 34 und 63 Jahren alt (Mittel 47 Jahre), die CI-Tragedauer betrug 0.8 bis 7.0 Jahre (Mittel 2.5 Jahre). Alle CI-Träger waren postlingual ertaubt. Genauere Angaben zu den einzelnen Patienten sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Die Rekrutierung der Patienten erfolgte über eine Kooperation mit der HNO-Klinik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg (Dr. Joachim Müller) bzw. dem Zentrum für HNO der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt/Main (Dr. Jan Kiefer). Die Kontrollprobanden entsprachen den CI-Trägern hinsichtlich des Geschlechts, des Alters ($\pm$ 3 Jahre) und soweit möglich auch hinsichtlich des Bildungsstands. Bei allen Versuchspersonen handelte es sich um deutsche Muttersprachler. Die Teilnahme am Experiment wurde mit 13 DM bzw. 7 EUR pro Stunde vergütet.

8.2.3 Versuchsdurchführung

Allgemein. Die Stimulussätze wurden den Probanden in einer schallisolierten Kabine akustisch über Lautsprecher dargeboten. Dabei wurde ebenso wie in den vorangegangenen akustischen Experimenten für die CI-Träger eine individuelle Anpassung der Lautstärke vorgenommen, während die akustische Präsentation für die Kontrollprobanden einheitlich mit mittlerer Lautstärke erfolgte. Die im Stimulusmaterial enthaltenen 168 Sätze wurden in pseudorandomisierter Reihenfolge auf vier Experimentalblöcke mit jeweils 42 Sätzen verteilt.

Die Versuchsteilnehmer hatten die Aufgabe, für jeden Satz nach Satzende über eine Tastatur eine Korrektheitsbeurteilung abzugeben. Alle Probanden erhielten vor dem Experiment eine schriftliche Instruktion, in der die Aufgabe anhand von Beispielsätzen erläutert wurde. Die Probanden wurden des Weiteren aufgefordert, sich während des Experiments möglichst nicht zu bewegen, es erfolgte aber keine spezielle Instruktion auf Vermeidung von Augenbewegungen. Durch ein auf einem Monitor eingeblendetes Zeichen ($*$), welches die Probanden während der Satzpräsentation fixieren sollten, sollten störende Augenbewegungen jedoch zumindest teilweise unterbunden werden. Das Fixationszeichen wurde 500 ms vor Beginn jeden Satzes bis 1500 ms nach Satzende eingeblendet, anschließend erschien für 2000 ms ein Antwortbild (☺ ☹), durch welches die Probanden zur Abgabe ihres Korrektheitsurteils aufgefordert wurden. Nach einem Interstimulusintervall von 1500 ms folgte der nächste Trial.

Vor Beginn des Experiments wurde ein Trainingsblock mit 16 Beispielsätzen präsentiert. Im Anschluss bearbeiteten die Versuchsteilnehmer die vier Experimentalblöcke, wobei zwischen den Blöcken die Gelegenheit zu kurzen Pausen bestand. Das Experiment dauerte ohne EEG-Vorbereitung etwa 40 Minuten.

Elektrophysiologische Ableitung. Die elektrophysiologische Ableitung entsprach der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Vorgehensweise.

8.2.4 Datenanalyse

Verhaltensdaten. In der Auswertung der Verhaltensdaten wurde ebenso vorgegangen, wie dies in Abschnitt 5.2.4 für das Experiment I beschrieben wurde. Entsprechend der Anzahl der experimentellen Bedingungen in Experiment IV war der Faktor BEDINGUNG in allen Analysen vierfach gestuft (korrekt, *high probability* / korrekt, *low probability* / semantisch inkorrekt / syntaktisch inkorrekt)

EKP-Daten. Die Auswertung der EEG-Rohdaten erfolgte entsprechend der in Abschnitt 5.2.4 für das Experiment I beschriebenen Vorgehensweise. Anschließend wurden die ereigniskorrelierten Potentiale ab 200 ms vor dem Beginn des kritischen Worts bis 1500 ms nach Beginn des kritischen Worts gemittelt. Die Mittelung wurde relativ zu einer 200 ms prästimulus-Baseline vorgenommen[2]. Hinsichtlich der quantitativen Analyse für die gemittelten ereigniskorrelierten Potentiale der semantischen Bedingung und der *probability*-Bedingung traten keine Änderungen gegenüber Experiment I auf.

Für die syntaktische Bedingung erfolgte die quantitative Analyse der EKP-Daten in leicht veränderter Form. Hier wurde für die CI-Träger anstelle der nur fünf Elektrodenpositionen umfassenden Analyse eine Auswertung vorgenommen, welche neben den Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ auch die posterioren lateralen Elektrodenpositionen P7, P8, P3, P4, O1 und O2 enthielt. Durch diese Analyse, die möglich wurde, weil bei den Patienten weniger Elektroden von CI-Artefakten betroffen waren als in den vorigen Experimenten, konnte die bei der Kontrollgruppe festgestellte spezielle Verteilung der P600-Komponente berücksichtigen werden. Die Analyse wurde für Mittellinienelektroden und laterale Elektrodenpositionen getrennt vorgenommen, wobei für die Lateralelektroden entsprechend ihrer Hemisphärenzugehörigkeit zwei ROIs definiert wurden (links-posterior: P7, P3, O1, rechts-posterior: P8, P4, O2). Für diese Elektrodenpositionen

[2] Im vorliegenden Experiment war die Verwendung einer solchen prästimulus-Baseline möglich, da dem kritischen Partizip in allen experimentellen Bedingungen einheitlich das Auxiliar *„wurde“* vorausging.

wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren BEDINGUNG (zweifach gestuft: korrekt / syntaktisch inkorrekt) und HEMISPHÄRE (zweifach gestuft: links / rechts) gerechnet. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren BEDINGUNG (wiederum zweifach gestuft: korrekt / syntaktisch inkorrekt) und ELEKTRODE (dreifach gestuft: P7 / P3 / O1 bzw. P8 / P4 / O2) wurde für die beiden ROIs durchgeführt, wenn die Interaktion von BEDINGUNG und HEMISPHÄRE signifikant oder marginal signifikant wurde. Eine anschließende Analyse auf Elektrodenebene mittels t-Tests wurde vorgenommen, wenn sich innerhalb einer ROI eine Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE ergab. Für die Mittellinienelektroden FZ, CZ und PZ wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse gerechnet, welche die Faktoren BEDINGUNG (zweifach gestuft: korrekt / syntaktisch inkorrekt) und ELEKTRODE (dreifach gestuft: FZ / CZ / PZ) enthielt. Bei einer signifikanten Interaktion zwischen den beiden Faktoren wurden t-Tests für die einzelnen Elektrodenpositionen durchgeführt. Eine dementsprechende Auswertung wurde zu Vergleichszwecken auch bei den Kontrollprobanden vorgenommen. Da jedoch die Analyse für die Mittellinienelektroden bereits in der Auswertung enthalten war, die alle 19 gemessenen Elektrodenpositionen berücksichtigte, wurde hier nur die gesonderte Auswertung für die sechs posterioren Lateralelektroden P7, P8, P3, P4, O1 und O2 durchgeführt.

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Verhaltensdaten

Die Tabelle 8.2 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Fehlerraten und Reaktionszeiten in der Gruppe der Kontrollprobanden und in der CI-Gruppe.

Tab. 8.2: *Mittlere Reaktionszeiten in Millisekunden und prozentuale Fehlerraten für die einzelnen Bedingungen im Vergleich für CI-Träger und normalhörende Kontrollprobanden. Die jeweiligen Standardabweichungen sind in Klammern angegeben.*

	Kontrollen		CI-Träger	
	Reaktionszeit	*Fehlerrate*	*Reaktionszeit*	*Fehlerrate*
korrekt (high probability)	361(94)	1.2 (1.7)	363(112)	8.6 (5.6)
korrekt (low probability)	369(97)	1.8 (1.8)	385(106)	11.0 (6.9)
semantisch inkorrekt	379(119)	2.4 (6.6)	400(108)	5.4 (5.4)
syntaktisch inkorrekt	365(110)	0.7 (1.1)	397(105)	5.1 (3.5)

Für die Kontrollprobanden konnte kein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG in der Analyse über die Fehlerdaten festgestellt werden ($F(3,45) < 1$). Ein solcher Effekt ergab sich ebenso wenig in der Analyse der Reaktionszeiten ($F(3,45) = 2,08, p =$

$.12, MS_e = 472$). Damit unterschieden sich weder die Fehlerzahlen noch die Reaktionszeiten in den einzelnen Bedingungen voneinander.

Im Gegensatz dazu ließ sich in der Varianzanalyse über die Fehlerraten für die CI-Gruppe ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG nachweisen ($F(3,45) = 7,88, p < .001, MS_e = 16$). Im Einzelvergleich der Bedingungen zeigte sich, dass für die Sätze der korrekten *low probability*-Bedingung tendenziell mehr Fehler zu verzeichnen waren als für die korrekten *high probability*-Sätze ($t(15) = 1,94, p = .07$). Signifikant geringere Fehlerraten konnten dagegen für die beiden Verletzungsbedingungen im Vergleich mit den Sätzen der korrekten *high probability*-Bedingung festgestellt werden (semantisch inkorrekt: $t(15) = 2,15, p < .05$; syntaktisch inkorrekt: $t(15) = 2,51, p < .05$). Dabei unterschieden sich die semantisch inkorrekte Bedingung und die syntaktisch inkorrekte Bedingung hinsichtlich der Fehlerraten nicht voneinander ($t(15) < 1$). Für die CI-Gruppe war auch in der Analyse über die Reaktionszeiten ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG zu beobachten ($F(3,45) = 6,06, p < .01, MS_e = 732$). Dieser ging auf im Vergleich zur korrekten *high probability*-Bedingung längere Reaktionszeiten sowohl für die korrekte *low probability*-Bedingung ($t(15) = 2,52, p < .05$) als auch für die semantisch inkorrekte Bedingung ($t(15) = 3,49, p < .01$) und die syntaktisch inkorrekte Bedingung ($t(15) = 4,05, p < .01$) zurück.

Bei einem Vergleich von CI-Trägern und Kontrollprobanden wurde für die Fehlerraten ein signifikanter Effekt des Faktors GRUPPE festgestellt ($F(1,30) = 26,89, p < .001, MS_e = 43$). Dieser ließ sich darauf zurückführen, dass für die CI-Träger für die beiden korrekten Bedingungen ebenso wie für die syntaktisch inkorrekte Bedingung signifikant mehr Fehler zu verzeichnen waren als für die Kontrollprobanden (korrekt, *high probability*: $F(1,30) = 25,54, p < .001, MS_e = 17$; korrekt, *low probability*: $F(1,30) = 26,35, p < .001, MS_e = 26$; syntaktisch inkorrekt: $F(1,30) = 22,41, p < .001, MS_e = 7$). Die im Gruppenvergleich für die Fehlerraten signifikant werdende Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE ($F(3,90) = 4,49, p < .01, MS_e = 15$) reflektierte die bereits in den Einzelanalysen festgestellte Tatsache, dass ein signifikanter Bedingungseffekt hinsichtlich der Fehlerzahlen nur für die Gruppe der CI-Träger nachgewiesen werden konnte. Im Gegensatz zu den Fehlerraten ergab sich für den Vergleich der Reaktionszeiten von CI-Gruppe und Kontrollgruppe weder ein signifikanter Gruppeneffekt ($F(1,30) < 1$) noch eine signifikante Interaktion von BEDINGUNG und GRUPPE ($F(3,90) = 1,91, p = .13, MS_e = 602$).

Insgesamt zeigte sich damit, dass – obwohl die Fehlerraten in diesem Experiment insgesamt geringer waren als in den beiden vorangegangenen akustischen Experimenten –

hinsichtlich des Satzverständnisses trotzdem noch Unterschiede zwischen den CI-Trägern und den normalhörenden Kontrollprobanden bestanden. Auffällig ist die geringere Fehlerzahl der Patienten sowohl in der syntaktisch inkorrekten Bedingung als auch in der semantisch inkorrekten Bedingung. Die syntaktische Verletzung wurde von den CI-Trägern demzufolge wie vorhergesagt relativ problemlos erkannt.

8.3.2 EKP-Daten

8.3.2.1 Semantische Bedingung und *probability*-Bedingung: Kontrollgruppe

Die EKP-Daten für die Vergleiche zwischen korrekter Bedingung (*high probability*) und korrekter Bedingung (*low probability*) sowie zwischen korrekter Bedingung (*high probability*) und semantisch inkorrekter Bedingung finden sich in den Abbildungen 8.1 und 8.3. Sowohl für die *low probability*-Bedingung als auch für die semantisch inkorrekte Bedingung ist zwischen 300 und 800 ms nach Beginn des kritischen Wortes im Vergleich zur *high probability*-Bedingung ein negativerer Potentialverlauf zu beobachten, der sich besonders auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen manifestiert (N400-Komponente). Bei visueller Inspektion der beiden Komponenten lässt sich feststellen, dass der Effekt der semantischen Bedingung im Zeitfenster zwischen 500 und 800 ms stärker ausgeprägt ist als für die *cloze probability*-Manipulation (vgl. Darstellung der Differenzkurven in Abbildung 8.5).

N400-Komponente in der *probability*-Bedingung (300 bis 800 ms). Die statistische Absicherung des beobachteten Negativierungseffekts erfolgte auf der Basis der visuellen Inspektion der Potentialverläufe im Zeitfenster zwischen 300 und 800 ms. Hier ergab sich in der globalen Analyse über alle Lateralelektroden ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Daneben waren auch jeweils signifikante Zweifachinteraktionen dieses Faktors mit den Faktoren REGION und HEMISPHÄRE zu verzeichnen.

Tab. 8.3: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die* probability-*Manipulation im Zeitbereich 300-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	27.56	$<.0001$	2.08
BEDINGUNG × REGION	1,15	7.46	$<.05$	0.68
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	10.25	$<.01$	0.27
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	1.18	.29	0.15

Aufgrund dieser Interaktionen wurde eine Analyse auf Quadrantenebene durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass der Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG in allen vier Qua-

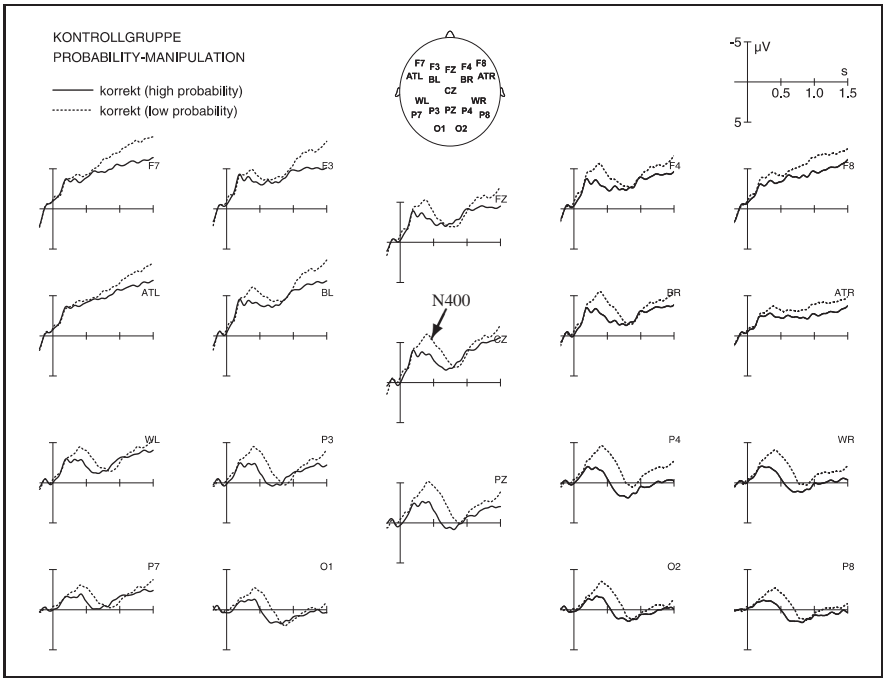

Abb. 8.1: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die* probability-*Bedingung.*

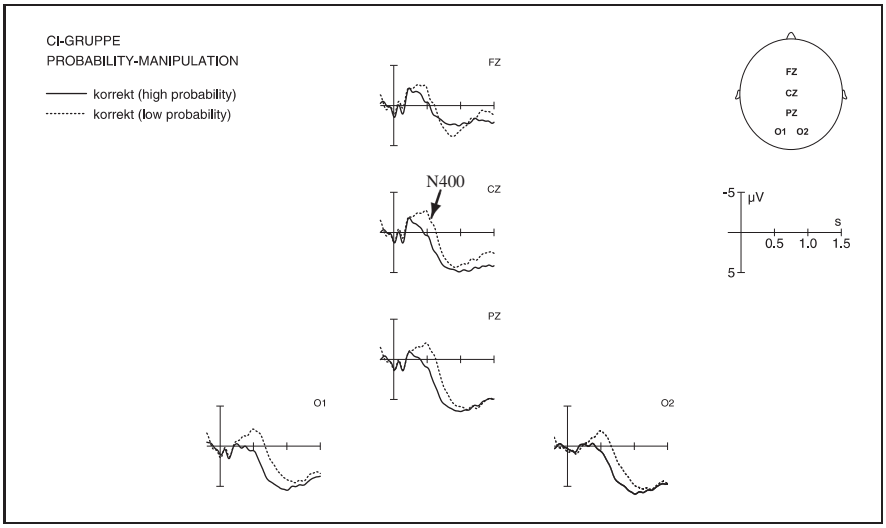

Abb. 8.2: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die* probability-*Bedingung.*

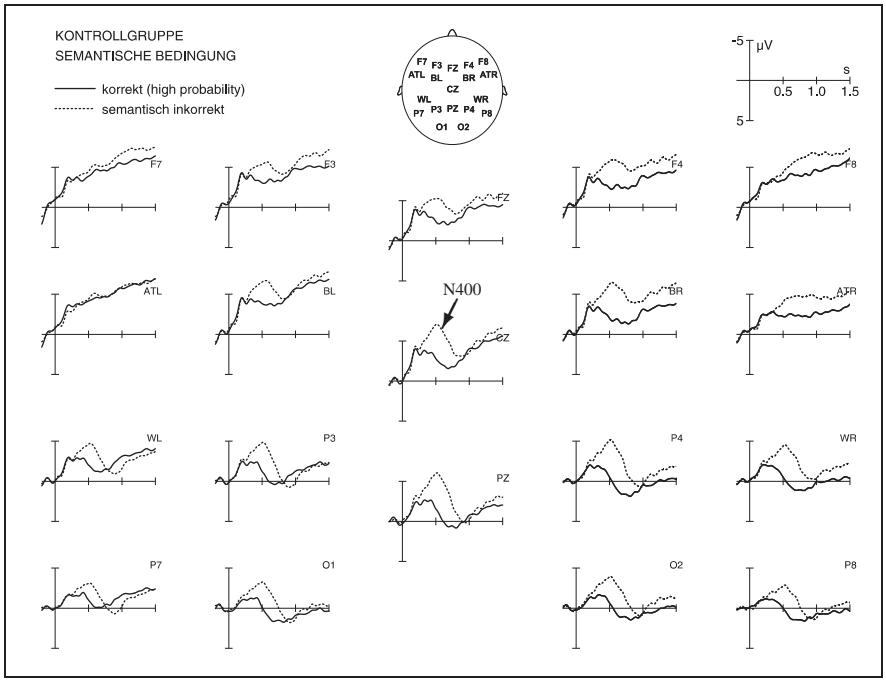

Abb. 8.3: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung.*

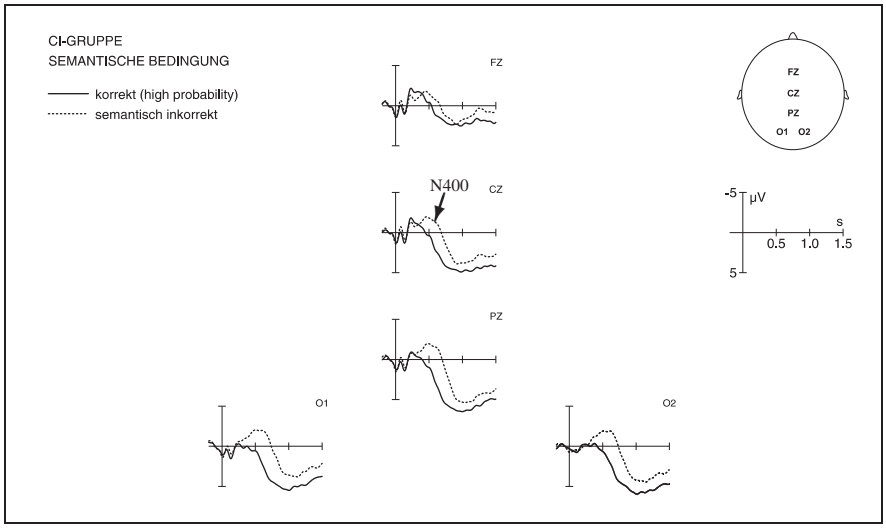

Abb. 8.4: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung.*

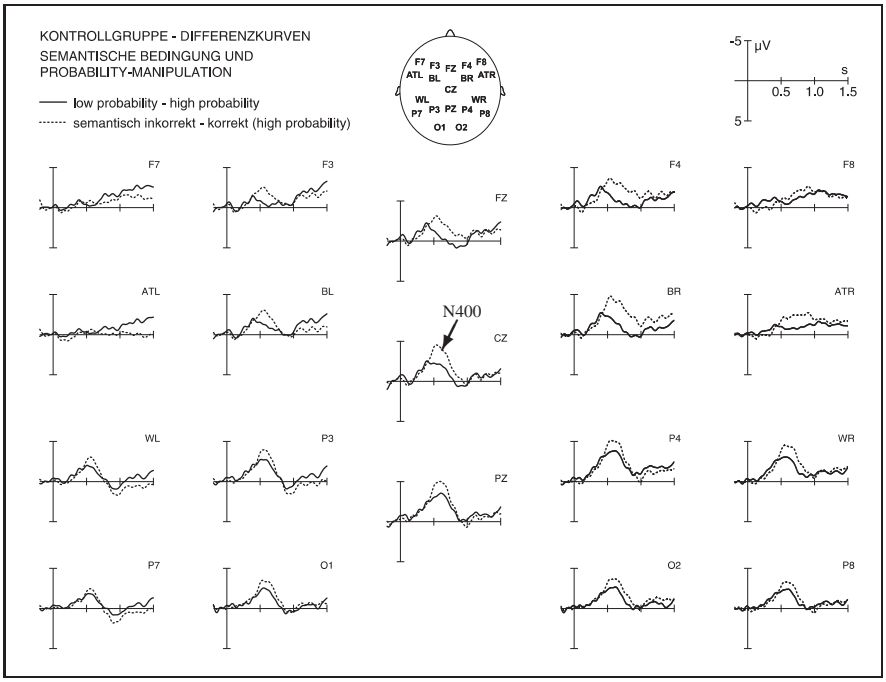

Abb. 8.5: *Grand Average Differenzkurven für die Kontrollgruppe für den Vergleich von* probability-*Bedingung und semantischer Bedingung.*

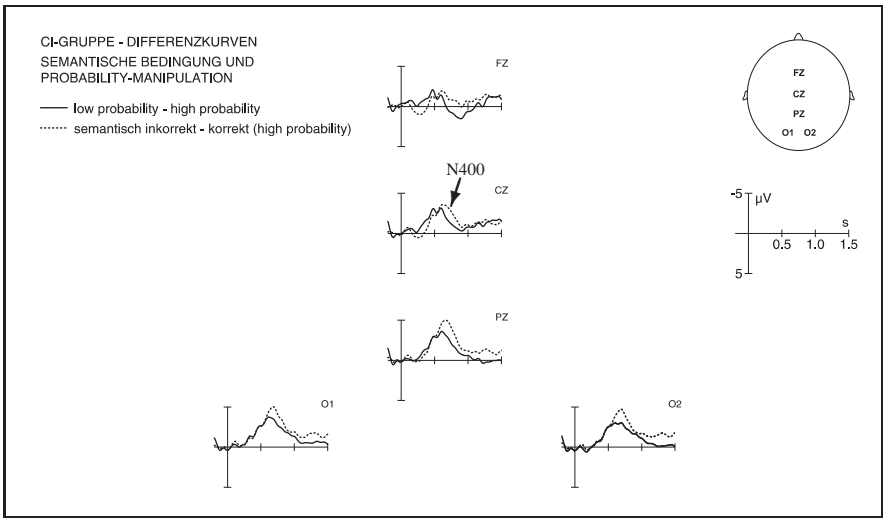

Abb. 8.6: *Grand Average Differenzkurven für die CI-Gruppe für den Vergleich von* probability-*Bedingung und semantischer Bedingung.*

dranten signifikant wurde, wobei es sich in den beiden posterioren Quadranten um einen jeweils hochsignifikanten Effekt handelte. Im rechts-posterioren Quadranten lag auch eine signifikante Interaktion des Faktors BEDINGUNG mit dem Faktor ELEKTRODE vor, links-posterior wurde die Interaktion tendenziell signifikant.

Tab. 8.4: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die* probability-*Manipulation im Zeitbereich 300-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	4.81	$<.05$	3.46
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	10.34	$<.01$	4.16
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	2.30	.14	0.48
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	29.29	$<.0001$	2.03
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.14	.07	0.29
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	46.21	$<.0001$	3.07
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	5.79	$<.01$	0.42

Die Analyse auf Elektrodenebene ergab, dass die beobachtete Negativierung links-posterior auf allen Elektrodenpositionen statistisch signifikant wurde, wobei auf der Position P3 ein hochsignifikanter Effekt vorlag. Rechts-posterior konnte ein solcher hochsignifikanter Effekt für die drei Elektrodenpositionen WR, P8 und P4 nachgewiesen werden, statistische Signifikanz wurde aber auch für die Elektrodenposition O2 erreicht.

Tab. 8.5: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von* high probability- *und* low probability-*Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
posterior-links			
WL	1,15	17.25	$<.001$
P7	1,15	16.83	$<.001$
P3	1,15	27.93	$<.0001$
O1	1,15	20.35	$<.001$
posterior-rechts			
WR	1,15	39.54	$<.0001$
P8	1,15	38.01	$<.0001$
P4	1,15	36.06	$<.0001$
O2	1,15	24.31	$<.001$

In der Analyse für die drei Mittellinienelektroden konnte ebenfalls ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG nachgewiesen werden. Außerdem wurde eine Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE festgestellt.

Tab. 8.6: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die* probability-*Manipulation im Zeitbereich 300-800 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	12.75	$<.01$	5.10
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	5.93	$<.05$	0.94

Die Interaktion ließ sich auf die Tatsache zurückführen, dass ein signifikanter Negativierungseffekt nur für die Elektrodenpositionen CZ und PZ zu verzeichnen war, während er auf der Position FZ kein Signifikanzniveau erreichte.

Tab. 8.7: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von* high probability- *und* low probability-*Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	2.40	.14
CZ	1,15	8.15	$<.05$
PZ	1,15	23.28	$<.001$

Die Negativierung ließ sich auch in der nur die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 umfassenden Analyse nachweisen. Hier wurde neben dem signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG auch eine marginal signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE festgestellt.

Tab. 8.8: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die* probability-*Manipulation im Zeitbereich 300-800 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	21.10	$<.001$	5.02
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	3.04	.05	0.95

Die Interaktion ließ sich wiederum darauf zurückführen, dass auf der Elektrodenposition FZ kein statistisch signifikanter Effekt zu verzeichnen war, während auf den parietalen Elektrodenpositionen eine signifikante Negativierung vorlag.

Tab. 8.9: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von* high probability- *und* low probability-*Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	2.40	.14
CZ	1,15	8.15	$<.05$
PZ	1,15	23.28	$<.001$
O1	1,15	20.35	$<.001$
O2	1,15	24.31	$<.001$

N400-Komponente in der semantischen Bedingung (300 bis 800 ms). Auf der Basis der deskriptiven Analyse sowie in Übereinstimmung mit der in der *probability*-Bedingung nachgewiesenen N400-Komponente wurde die statistische Analyse für den in der semantischen Bedingung beobachteten N400-Effekt im Zeitfenster zwischen 300 und 800 ms gerechnet. In der globalen Analyse über alle lateralen Elektrodenpositionen ergaben sich dabei sowohl ein reliabler Haupteffekt BEDINGUNG als auch eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und HEMISPHÄRE. Weiterhin war eine marginal signifikante Interaktion von BEDINGUNG und REGION zu verzeichnen.

Tab. 8.10: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	50.14	$<.0001$	2.34
BEDINGUNG × REGION	1,15	3.46	.08	1.16
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	14.94	$<.01$	0.56
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	<1		

Aufgrund dieser Interaktionen wurde eine Analyse auf Quadrantenebene durchgeführt. Hier zeigte sich ein hochsignifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG für die beiden Quadranten der rechten Hemisphäre. Auch in den beiden Quadranten der linken Hemisphäre lag ein signifikanter Effekt BEDINGUNG vor, der allerdings besonders im links-anterioren Quadranten geringer ausgeprägt war. In allen vier Quadranten wurde die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE signifikant.

Tab. 8.11: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	5.68	$<.05$	6.01
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	6.23	$<.01$	0.76
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	32.47	$<.0001$	4.28
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	11.34	$<.001$	0.64
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	24.46	$<.001$	4.11
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	10.41	$<.001$	0.23
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	83.67	$<.0001$	2.92
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	11.73	$<.0001$	0.25

Tab. 8.12: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
anterior-links			
F7	1,15	0.95	.35
F3	1,15	9.62	$<.01$
ATL	1,15	0.16	.69
BL	1,15	16.73	$<.01$
anterior-rechts			
F8	1,15	4.69	$<.05$
F4	1,15	28.85	$<.0001$
ATR	1,15	21.45	$<.001$
BR	1,15	49.60	$<.0001$
posterior-links			
WL	1,15	15.65	$<.01$
P7	1,15	11.86	$<.01$
P3	1,15	32.82	$<.0001$
O1	1,15	24.85	$<.001$
posterior-rechts			
WR	1,15	03.26	$<.0001$
P8	1,15	62.48	$<.0001$
P4	1,15	87.43	$<.0001$
O2	1,15	37.93	$<.0001$

In den in der Tabelle 8.12 dargestellten entsprechenden t-Tests wurde nachgewiesen, dass links-anterior nur für die beiden zentraler gelegenen Elektrodenpositionen F3 und BL ein statistisch signifikanter Effekt zu verzeichnen war. Links-anterior erreichte der Effekt dagegen auf allen Elektrodenpositionen statistische Signifikanz, allerdings war er auf den zentraleren Positionen F4 und BR wiederum stärker ausgeprägt. Auch im links-anterioren Quadranten wurde für alle Elektrodenpositionen ein signifikanter Effekt nachgewiesen, der auf den zentraleren Elektroden P3 und O1 stärker ausgeprägt war. Links-posterior wurde die beobachtete Negativierung auf allen Elektroden hochsignifikant.

In der Analyse für die Mittellinienelektroden wurden ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG sowie eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE festgestellt.

Tab. 8.13: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	48.11	$<.0001$	3.64
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	7.43	$<.01$	0.51

Die Interaktion ließ sich durch die nachfolgend gerechneten t-Tests auf den Umstand zurückführen, dass auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen CZ und PZ eine stärkere Signifikanz des Negativierungseffekts vorlag.

Tab. 8.14: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	t	p
FZ	1,15	13.95	$<.01$
CZ	1,15	45.72	$<.0001$
PZ	1,15	81.30	$<.0001$

Die Negativierung konnte auch in einer Analyse nachgewiesen werden, welche nur drei Mittellinienelektroden sowie die Elektrodenpositionen O1 und O2 enthielt. Es zeigte sich hier ein hochsignifikanter Effekt des Faktors BEDINGUNG sowie eine tendenzielle Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 8.15: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	61.81	$<.0001$	4.21
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	2.85	.09	0.82

Die Interaktion ging dabei wiederum auf die etwas stärkere Ausprägung des Effekts auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen zurück, wobei aber für alle fünf Elektroden ein signifikanter Effekt nachgewiesen werden konnte.

Tab. 8.16: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	13.95	$<.01$
CZ	1,15	45.72	$<.0001$
PZ	1,15	81.30	$<.0001$
O1	1,15	24.85	$<.001$
O2	1,15	37.93	$<.0001$

Vergleich von *probability*-Bedingung und semantischer Bedingung (500 bis 800 ms). Die visuelle Inspektion der EKP-Daten hatte im Zeitfenster zwischen 500 und 800 ms eine stärkere Ausprägung der N400-Komponente in der semantischen Bedingung im Vergleich zur *probability*-Bedingung ergeben (vgl. Abbildung 8.5). Eine inferenzstatistische Analyse im entsprechenden Zeitfenster über die jeweiligen Differenzdaten (korrekt, *low probability* - korrekt, *high probability* bzw. semantisch inkorrekt - korrekt, *high probability*) sollte zeigen, ob es sich hierbei um einen statistisch nachweisbaren Unterschied handelte. Wie aus Tabelle 8.17 ersichtlich ist, konnte in der Analyse über alle Lateralelektroden ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG festgestellt werden. Daneben wurde auch eine Interaktion von BEDINGUNG und HEMISPHÄRE sowie eine Dreifachinteraktion der Faktoren BEDINGUNG, REGION und HEMISPHÄRE festgestellt.

Tab. 8.17: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für den Vergleich von semantischer Bedingung und* probability-*Manipulation im Zeitbereich 500-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	5.65	$<.05$	5.61
BEDINGUNG × REGION	1,15	<1		
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	11.59	$<.01$	0.50
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	5.43	$<.05$	0.17

Tab. 8.18: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für den Vergleich von semantischer Bedingung und* probability-*Manipulation im Zeitbereich 500-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.21	.07	1.29
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	10.70	$<.01$	8.56
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.22	.08	1.66
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.68	.22	7.79
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.99	.15	0.42
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	6.80	$<.05$	6.22
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		

Wie aus Tabelle 8.18 hervorgeht, zeigte sich in der Analyse auf Quadrantenebene, dass ein Haupteffekt BEDINGUNG nur für den anterioren und für den posterioren Quadranten

der rechten Hemisphäre zu verzeichnen war. In den beiden anterioren Quadranten lag eine marginal signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE vor.

Für den links-anterioren Quadranten ließ sich die Interaktion auf das Vorliegen gegenläufiger, jedoch jeweils nicht signifikant werdender Effekte zurückführen. Rechts-anterior konnte dagegen ein signifikanter Effekt für die Elektrodenpositionen F4, ATR und BR nachgewiesen werden.

Tab. 8.19: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von semantischer Bedingung und* probability-*Manipulation im Zeitbereich 500-800 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	-0.02	.88
F3	1,15	2.66	.12
ATL	1,15	-0.05	.82
BL	1,15	2.97	.11
anterior-rechts			
F8	1,15	0.74	.40
F4	1,15	11.72	$<.01$
ATR	1,15	7.64	$<.05$
BR	1,15	16.71	$<.01$

In der globalen Analyse für die Mittellinienelektroden ergab sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG.

Tab. 8.20: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für den Vergleich von semantischer Bedingung und* probability-*Manipulation im Zeitbereich 500-800 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	6.19	$<.05$	10.28
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	<1		

Eine unterschiedlich starke Ausprägung der N400-Komponente in der semantischen Bedingung und in der *probability*-Bedingung konnte auch bei nur fünf ausgewerteten Elektrodenpositionen nachgewiesen werden.

Tab. 8.21: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für den Vergleich von semantischer Bedingung und* probability-*Manipulation im Zeitbereich 500-800 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	6.54	$<.05$	11.81
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	<1		

Zusammenfassend wurde somit gezeigt, dass sowohl die semantischen Verletzungen als auch die Manipulationen der *cloze probability* bei den Kontrollprobanden eine N400-Komponente evozierten. Die N400 in der semantischen Bedingung war dabei stärker ausgeprägt als die N400 auf die *cloze probability*-Manipulation.

8.3.2.2 Semantische Bedingung und *probability*-Bedingung: CI-Gruppe

Die ereigniskorrelierten Potentiale der *probability*-Bedingung und der semantischen Bedingung für die CI-Träger sind den Abbildungen 8.2 und 8.4 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Sätze der *low probability*-Bedingung als auch die semantisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den *high probability*-Sätzen eine Negativierung auslösten (N400-Komponente). Der Effekt ist im gleichen Zeitfenster wie bei den Kontrollprobanden zu beobachten. Ebenfalls in Übereinstimmung mit der Datenlage für die Kontrollgruppe zeigt die visuelle Dateninspektion eine stärkere Ausprägung der Negativierung für die semantische Bedingung verglichen mit der *probability*-Bedingung (vgl. Darstellung der Differenzkurven in Abbildung 8.6).

N400-Komponente in der *probability*-Bedingung (300 bis 800 ms). Für die statistische Analyse wurde auf der Basis der visuellen Inspektion der Daten das Zeitfenster 300 bis 800 ms gewählt. Für die fünf auswertbaren Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 ergab sich dabei neben einem signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG auch eine Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 8.22: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die* probability-*Manipulation im Zeitbereich 300-800 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	26.22	$<.001$	5.55
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	4.46	$<.05$	0.99

In den aufgrund dieser Interaktion gerechneten t-Tests zeigte sich, dass auf der frontalen Elektrodenposition FZ kein signifikanter Effekt zu verzeichnen war, während dies für die zentro-parietalen Positionen CZ, PZ, O1 und O2 der Fall war.

Tab. 8.23: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von* high probability- *und* low probability-*Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	t	p
FZ	1,15	1.09	.31
CZ	1,15	11.10	$<.01$
PZ	1,15	29.10	$<.0001$
O1	1,15	69.69	$<.0001$
O2	1,15	22.76	$<.001$

N400-Komponente in der semantischen Bedingung (300 bis 800 ms). Die in der semantischen Bedingung festgestellte Negativierung war im gleichen Zeitfenster wie in der *probability*-Bedingung zu beobachten, weshalb die statistische Analyse ebenfalls im Zeitfenster zwischen 300 und 800 ms gerechnet wurde. In der Analyse über fünf Elektroden-

positionen ließen sich ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG sowie eine Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE nachweisen.

Tab. 8.24: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	26.13	$<.001$	8.28
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	7.36	$<.01$	0.93

Wie die nachfolgend gerechneten t-Tests zeigen, war die Interaktion durch die Tatsache bedingt, dass für die zentro-parietalen Elektrodenpositionen CZ, PZ, O1 und O2 ein signifikanter Effekt zu verzeichnen war, wohingegen die Negativierung auf der Elektrodenposition FZ nicht signifikant wurde.

Tab. 8.25: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und semantisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	t	p
FZ	1,15	1.64	.22
CZ	1,15	9.54	.01
PZ	1,15	27.01	$<.001$
O1	1,15	66.37	$<.0001$
O2	1,15	42.39	$<.0001$

Vergleich von *probability*-Bedingung und semantischer Bedingung (500 bis 800 ms). So wie bei den Kontrollprobanden war auch bei den CI-Trägern eine stärkere Ausprägung der durch die semantische Verletzung evozierten N400-Komponente im Vergleich zur N400 in der *probability*-Bedingung im Zeitfenster zwischen 500 und 800 ms beobachtet worden. Die dementsprechende statistische Analyse, welche über die Differenzdaten der beiden Bedingungen gerechnet wurde, zeigte einen signifikanten Haupteffekt BEDINGUNG.

Tab. 8.26: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für den Vergleich von semantischer Bedingung und* probability*-Manipulation im Zeitbereich 500-800 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	6.86	$<.05$	5.79
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	<1		

Insgesamt konnte damit für die CI-Gruppe sowohl in der semantischen Bedingung als auch in der *probability*-Bedingung eine N400-Komponente nachgewiesen werden, wobei die durch ausgesprochene semantische Verletzungen evozierte N400 eine größere Ausprägung aufwies.

8.3.2.3 Syntaktische Bedingung: Kontrollgruppe

Die EKP-Daten der syntaktischen Bedingung für die Kontrollgruppe sind der Abbildung 8.7 zu entnehmen. Hier zeigt sich für die syntaktisch inkorrekten Sätze im Vergleich zu den korrekten Sätzen (*high probability*) zunächst eine Negativierung (N400-Komponente) im Potentialverlauf, welche auf den zentralen Elektrodenpositionen besonders ausgeprägt zu sein scheint. Der Negativierungseffekt ist zwischen 300 und 800 ms nach Beginn des kritischen Wortes zu beobachten. Er wird gefolgt von einer mehr parietal verteilten Positivierung (P600-Komponente), die etwa bei 900 ms beginnt und bis 1200 ms anhält.

N400-Komponente (300 bis 800 ms). Die in der deskriptiven Analyse beobachtete N400 wurde auf der Basis der visuellen Inspektion sowie in Übereinstimmung mit der in der semantischen Bedingung nachgewiesenen N400-Komponente im Zeitfenster 300 bis 800 ms auf statistische Signifikanz geprüft. In der globalen Analyse über alle lateralen Elektrodenpositionen ergab sich zunächst ein reliabler Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Weiterhin zeigten sich signifikante Interaktionen zwischen BEDINGUNG und REGION sowie zwischen BEDINGUNG und HEMISPHÄRE.

Tab. 8.27: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die semantische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	18.28	$<.001$	3.13
BEDINGUNG × REGION	1,15	7.63	$<.05$	1.37
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	23.41	$<.001$	0.61
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	1.12	.31	0.11

Tab. 8.28: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	11.84	$<.0001$	0.44
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	13.15	$<.01$	5.42
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	6.47	$<.01$	0.52
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	14.63	$<.01$	3.73
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	5.88	$<.05$	0.32
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	14.88	$<.0001$	1.76
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	4.80	$<.05$	0.42

In der nachfolgenden Analyse auf Quadrantenebene (vgl. Tabelle 8.28) konnte ein Haupteffekt BEDINGUNG für den rechts-anterioren Quadranten sowie für die beiden po-

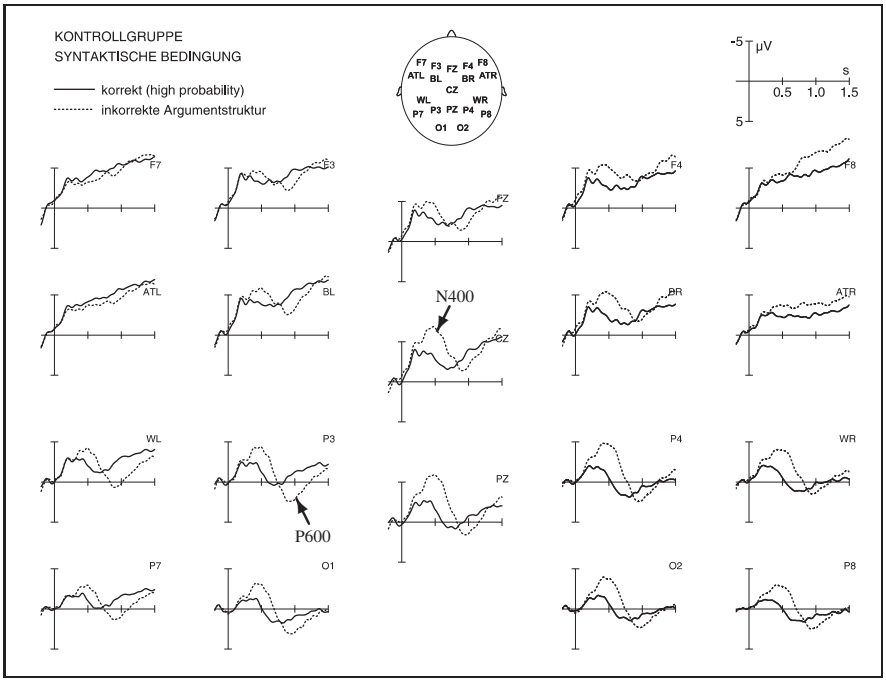

Abb. 8.7: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung.*

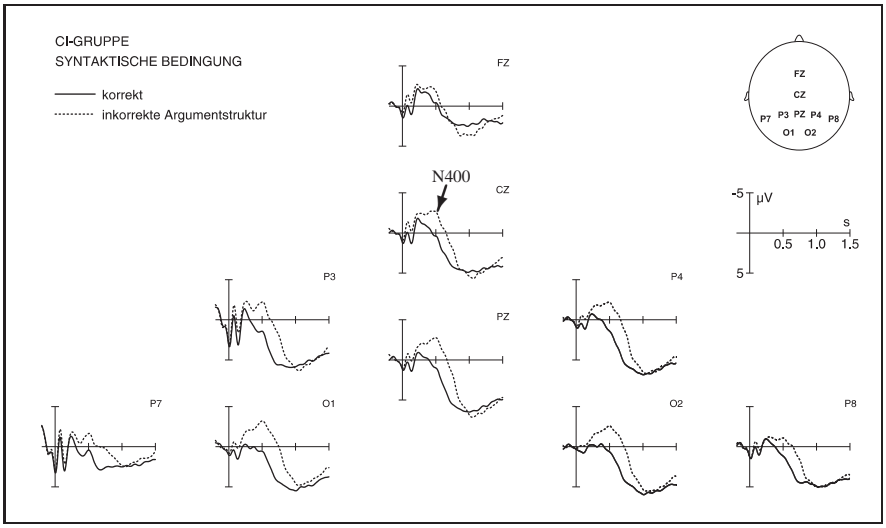

Abb. 8.8: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung.*

sterioren Quadranten nachgewiesen werden. In allen vier Quadranten interagierten die Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE miteinander.

Die Interaktion im links-anterioren Quadranten konnte auf das Vorliegen gegenläufiger, jedoch jeweils nicht signifikant werdender Effekte zurückgeführt werden. Rechts-anterior erreichte die Negativierung dagegen statistische Signifikanz auf den Elektrodenpositionen F4 und ATR sowie stärker ausgeprägt auf der Position BR. Im links-posterioren Quadranten lag eine signifikante Negativierung auf allen Elektrodenpositionen vor, sie war allerdings auf den zentraler gelegenen Elektrodenpositionen P3 und O1 weniger stark ausgeprägt. Rechts-posterior wurde ein hochsignifikanter Effekt für die Positionen WR, P8 und P4 nachgewiesen, ein weniger stark ausgeprägter Effekt zeigte sich auf O1.

Tab. 8.29: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
anterior-links			
F7	1,15	-1.28	.28
F3	1,15	0.58	.46
ATL	1,15	-1.01	.33
BL	1,15	2.78	.12
anterior-rechts			
F8	1,15	2.22	.16
F4	1,15	11.43	$<.01$
ATR	1,15	12.88	$<.01$
BR	1,15	26.35	$<.001$
posterior-links			
WL	1,15	4.89	$<.05$
P7	1,15	7.35	$<.05$
P3	1,15	23.61	$<.001$
O1	1,15	15.71	$<.01$
posterior-rechts			
WR	1,15	25.94	$<.0001$
P8	1,15	54.27	$<.0001$
P4	1,15	96.10	$<.0001$
O2	1,15	35.62	$<.0001$

In der die Mittellinienelektroden umfassenden Analyse ergaben sich ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG und eine signifikante Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 8.30: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	19.07	$<.001$	6.28
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	17.00	$<.001$	0.63

Wie Tabelle 8.31 zeigt, ließ sich die Interaktion auf den Umstand zurückführen, dass die Negativierung sich nur für die Elektrodenpositionen CZ und PZ nachweisen ließ, wobei sie auf PZ stärker ausgeprägt war.

Tab. 8.31: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	2.24	.16
CZ	1,15	20.82	$<.001$
PZ	1,15	44.06	$<.0001$

Ein globaler Haupteffekt des Faktors Bedingung zeigte sich ebenfalls in der Analyse, welche über die sechs lateralen Elektrodenpositionen gerechnet wurde, die auch bei den CI-Trägern ausgewertet werden sollten. Daneben ergab sich hier eine Interaktion von BEDINGUNG und HEMISPHÄRE.

Tab. 8.32: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die sechs posterioren lateralen Elektrodenpositionen P3, P4, P7, P8, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	54.79	$<.0001$	1.12
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	12.93	$<.01$	0.34

In einer weitergehenden Analyse konnten signifikante Effekte des Faktors BEDINGUNG sowohl für die links-posteriore ROI als auch für die rechts-posteriore ROI nachgewiesen werden. In beiden ROIs interagierten die Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE miteinander.

Tab. 8.33: *ROI-Analyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die posterioren lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	18.39	$<.001$	2.70
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	6.14	$<.05$	0.33
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	88.30	$<.0001$	1.67
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	6.55	$<.01$	0.45

In den entsprechenden t-Tests zeigte sich, dass rechts-posterior auf allen drei Elektrodenpositionen ein hochsignifikanter Bedingungseffekt vorlag, während für die links-posterioren Elektrodenpositionen geringer ausgeprägte, jedoch ebenfalls signifikant werdende Effekte zu verzeichnen waren.

Tab. 8.34: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die posterioren lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
posterior-links			
P7	1,15	7.35	$<.05$
P3	1,15	23.61	$<.001$
O1	1,15	15.71	$<.01$
posterior-rechts			
P8	1,15	54.27	$<.0001$
P4	1,15	96.10	$<.0001$
O2	1,15	35.62	$<.0001$

P600-Komponente (900 bis 1200 ms). Auf der Basis der deskriptiven Analyse wurde die inferenzstatistische Analyse für die bei der Kontrollgruppe beobachtete P600-Komponente im Zeitfenster 900 bis 1200 ms gerechnet. In der globalen Analyse über alle lateralen Elektrodenpositionen zeigte sich hier zwar kein Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG, jedoch lagen signifikante Interaktionen zwischen BEDINGUNG und REGION sowie zwischen BEDINGUNG und HEMISPHÄRE vor.

Tab. 8.35: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	2.14	.16	10.74
BEDINGUNG × REGION	1,15	8.04	$<.05$	2.09
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	36.43	$<.0001$	0.53
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	1.48	.24	0.46

In der zur Auflösung dieser Interaktionen gerechneten Analyse auf Quadrantenebene ergab sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG für den posterioren linken Quadranten sowie ein tendenzieller Haupteffekt dieses Faktors für den rechts-posterioren Quadranten. Eine Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE konnte für den rechts-anterioren Quadranten und für den links-posterioren Quadranten festgestellt werden, im links-anterioren Quadranten wurde die Interaktion tendenziell signifikant.

Tab. 8.36: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.90	.19	18.35
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	2.86	.06	0.92
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	1.31	.27	15.62
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	7.94	$<.01$	1.41
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	11.55	$<.01$	13.43
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.57	$<.05$	0.86
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	3.63	.08	7.87
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		

Entsprechend dieser Interaktionen wurden t-Tests für die einzelnen Elektrodenpositionen der jeweiligen Quadranten durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass im links-anterioren Quadranten für die beobachtete Positivierung lediglich auf der Elektrodenposition BL eine marginale Signifikanz zu verzeichnen war. Rechts-anterior ließ sich die Interaktion dagegen auf das Vorliegen gegenläufiger Effekte zurückführen, wobei eine auf den Positionen F8 und ATR beobachtbare, möglicherweise durch frontale *Drifts* verursachte

Negativierung statistisch signifikant wurde. Die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE im links-posterioren Quadranten war durch die unterschiedlich starke Ausprägung des Positivierungseffekts auf den einzelnen Elektrodenpositionen bedingt. Während der Effekt auf den Positionen WL, P7 und P3 statistisch signifikant wurde, war für die Position O1 nur marginale Signifikanz zu verzeichnen.

Tab. 8.37: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	-0.21	.65
F3	1,15	-2.19	.16
ATL	1,15	-1.46	.25
BL	1,15	-3.67	.07
anterior-rechts			
F8	1,15	8.92	$<.01$
F4	1,15	0.07	.80
ATR	1,15	4.60	$<.05$
BR	1,15	-0.23	.64
posterior-links			
WL	1,15	-11.08	$<.01$
P7	1,15	-14.68	$<.01$
P3	1,15	-12.85	$<.01$
O1	1,15	-3.99	.06

Für die Mittellinienelektroden ließ sich, wie aus Tabelle 8.38 ersichtlich ist, weder ein Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG noch eine Interaktion dieses Faktors mit dem Faktor ELEKTRODE feststellen.

Tab. 8.38: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	2.58	.13	17.02
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	<1	.73	1.18

In der Varianzanalyse für die lateralen Elektrodenpositionen P7, P8, P3, P4, O1 und O2 zeigte sich neben einem signifikanten Haupteffekt BEDINGUNG auch eine reliable Interaktion von BEDINGUNG und HEMISPHÄRE.

Tab. 8.39: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms über die sechs posterioren lateralen Elektrodenpositionen P3, P4, P7, P8, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	7.85	$<.05$	4.83
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	7.15	$<.05$	0.58

Die daraufhin durchgeführte Analyse für die beiden jeweils drei posteriore Elektrodenpositionen umfassenden ROIs ergab einen signifikanten Haupteffekt BEDINGUNG für die links-posteriore ROI, während rechts-posterior lediglich ein marginal signifikanter

Haupteffekt BEDINGUNG zu verzeichnen war. In der links-posterioren ROI lag außerdem eine Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE vor.

Tab. 8.40: *ROI-Analyse für die Kontrollgruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms über die posterioren lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	10.93	$<.01$	9.22
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	4.14	$<.05$	0.85
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	3.62	.08	7.01
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	<1		

Diese Interaktion in der links-posterioren ROI ließ sich durch entsprechende t-Tests darauf zurückführen, dass die Positivierung auf den Elektrodenpositionen P7 und P3 signifikant wurde, während auf der Position O1 nur marginale Signifikanz vorlag.

Tab. 8.41: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms für die posterioren lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
posterior-links			
P7	1,15	-14.68	$<.01$
P3	1,15	-12.85	$<.01$
O1	1,15	-3.99	.06

Wie in diesen Analysen deutlich wurde, manifestierte sich die bei der Kontrollgruppe beobachtete P600-Komponente im vorliegenden Experiment auf den Elektrodenpositionen des links-posterioren Quadranten. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass sich der Effekt auch dann statistisch absichern ließ, wenn die Analyse entsprechend der bei den Patienten durchführbaren Auswertung nicht alle lateralen (posterioren) Elektrodenpositionen enthielt. Insgesamt konnte in der syntaktischen Bedingung somit für die Kontrollprobanden ein biphasisches Muster aus N400 und nachfolgender P600-Komponente nachgewiesen werden.

8.3.2.4 Syntaktische Bedingung: CI-Gruppe

Die EKP-Daten der syntaktischen Bedingung im Vergleich zur korrekten Bedingung (*high probability*) für die Gesamtgruppe der CI-Träger sind in Abbildung 8.8 dargestellt. Im Potentialverlauf ist zunächst eine deutliche Negativierung im gleichen Zeitfenster wie auch bei den Kontrollprobanden erkennbar, also zwischen 300 und 800 ms nach Beginn des kritischen Wortes (N400-Komponente). Auf den parietalen Elektrodenpositionen zeigt sich jedoch daran anschließend kein positiverer Verlauf der ereigniskorrelierten Potentiale für die syntaktisch inkorrekten Sätze gegenüber den korrekten Sätzen. Stattdessen wird ei-

ne leichte Positivierung auf den frontalen Elektroden erkennbar, wobei eine statistische Analyse Aufschluss darüber geben muss, ob es sich hierbei um einen reliablen Effekt handelt.

N400-Komponente (300 bis 800 ms). Die inferenzstatistische Analyse für die N400 wurde in Übereinstimmung mit der Analyse für die Kontrollgruppe und auf der Basis der visuellen Inspektion der Potentialverläufe im Zeitfenster 300 bis 800 ms vorgenommen. Die globale Analyse über die sechs lateralen Elektrodenpositionen P7, P8, P3, P4, O1 und O2 ergab hier einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Eine Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und HEMISPHÄRE war nicht zu verzeichnen.

Tab. 8.42: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die sechs posterioren lateralen Elektrodenpositionen P3, P4, P7, P8, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	34.56	$<.0001$	3.79
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	<1		

In der für die drei Mittellinienelektroden getrennt durchgeführten Analyse zeigten sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG sowie eine hochsignifikante Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 8.43: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	9.55	.01	10.70
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	32.30	$<.0001$	0.42

Die Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE ließ sich, wie nachfolgend gerechnete t-Tests zeigen, auf die Tatsache zurückführen, dass der Negativierungseffekt nur auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen CZ und PZ statistische Signifikanz erreichte.

Tab. 8.44: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und syntaktisch inkorrekter Bedingung im Zeitbereich 300-800 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	t	p
FZ	1,15	0.95	.35
CZ	1,15	8.85	$<.01$
PZ	1,15	27.20	$<.001$

P600-Komponente (900 bis 1200 ms). Für die inferenzstatistische Analyse, die das Vorhandensein einer P600-Komponente bei den CI-Trägern überprüfen sollte, wurde das Zeitfenster zwischen 900 und 1200 ms gewählt, in dem bei visueller Inspektion der Daten ein frontal leicht positiverer Potentialverlauf für die syntaktisch inkorrekten Sätze im

Vergleich zu den korrekten Sätzen aufgefallen war. Es handelte sich hierbei um das gleiche Zeitfenster, in dem die P600-Komponente bei den Kontrollprobanden nachgewiesen wurde.

In der globalen Analyse über die sechs auswertbaren lateralen Elektrodenpositionen ergab sich jedoch weder ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG noch lag eine Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und HEMISPHÄRE vor.

Tab. 8.45: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms über die sechs posterioren lateralen Elektrodenpositionen P3, P4, P7, P8, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	< 1		
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	< 1		

Für die Mittellinienelektroden konnte im fraglichen Zeitfenster ebenfalls kein signifikant unterschiedlicher Potentialverlauf für syntaktisch inkorrekte Sätze verglichen mit korrekten Sätzen nachgewiesen werden. Wie auch bei den lateralen Elektroden zeigten sich hier weder ein Haupteffekt BEDINGUNG noch eine Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 8.46: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die syntaktische Bedingung im Zeitbereich 900-1200 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	1.50	.24	0.90

Zusammenfassend konnte in der syntaktischen Bedingung für die CI-Träger damit zwar eine N400-Komponente mit ähnlicher zentro-parietaler Verteilung wie bei den Kontrollen nachgewiesen werden, jedoch zeigte sich klar, dass die syntaktische Verletzung bei den Patienten keine P600-Komponente evozierte.

8.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Mittelpunkt des Experiments IV stand die Frage nach der auditiven Verarbeitung von Argumentstrukturen des Verbs bei CI-Trägern. Damit sollte getestet werden, ob sich Abweichungen gegenüber Normalhörenden auch für syntaktische Anomalien nachweisen lassen, die leichter aus dem akustischen Sprachsignal zu extrahieren sind als die in den Experimenten I und III untersuchten Phrasenstrukturverletzungen. Der Fragestellung entsprechend wurden Sätze präsentiert, welche eine inkorrekte Verbargumentstruktur im Sinne einer Stelligkeitsverletzung enthielten. In dem Experiment sollten des Weiteren die Prozesse der semantischen Informationsverarbeitung spezifiziert werden, indem ei-

nerseits eine Replikation der Befunde aus Experiment I hinsichtlich der Verarbeitung semantischer Anomalien erfolgen sollte, andererseits aber auch die durch Variation der kontextuellen semantischen Passung bedingten Verarbeitungseffekte untersucht wurden. Zu diesem Zweck wurden neben den syntaktisch inkorrekten Sätzen Sätze mit semantischen Verletzungen sowie Sätze mit einer Manipulation der *cloze probability* präsentiert.

Für die Gruppe der normalhörenden Kontrollprobanden konnten sowohl für die inkorrekten Verbargumentstrukturen als auch für die semantischen Manipulationen die vorhergesagten Effekte nachgewiesen werden. So evozierten semantische Anomalien ebenso wie Wörter mit einer satzkontextuell bedingten niedrigen *cloze probability* im Vergleich zu Wörtern mit einer hohen *cloze probability* eine N400, wobei die Komponente in der Verletzungsbedingung eine größere Amplitude aufwies. Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit den von Kutas und Hillyard (1984) und Kutas et al. (1984) berichteten Befunden zur Verarbeitung der kontextuellen semantischen Passung eines Satzelements. In der syntaktischen Bedingung wurde in der Kontrollgruppe wie vorhergesagt ein biphasisches Muster aus N400 und P600 festgestellt, womit sich die Ergebnisse von Friederici und Frisch (2000) bezüglich der Verarbeitung von Stelligkeitsinformation auch für ältere Probanden nachweisen ließen. Allerdings wies die im vorliegenden Experiment beobachtete P600-Komponente eine unerwartet geringe Ausprägung auf. Diese geht möglicherweise auf eine durch die Satzendstellung des kritischen Worts bedingte Überlagerung der Positivierung mit einer Satzendnegativierung zurück (vgl. Osterhout, 1997).

Für die CI-Gruppe ließen sich in den Verhaltensdaten zwar zunächst in allen Bedingungen mit Ausnahme der semantisch inkorrekten Bedingung höhere Fehlerraten als bei den hörgesunden Kontrollprobanden feststellen, insgesamt lagen die Fehlerzahlen jedoch niedriger als in den vorangegangenen akustischen Experimenten. Dass es den CI-Trägern relativ problemlos gelang, die syntaktischen Verletzungen im akustischen Sprachsignal zu detektieren, zeigte sich darin, dass für diese Bedingung geringere Fehlerraten zu beobachten waren als für die korrekten Bedingungen. Damit bestätigten die Verhaltensdaten die Annahme, dass Verletzungen hinsichtlich der Verbargumentstruktur von CI-Trägern besser erkannt werden können als Phrasenstrukturverletzungen.

Hinsichtlich der Verarbeitung von semantischer Information bestätigten die EKP-Daten die Beobachtungen aus Experiment I, in welchem sich für diesen sprachlichen Informationstyp bei den CI-Trägern keine Abweichungen gegenüber Hörgesunden gezeigt hatten. Auch im vorliegenden Experiment lösten die semantischen Anomalien in der CI-Gruppe ebenso wie in der Kontrollgruppe eine N400-Komponente aus. Eine sol-

che N400 ergab sich auch im Zusammenhang mit der Manipulation der *cloze probability*, wobei dieser Effekt ebenso wie bei den Kontrollprobanden geringer ausgeprägt war als die durch die semantische Verletzung evozierte N400. Damit konnte nachgewiesen werden, dass bei den CI-Trägern nicht nur semantisch unpassende Wörter ähnlich wie bei Normalhörenden verarbeitet werden, sondern dass auch die Verarbeitung der kontextuellen Passung eines Satzelements mit vergleichbaren hirnelektrischen Korrelaten wie bei Normalhörenden einhergeht.

Für die Verarbeitung der inkorrekten Verbargumentstruktur konnte mit den Verhaltensdaten zwar gezeigt werden, dass die Detektion dieser syntaktischen Anomalie den CI-Trägern relativ gut gelang, allerdings widerlegten die EKP-Befunde die eingangs aufgestellte Hypothese, dass in diesem Fall auch eine adäquate Verarbeitung der syntaktischen Information zu erwarten wäre, weshalb keine Abweichungen gegenüber Hörgesunden auftreten sollten. Während die Subkategorisierungsverletzung bei den Normalhörenden ein biphasisches Muster aus N400 und P600 evoziert hatte, ließ sich bei den Patienten lediglich eine N400-Komponente nachweisen. Eine P600 als das Korrelat syntaktischer Reanalyse- bzw. Korrekturprozesse konnte jedoch entgegen der ursprünglichen Annahmen nicht beobachtet werden. Dass für die hier untersuchte Verletzung der Argumentstruktur des Verbs bei den Patienten nur eine semantische Verarbeitung nachgewiesen werden konnte, zeigt, dass bei CI-Trägern auch dann Abweichungen hinsichtlich der Integration von syntaktisch unpassenden Satzelementen auftreten können, wenn es sich um im Sprachsignal akustisch eindeutigere syntaktische Informationstypen handelt. Es ist anzumerken, dass bei den Patienten im Gegensatz zu den hörgesunden Kontrollprobanden bereits für die korrekten Sätze eine ausgeprägte Positivierung zu beobachten war. Dies könnte ein Anzeichen dafür sein, dass die syntaktische Integration bei den Patienten generell mehr Verarbeitungsaufwand erfordert als bei Normalhörenden. Interessanterweise konnte ein ähnlicher Effekt bereits auch für Zweitsprachlerner festgestellt werden (Hahne & Friederici, 2001). Eine ausführlichere Diskussion dieser Parallelen soll im Rahmen der Gesamtdiskussion erfolgen.

Zusammenfassend konnte mit dem vorliegenden Experiment bestätigt werden, dass die Reduktion des akustischen Inputs sich bei CI-Trägern nicht auf die Prozesse der semantischen Integration auswirkt. Hingegen wurden bei den Patienten Abweichungen in den Prozessen der Verarbeitung von Information bezüglich der Verbargumentstruktur festgestellt.

Kapitel 9
Experiment V: Auditive Verarbeitung von morphosyntaktischer Information (Pluralmarkierungen)

9.1 Fragestellung und Hypothesen

In Experiment V stand die Verarbeitung von Pluralmarkierungen an Nomen und damit ein morphosyntaktischer Verarbeitungsprozess im Mittelpunkt des Interesses. Da solche Pluralmarkierungen akustisch nur wenig salient sind, stellte sich die Frage, wie sie von CI-Träger wahrgenommen und verarbeitet werden und ob möglicherweise auch hier Kompensationsstrategien zu beobachten sein würden.

Im Experiment sollte sowohl die Verarbeitung von regulären als auch von irregulären Pluralformen untersucht werden. Die Unterscheidung zwischen regulären und irregulären Pluralformen basiert dabei auf den Annahmen des *dual route*-Modells (vgl. Clahsen, 1999; Marcus et al., 1995; Pinker, 1991; Pinker & Prince, 1991), welches postuliert, dass die durch das Pluralsuffix *„-s“* gekennzeichneten regulären Pluralformen zur Verarbeitung vom Sprachverarbeitungssystem dekomponiert werden, wohingegen für irreguläre Pluralformen ein eigenständiger Eintrag im mentalen Lexikon vorliegt. Diesem Modell folgend ist davon auszugehen, dass irreguläre Pluralformen zumindest bei Normalhörenden in anderer Weise als reguläre Pluralformen verarbeitet werden. Eine EKP-Studie von Lück et al. (2001a, siehe auch Lück et al., 2001b) erbrachte für diese Annahme empirische Evidenz. Die Autoren konnten feststellen, dass inkorrekte Regularisierungen von Nomen – d. h. Nomen, welche ihren Plural korrekterweise mit dem Suffix *„-en“* als einem der möglichen irregulären Pluralsuffixe bilden, wurden mit der regulären Pluralmarkierung *„-s“* versehen – im ereigniskorrelierten Potential ein Muster aus LAN und P600 hervorriefen. Ein solches Muster kann als Anzeichen für morphosyntaktische Verarbeitungsprozesse interpretiert werden, welche durch die Detektion einer falschen Re-

gelanwendung ausgelöst wurden (vgl. Abschnitt 3.3.2.3). Vergleichbare hirnelektrische Korrelate syntaktischer Verarbeitungsprozesse waren für irregularisierte Nomen dagegen nicht nachzuweisen. Für diese Nomen, welche inkorrekterweise mit dem irregulären Pluralsuffix *„-en“* versehen wurden, war stattdessen mit einer N400 das Korrelat semantischer Verarbeitungsprozesse gefunden worden (Lück et al., 2001a, 2001b). Dieser Befund ist kompatibel mit der Vorstellung des *dual route*-Modells, dass irreguläre Pluralformen vom Sprachverarbeitungssystem nicht dekomponiert werden können, weshalb im mentalen Lexikon eine Suche für das Wort im Ganzen stattfinden muss. Für inkorrekterweise irregularisierte Pluralnomen ist ein entsprechender Lexikoneintrag aber nicht vorhanden, das Wort wird demzufolge ähnlich wie ein Pseudowort verarbeitet, was sich in der N400 widerspiegelt (vgl. Weyerts et al., 1997). Mit dem vorliegende Experiment sollte jedoch unabhängig von der Diskussion um reguläre und irreguläre Pluralformen hauptsächlich untersucht werden, wie CI-Träger mit dieser Art von syntaktischer Information umgehen. Es stellte sich dabei primär die Frage, ob für die Patienten die gleichen EKP-Muster wie für die Kontrollen zu beobachten sein würden.

Für die Kontrollgruppe wurde entsprechend der Befunde in vorherigen Studien mit normalhörenden studentischen Probanden vorhergesagt, dass inkorrekte Regularisierungen von Nomen ein Muster aus LAN und P600 hervorrufen. Die Verarbeitung inkorrekter Irregularisierungen sollte dagegen im ereigniskorrelierten Potential mit einer N400-Komponente einhergehen.

Fraglich war, ob sich die entsprechenden Effekte auch bei den CI-Trägern nachweisen ließen. Dies erschien zunächst unwahrscheinlich, wenn von der Überlegung ausgegangen wurde, dass die Wahrnehmung von Pluralmarkierungen aufgrund der geringen akustischen Salienz dieser Elemente für CI-Träger sehr problematisch sein müsste. Andererseits war nicht anzunehmen, dass der Einsatz semantischer Kompensationsstrategien, wie er in Experiment I beobachtet worden war, hier einen Sinn ergeben würde. Des Weiteren hat-

Tab. 9.1: *Übersicht über die in Experiment V vorkommenden Bedingungen und Beispielsätze. Das kritische Wort für die experimentellen Sätze ist durch Unterstreichung gekennzeichnet.*

Experimentelle Sätze		
(a)	feminin, korrekt	*Oma kauft im Supermarkt die großen Büchsen mit Erbsensuppe.*
(b)	feminin, inkorrekt	**Oma kauft im Supermarkt die großen Büchses mit Erbsensuppe.*
(c)	Namen, korrekt	*Diesen Sommer zelten wir mit den Schmidts in der Schweiz.*
(d)	Namen, inkorrekt	**Diesen Sommer zelten wir mit den Schmidten in der Schweiz.*

te sich bereits in Experiment IV gezeigt, dass die akustische Salienz eines syntaktischen Informationstyps nicht ausschlaggebend dafür zu sein scheint, ob hinsichtlich der Verarbeitung der entsprechenden syntaktischen Information Abweichungen gegenüber Normalhörenden zu verzeichnen sind.

9.2 Methoden

9.2.1 Stimulusmaterial

In dem Experiment, welches insgesamt vier Bedingungen umfasste, kam das Stimulusmaterial aus einer Studie von Lück et al. (2001a) zum Einsatz. Dieses bestand aus Sätzen, welche (a) feminine Nomen im korrekten Plural oder (b) in einer inkorrekten Pluralform enthielten, sowie des Weiteren aus Sätzen, in denen (c) Eigennamen im korrekten Plural oder (d) in einer inkorrekten Pluralform enthalten waren (vgl. Tabelle 9.1). Nach Weyerts et al. (1997) und Clahsen (1999) gelten die Pluralformen femininer Nomen, welche im Deutschen korrekterweise mit dem Pluralsuffix *„-en“* gebildet werden, als irreguläre Plurale. Für die inkorrekte Bedingung wurden diese Pluralformen regularisiert, d. h. das feminine Nomen wurde mit dem regulären Pluralsuffix *„-s“* versehen. Die Plurale von Namen dagegen, die im Deutschen korrekterweise mit dem regulären Pluralsuffix *„-s“* gebildet werden, wurden zur Realisierung der inkorrekten Bedingung irregularisiert. Diese Irregularisierung erfolgte, indem die entsprechenden Pluralformen der Namen mit dem irregulären Pluralsuffix *„-en“* gebildet wurden. In allen Sätzen erschien die kritische Pluralform der Nomen an der Objektposition innerhalb einer Subjekt-Verb-Objekt-Struktur und wurde von einer Adverbialphrase gefolgt.

Die Prozesse der Verarbeitung von regulären Pluralformen von Nomen sollten erfasst werden, indem ein Vergleich der ereigniskorrelierten Potentiale auf den inkorrekten Plural in der femininen Bedingung mit dem korrekten femininen Plural vorgenommen wurde. Im Folgenden soll dieser Vergleich auch als *feminine Bedingung* bezeichnet werden. Hingegen sollte die ereigniskorrelierte Aktivität auf den inkorrekten Plural von Eigennamen mit den EKPs für den korrekten Plural von Eigennamen verglichen werden, um die Prozesse der Verarbeitung von irregulären Pluralformen zu erfassen. Auf diesen Vergleich soll im Folgenden auch als *Namens-Bedingung* referiert werden.

In den Experimentalsätzen kamen 24 verschiedene feminine Nomen und 24 verschiedene Eigennamen vor. Bei den Eigennamen handelte es sich um Familiennamen, welche dem Telefonbuch entnommen wurden, wobei als Auswahlkriterium die Vorkommenshäu-

figkeit der Namen galt. Für jedes der insgesamt 48 Nomen wurden vier verschiedene Satzkontexte konstruiert. In diesen Satzkontexten wurde das Nomen jeweils in seiner korrekten Pluralform sowie in der jeweiligen inkorrekt gebildeten Pluralform (s. o.) verwendet. Somit waren für jede Bedingung insgesamt 96 Sätze vorhanden, jedes Nomen kam in acht verschiedenen Sätzen vor, von denen vier korrekt und vier inkorrekt waren. Die insgesamt 384 Sätze wurden auf zwei Listen verteilt, so dass jede Liste 48 Sätze pro Bedingung enthielt. Im Experiment wurde den Teilnehmern jeweils nur eine Liste dargeboten. Damit kam im Experiment jedes Nomen viermal vor. Es wurde zweimal der korrekte Plural und zweimal der inkorrekte Plural des Nomens in jeweils unterschiedlichen Satzkontexten verwendet.

Die Sätze wurden von einer trainierten Sprecherin mit normaler Sprachgeschwindigkeit eingesprochen. Diese wurde dahingehend instruiert, dass die Intonation für die korrekten Pluralnomen auf die inkorrekten Pluralnomen übertragen werden sollte. Die Sätze wurden anschließend entsprechend der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Prozedur digitalisiert und als separate Dateien gespeichert.

9.2.2 Probanden

Am Experiment nahmen 16 CI-Träger mit gutem freiem Sprachverständnis und 16 hörgesunde Kontrollprobanden teil. Die Patienten (9 weiblich, 7 männlich) waren zum Zeitpunkt des Experiments zwischen 34 und 77 Jahren alt (Mittel 55 Jahre), die CI-Tragedauer betrug 0.9 bis 7.0 Jahre (Mittel 3.0 Jahre). Alle CI-Träger waren postlingual ertaubt. Genauere Angaben zu den einzelnen Patienten sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Die Rekrutierung der Patienten erfolgte über eine Kooperation mit der HNO-Klinik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg (Dr. Joachim Müller) bzw. dem Zentrum für HNO der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt/Main (Dr. Jan Kiefer). Die Kontrollprobanden entsprachen den CI-Trägern hinsichtlich des Geschlechts, des Alters ($\pm$ 3 Jahre) und soweit möglich auch hinsichtlich des Bildungsstands. Bei allen Versuchspersonen handelte es sich um deutsche Muttersprachler. Die Teilnahme am Experiment wurde mit 13 DM bzw. 7 EUR pro Stunde vergütet.

9.2.3 Versuchsdurchführung

Allgemein. Die Präsentation der Stimulussätze erfolgte in einer schallisolierten Kabine akustisch über Lautsprecher. Für die Patienten wurde die Lautstärke für ein möglichst op-

timales Sprachverständnis individuell angepasst, für die Kontrollprobanden erfolgte die akustische Darbietung einheitlich mit einer mittleren Lautstärke. Im Experiment hörte jeder Proband 48 Sätze pro Bedingung. Die insgesamt 192 Sätze waren in pseudorandomisierter Reihenfolge auf 6 Blöcke mit jeweils 32 Sätzen verteilt.

Auch in diesem Experiment erhielten die Probanden die Aufgabe, nach jedem Satz durch Tastendruck an einer Tastatur eine Korrektheitsbeurteilung vorzunehmen. Alle Probanden erhielten vor Beginn des Experiments eine schriftliche Instruktion mit Beispielsätzen, damit sichergestellt werden konnte, dass sie die Aufgabe vollständig erfasst hatten. Des Weiteren wurden die Probanden instruiert, sich während der Präsentation der Sätze möglichst nicht zu bewegen, wobei aber keine spezielle Instruktion auf Vermeidung von Augenbewegungen erfolgte. Wie in den vorangegangenen Experimenten wurde auf einem Monitor ein Zeichen ($*$) eingeblendet, welches die Probanden fixieren sollten, womit störende Augenbewegungen zumindest teilweise unterbunden werden sollten. Das Fixationszeichen erschien 500 ms vor Beginn jedes Satzes bis 2500 ms nach Satzende auf dem Monitor, welcher auf Augenhöhe in etwa 130 cm Abstand zum Probanden positioniert war. Im Anschluss wurde für 3000 ms ein Antwortbild (☺ ☹) eingeblendet, welches die Probanden dazu aufforderte, ihr Korrektheitsurteil abzugeben. Nach einem Interstimulusintervall von 1500 ms folgte der nächste Trial.

Zu Beginn des Experiments wurde ein Trainingsblock mit 15 Beispielsätzen präsentiert, der bei Bedarf wiederholt wurde. Anschließend bearbeiteten die Probanden die sechs experimentellen Blöcke. Zwischen den Blöcken bestand die Gelegenheit zu kurzen Erholungspausen. Das Experiment dauerte ohne EEG-Vorbereitung etwa 45 Minuten.

Elektrophysiologische Ableitung. Die Ableitung des EEGs folgte der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Methodik.

9.2.4 Datenanalyse

Verhaltensdaten. Die Auswertung der Verhaltensdaten entsprach der in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Vorgehensweise. Der Anzahl der experimentellen Bedingungen entsprechend war der Faktor BEDINGUNG dabei in allen Analysen vierfach gestuft (feminin, korrekt / feminin, inkorrekt / Namen, korrekt / Namen, inkorrekt).

EKP-Daten. In der Auswertung der EEG-Rohdaten sowie der anschließenden quantitativen Analyse der gemittelten ereigniskorrelierten Potentiale wurde ebenso vorgegangen, wie dies in Abschnitt 5.2.4 für das Experiment I beschrieben wurde. Die Mittelung der

ereigniskorrelierten Potentiale wurde relativ zu einer 200 ms prästimulus-Baseline vorgenommen[1].

9.3 Ergebnisse

9.3.1 Verhaltensdaten

In der Tabelle 9.2 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für Fehlerraten und Reaktionszeiten der Kontrollgruppe und der CI-Gruppe dargestellt.

Tab. 9.2: *Mittlere Reaktionszeiten in Millisekunden und prozentuale Fehlerraten für die einzelnen Bedingungen im Vergleich für CI-Träger und normalhörende Kontrollprobanden. Die jeweiligen Standardabweichungen sind in Klammern angegeben.*

	Kontrollen		CI-Träger	
	Reaktionszeit	*Fehlerrate*	*Reaktionszeit*	*Fehlerrate*
feminin, korrekt	425(96)	2.2 (2.1)	556(237)	24.7 (17.6)
feminin, inkorrekt	405(87)	1.7 (2.4)	534(347)	27.7 (27.8)
Namen, korrekt	426(95)	6.6 (6.0)	622(225)	32.3 (15.7)
Namen, inkorrekt	459(139)	14.1 (12.3)	702(349)	53.4 (29.6)

In der Varianzanalyse über die Fehlerraten in der Kontrollgruppe konnte ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt werden ($F(3,45) = 10,34, p < .001, MS_e = 51$). Dieser ging unter anderem darauf zurück, dass für Sätze der Namens-Bedingungen signifikant mehr Fehler zu verzeichnen waren als für Sätze der femininen Bedingungen, und zwar sowohl im direkten Vergleich der beiden korrekten Bedingungen ($t(15) = 3,11, p < .01$) als auch im Vergleich der beiden inkorrekten Bedingungen ($t(15) = 4,14, p < .01$). Des Weiteren wurden für die inkorrekte Namens-Bedingung tendenziell mehr Fehler beobachtet als für die korrekte Namens-Bedingung ($t(15) = 1,97, p = .07$). Ein solcher Effekt konnte für die femininen Bedingungen nicht festgestellt werden ($t(15) < 1$). Ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG ließ sich auch in der Analyse über die Reaktionszeiten nachweisen ($F(3,45) = 13,84, p < .05, MS_e = 2104$). Hier zeigte sich, dass die Reaktionszeiten auf Sätze mit inkorrekten Namenspluralen signifikant länger waren als die Reaktionszeiten auf die inkorrekte feminine Bedingung ($t(15) = 2,69, p < .05$).

Für die Patientengruppe ergab sich ein ähnliches Bild. Auch hier wurde für die Fehlerraten ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG beobachtet ($F(3,45) = 13,91, p <$

[1] Die Wahl einer solchen prästimulus-Baseline war möglich, da sich die Sätze über die Probanden hinweg vor dem kritischen Pluralnomen im Vergleich der jeweiligen experimentellen Bedingungen einheitlich nicht voneinander unterschieden.

$.001, MS_e = 193$), der auf höhere Fehlerzahlen in den jeweiligen Namens-Bedingungen (korrekt: $t(15) = 2,33, p < .05$; inkorrekt: $t(15) = 4,88, p < .001$) ebenso zurückging wie auf die Tatsache, dass für die inkorrekte Namens-Bedingung signifikant mehr Fehler zu verzeichnen waren als für die korrekte Namens-Bedingung ($t(15) = 4,15, p < .01$). Des Weiteren konnte auch für die CI-Träger in der Analyse über die Reaktionszeiten ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG nachgewiesen werden ($F(3,45) = 4,37, p < .01, MS_e = 20941$). Ebenso wie bei den Kontrollprobanden waren dabei signifikant längere Reaktionszeiten auf Sätze mit inkorrekten Namenspluralen im Vergleich zu Sätzen der inkorrekten femininen Bedingung festzustellen ($t(15) = 2,71, p < .05$). Tendenziell längere Reaktionszeiten konnten für die korrekte Namens-Bedingung im Vergleich zur korrekten femininen Bedingung beobachtet werden ($t(15) = 2,11, p = .05$).

Der Vergleich von CI-Trägern und Kontrollprobanden ergab hinsichtlich der Fehlerraten einen signifikanten Effekt des Faktors GRUPPE ($F(1,30) = 30,79, p < .001, MS_e = 837$). Dabei waren für alle Bedingungen signifikant höhere Fehlerraten für die CI-Gruppe festzustellen (feminin, korrekt: $F(1,30) = 25,69, p < .001, MS_e = 157$; feminin, inkorrekt: $F(1,30) = 13,94, p < .01, MS_e = 389$; Namen, korrekt: $F(1,30) = 37,28, p < .001$, $MS_e = 142$; Namen, inkorrekt: $F(1,30) = 24,07, p < .001, MS_e = 114$). Die gleichfalls signifikant werdende Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE ($F(3,90) = 3,67, p < .05, MS_e = 122$) zeigte, dass die für beide Gruppen beschriebenen Bedingungseffekte unterschiedlich stark ausgeprägt waren. Ein signifikanter Gruppeneffekt konnte auch für die Reaktionszeiten nachgewiesen werden ($F(1,30) = 6,00, p < .05, MS_e = 162558$). Längere Reaktionszeiten bei den CI-Trägern betrafen dabei sowohl die korrekte Namens-Bedingung ($F(1,30) = 10,29, p < .01, MS_e = 29844$) als auch die inkorrekte Namens-Bedingung ($F(1,30) = 6,66, p < .05, MS_e = 70757$) sowie tendenziell die korrekte feminine Bedingung ($F(1,30) = 4,19, p = .05, MS_e = 32688$). Für die Reaktionszeiten wurde allerdings keine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und GRUPPE festgestellt ($F(3,90) = 2,11, p = .11, MS_e = 11523$)

Insgesamt spiegelten die Verhaltensdaten deutlich die Tatsache wider, dass in diesem Experiment bei den CI-Trägern erhebliche Schwierigkeiten im Satzverständnis und dabei besonders bei den Sätzen der beiden Namens-Bedingungen bestanden. Dies wurde auch von den Patienten selbst im Anschluss an das Experiment berichtet. Allerdings zeigte sich ebenfalls, dass auch bei den Kontrollprobanden Unsicherheiten hinsichtlich der Sätze mit Namenspluralen vorhanden waren.

9.3.2 EKP-Daten

9.3.2.1 Feminine Pluralnomen: Kontrollgruppe

Die EKP-Daten für den Vergleich von korrekten und inkorrekten femininen Pluralnomen für die Kontrollgruppe sind der Abbildung 9.1 zu entnehmen. Bei visueller Inspektion der Potentialverläufe zeigt sich zunächst eine leichte Negativierung für die inkorrekten Pluralfeminina im Vergleich zu den korrekten Pluralfeminina. Die Negativierung (LAN-Komponente) tritt zwischen etwa 500 und 600 ms nach Beginn des kritischen Wortes auf, sie beschränkt sich allerdings auf die lateralsten anterioren Elektrodenpositionen. Ebenfalls bereits bei etwa 500 ms beginnt eine sehr stark ausgeprägte Positivierung (P600-Komponente), welche sich besonders auf den zentro-parietalen Elektrodenpositionen manifestiert und bis zum Mittelungsende bei 1500 ms andauert.

LAN-Komponente (500 bis 600 ms). Auf der Basis der deskriptiven Analyse erfolgte die statistische Absicherung des beobachteten Negativierungseffekts im Zeitfenster 500 bis 600 ms. In der globalen Analyse über alle Lateralelektroden zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG, jedoch wurde die Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und REGION signifikant.

Tab. 9.3: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-600 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × REGION	1,15	12.02	$<.01$	1.09
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	<1		
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	<1		

Tab. 9.4: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-600 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.11	.31	7.91
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	4.03	$<.05$	0.71
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	2.97	.08	0.53
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	2.90	.11	6.30
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	12.01	$<.0001$	0.33
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	4.63	$<.05$	5.35
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	9.45	$<.001$	0.21

Die aufgrund dieser Interaktion durchgeführte Quadrantenanalyse (vgl. Tabelle 9.4) ergab, dass ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG nur für den rechts-

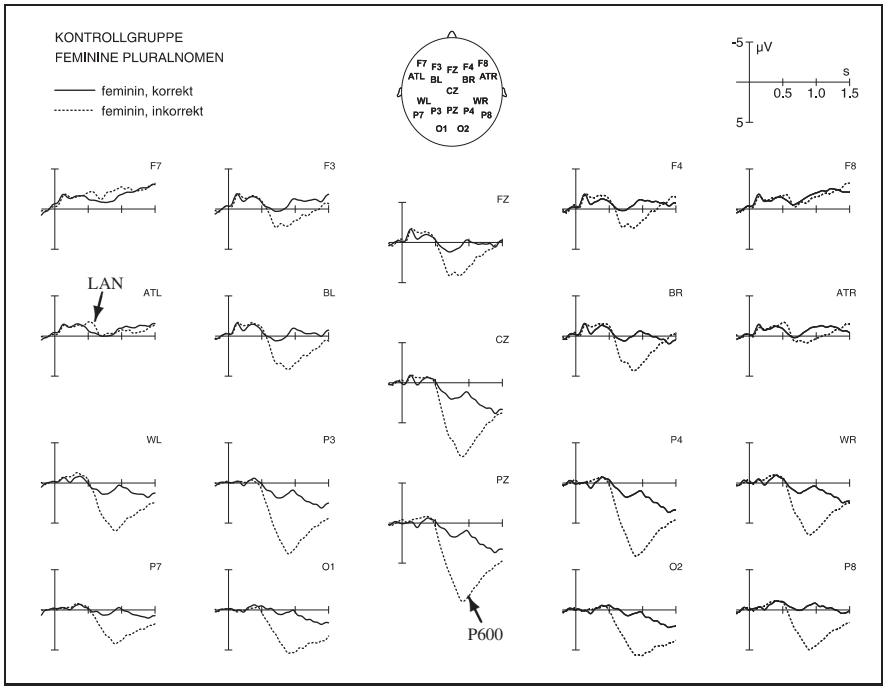

Abb. 9.1: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung.*

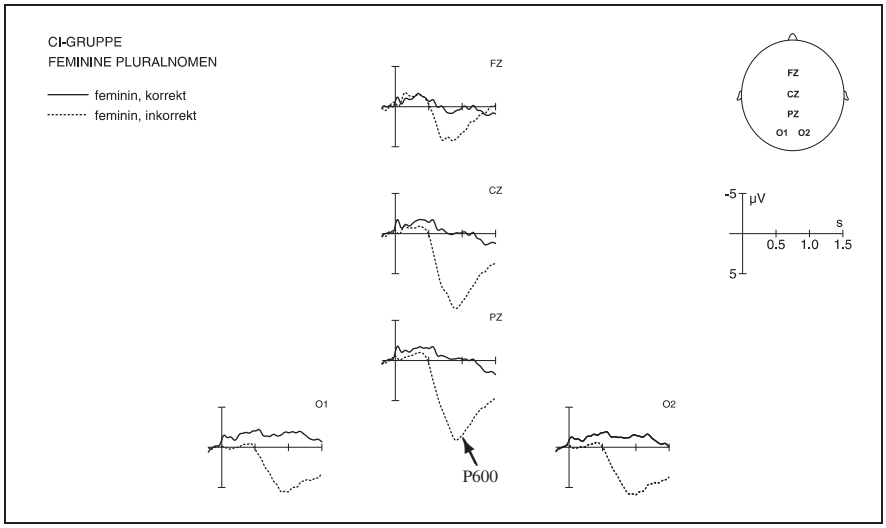

Abb. 9.2: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die feminine Bedingung.*

posterioren Quadranten zu verzeichnen war, wobei es sich hier jedoch um den bereits zu diesem Zeitpunkt einsetzenden Positivierungseffekt handelte. Eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE konnte sowohl für die beiden posterioren als auch für den links-anterioren Quadranten festgestellt werden. Im rechts-anterioren Quadranten wurde die Interaktion marginal signifikant.

Durch die entsprechenden t-Tests ließ sich die Interaktion in den beiden anterioren Quadranten auf den Umstand zurückführen, dass auf den Elektrodenpositionen ATL und ATR eine signifikante Negativierung sowie auf den Positionen F7 und F8 eine marginal signifikante Negativierung vorlag, wohingegen für die anderen anterioren Elektrodenpositionen teilweise gegenläufige, jedoch jeweils nicht signifikante Effekte zu verzeichnen waren. In den beiden posterioren Quadranten wurde die hier bereits einsetzende Positivierung auf den Elektrodenpositionen P3 und O1 sowie P4 und O2 signifikant.

Tab. 9.5: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter femininer Bedingung im Zeitbereich 500-600 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	3.11	.10
F3	1,15	-0.00	.95
ATL	1,15	6.19	$<.05$
BL	1,15	0.01	.93
anterior-rechts			
F8	1,15	3.18	.09
F4	1,15	0.02	.88
ATR	1,15	6.69	$<.05$
BR	1,15	-0.00	.98
posterior-links			
WL	1,15	-0.01	.94
P7	1,15	-0.50	.49
P3	1,15	-5.96	$<.05$
O1	1,15	-9.57	$<.01$
posterior-rechts			
WR	1,15	-0.61	.45
P8	1,15	-2.37	.14
P4	1,15	-7.18	$<.05$
O2	1,15	-10.26	$<.01$

In der Analyse für die Mittellinienelektroden ergaben sich ein marginal signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG und eine ebenfalls marginal signifikante Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE, wobei der Haupteffekt wie auch bei den posterioren Lateralelektroden auf die bereits einsetzende Positivierung zurückging.

Tab. 9.6: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-600 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	4.36	.05	8.44
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	3.44	.06	0.92

Die Analyse für die Einzelelektroden der Mittellinie zeigte, dass diese Positivierung auf den zentro-parietalen Mittellinienelektroden CZ und PZ signifikant bzw. marginal signifikant wurde.

Tab. 9.7: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter femininer Bedingung im Zeitbereich 500-600 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	-1.00	.33
CZ	1,15	-3.32	.09
PZ	1,15	-7.68	$<.05$

Durch die Beschränkung des Negativierungseffekts auf die anterior-lateralen Elektrodenpositionen F7, ATL, F8 und ATR, wie sie in den vorangegangenen Analysen deutlich wurde, war eine Absicherung des Effekts nicht mehr möglich, wenn nur die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ sowie O1 und O2 in die Auswertung einbezogen wurden. Die entsprechende statistische Analyse ergab zwar einen signifikanten Haupteffekt BEDINGUNG, jedoch wurde damit nur die bereits einsetzende Positivierung erfasst.

Tab. 9.8: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-600 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	6.31	$<.05$	9.75
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	2.09	.12	0.76

Die LAN-Komponente konnte also bei einer nur die Mittellinienelektroden sowie die Positionen O1 und O2 umfassenden Analyse bei den Kontrollen nicht mehr nachgewiesen werden. Somit wird über das Vorhandensein dieser Komponente bei den CI-Trägern keine Aussage zu machen sein, da bei ihnen aufgrund von CI-Artefakten nur die genannten Elektroden in die Analyse einbezogen werden konnten.

P600-Komponente (500 bis 1500 ms). Wie die vorangegangenen statistischen Analysen gezeigt hatten, war bereits während des Auftretens der LAN-Komponente zwischen 500 und 600 ms eine statistisch signifikante Positivierung vorhanden. Bei visueller Inspektion der Potentialverläufe hatte diese Positivierung bis zum Mittelungsende bei 1500 ms beobachtet werden können. Dementsprechend wurde die statistische Analyse für den Positivierungseffekt im Zeitfenster zwischen 500 und 1500 ms vorgenommen. In der globalen Analyse über alle Lateralelektroden ergab sich dabei ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Außerdem war eine hochsignifikante Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und REGION zu verzeichnen.

Tab. 9.9: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	14.28	$<.01$	8.62
BEDINGUNG × REGION	1,15	28.47	$<.0001$	1.38
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	<1		
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	<1		

Diese Interaktion ließ sich durch die nachfolgend gerechnete Quadrantenanalyse auf die Tatsache zurückführen, dass ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG nur für die beiden posterioren Quadranten nachgewiesen werden konnte, nicht jedoch für die Quadranten der anterioren Region. Eine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE lag in allen vier Quadranten vor.

Tab. 9.10: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	1.43	.25	16.37
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	18.60	$<.0001$	0.73
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	3.05	.10	7.67
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	6.42	$<.01$	0.68
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	28.59	$<.0001$	9.65
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	12.59	$<.0001$	0.44
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	33.34	$<.0001$	9.82
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	7.43	$<.01$	0.37

Tab. 9.11: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter femininer Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	0.71	.41
F3	1,15	-2.93	.11
ATL	1,15	-0.02	.89
BL	1,15	-6.43	$<.05$
anterior-rechts			
F8	1,15	-0.02	.89
F4	1,15	-2.99	.10
ATR	1,15	-1.27	.28
BR	1,15	-7.98	$<.05$
posterior-links			
WL	1,15	-19.45	$<.001$
P7	1,15	-15.66	$<.01$
P3	1,15	-35.88	$<.0001$
O1	1,15	-30.98	$<.0001$
posterior-rechts			
WR	1,15	-24.53	$<.001$
P8	1,15	-27.97	$<.0001$
P4	1,15	-34.34	$<.0001$
O2	1,15	-33.99	$<.0001$

In der dementsprechend durchgeführten Analyse auf Elektrodenebene (vgl. Tabelle 9.11) zeigte sich, dass die Positivierung anterior nur auf den Elektrodenpositionen BL und BR statistische Signifikanz erreichte. Dagegen wurde sie posterior auf allen Elektrodenpositionen der beiden Quadranten signifikant, wobei sich die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE in diesen Quadranten auf die unterschiedlich starke Ausprägung des Effekts zurückführen ließ.

In Analyse für die Mittellinienelektroden ergaben sich ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG sowie eine reliable Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 9.12: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	16.77	$<.01$	15.64
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	10.15	$<.001$	1.55

Wiederum zeigte sich in den entsprechenden t-Tests, dass diese Interaktion auf eine stärkere zentro-parietale Ausprägung der Positivierung zurückging. Während für die Elektrodenpositionen CZ und PZ ein signifikanter bzw. hochsignifikanter Effekt nachgewiesen werden konnte, war für die frontale Elektrode FZ nur ein marginal signifikanter Effekt zu verzeichnen.

Tab. 9.13: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter femininer Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	t	p
FZ	1,15	-4.11	.06
CZ	1,15	-14.07	$<.01$
PZ	1,15	-31.82	$<.0001$

Eine klare statistische Absicherung der Positivierung war auch dann möglich, wenn nur die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 in die Analyse einbezogen wurden. Hier zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG ebenso wie eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 9.14: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	24.27	$<.001$	17.05
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	5.02	$<.05$	1.59

Wie die t-Tests für die Einzelelektroden zeigten, ging die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE wiederum auf die Tatsache zurück, dass der Positivierungseffekt zwar auf allen fünf Elektrodenpositionen signifikant bzw. marginal signifikant wurde, jedoch auf den parietal-okzipitalen Elektrodenpositionen stärker ausgeprägt war.

Tab. 9.15: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter femininer Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	-4.11	.06
CZ	1,15	-14.07	$<.01$
PZ	1,15	-31.82	$<.0001$
O1	1,15	-30.98	$<.0001$
O2	1,15	-33.99	$<.0001$

Insgesamt ließ sich somit in der femininen Bedingung bei den Kontrollen eine LAN-Komponente nachweisen, die bilateral zwischen 500 und 600 ms nach Beginn des kritischen Worts auf den lateralsten anterioren Elektrodenpositionen auftrat. Des Weiteren wurde zwischen 500 und 1500 ms eine deutlich ausgeprägte, breit verteilte P600 mit maximalen Amplituden auf parietalen Elektrodenpositionen festgestellt.

9.3.2.2 Feminine Pluralnomen: CI-Gruppe

Die ereigniskorrelierten Potentiale für die korrekten und die inkorrekten femininen Pluralnomen für die CI-Gruppe sind in Abbildung 9.2 dargestellt. Es hatte sich bereits in der Auswertung der Daten der Kontrollgruppe gezeigt, dass aufgrund der beschränkten Anzahl an auswertbaren Elektrodenpositionen bei den CI-Trägern keine Aussage über das Vorhandensein einer LAN-Komponente möglich sein würde. Bei der visuellen Inspektion der Potentialverläufe für die Gruppe der CI-Träger zeigt sich auch wie erwartet keine der LAN entsprechende Negativierung. Es ist jedoch ebenso wie bei den Kontrollen eine deutliche Positivierung der ereigniskorrelierten Potentiale für die inkorrekten femininen Pluralnomen im Vergleich zu den korrekten Pluralfeminina zu erkennen (P600). Der positivere EKP-Verlauf beginnt etwa 500 ms nach Beginn des kritischen Wortes und hält bis 1500 ms an. Der Effekt manifestiert sich besonders auf den zentro-parietalen Elektroden.

P600-Komponente (500 bis 1500 ms). Die statistische Absicherung des Positivierungseffekts erfolgte auf Basis der visuellen Inspektion sowie in Übereinstimmung mit der bei den Kontrollen nachgewiesenen P600-Komponente im Zeitfenster zwischen 500 und 1500 ms. In der globalen Analyse über die fünf auswertbaren Elektrodenpositionen ergab sich dabei ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Weiterhin lag eine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE vor.

Tab. 9.16: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die feminine Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	14.96	$<.01$	17.81
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	3.59	$<.05$	2.26

In den dementsprechenden t-Tests zeigte sich, dass für alle Elektroden mit Ausnahme der frontalen Elektrodenposition FZ ein signifikanter Positivierungseffekt zu verzeichnen war.

Tab. 9.17: *t-Tests für die CI-Gruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter femininer Bedingung im Zeitbereich 500-1500 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	-1.76	.20
CZ	1,15	-9.49	$<.01$
PZ	1,15	-13.46	$<.01$
O1	1,15	-15.38	$<.01$
O2	1,15	-12.08	$<.01$

Somit konnte auch für die Gruppe der CI-Träger in der femininen Bedingung eine im Zeitfenster zwischen 500 und 1500 ms statistisch klar abzusichernde P600-Komponente nachgewiesen werden.

9.3.2.3 Pluralformen von Namen: Kontrollgruppe

Wie den in Abbildung 9.3 dargestellten EKP-Daten der Namens-Bedingung zu entnehmen ist, lösten die inkorrekten Pluralformen der Namen zwischen 550 und 700 ms nach Beginn des kritischen Wortes einen negativeren Potentialverlauf im Vergleich zu den korrekten Pluralformen aus (N400-Komponente). Zusätzlich tritt zwischen etwa 800 und 1200 ms eine Positivierung auf den posterioren Elektrodenpositionen auf. Verteilung und Latenz des Effekts legen die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um einen P600-Effekt handelt (vgl. Diskussion Abschnitt 9.4).

N400-Komponente (550 bis 700 ms). Auf der Basis der Beobachtungen in der deskriptiven Analyse erfolgte die statistische Überprüfung des Negativierungseffekts im Zeitfenster zwischen 550 und 700 ms. In der globalen Analyse über alle Lateralelektroden ergaben sich dabei sowohl ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG als auch eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und HEMISPHÄRE.

Tab. 9.18: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 550-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	4.98	$<.05$	3.32
BEDINGUNG × REGION	1,15	<1		
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	11.60	$<.01$	0.25
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	1.33	.27	0.27

Die Interaktion zwischen BEDINGUNG und HEMISPHÄRE ließ sich in der Analyse auf Quadrantenebene auf die Tatsache zurückführen, dass für beide Quadranten der rech-

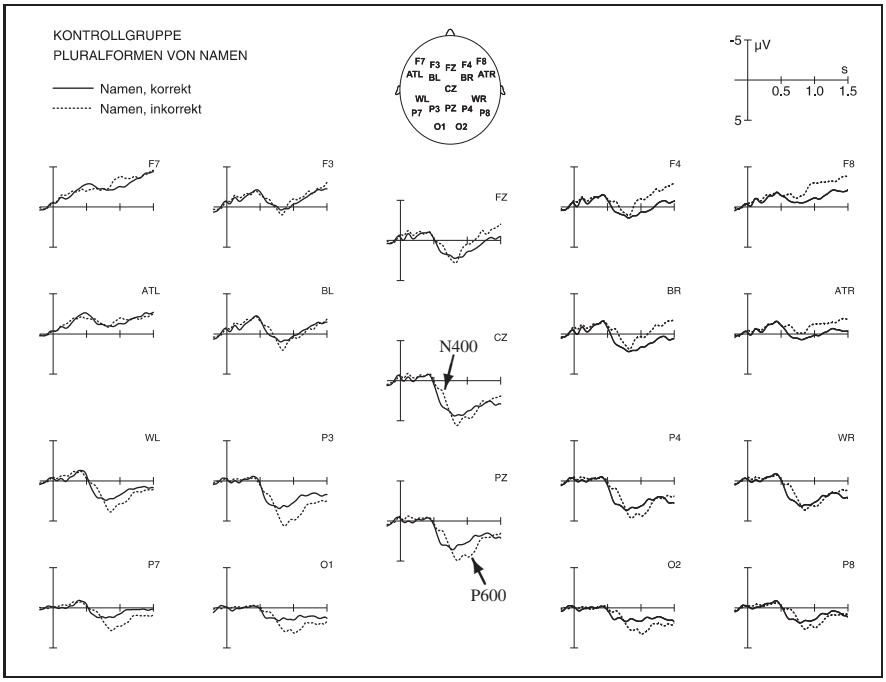

Abb. 9.3: *Grand Average EKP für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung.*

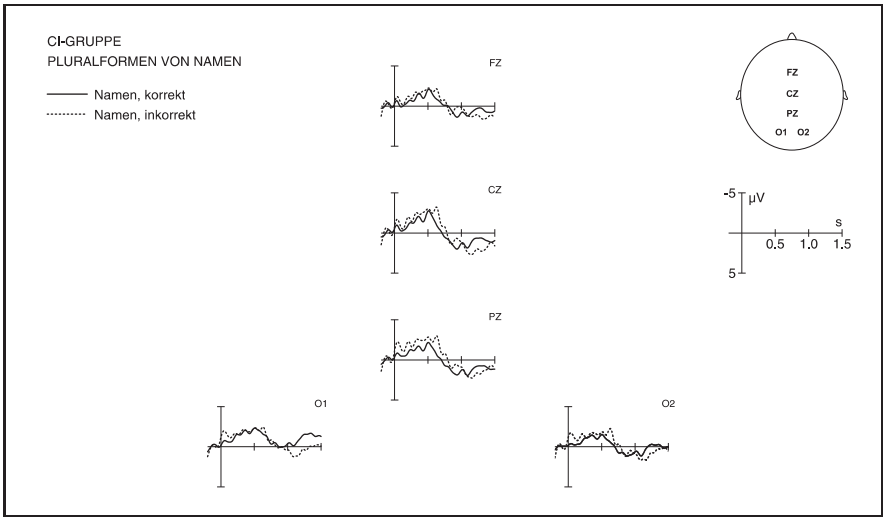

Abb. 9.4: *Grand Average EKP für die CI-Gruppe für die Namens-Bedingung.*

ten Hemisphäre ein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG zu verzeichnen war, wohingegen links-hemisphärisch lediglich ein marginal signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG für den posterioren Quadranten festgestellt wurde. Die Interaktion zwischen den Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE wurde rechts-posterior signifikant.

Tab. 9.19: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 550-700 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	F	p	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	2.44	.12	0.54
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	5.18	$< .05$	5.64
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	1.75	.20	0.37
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	3.13	.10	4.96
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	< 1		
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	10.54	$< .01$	3.61
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.47	$< .05$	0.20

Die dementsprechenden t-Tests zeigten, dass die Negativierung im rechts-posterioren Quadranten auf allen vier Elektrodenpositionen signifikant wurde, wobei der Effekt aber auf der okzipitalen Position O2 geringer ausgeprägt war.

Tab. 9.20: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter Namens-Bedingung im Zeitbereich 550-700 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	t	p
posterior-rechts			
WR	1,15	12.04	$< .01$
P8	1,15	11.04	$< .01$
P4	1,15	10.28	$< .01$
O2	1,15	4.60	$< .05$

Die Analyse für die Mittellinienelektroden ergab einen marginal signifikanten Haupteffekt BEDINGUNG. Eine Interaktion dieses Faktors mit dem Faktor ELEKTRODE konnte nicht festgestellt werden.

Tab. 9.21: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 550-700 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	3.99	.06	6.70
BEDINGUNG × ELEKTRODE	2,30	1.25	.29	0.78

Die N400 ließ sich statistisch auch absichern, wenn die Auswertung nur die fünf auch bei den CI-Trägern auswertbaren Elektrodenpositionen enthielt. Die entsprechende Analyse ergab einen marginal signifikanten Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG. Wiederum war keine Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE zu verzeichnen.

Tab. 9.22: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 550-700 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	4.46	.05	7.34
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	1.15	.33	0.73

P600-Komponente (800 bis 1200 ms). Die beobachtete Positivierung wurde in einer inferenzstatistischen Analyse im Zeitfenster zwischen 800 und 1200 ms auf ihre Reliabilität geprüft. In der globalen Analyse über alle Lateralelektroden konnte kein signifikanter Haupteffekt des Faktors BEDINGUNG festgestellt werden. Jedoch lagen signifikante Interaktionen zwischen BEDINGUNG und REGION sowie zwischen BEDINGUNG und HEMISPHÄRE vor.

Tab. 9.23: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × REGION	1,15	17.86	$<.001$	1.66
BEDINGUNG × HEMISPHÄRE	1,15	9.04	$<.01$	0.67
BEDINGUNG × REGION × HEMISPHÄRE	1,15	1.75	.21	0.24

Die Analyse auf Quadrantenebene ergab für die beiden posterioren Quadranten einen signifikanten bzw. tendenziell signifikanten Haupteffekt BEDINGUNG, der sich auf die dort beobachtete Positivierung zurückführen ließ. Der für den rechts-anterioren Quadranten festgestellte Haupteffekt BEDINGUNG ging dagegen auf einen dort beobachtbaren anhaltenden Negativierungseffekt zurück. Eine signifikante Interaktion zwischen BEDINGUNG und ELEKTRODE war für den rechts-posterioren Quadranten zu verzeichnen, in den beiden links-hemisphärischen Quadranten wurde die Interaktion tendenziell signifikant.

Tab. 9.24: *Quadrantenanalyse für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms über die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*F*	*p*	MS_e
anterior-links				
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.05	.07	0.73
anterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	7.35	$<.05$	7.53
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	<1		
posterior-links				
BEDINGUNG	1,15	13.13	$<.01$	5.35
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	2.96	.06	0.37
posterior-rechts				
BEDINGUNG	1,15	4.09	.06	5.57
BEDINGUNG × ELEKTRODE	3,45	3.87	$<.05$	0.25

Durch die dementsprechenden t-Tests konnte festgestellt werden, dass die Interaktion im links-anterioren Quadranten auf das Vorliegen gegenläufiger, jedoch jeweils nicht

signifikanter Effekte zurückging. Im links-posterioren Quadranten wurde die Positivierung auf allen Elektrodenpositionen signifikant, sie war jedoch auf der Position WL geringer ausgeprägt. Rechts-posterior konnte ein signifikanter Positivierungseffekt nur für die Elektrodenpositionen P8 und O2 sowie tendenziell für die Position P4 nachgewiesen werden.

Tab. 9.25: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms für die lateralen Elektrodenpositionen.*

	df	*t*	*p*
anterior-links			
F7	1,15	2.90	.11
F3	1,15	0.33	.57
ATL	1,15	0.35	.56
BL	1,15	-0.94	.35
posterior-links			
WL	1,15	-6.13	$<.05$
P7	1,15	-17.32	$<.001$
P3	1,15	-13.36	$<.01$
O1	1,15	-10.71	$<.01$
posterior-rechts			
WR	1,15	-0.78	.39
P8	1,15	-4.87	$<.05$
P4	1,15	-3.12	.10
O2	1,15	-8.84	$<.01$

In der Analyse über die Mittellinienelektroden ergab sich kein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG, jedoch lag wiederum eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE vor.

Tab. 9.26: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms über die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*F*	*p*	MS_e
BEDINGUNG	1,15	<1		
BEDINGUNG $\times$ ELEKTRODE	2,30	5.96	$<.05$	1.70

Die dementsprechende Analyse für die Einzelelektroden zeigte, dass die Interaktion durch das Vorliegen von gegenläufigen Effekten bedingt war. Statistische Signifikanz erreichte allerdings nur die Positivierung auf der parietalen Elektrodenposition PZ.

Tab. 9.27: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms für die Elektrodenpositionen der Mittellinie.*

	df	*t*	*p*
FZ	1,15	1.37	.26
CZ	1,15	-0.91	.36
PZ	1,15	-5.31	$<.05$

Die Reliabilität der Positivierung konnte auch in der nur die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 umfassenden Analyse nachgewiesen werden. In der globalen Analyse über alle fünf Elektroden ergab sich ein tendenziell signifikanter Haupteffekt

BEDINGUNG. Außerdem war eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE zu verzeichnen.

Tab. 9.28: *Globale ANOVA für die Kontrollgruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	3.15	.10	8.64
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	5.20	$<.05$	1.25

Die Interaktion von BEDINGUNG und ELEKTRODE ging auf den Umstand zurück, dass im entsprechenden Zeitfenster auf den entsprechenden Elektrodenpositionen gegenläufige Effekte vorlagen. Statistische Signifikanz erreichte jedoch nur die Positivierung auf den parietalen Elektroden PZ, O1 und O2.

Tab. 9.29: *t-Tests für die Kontrollgruppe für den Vergleich von korrekter und inkorrekter Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms für die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	t	p
FZ	1,15	1.37	.26
CZ	1,15	-0.91	.36
PZ	1,15	-5.31	$<.05$
O1	1,15	-10.71	$<.01$
O2	1,15	-8.84	$<.01$

Zusammenfassend wurde bei den Kontrollprobanden in der Namens-Bedingung somit sowohl eine N400-Komponente zwischen 550 und 700 ms als auch eine gering ausgeprägte P600-Komponente zwischen 800 und 1200 ms nachgewiesen. Zusätzlich wurde im Zeitfenster der P600-Komponente rechts-anterior ein möglicherweise durch frontale *Drifts* verursachter Negativierungseffekt festgestellt.

9.3.2.4 Pluralformen von Namen: CI-Gruppe

Aufgrund der sehr hohen Fehlerraten der CI-Träger insbesondere für die inkorrekten, aber auch für die korrekten Sätze der Namens-Bedingung ergab sich in der Mittelung der ereigniskorrelierten Potentiale, in welche nur korrekt beantwortete Trials eingingen, ein sehr ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis. Die gemittelten EKP-Daten müssen deshalb als wenig aussagekräftig eingeschätzt werden. Sie sollen aus Gründen der Vollständigkeit nachfolgend zwar trotzdem berichtet werden, es sei jedoch bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auf eine Interpretation der Befunde verzichtet werden wird (siehe auch die Diskussion in Abschnitt 9.4).

Bei visueller Inspektion der in der Abbildung 9.4 dargestellten Potentialverläufe für die korrekte und die inkorrekte Namens-Bedingung für die CI-Gruppe lässt sich kein deutlicher Unterschied zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen der beiden Bedin-

gungen erkennen. Weder ist eine N400-Komponente zu beobachten, noch eine Positivierung wie sie bei den Kontrollprobanden neben der N400 auch bei nur fünf ausgewerteten Elektroden festzustellen war. Es wurde dennoch überprüft, ob sich in den entsprechenden Zeitfenstern signifikant unterschiedliche Potentialverläufe für die beiden Bedingungen nachweisen ließen.

N400-Komponente (550 bis 700 ms). Wie aus Tabelle 9.30 ersichtlich ist, ergab die Analyse über die fünf auswertbaren Elektrodenpositionen im Zeitfenster der bei den Kontrollprobanden festgestellten N400 weder einen signifikanten Haupteffekt BEDINGUNG noch eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE.

Tab. 9.30: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 550-700 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	1.32	.27	24.29
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	< 1		

P600-Komponente (800 bis 1200 ms). Auch im Zeitfenster der bei den Kontrollen nachgewiesenen P600-Komponente konnte bei den Patienten kein signifikanter Unterschied für die Potentialverläufe der korrekten und der inkorrekten Namens-Bedingung festgestellt werden. In der entsprechenden globalen Analyse über die fünf auswertbaren Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2 zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt BEDINGUNG. Ebenso wenig war eine signifikante Interaktion der Faktoren BEDINGUNG und ELEKTRODE zu verzeichnen.

Tab. 9.31: *Globale ANOVA für die CI-Gruppe für die Namens-Bedingung im Zeitbereich 800-1200 ms über die fünf Elektrodenpositionen FZ, CZ, PZ, O1 und O2.*

	df	F	p	MS_e
BEDINGUNG	1,15	< 1		
BEDINGUNG × ELEKTRODE	4,60	< 1		

Damit konnte in der Namens-Bedingung bei den CI-Patienten kein signifikanter Unterschied in den EKP-Verläufen für korrekte und für inkorrekte Namensplurale festgestellt werden.

9.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Experiment V sollte bei den CI-Trägern mit der Verarbeitung von Pluralmarkierungen an Nomen ein morphosyntaktischer Verarbeitungsprozess untersucht werden. Dazu wurden Sätze präsentiert, welche entweder korrekte oder inkorrekte Pluralformen von Nomen

enthielten. Getestet wurde dabei sowohl, wie Regularisierungen von eigentlich irregulär gebildeten femininen Pluralnomen (z. B. *„Büchsen“* vs. *„*Büchses“*) verarbeitet werden, als auch die Verarbeitung von Irregularisierungen korrekterweise regulär gebildeter Pluralnomen von Familiennamen (z. B. *„Schmidts“* vs. *„*Schmidten“*).

Für die hörgesunden Kontrollprobanden war den Annahmen des *dual route*-Modells (vgl. Clahsen, 1999; Marcus et al., 1995) folgend vorhergesagt worden, dass die Verarbeitung regulärer Pluralmarkierungen an Nomen ein EKP-Muster hervorruft, welches sich von dem durch irreguläre Pluralmarkierungen evozierten EKP-Muster unterscheidet. Den Vorhersagen entsprechend evozierten die inkorrekten Regularisierungen der femininen Nomen ein Muster aus anteriorer Negativierung (LAN-Komponente) und nachfolgender P600-Komponente, während die inkorrekten Irregularisierungen der Namensplurale eine N400-Komponente auslösten. Damit gelang es, die von Lück et al. (2001a, 2001b) für eine studentische Probandengruppe berichteten Effekte mit dem gleichen Satzmaterial für hörgesunde ältere Probanden zu replizieren. Ähnliche EKP-Muster hatten auch Weyerts et al. (1997) in einem vergleichbaren Experiment beobachten können, wobei die Autoren für die Verarbeitung von inkorrekten Regularisierungen lediglich eine links-anteriore Negativierung feststellten.

Das auf morphosyntaktische Verarbeitungsprozesse hindeutende Muster aus LAN und nachfolgender P600-Komponente, welches im vorliegenden Experiment bei den Kontrollprobanden für die inkorrekterweise regularisierten Pluralformen femininer Nomen festgestellt wurde, kann im Sinne der Detektion einer falschen Regelanwendung sowie nachfolgender Prozesse der syntaktischen Reanalyse bzw. Korrektur interpretiert werden. Es ist anzumerken, dass die anteriore Negativierung keine klare Linkslateralisierung aufwies und zudem nur sehr gering ausgeprägt war, d. h. sie ließ sich nur für die beiden lateral gelegenen Elektrodenpositionen ATL und ATR nachweisen. Die sehr geringe Ausprägung der LAN-Komponente ist vermutlich auf die Überlagerung mit der wiederum unerwartet stark ausgeprägten nachfolgenden Positivierung zurückzuführen, welche sich bis auf zentrale und sogar frontale Elektrodenpositionen erstreckte. Dass bei den normalhörenden älteren Kontrollprobanden ein solchermaßen ausgeprägter Positivierungseffekt auftrat, ist möglicherweise dadurch bedingt, dass die syntaktischen Korrekturprozesse bei diesen Probanden mehr Verarbeitungskapazität erforderten. Unabhängig von dieser auf Spekulationen beruhenden Erklärung wirkt sich die Tatsache, dass die LAN für die Kontrollgruppe nur auf lateralen Elektrodenpositionen nachgewiesen werden konnte, dahingehend aus, dass der Vergleich zwischen Patienten und Kontrollprobanden auf die P600-Komponente beschränkt bleiben muss.

Die in der Kontrollgruppe für die Irregularisierungen der normalerweise regulär gebildeten Namensplurale nachgewiesene N400-Komponente kann als Hinweis auf Probleme bei der semantisch-lexikalischen Integration dieser Wörter gedeutet werden. Diese Interpretation steht in Übereinstimmung mit den Annahmen des *dual route*-Modells (vgl. Clahsen, 1999; Weyerts et al., 1997), welches postuliert, dass das Sprachverarbeitungssystem irreguläre Pluralsuffixe nicht als solche erkennt, weshalb inkorrekt irreguläre Pluralformen nicht dekomponiert werden können, sondern ähnlich wie Pseudo-Wörter verarbeitet werden, für die ebenfalls eine N400 berichtet wurde (vgl. z. B. Kutas & Van Petten, 1994). Für die inkorrekten Namensplurale wurde im vorliegenden Experiment neben der vorhergesagten N400 auch eine parietale Positivierung festgestellt, welche als P600 interpretiert wurde. Das Auftreten einer solchen Komponente im Zusammenhang mit den inkorrekten Namenspluralen lässt sich möglicherweise damit erklären, dass die in diesen Sätzen auf der semantischen Ebene entstehenden Interpretationsprobleme zu globaleren Problemen bei der Satzintegration führten, was sich wiederum in einer P600 niederschlug (zur Interpretation der P600 als Indikator globalerer Satzintegrationsprobleme vgl. Gunter et al., 2000, siehe auch Abschnitt 3.3.2.4).

Für die CI-Gruppe zeigte sich zunächst in den Verhaltensdaten, dass das Verstehen der Sätze den Patienten generell große Probleme bereitete. So waren für die CI-Träger in allen Bedingungen signifikant mehr Fehler zu verzeichnen als bei den hörgesunden Kontrollprobanden, wobei für die inkorrekten Sätze im Vergleich zu den jeweiligen korrekten Sätzen wiederum signifikant höhere Fehlerraten registriert wurden. In der Namens-Bedingung wiesen die behavioralen Daten auf besonders große Verstehensprobleme hin. Die Fehlerraten für die inkorrekten Namensplurale bewegten sich dabei auf Zufallsniveau, weshalb die in dieser Bedingung gemittelten ereigniskorrelierten Potentiale als nicht-aussagekräftig betrachtet werden müssen und auf eine Interpretation dieser Daten verzichtet werden soll[2]. Insgesamt können die hohen Fehlerraten der Patienten in allen Bedingungen als Beleg dafür gelten, dass die in diesem Experiment untersuchten morphosyntaktischen Anomalien für die CI-Träger äußerst schwierig zu detektieren waren. Da sich allerdings im vorangegangenen Experiment IV angedeutet hatte, dass Verarbeitungsunterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden nicht unbedingt mit der auditiven Perzipierbarkeit des untersuchten syntaktischen Informationstyps relatiert sind, war das Auftreten von abweichenden Verarbeitungsmustern bei den CI-Trägern im vorliegenden

[2]Es ist anzumerken, dass die Detektion der inkorrekten Namensplurale auch für die normalhörenden Kontrollprobanden nicht unproblematisch war, was aber möglicherweise darauf zurückgeht, dass viele der Versuchsteilnehmer die inkorrekten Pluralformen unter dialektalen Gesichtspunkten als legal empfanden.

Experiment fraglich. Tatsächlich konnte für die inkorrekt regularisierten femininen Pluralnomen in der CI-Gruppe eindeutig eine P600-Komponente nachgewiesen werden. Eine solche Komponente war – neben der LAN, über deren Vorhandensein bei den CI-Trägern aufgrund ihrer lateralen Verteilung keine Aussage möglich ist – auch in der Kontrollgruppe beobachtet worden.

Zusammenfassend konnte damit gezeigt werden, dass die Verarbeitung der in diesem Experiment präsentierten, im akustischen Sprachsignal nur wenig prominenten morphosyntaktischen Anomalien bei den CI-Trägern ebenso wie bei den hörgesunden Kontrollprobanden mit syntaktischen Reanalyse- bzw. Korrekturprozessen einherging. Hingegen ergab sich keine Evidenz für eine Verarbeitung der inkongruenten Satzelemente auf semantischer Ebene, wie sie in den Experimenten I und IV auftrat. Ein Zusammenhang zwischen den bei CI-Trägern auftretenden Abweichungen im Prozess des Sprachverstehens und der auditiven Perzipierbarkeit der entsprechenden sprachlichen Informationstypen scheint damit weitestgehend ausgeschlossen zu sein. Alternative Erklärungsansätze für die in den Experimenten I bis V gefundenen Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten im Satzverstehen von CI-Patienten und Normalhörenden sollen im Rahmen der Gesamtdiskussion vorgestellt werden.

Kapitel 10
Allgemeine Diskussion und Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente zielten auf eine Untersuchung der Prozesse ab, die dem Satzverstehen bei postlingual ertaubten Patienten, deren Hörwahrnehmung mit Hilfe eines Cochlea-Implantats wiederhergestellt wurde, zugrunde liegen. Davon ausgehend, dass die trotz der CI-Rehabilitation bei diesen Patienten bestehende Einschränkung der Hörwahrnehmung zu veränderten Mechanismen der auditiven Sprachverarbeitung führt, sollten die von Abweichungen betroffenen Teilprozesse des Satzverstehens spezifiziert werden. Als kritische Annahme galt dabei die Vermutung, dass Modifikationen in den Prozessen der Satzverarbeitung bei den CI-Trägern mit der auditiven Perzipierbarkeit der jeweils in die Satzrepräsentation zu integrierenden sprachlichen Elemente relatiert sind. Sie sollten demzufolge vor allem für die Verarbeitung von im akustischen Sprachschall nur wenig prominenten Elementen beobachtbar sein, welche von der durch die CI-Technik bedingten Reduzierung des Sprachsignals besonders betroffen sind. Abweichungen gegenüber Normalhörenden waren auf der Basis dieser Überlegungen primär für die Prozesse der Verarbeitung von syntaktischen Informationen erwartet worden, da diese häufig durch sprachliche Elemente von geringer akustischer Salienz kodiert sind. Hingegen waren für die Verarbeitung auf semantischer Ebene keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden vorhergesagt worden. Hinsichtlich der syntaktischen Informationsverarbeitung war des Weiteren angenommen worden, dass sich für akustisch eindeutigere Informationstypen bei den Patienten ähnliche Verarbeitungsprozesse wie bei Normalhörenden nachweisen lassen, während für die Verarbeitung von problematischer zu perzipierenden syntaktischen Elementen Abweichungen gegenüber Hörgesunden auftreten sollten. Die Gültigkeit dieser Annahmen wurde durch die systematische Variation verschiedener sprachlicher Informationstypen überprüft. Mit Hilfe eines visuellen Kontrollexperiments sollte zudem untersucht werden, ob sich Abweichungen im Satzverstehensprozess auf die auditiven Verarbeitungsmechanismen beschränken oder ob es sich um generellere Modifikationen des Sprachverarbeitungssystems handelt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der fünf berichteten Experimente zunächst überblicksartig

dargestellt (vgl. auch Tabelle 10.1), bevor anschließend eine allgemeine Diskussion der Daten vorgenommen wird.

EKP-Befunde zur Verarbeitung semantischer Informationen. Die auditive Verarbeitung semantischer Informationen wurde in den Experimenten I und IV getestet, während mit Experiment II semantische Verarbeitungsprozesse in der visuellen Modalität geprüft wurden. In allen Experimenten konnte bei den CI-Trägern mit der N400-Komponente das auch bei hörgesunden Probanden beobachtbare hirnelektrische Korrelat von semantisch-lexikalischen Integrationsprozessen nachgewiesen werden. Dies war konsistent sowohl für die Verarbeitung semantischer Anomalien (Experimente I und IV, akustisch; Experiment II, visuell) als auch im Zusammenhang mit Manipulationen der kontextuell bedingten Erwartetheit von semantisch adäquaten Wörtern (Experiment IV) der Fall. Ebenso wie bei den Normalhörenden war die N400 auf semantisch inadäquate Satzelemente dabei stärker ausgeprägt als die durch semantisch adäquate aber unerwartete Wörter evozierte N400. Des Weiteren wies die Komponente in der visuellen Modalität eine rechts-laterale Verteilung auf. Die Befunde für die Verarbeitung semantischer Informationen stimmten bei den getesteten CI-Trägern damit nicht nur mit dem für die normalhörende Kontrollgruppe beobachteten Muster überein, sondern sie stehen auch in Einklang mit den in der Literatur berichteten Daten (z. B. Kutas & Hillyard, 1980a, 1980b, 1984; Kutas et al., 1988, siehe auch Abschnitt 3.3.1).

Insgesamt kann deshalb davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Prozessen der semantischen Integration um relativ robuste Prozesse handelt, auf welche ein reduzierter akustischer Input wenig Einfluss hat.

EKP-Befunde zur Verarbeitung syntaktischer Informationen. Die Prozesse der auditiven Verarbeitung von syntaktischer Information wurden in den Experimenten I, III, IV und V getestet. Während die Experimente I und III dabei die Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation zum Gegenstand hatten, zielte das Experiment IV auf die Prozesse der Verarbeitung von Argumentstrukturinformation ab. In Experiment V wurde mit der Verarbeitung von Pluralmarkierungen an Nomen ein morphosyntaktischer Verarbeitungsprozess untersucht. Das Experiment II diente als visuelles Kontrollexperiment, in welchem ebenso wie in Experiment I die Verarbeitung von Phrasenstrukturinformation geprüft wurde.

Hinsichtlich der auditiven Perzipierbarkeit der getesteten syntaktischen Informationstypen konnte mit Hilfe der Fehlerdaten in der für alle Experimente identischen behavi-

Tab. 10.1: *Tabellarische Zusammenstellung der experimentellen Befunde zur Verarbeitung von syntaktischer Information bei den CI-Trägern und den hörgesunden Kontrollprobanden. Es werden jeweils nur die Effekte angegeben, über deren Vorhandensein auch bei einer auf fünf Elektrodenpositionen beschränkten Auswertung eine Aussage möglich war.*

	EKP-Befunde		
	Hörgesunde	CI-Träger	Abweichungen
Phrasenstruktur (Experiment I)	P600	N400[a]	✔
Phrasenstruktur,visuell (Experiment II)	P600	P600	✘
Phrasenstruktur in Jabberwocky-Sätzen (Experiment III)	P600, AN[b]	AN[b]	✔
Verbargumentstruktur (Experiment IV)	N400, P600	N400	✔
Pluralmarkierungen (Experiment V)	P600	P600	✘

[a] P600 für 6 von 30 getesteten CI-Trägern
[b] AN=Anhaltende Negativierung

oralen Beurteilungsaufgabe gezeigt werden, dass die Detektion der morphosyntaktischen Verletzungen im akustischen Signal für die CI-Träger am problematischsten war. Große Erkennensschwierigkeiten bestanden aber auch hinsichtlich der Phrasenstrukturverletzung. Hingegen gelang es den Patienten relativ problemlos, Argumentstrukturanomalien aus dem akustischen Satzsignal zu extrahieren. Während sich die Fehlerraten von CI-Trägern und Normalhörenden im visuellen Kontrollexperiment nicht voneinander unterschieden, waren in allen akustischen Experimenten höhere Fehlerraten für die Patienten zu verzeichnen.

Für die Verarbeitung von Anomalien der *Phrasenstruktur* wurde in Experiment I bei fast allen der getesteten CI-Träger eine N400-ähnliche Negativierung beobachtet. Lediglich bei einigen wenigen Patienten, denen die Detektion der syntaktischen Anomalien überdurchschnittlich gut gelang, evozierten die Phrasenstrukturverletzungen eine auch bei Normalhörenden beobachtbare P600-Komponente. Damit wurde bei den meisten CI-Trägern anstelle des Korrelats syntaktischer Korrekturprozesse eine Komponente nachgewiesen, welche in der Regel mit semantischen Verarbeitungsprozessen in Verbindung gebracht wird (vgl. z. B. Kutas & Federmeier, 2000, siehe auch Abschnitt 3.3.1). Dies weist darauf hin, dass das Verstehen der phrasenstrukturell inkorrekten Sätze bei den CI-Patienten auf einer vorrangigen Verarbeitung von semantischer vor syntaktischer Information basierte.

Die bei Hörgesunden auftretende P600 als hirnelektrisches Korrelat syntaktischer Verarbeitungsprozesse ließ sich bei den CI-Trägern auch dann nicht beobachten, wenn Phrasenstrukturverletzungen innerhalb von Pseudowort-Sätzen dargeboten wurden (Experiment III), obwohl eine bevorzugte semantische Verarbeitung, wie sie sich in Experiment I angedeutet hatte, für diese Sätze nicht möglich war. Statt der erwarteten P600-

Komponente wurde in diesem Experiment bei den Patienten eine anhaltende Negativierung festgestellt, welche möglicherweise auf Prozesse der Verarbeitung von prosodischen Merkmalen zurückgeführt werden kann (s. u.). Ein anhaltender Negativierungseffekt war auch in der Kontrollgruppe neben einer frühen anterioren Negativierung und einer P600 festzustellen.

Während in diesen beiden akustischen Experimenten Unterschiede zwischen Patienten und Normalhörenden zu verzeichnen waren, evozierte die visuell präsentierte Phrasenstrukturanomalie in Experiment II bei den CI-Trägern ebenso wie bei den Normalhörenden eine P600-Komponente. Damit konnte gezeigt werden, dass sich Abweichungen hinsichtlich der Verarbeitung von phrasenstruktureller Information bei den getesteten CI-Trägern auf die akustische Modalität beschränkten.

Für die inkorrekten *Verbargumentstrukturen* in Form von Stelligkeitsverletzungen in Experiment IV ließen die ereigniskorrelierten Potentiale für die CI-Träger nicht, wie aufgrund der besseren auditiven Perzipierbarkeit dieses syntaktischen Informationstyps vermutet wurde, auf vergleichbare Verarbeitungsprozesse wie bei Hörgesunden schließen. Während in der Kontrollgruppe das für diese Verletzung bereits früher berichtete biphasische Muster aus N400 und nachfolgender P600 (z. B. Friederici & Frisch, 2000, vgl. auch Abschnitt 3.3.2.2) repliziert wurde, war in der CI-Gruppe lediglich eine N400 festzustellen. Eine mit syntaktischen Verarbeitungsprozessen einhergehende P600 konnte bei den Patienten hingegen nicht nachgewiesen werden. Damit wurden abweichende Verarbeitungsprozesse bei den getesteten CI-Trägern auch für solche syntaktisch inadäquaten Satzelemente beobachtet, deren Perzeption den Patienten vergleichsweise wenig Probleme bereitete.

Die Prozesse der *morphosyntaktischen* Verarbeitung von inkorrekten regulären Pluralmarkierungen an femininen Nomen (Experiment V) gingen bei den getesteten CI-Trägern im ereigniskorrelierten Potential überraschenderweise mit ähnlichen Effekten wie bei Hörgesunden einher. Bei den Patienten ließ sich ebenso wie bei den Kontrollprobanden die auch in früheren Studien für diese Art von syntaktischer Anomalie berichtete P600-Komponente nachweisen (z. B. Lück et al., 2001b, vgl. auch Abschnitt 3.3.2.3). Das in den akustischen Experimenten I, III und IV bei den CI-Trägern nicht nachweisbare hirnelektrische Korrelat syntaktischer Korrekturprozesse wurde bei den Patienten damit ausgerechnet durch die auditiv nur schwer detektierbaren morphosyntaktischen Verletzungen evoziert.

Zusammenfassend ließ sich wie vorhergesagt nachweisen, dass die Reduzierung des akustischen Inputs bei den CI-Trägern zu Veränderungen in den Prozessen der syntak-

tischen Informationsverarbeitung führt. Damit scheint das menschliche Sprachverarbeitungssystem hinsichtlich der Prozesse der syntaktischen Integration störungsanfälliger zu sein als hinsichtlich semantischer Verarbeitungsprozesse. Die Annahme, dass Abweichungen in der syntaktischen Verarbeitung in Abhängigkeit von der akustischen Prominenz bzw. der auditiven Perzipierbarkeit des entsprechenden syntaktischen Informationstyps auftreten, konnte allerdings nicht bestätigt werden. Ebenso wenig, wie die leichtere Detektierbarkeit der Argumentstrukturverletzungen mit Ähnlichkeiten in den ereigniskorrelierten Potentialen zwischen Patienten und Kontrollprobanden einherging, schlug sich die ausgesprochen problematische Perzipierbarkeit der morphosyntaktischen Anomalien in Abweichungen im EKP bei den Patienten nieder.

Es muss angemerkt werden, dass in der vorliegenden Arbeit der Ansatz verfolgt wurde, sich bei der Einschätzung der auditiven Perzipierbarkeit der verschiedenen syntaktischen Informationstypen daran zu orientieren, wie gut es den CI-Trägern gelang, die entsprechende Information wahrzunehmen bzw. entsprechende Anomalien zu detektieren. Somit wurden die untersuchten syntaktischen Informationstypen allein anhand der behavioralen Fehlerraten der CI-Träger beurteilt. Um die Ursachen der im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehenden Frage nach der Abhängigkeit der auditiven Verarbeitungsprozesse von der Perzipierbarkeit der sprachlichen Informationen genauer zu determinieren, wäre es in einem nächsten Schritt allerdings erforderlich, eine systematischere Variation der akustischen Salienz von verschiedenen sprachlichen Informationstypen vorzunehmen und dabei objektive physikalisch-akustische Kriterien, wie beispielsweise temporale oder spektrale Charakteristika, zur Beurteilung der Perzipierbarkeit der jeweiligen sprachlichen Information heranzuziehen.

Der zunächst unerwartete Befund, dass sich für die Prozesse der morphosyntaktischen Verarbeitung bei den CI-Trägern keine Abweichungen gegenüber Normalhörenden beobachten ließen, während dies sowohl für die Verarbeitung phrasenstruktureller Information als auch für die Verarbeitung von Information über die Argumentstruktur des Verbs der Fall war, soll im Folgenden im Hinblick auf die Verschiedenartigkeit der syntaktischen Informationstypen diskutiert werden.

Syntaktische Verarbeitung vs. semantische Kompensation. Für die Verarbeitung von inkorrekten Phrasenstrukturen war bei den Patienten statt des Korrelats syntaktischer Verarbeitungsprozesse eine N400-ähnliche Negativierung beobachtet worden. Diese wurde als Indiz für die vorrangige Verarbeitung von semantischer vor syntaktischer Information interpretiert, d. h. für das Bestreben der CI-Träger, eine adäquate Satzinterpretation durch

das Erkennen und Kombinieren der individuellen Wortbedeutungen herzuleiten. Eine solche als kompensatorisch zu betrachtende semantische Verarbeitungsstrategie erscheint plausibel für die in diesem Experiment präsentierten Sätze, welche eine unbetonte, von vielen CI-Trägern nur ungenau erkannte Präposition enthielten. Die Integration des fraglichen Elements auf lexikalisch-semantischer Ebene – die N400 wäre dann beispielsweise eine Reflektion der Suche im mentalen Lexikon nach dem Eintrag für ein möglicherweise gehörtes Partikelverb – konnte hier durchaus erfolgreich sein. Auch im Alltag wenden CI-Träger nach eigener Aussage häufig eine Strategie an, bei der die Identifikation von nur ungenau wahrgenommenen Wörtern anhand kontextueller Restriktionen erfolgt.

Bei den CI-Trägern konnte auch für die Verarbeitung der inkorrekten Verbargumentstrukturen kein Korrelat syntaktischer Korrekturprozesse festgestellt werden. Das inkongruente Satzelement wurde hier ebenfalls nur auf semantischer Ebene integriert, wie die isoliert auftretende N400 anzeigte. Es ist anzumerken, dass für Stelligkeitsverletzungen auch bei Normalhörenden – der P600-Komponente vorausgehend – eine N400 zu beobachten ist, wobei dieser Effekt gewöhnlich als Ausdruck der semantisch-thematischen Integrationsschwierigkeiten interpretiert wird, die diese Art von syntaktischer Anomalie nach sich zieht (Friederici & Frisch, 2000). Obwohl aufgrund dieser Tatsache für die bei den CI-Trägern beobachtete N400 auf den Begriff der semantischen *Kompensation* verzichtet werden soll, bleibt festzuhalten, dass das Satzverstehen der Patienten offensichtlich auch in diesem Experiment auf einer rein semantischen Informationsverarbeitung beruhte, wohingegen syntaktische Korrekturprozesse in Bezug auf die vom Verb nicht lizenzierte syntaktische Struktur anscheinend nicht stattfanden.

Dass eine semantische Verstehensstrategie von den CI-Trägern bei der Verarbeitung sowohl der phrasenstrukturell inkorrekten Sätze als auch der leichter perzipierbaren Argumentstrukturverletzungen angewandt wurde, kann möglicherweise damit begründet werden, dass die Fehlerdetektion in beiden Fällen auf dem Erkennen der Relationen der verschiedenen Satzelemente zueinander beruhte, wofür das Verstehen der einzelnen Wortbedeutungen genügte. Eine solche vorrangig semantische Verarbeitung, welche den CI-Trägern also potentiell sowohl die Detektion der Phrasenstrukturverletzungen als auch der Argumentstrukturanomalien erlaubte, hätte für die Fehlererkennung der inkorrekten Pluralformen jedoch nicht gegriffen. Hier handelte es sich um ein in sich selbst inkorrektes Element, welches eine Anomalie auf Morphemebene enthielt. Das Erkennen dieser Verletzung erforderte damit zwingend eine Verarbeitung auf morphosyntaktischer Ebene. Dies könnte erklären, dass für die Verarbeitung der korrekt erkannten fehlerhaften Sätze

– und nur diese gingen in die Auswertung ein – auch bei den CI-Trägern eine P600-Komponente als Korrelat syntaktischer Verarbeitungsprozesse zu beobachten war.

Es ist allerdings zu vermuten, dass bei der Auslösung der syntaktischen Verarbeitungsprozesse auch die experimentellen Bedingungen, unter denen diese Prozesse zu beobachten waren, eine entscheidende Rolle spielten. Durch die Laborsituation – also die Instruktion, die Sätze möglichst genau zu verstehen und anschließend ihre Korrektheit zu beurteilen, wobei die Art der verwendeten Anomalien vor dem Experiment anhand von Beispielsätzen verdeutlicht wurde – war die volle Aufmerksamkeit der CI-Träger auf den syntaktischen Fehler gelenkt. Die Laborbedingungen können zudem insofern als ideal für die korrekte auditive Perzeption der Anomalie gelten, als die Sätze von einer trainierten Sprecherin mit gut verständlicher Sprechweise eingesprochen worden waren und die Durchführung des Experiments in einer schallisolierten Kabine die Unterdrückung von Störgeräuschen ermöglichte. Wie die EKP-Daten zeigen, können bei CI-Trägern unter solchen Voraussetzungen analoge morphosyntaktische Verarbeitungsprozesse wie bei Normalhörenden festgestellt werden. In alltäglichen Situationen, in denen weder optimale Bedingungen für die korrekte Wahrnehmung von vergleichbaren morphosyntaktischen Verletzungen gegeben sind, noch die Aufmerksamkeit auf solche Fehler gelenkt ist, wäre aber möglicherweise eher zu erwarten, dass diese Anomalien überhaupt nicht erkannt werden und deshalb in ähnlicher Weise wie korrekte morphosyntaktische Strukturen verarbeitet werden.

Insgesamt deutet sich in den Befunden zur auditiven Verarbeitung von syntaktischer Information bei postlingual ertaubten CI-Trägern also eine Verarbeitungsstrategie an, welche zunächst versucht, allein auf der Basis semantischer Informationen eine kohärente Satzrepräsentation herzuleiten. Syntaktische Reanalyse- oder Korrekturprozesse, wie sie sich in der P600-Komponente widerspiegeln, kommen dagegen nur zum Tragen, wenn eine alleinige semantische Analyse den Aufbau einer adäquaten Satzrepräsentation nicht gewährleisten kann. Auf der Basis dieser Überlegungen wäre vorherzusagen, dass sich bei CI-Trägern vergleichbare Verarbeitungsprozesse wie bei Normalhörenden auch für andere Arten von morphosyntaktischen Anomalien, wie z. B. Subjekt-Verb-Inkongruenzen, nachweisen lassen. Einschränkend soll allerdings hinzugefügt werden, dass entsprechende Prozesse der syntaktischen Verarbeitung vermutlich zusätzlich von situativen Anforderungen abhängig sind, wobei die im Experiment verwendete Aufgabenstellung der Detektion von Anomalien auf morphosyntaktischer Ebene als eine solche situative Anforderung gelten kann. Es ist fraglich, ob vergleichbare syntaktische Korrekturprozesse, wie

sie im experimentellen Rahmen bei den CI-Trägern nachgewiesen werden konnten, auch in solchen Situationen auftreten, in denen das präzise Wahrnehmen von beispielsweise morphosyntaktischen Elementen nicht zwingend erforderlich ist, um kommunikativ erfolgreich zu sein.

Bei hörgesunden Probanden konnte gezeigt werden, dass die semantische Integration von syntaktisch inkongruenten Satzelementen normalerweise durch die vorangehenden Prozesse der syntaktischen Fehlerdetektion blockiert wird, wobei diese Fehlerdetektion häufig mit (links-) anterioren Negativierungen im EKP einhergeht (Friederici et al., 1999a; Hahne & Friederici, 2002, vgl. auch Abschnitt 3.3.2). Für die getesteten CI-Träger war eine Aussage über solche frühen syntaktischen Verarbeitungsprozesse aufgrund der artefaktbedingten Beschränkungen in der EKP-Auswertung (vgl. Abschnitt 5.2.3) nicht möglich. Möglicherweise liegen bei den Patienten jedoch auch hinsichtlich dieser Prozesse Veränderungen gegenüber Normalhörenden vor, da eine frühe syntaktische Fehlerdetektion andernfalls vermutlich die Prozesse der semantischen Integration unterbunden hätte. Diese Annahme muss jedoch spekulativ bleiben, solange keine technische Möglichkeit gefunden ist, welche die durch das CI-System verursachten Artefakte unterdrückt bzw. korrigiert und damit auch eine Auswertung von lateralen Effekten ermöglicht[1].

Ähnliche Befunde wie für die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente berichteten Hagoort, Wassenaar und Brown (2003a) für die Verarbeitung von syntaktischen Anomalien bei agrammatischen Patienten. Das Störungsbild des Agrammatismus beinhaltet, dass grammatische Informationen wie z. B. morphosyntaktische Markierungen oder Wortstellungsrestriktionen nur begrenzt zum Sprachverstehen genutzt werden können (Linebarger, Schwartz & Saffran, 1983), was allerdings nicht wie bei den CI-Trägern auf ein eingeschränktes Hörvermögen zurückgeht, sondern durch neurologische Störungen verursacht ist. Interessanterweise scheinen jedoch auch agrammatische Patienten auf semantische Kompensationsstrategien zurückzugreifen, um syntaktische Defizite auszugleichen. Die Autoren verwendeten den Begriff der *multiple-route plasticity* für das Phänomen, dass zur Herleitung einer adäquaten Satzinterpretation stärker auf eine alternative Verarbeitungsroute zurückgegriffen wird. Die Ergebnisse von Hagoort et al. (2003a) zeigen ebenso wie die Befunde der vorliegenden Arbeit, dass eine kompensatorische semantische Verarbeitungsroute zwar für Phrasenstrukturinformation, nicht jedoch für morphosyntaktische Information verfügbar ist. Während Anomalien in der Wortabfolge, welche

[1] Erste Erfolge beim Versuch der Entwicklung von Prozeduren, welche die Korrektur der vom CI-System verursachten Artefakte ermöglichen, werden aktuell von Attias und Urbach (2003) berichtet.

normalerweise mit einer P600 einhergehen, bei den Agrammatikern ähnlich wie bei den CI-Trägern eine N400-ähnliche Negativierung evozierten, war für morphosyntaktische Numerusinkongruenzen keinerlei Verarbeitungseffekt festzustellen. Letzter Befund zeigt damit jedoch auch einen großen Unterschied zwischen agrammatischen Patienten und CI-Trägern auf. Dieser besteht darin, dass die Agrammatiker morphosyntaktische Informationen aufgrund ihrer neurologischen Beeinträchtigung überhaupt nicht verarbeiten können, wohingegen bei den CI-Trägern eine morphosyntaktische Verarbeitung zum Einsatz kommen kann, wenn die Aufmerksamkeit dieser Patienten auf die entsprechende Information gelenkt wird.

Herkunft des anhaltenden Negativierungseffekts. Während die Befunde der Experimente I, IV und V mit den bisherigen Ausführungen hinsichtlich des Einsatzes semantischer Kompensationsstrategien vs. syntaktischer Korrekturprozesse in Einklang zu bringen sind, lassen sich die unerwarteten Ergebnisse von Experiment III nicht damit erklären. Dieses Experiment untersuchte die auditive Verarbeitung von Phrasenstrukturverletzungen, die in Pseudowort-Sätze eingebettet waren. Eine Interpretation auf semantischer Ebene war hier nicht möglich. Zwar konnte dementsprechend bei den CI-Trägern auch keine N400-Komponente beobachtet werden, jedoch ließ sich ebenfalls kein Korrelat syntaktischer Korrekturprozesse nachweisen. Stattdessen wurde ein anhaltender Negativierungseffekt festgestellt, welcher auch bei den Normalhörenden zusätzlich zu einer P600-Komponente auftrat. Ein vergleichbarer anhaltender Negativierungseffekt war bereits in Experiment I im Zusammenhang mit der Verarbeitung der Phrasenstrukturverletzung in der Kontrollgruppe aufgetreten. Auch in den Daten früherer Studien konnten bei visueller Inspektion der jeweiligen dargestellten Potentialverläufe ähnliche Negativierungen beobachtet werden (Friederici et al., 1999b, 2003; Hahne & Friederici, 1999).

Die anhaltende Negativierung geht möglicherweise auf Prozesse der strategischen Verarbeitung von prosodischen Merkmalen zurück. Dafür würde die Tatsache sprechen, dass vergleichbare Negativierungseffekte bislang immer in akustischen Experimentalparadigmen auftraten. In einer Studie von Alter et al. (2001) konnte zudem eine rechtsanteriore anhaltende Negativierung für die Verarbeitung von prosodisch manipulierten Sätzen gefunden werden, was die Interpretation dieses Effekts im Sinne eines Korrelats von prosodischen Verarbeitungsprozessen stützt. Eine solche Interpretation erscheint auch plausibel im Hinblick darauf, dass die meisten der getesteten CI-Träger im Anschluss an das Experiment angaben, dass sie sich beim Verstehen der Sätze stark an rhythmischen Merkmalen orientierten.

Insgesamt lassen die Daten zur Verarbeitung von phrasenstrukturellen Anomalien in Pseudowort-Sätzen allerdings zum jetzigen Zeitpunkt nur Spekulationen zu. Eine hinreichende Erklärung für den anhaltenden Negativierungseffekt bedarf weiterer experimenteller Evidenz, wobei zunächst geprüft werden müsste, ob es sich hier tatsächlich um ein Korrelat der Verarbeitung von prosodischen Merkmalen handelt. Eine dahingehende – bisher nur spekulative – Interpretation des Negativierungseffekts wäre des Weiteren im Hinblick darauf zu spezifizieren, welche prosodischen Verarbeitungsprozesse im einzelnen diesem Effekt zugrunde liegen. Dies könnte beispielsweise auch Aufschluss darüber geben, warum ähnliche langanhaltende Negativierungen bei Normalhörenden bereits in verschiedenen Studien mit einer bislang nicht klar erkennbaren Systematik aufgetreten sind.

Parallelen im Sprachverstehen von CI-Trägern und Zweitsprachlernern. Vergleichbare Phänomene, wie sie sich in den Befunden zur auditiven Satzverarbeitung bei den CI-Trägern andeuteten, konnten interessanterweise bereits im Zusammenhang mit der Verarbeitung einer Zweitsprache (L2) festgestellt werden. So wurde auch für die Sprachverarbeitungsprozesse von L2-Lernern gezeigt, dass die Aspekte der semantischen und der syntaktischen Verarbeitung sich in ihrer Abhängigkeit vom Sprachinput erheblich voneinander unterscheiden, wobei speziell die Verarbeitung syntaktischer Informationen störungsanfälliger zu sein scheint (z. B. Hahne, 2001; Hahne & Friederici, 2001; Osterhout & McLaughlin, 2000; Weber-Fox & Neville, 1996). Im Hinblick auf die Nicht-Muttersprachler bedeutet dies, dass ein späterer Beginn des Lernens einer Fremdsprache sich hinsichtlich der Verarbeitung semantisch-lexikalischer Informationen kaum bemerkbar macht, wohingegen syntaktische Verarbeitungsprozesse wesentlich stärker betroffen sind. Diesen Zusammenhang konnten Weber-Fox und Neville (1996) in einer Studie mit chinesischen Muttersprachlern, welche in verschiedenen Altersstufen begannen, Englisch als Zweitsprache zu lernen, sowohl durch behaviorale Befunde als auch anhand von EKP-Daten demonstrieren.

Neben diesen eher allgemeinen Parallelen im Sprachverstehen bei CI-Trägern und Zweitsprachlernern lassen sich auch speziellere Gemeinsamkeiten feststellen. So berichteten Osterhout und McLaughlin (2000, zitiert nach Ullman, 2001) dass die Verarbeitung von syntaktischen Anomalien bei Französisch lernenden englischen Muttersprachlern nach einer kurzen Phase des Lernens der Zweitsprache entweder mit einer N400 einherging oder gar keinen Effekt hervorrief. Damit fanden die Autoren bei diesen L2-Lernern ähnlich wie bei den in dieser Arbeit getesteten CI-Trägern Evidenz für eine se-

mantisch dominierte Verarbeitungsstrategie. Eine ebenso wie bei Muttersprachlern beobachtbare P600 als Korrelat syntaktischer Verarbeitungsprozesse war bei den L2-Lernern erst nach einer längeren Lernphase nachzuweisen.

Auch Hahne und Friederici (2001), die Deutsch lernende japanische Muttersprachler testeten, konnten für die Verarbeitung von phrasenstrukturell inkorrekten Sätzen keines der bei Muttersprachlern beobachtbaren Korrelate der syntaktischen Verarbeitung feststellen. Für die syntaktischen Anomalien war dagegen die Tendenz zu einer Negativierung zu beobachten, in welcher sich möglicherweise semantische Verarbeitungsprozesse andeuteten. Da dieser Effekt allerdings keine statistische Signifikanz erreichte, wurde von den Autoren nicht näher auf ihn eingegangen. Deutlich nachgewiesen werden konnte von Hahne und Friederici (2001) hingegen, dass die L2-Sprecher bereits für korrekte Sätze eine ausgeprägtere Positivierung als Muttersprachler zeigten, was die Autoren als Ausdruck eines generell erhöhten Verarbeitungsaufwandes bei der syntaktischen Integration interpretierten (zur Interpretation der P600 als Indikator syntaktischer Integrationsprobleme vgl. Kaan et al., 2000). Ein ähnlicher Effekt hatte sich auch bei den CI-Trägern im Experiment IV der vorliegenden Arbeit beim Vergleich von korrekten und syntaktisch inkorrekten Sätzen angedeutet[2]. Die Interpretation dieser Beobachtung im Sinne eines generell erhöhten syntaktischen Integrationsaufwandes erscheint für die CI-Träger ebenso plausibel wie für die Zweitsprachlerner.

Während in der Studie von Hahne und Friederici (2001) Unterschiede zwischen L2-Lernern und Muttersprachlern im Hinblick auf die späteren Prozesse der syntaktischen Reanalyse bzw. Korrektur nachgewiesen werden konnten, ließen sich in einer ähnlichen Studie mit Deutsch lernenden russischen Muttersprachlern keine vergleichbaren Abweichungen feststellen. Wie Hahne (2001) berichtete, unterschieden sich diese L2-Sprecher, welche über eine längere Erfahrung und damit bessere Kenntnisse in der Fremdsprache verfügten, lediglich hinsichtlich der frühen syntaktischen Strukturierungsprozesse von Muttersprachlern.

Die Studien von Hahne (2001) und Hahne und Friederici (2001) zeigen, dass Abweichungen im Sprachverarbeitungsprozess gegenüber Muttersprachlern bei L2-Lernern in der Regel mit zunehmender L2-Spracherfahrung abnehmen (z. B. auch Weber-Fox & Neville, 1996), wobei eine längere Spracherfahrung in der Regel aber auch mit einer höheren Sprachkompetenz einhergeht. Für die getesteten postlingual ertaubten CI-Träger ließen sich ähnliche Korrelationen nur bedingt nachweisen. So fanden sich in Experiment I bei

[2] Es ist anzumerken, dass es sich hierbei um einen deskriptiv festzustellenden Effekt handelte, dem statistisch nicht nachgegangen wurde.

den Patienten zwar klare interindividuelle Unterschiede in der Verarbeitung der Phrasenstrukturinformation, die in Abhängigkeit von den individuellen Verstehensleistungen im Experiment auftraten, jedoch trat dabei kein Zusammenhang mit den individuellen Patientendaten hinsichtlich der CI-Tragedauer zutage. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass solche Korrelationen durchaus vorhanden waren (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.3), sich aber aufgrund der Konfundierung mit anderen patientenindividuellen Faktoren nicht nachweisen ließen.

Für die in dieser Arbeit berichteten Befunde zur auditiven Sprachverarbeitung bei CI-Trägern ergeben sich Übereinstimmungen mit den Vorstellungen eines Modells zur Zweitsprachverarbeitung, welches von Ullman (2001) entwickelt wurde. Dieses *declarative/procedural model* genannte Modell basiert auf der Annahme, dass die Verarbeitung von lexikalen und grammatischen Informationen in der Muttersprache mit unterschiedlichen Gedächtnissystemen verknüpft ist. Während die lexikale Verarbeitung dabei an deklarative Gedächtnisprozesse gebunden ist, geht die syntaktische Verarbeitung auf prozedurale Gedächtnisprozesse zurück. Da die Leistungsfähigkeit des prozeduralen Gedächtnisses mit zunehmendem Alter abnimmt, muss bei der Verarbeitung syntaktischer Aspekte in einer später erlernten Zweitsprache verstärkt auf das deklarative System zurückgegriffen werden. Das *declarative/procedural model* postuliert auf der Basis dieser Vorstellungen und in Einklang mit den experimentellen Befunden u. a. der hier erwähnten Studien, dass grammatische und lexikale Prozesse bei L2-Lernern im Vergleich zu Muttersprachlern weniger trennbar sind bzw. sogar identisch sein können und dass Unterschiede zwischen Muttersprachlern und L2-Sprechern primär die syntaktische Verarbeitung betreffen. Im Hinblick auf diese Vorhersagen korrespondieren die Ergebnisse der in der vorliegenden Arbeit berichteten Experimente mit den Annahmen des Modells zur Zweitsprachverarbeitung von Ullman (2001). Als gesichert geltende Aussagen über die sich hier andeutenden Parallelen im Sprachverstehen bei CI-Trägern und Zweitsprachlernern können auf der Basis der bisherigen Befunde allerdings nicht getroffen werden, hierzu bedarf es weiterer experimenteller Evidenz.

Implikationen im Hinblick auf funktionelle Reorganisation. In den EKP-Daten der vorliegenden Arbeit zeigten sich nicht nur quantitative Unterschiede in der Latenz oder der Ausprägung einzelner Komponenten, sondern es konnten auch qualitative Abweichungen nachgewiesen werden (N400 bei den CI-Trägern vs. P600 bei den Kontrollprobanden in Experiment I). Nach Rugg und Coles (1995) gelten solche qualitativ abweichenden EKP-Muster als Hinweis auf eine funktionale Verschiedenheit der zugrun-

de liegenden Prozesse. Somit lassen die Befunde der Experimente auf eine funktionelle Reorganisation im Sprachverstehenssystem bei den postlingual ertaubten erwachsenen CI-Trägern schließen. Dass die funktionellen Abweichungen im Sprachverstehen bei den CI-Trägern neuronal bedingt sind, kann jedoch daraus nicht geschlussfolgert werden. Die von den postlingual ertaubten CI-Trägern entwickelten Verstehensstrategien scheinen vielmehr auf bestehende Verarbeitungsstrukturen innerhalb des sprachverarbeitenden Systems zurückzugreifen und diese kompensatorisch zu nutzen. Vergleichbare Beobachtungen konnten für CI-Patienten verschiedentlich bereits auch in Experimenten mit bildgebenden Verfahren gemacht werden (vgl. Giraud et al., 2001c, vgl. Abschnitt 2.4).

In der vorliegenden Arbeit konnte auch keine Evidenz dafür gefunden werden, dass bei den CI-Trägern als Reaktion auf den vom Cochlea-Implantat vermittelten reduzierten akustischen Input eine generelle, modalitätsübergreifende Reorganisation des kognitiven Sprachverstehenssystems stattgefunden hat. Dies zeigten die Daten des visuellen Experiments, in welchem sich keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und Normalhörenden ergeben hatten.

Die Frage, ob die Entwicklung der kompensatorischen semantischen Verstehensstrategien in der auditiven Verarbeitungsmodalität die Folge der bei fast allen getesteten CI-Trägern über längere Zeit bestehenden Schwerhörigkeit ist oder ob diese Strategien sich beim Hören mit Cochlea-Implantat im Laufe des Rehabilitationsprozesses herausbildeten (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.4), kann mit den berichteten Daten nicht eindeutig beantwortet werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich die beobachteten abweichenden Verarbeitungsstrategien erst nach abgeschlossenem Spracherwerb entwickelten, da ausschließlich postlingual ertaubte CI-Träger getestet wurden, deren Hörverlust sich nach der Pubertät, also im Erwachsenenalter manifestierte (vgl. Abschnitt 5.2.2). Demzufolge können die bei den erwachsenen CI-Trägern nachgewiesenen Abweichungen in den kognitiven Prozessen der Satzverarbeitung zumindest als Hinweis darauf gelten, dass das menschliche Sprachverarbeitungssystem auch nach abgeschlossener Entwicklung noch funktionelle Modifikationen durchlaufen kann, die durch veränderte Input-Bedingungen hervorgerufen werden.

Ausblick. Mit der vorliegenden Arbeit wurde erstmalig der Versuch unternommen, mit Hilfe der Messung ereigniskorrelierter Potentiale die Prozesse des Satzverstehens bei postlingual ertaubten erwachsenen Cochlea-Implantat-Trägern systematisch zu untersuchen. Es konnte dabei nachgewiesen werden, dass diese Patienten beim Verstehen des durch das CI-System vermittelten, eingeschränkten akustischen Inputs teilweise alternati-

ve Verstehensstrategien anwenden, welche auf der bevorzugten Verarbeitung von semantischer vor syntaktischer Information beruhen. Damit zeigte sich, dass die Methode der Messung ereigniskorrelierter Potentiale – trotz einer bis dato aufgrund von CI-Artefakten nur eingeschränkt möglichen Datenauswertung – geeignet ist, bei CI-Trägern nicht nur wie in früheren Untersuchungen die Prozesse der primären Hörwahrnehmung zu erfassen, sondern auch die auf höherer Ebene stattfindenden kognitiven Prozesse der Satzverarbeitung abzubilden.

Um ein detaillierteres Bild der Sprachverstehensmechanismen bei CI-Trägern zu entwickeln, werden die Ergebnisse der hier vorgestellten Arbeit in verschiedener Hinsicht zu spezifizieren sein. So werden weitere Untersuchungen beispielsweise Aufschluss darüber geben müssen, welcher Stellenwert der prosodischen Informationsverarbeitung beim Sprachverstehen unter reduzierten akustischen Inputbedingungen zukommt. Eine Spezifizierung der Mechanismen des auditiven Sprachverstehens bei postlingual ertaubten CI-Trägern erscheint des Weiteren notwendig hinsichtlich der Frage, ob die bei den Patienten beobachteten kompensatorischen semantischen Verstehensstrategien sich bereits in der meist der Implantation vorausgehenden längeren Zeit der Schwerhörigkeit herausbildeten oder ob sie tatsächlich auf die Umstellung auf den veränderten Höreindruck im Verlauf des CI-Rehabilitationsprozesses zurückgehen. Prinzipiell konnte bereits in verschiedenen Studien mit bildgebenden Verfahren gezeigt werden, dass bei CI-Trägern neuronale Reorganisation durch die Hör-Rehabilitation an sich hervorgerufen werden kann (vgl. Giraud et al., 2001c). Interessant wäre in diesem Zusammenhang zum Beispiel, ob sich Abweichungen im Prozess des Satzverstehens auch bei CI-Trägern nachweisen lassen, deren CI-Versorgung sehr schnell im Anschluss an eine plötzlich eingetretene Hörschädigung erfolgte[3]. Weiterhin wäre hier auch der Frage nachzugehen, ob sich vergleichbare Kompensationseffekte wie bei den CI-Trägern bei einer Reduzierung des akustischen Sprachsignals auch für Hörgesunde nachweisen lassen. Dafür bietet sich die Verwendung von CI-Simulationen an, welche eine stufenweise Reduktion des Sprachsignals zulassen, wobei die Manipulation vergleichbar ist mit dem durch ein CI vermittelten Höreindruck (vgl. z. B. Dorman, Loizou, Fitzke & Tu, 1995).

Als ein wichtiger Schwerpunkt, dem sich zukünftige Untersuchungen zuzuwenden haben, muss die Aufklärung der Prozesse gelten, welche dem Sprachverstehen von prälingual gehörlosen, mit einem Cochlea-Implantat versorgten Kindern zugrunde liegen. Diese Kinder sind – im Gegensatz zu postlingual ertaubten Patienten – darauf angewiesen,

[3] Allerdings dürfte sich die Rekrutierung von Patienten mit einer solchen Krankheitsgeschichte voraussichtlich sehr schwierig gestalten.

mentale sprachliche Repräsentationen auf der Basis eines reduzierten akustischen Sprachinputs aufzubauen. Es stellt sich dabei die Frage, ob analoge kompensatorische Verstehensstrategien wie bei erwachsenen postlingual ertaubten CI-Trägern auch bei prälingual tauben Kindern mit CI zur Anwendung kommen oder ob diese Strategien vielmehr nur dann eingesetzt werden, wenn Inkongruenzen mit den auf natürlichem sprachlichen Input aufgebauten mentalen Repräsentationen vorliegen, wie das bei den in dieser Arbeit getesteten Patienten der Fall war. Eine Untersuchung, in welcher Weise sich die reduzierten Inputbedingungen bei CI-Kindern auf die Prozesse des Sprachverstehens auswirken, kann möglicherweise wichtige Hinweise dafür geben, wie der bei diesen Kindern häufig nicht ungestört verlaufende Spracherwerb optimal gefördert werden kann.

Insgesamt sind die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zunächst hauptsächlich im Kontext der Grundlagenforschung des Sprachverstehens von Interesse. Sie tragen dazu bei, die Reaktionen des Sprachverarbeitungssystems auf reduzierte Inputbedingungen aufzuklären, lassen gleichzeitig aber auch Rückschlüsse auf die Funktionsweise des unbeeinträchtigten Systems zu. Eine praktische Relevanz der experimentellen Befunde der vorliegenden Arbeit besteht insofern, als die Entwicklung spezifischer sprach- bzw. hörtherapeutischer Maßnahmen zur Verbesserung der Sprachverstehensfähigkeiten von CI-Patienten nur auf der Basis eines genaueren theoretischen Verständnisses der Sprachverstehensmechanismen bei diesen Patienten geschehen kann. Damit scheint gerade im therapeutischen Bereich ein Ansatzpunkt zu liegen, um die derzeit vor allem unter theoretischen Gesichtspunkten interessanten Ergebnisse zum Sprachverstehen mit Cochlea-Implantat in eine praktische Anwendung zu überführen.

Literaturverzeichnis

Ainsworth-Darnell, K., Shulman, H. G., & Boland, J. E. (1998). Dissociating brain responses to syntactic and semantic anomalies: Evidence from event-related potentials. *Journal of Memory and Language*, *38*, 112-130.

Alter, K., Meyer, M., Hruska, C., Lattner, S., Herrmann, C. S., & Friederici, A. D. (2001). Brain responses to pitch perception: Is there a specific function of the right hemisphere? *7th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Brighton*.

Angrilli, A., Penolazzi, B., Vespignani, F., de Vincenzi, M., Job, R., Ciccarelli, L., Palomba, D., & Stegagno, L. (2002). Cortical brain responses to semantic incongruity and syntactic violation in Italian language: an event-related potential study. *Neuroscience Letters*, *322*, 5-8.

Attias, J., & Urbach, D. (2003). Analysis of the artifacts contamining the event-related potentials in cochlear implantees. *XVIII Biennial Symposium of the International Evoked Response Audiometry Study Group (IERASG), Puerto de la Cruz*.

Barrett, S. E., & Rugg, M. D. (1990). Event-related potentials and the semantic matching of pictures. *Brain and Cognition*, *14*, 201-212.

Battmer, R.-D. (1998). Technische Aspekte der verschiedenen Codierungsstrategien und Implantatsysteme. In T. Lenarz (Hrsg.), *Cochlea-Implantat: Ein praktischer Leitfaden für die Versorgung von Kindern und Erwachsenen* (S. 70-82). Berlin, Heidelberg: Springer.

Battmer, R.-D., Gupta, S. P., Allum-Mecklenburg, D. J., & Lenarz, T. (1995). Factors influencing cochlear implant perceptual performance in 132 adults. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology*, *104 (Suppl. 166)*, 185-187.

Bavelier, D., & Neville, H. J. (2002). Cross-modal plasticity: Where and how? *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 443-452.

Bentin, S., Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1995). Semantic processing and memory for attended and unattended words in dichotic listening: Behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 54-67.

Bentin, S., McCarthy, G., & Wood, C. C. (1985). Event-related potentials, lexical decision and semantic priming. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *60*, 343-355.

Beringer, J. (1993). *Experimental Run Time System (ERTS).* TH Darmstadt.

Besson, M., Fischler, I., Boaz, T., & Raney, G. (1992a). Effects of automatic associative activation on explicit and implicit memory test. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*, 89-105.

Besson, M., & Kutas, M. (1993). The many facets of repetition: A cued-recall and event-related potential analysis of repeating words in same versus different sentence contexts. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*, 1115-1133.

Besson, M., Kutas, M., & Van Petten, C. (1992b). An event-related potential ERP analysis of semantic congruity and repetition effects in sentences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *4*, 132-149.

Besson, M., & Macar, F. (1987). An event-related potential analysis of incongruity in music and other non-linguistic contexts. *Psychophysiology*, *24*, 14-25.

Biesalski, P. (1994). Pädaudiologie. In P. Biesalski & F. Frank (Hrsg.), *Phoniatrie - Pädaudiologie, Band 2: Pädaudiologie* (2. Aufl., S. 48-137). Stuttgart, New York: Thieme.

Birbaumer, N., & Schmidt, R. F. (1991). *Biologische Psychologie* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Blamey, P., Arndt, P., Bergeron, F., Bredberg, G., Brimacombe, J., Facer, G., Larky, J., Lindström, B., Nedzelski, J., Peterson, A., Shipp, D., Staller, S., & Whitford, L. (1996). Factors affecting auditory performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants. *Audiology & Neuro-Otology*, *1*, 293-306.

Bloom, P. A., & Fischler, I. (1980). Completion norms for 329 sentence contexts. *Memory and Cognition*, *8*, 631-642.

Böhme, G., & Welzl-Müller, K. (1993). *Audiometrie: Hörprüfungen im Erwachsenen- und Kindesalter* (3. Aufl.). Bern: Huber.

Boothroyd, A. (1993). Profound deafness. In R. S. Tyler (Hrsg.), *Cochlear implants: audiological foundations* (S. 1-34). San Diego: Singular Publishing Group.

Bösel, R. (1996). *Die EEG-Grundaktivität: Ein Laborhelfer.* Regensburg: Roderer.

Brodmann, K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues.* Leipzig: Barth.

Brown, C., & Hagoort, P. (1993). The processing nature of the N400: Evidence from masked priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *5*, 34-44.

Butts, S. L., Hodges, A. V., Ash, S. D., Schloffman, J. J., & Balkany, T. J. (2000). Cochlear implantation: results in patients over 65. In S. B. Waltzman & N. L. Cohen (Hrsg.), *Cochlear implants* (S. 334-335). New York, Stuttgart: Thieme.

Chomsky, N. (1965). *Aspects of the theory of syntax.* Cambridge: MIT Press.

Chomsky, N. (1981). *Lectures on government and binding: The Pisa lectures.* Doordrecht: Foris Publishers.

Chwilla, D. J., Brown, C. M., & Hagoort, P. (1995). The N400 as a function of the level of processing. *Psychophysiology*, *32*, 274-285.

Clahsen, H. (1999). Lexical entries and rules of language: A multidisciplinary study of German inflection. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 991-1060.

Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: An introduction. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Hrsg.), *Electrophysiology of mind: Event-related brain potentials and cognition* (S. 1-26). New York: Oxford University Press.

Connolly, J. F., & Phillips, N. A. (1994). Event-related potential components reflect phonological and semantic processing of the terminal word of spoken sentences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *6*, 256-266.

Connolly, J. F., Phillips, N. A., & Forbes, K. A. K. (1995). The effects of phonological and semantic features of sentence-ending words on visual event-related brain potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *94*, 276-287.

Coulson, S., King, J. W., & Kutas, M. (1998). Expect the unexpected: Event-related brain response to morphosyntactic violations. *Language and Cognitive Processes*, *13*, 21-58.

Davidson, R. J., Jackson, D. C., & Larson, C. L. (2000). Human electroencephalography. In J. D. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Berntson (Hrsg.), *Handbook of psychophysiology* (S. 27-52). Cambridge: University Press.

Deggouj, N., de Tourtchaninoff, M., Gersdorff, M., & Guerit, M. (1994). Intérêt du „brain mapping" des potentiels auditifs tardifs chez des sujets porteurs d'un implant cochléaire. *Acta Oto-Rhino-Laryngologica belg.*, *48*, 245-250.

Deggouj, N., & Gersdorff, M. (1998). Imaging and cochlear implant. *Acta Oto-Rhino-Laryngologica belg.*, *52*, 133-143.

Dehaene-Lambertz, G. (1997). Electrophysiological correlates of categorical phoneme perception in adults. *NeuroReport*, *8*, 919-924.

Deutsch, A., & Bentin, S. (2001). Syntactic and semantic factors in processing gender agreement in Hebrew: Evidence from ERPs and eye movements. *Journal of Memory and Language*, *45*, 200-224.

Diller, G. (1997). *Hören mit einem Cochlear-Implant. Eine Einführung* (2. Aufl.). Heidelberg: Universitätsverlag C. Winter.

Dillier, N. (1998). Codierungsstrategien - Grundlagen und Evaluation. In T. Lenarz (Hrsg.), *Cochlea-Implantat: Ein praktischer Leitfaden für die Versorgung von Kindern und Erwachsenen* (S. 52-69). Berlin, Heidelberg: Springer.

Donchin, E., Ritter, W., & McCallum, W. C. (1978). Cognitive psychophysiology: The endogeneous components of the ERP. In E. Callaway, P.Tueting, & S. H. Koslow (Hrsg.), *Event-related brain potentials in man* (S. 349-411). New York: Academic Press.

Dorman, M. F. (2000). Speech perception by adults. In S. B. Waltzman & N. L. Cohen (Hrsg.), *Cochlear implants* (S. 317-329). New York, Stuttgart: Thieme.

Dorman, M. F., & Loizou, P. C. (1997). Speech intelligibility as a function of the number of channels of stimulation for normal hearing listeners and patients with cochlear implants. *American Journal of Otology*, *18 (Suppl.)*, S113-S114.

Dorman, M. F., Loizou, P. C., Fitzke, J., & Tu, Z. (1995). The recognition of sentences in noise by normal-hearing listeners using simulations of cochlear-implant signal processors with 6-20 channels. *Journal of the Acoustical Society of America*, *104*, 3583-3585.

Dorman, M. F., Loizou, P. C., & Rainey, D. (1997). Simulating the effect of cochlear-implant electrode insertion depth on speech understanding. *Journal of the Acoustical Society of America*, *102*, 2993-2996.

Eggermont, J. J., & Ponton, C. W. (2002). The neurophysiology of auditory perception: From single units to evoked potentials. *Audiology & Neuro-Otology*, *7*, 71-99.

Eggermont, J. J., Ponton, C. W., Don, M., Waring, M. D., & Kwong, B. (1997). Maturational delays in cortical evoked potentials in cochlear implant users. *Acta Otolaryngologica (Stockholm)*, *117*, 161-163.

Fabiani, M., Gratton, G., & Coles, M. G. H. (2000). Event-related brain potentials: Methods, theory and applications. In J. D. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Berntson (Hrsg.), *Handbook of psychophysiology* (2. Aufl., S. 53-84). Cambridge: University Press.

Faulkner, A., Rosen, S., & Wilkinson, L. (2001). Effects of the number of channels and speech-to-noise ratio on rate of connected discourse tracking through a simulated cochlear implant speech processor. *Ear & Hearing*, *22*, 431-438.

Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., & Friederici, A. D. (2002). Separating syntactic memory costs and syntactic integration costs during parsing: The processing of german wh-questions. *Journal of Memory and Language*, *47*, 250-272.

Fischler, I., Bloom, P. A., Childers, D. G., Roucos, S. E., & Perry, N. W. (1983). Brain potentials related to stages of sentence verification. *Psychophysiology*, *20*, 400-409.

Frauenfelder, U. H., & Tyler, L. K. (1987). The process of spoken word recognition: An introduction. *Cognition*, *25*, 1-20.

Friederici, A. D. (1995). The time course of syntactic activation during language processing: A model based on neuropsychological and neurophysiological data. *Brain and Language*, *50*, 259-281.

Friederici, A. D. (1999). The neurobiology of language comprehension. In A. D. Friederici (Hrsg.), *Language comprehension: A biological perspective* (2. Aufl., S. 265-304). Berlin: Springer.

Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Sciences*, *6*, 78-84.

Friederici, A. D. (im Druck). The neural basis of sentence processing: A neurocognitive model. *Cognition (Special Issue)*.

Friederici, A. D., & Frisch, S. (2000). Verb argument structure processing: The role of verb-specific and argument-specific information. *Journal of Memory and Language*, *43*, 476-507.

Friederici, A. D., Hahne, A., & Mecklinger, A. (1996). Temporal structure of syntactic parsing: Early and late event-related brain potential effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *5*, 1219-1248.

Friederici, A. D., Hahne, A., & Saddy, D. (2002). Distinct neurophysiological patterns reflecting aspects of syntactic complexity and syntactic repair. *Journal of Psycholinguistic Research*, *31*, 45-63.

Friederici, A. D., Hahne, A., & von Cramon, D. Y. (1998a). 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.

Friederici, A. D., Kotz, S. A., Werheid, K., Hein, G., & von Cramon, D. Y. (2003). Syntactic comprehension in Parkinson's Disease: Investigating early automatic and late integrational processes using event-related brain potentials. *Neuropsychology*, *17*, 133-142.

Friederici, A. D., Mecklinger, A., Spencer, K. M., Steinhauer, K., & Donchin, E. (2001). Syntactic parsing preferences and their on-line revisions: a spatio-temporal analysis of event-related brain potentials. *Cognitive Brain Research*, *11*, 305-323.

Friederici, A. D., Pfeifer, E., & Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Cognitive Brain Research*, *1*, 183-192.

Friederici, A. D., Steinhauer, K., & Frisch, S. (1999a). Lexical integration: Sequential effects of syntactic and semantic information. *Memory and Cognition*, *27*, 438-453.

Friederici, A. D., Steinhauer, K., Mecklinger, A., & Meyer, M. (1998b). Working memory constraints on syntactic ambiguity resolution as revealed by electrical brain responses. *Biological psychology*, *47*, 193-221.

Friederici, A. D., & von Cramon, D. Y. (1999). Neurobiologische Grundlagen des Sprachverstehens. In A. D. Friederici (Hrsg.), *Sprachrezeption* (Bd. C/III/2, S. 307-349). Göttingen: Hogrefe.

Friederici, A. D., von Cramon, D. Y., & Kotz, S. A. (1999b). Language related brain potentials in patients with cortical and subcortical left hemisphere lesions. *Brain*, *122*, 1033-1047.

Frisch, S. (2000). *Verb-Argument-Struktur, Kasus und thematische Interpretation beim Sprachverstehen.* MPI Series in Cognitive Neuroscience, 12.

Frisch, S., Kotz, S. A., von Cramon, D. Y., & Friederici, A. D. (2003). Why the P600 is not just a P300: the role of the basal ganglia. *Clinical Neurophysiology*, *114*, 336-340.

Frisch, S., & Schlesewsky, M. (2001). The N400 reflects problems of thematic hierarchizing. *NeuroReport*, *12*, 3391-3394.

Frisch, S., Schlesewsky, M., Saddy, D., & Alpermann, A. (2002). The P600 as an indicator of syntactic ambiguity. *Cognition*, *85*, B83-B92.

Fujiki, N., Naito, Y., Hirano, S., Kojima, H., Shiomo, Y., Nishizawa, S., Konishi, J., & Honjo, I. (1999). Correlation between rCBF and speech perception in cochlear implant users. *Auris, Nasus, Larynx*, *26*, 229-236.

Garnsey, S. M. (1993). Event-related brain potentials and the study of language: An introduction. *Language and Cognitive Processes*, *8*, 337-356.

Geier, L., Barker, M. J., Opie, J., & Fisher, L. (2000). Speech perception in postlingually deafened adult Clarion users with long-term deafness. In S. B. Waltzman & N. L. Cohen (Hrsg.), *Cochlear implants* (S. 336-337). New York, Stuttgart: Thieme.

Geisser, S., & Greenhouse, S. W. (1958). An extension of Box's results on the use of the F-distribution in multivariate analysis. *Annals of Mathematical Statistics*, *29*, 885-891.

Gernsbacher, M. A., & Kaschak, M. P. (2003). Neuroimaging studies of language production and comprehension. *Annual Review of Psychology*, *54*, 91-114.

Giraud, A.-L., Price, C. J., Graham, J. M., & Frackowiak, R. S. J. (2001a). Functional plasticity of language-related brain areas after cochlear implantation. *Brain*, *124*, 1307-1316.

Giraud, A.-L., Price, C. J., Graham, J. M., Truy, E., & Frackowiak, R. S. J. (2001b). Cross-modal plasticity underpins language recovery after cochlear implantation. *Neuron*, *30*, 657-663.

Giraud, A.-L., & Truy, E. (2002). The contribution of visual areas to speech comprehension: A PET study in cochlear implants patients and normal-hearing subjects. *Neuropsychologia*, *40*, 1562-1569.

Giraud, A. L., Truy, E., & Frackowiak, R. (2001c). Imaging plasticity in cochlear implant patients. *Audiology & Neuro-Otology*, *6*, 381-393.

Giraud, A.-L., Truy, E., Frackowiak, R. S. J., Grégoire, M.-C., Pujol, J.-F., & Collet, L. (2000). Differential recruitment of the speech processing system in healthy subjects and rehabilitated cochlear implant patients. *Brain*, *123*, 1391-1402.

Goldstein, E. B. (2002). *Wahrnehmungspsychologie* (2. Aufl.). Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.

Groenen, P., Beynon, A. J., Snik, A., & van den Broek, P. (2001). Speech-evoked cortical potentials and speech recognition in cochlear implant users. *Scandinavian Audiology*, *30*, 31-40.

Groenen, P., Makhdoum, M., van den Brink, J. L., Stollman, M. H., Snik, A. F. M., & van den Broek, P. (1996a). The relation between electric auditory brainstem and cognitive responses and speech perception in cochlear implant users. *Acta Otolaryngologica (Stockholm)*, *116*, 785-790.

Groenen, P., Snik, A., & van den Broek, P. (1996b). On the clinical relevance of mismatch negativity: Results from subjects with normal hearing an cochlear implant users. *Audiology & Neuro-Otology*, *1*, 112-124.

Gunter, T. C., Friederici, A. D., & Hahne, A. (1999a). Brain responses during sentence reading: visual input affects central processes. *NeuroReport*, *10*, 3175-3178.

Gunter, T. C., Friederici, A. D., & Schriefers, H. (2000). Syntactic gender and semantic expectancy: ERPs reveal early autonomy and late interaction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 556-568.

Gunter, T. C., Jackson, J. L., & Mulder, G. (1992). An electrophysiological study of semantic processing in young and middle-aged academics. *Psychophysiology*, *29*, 38-54.

Gunter, T. C., Jackson, J. L., & Mulder, G. (1995). Language, memory, and aging: An electrophysiological exploration of the N400 during reading of memory-demanding sentences. *Psychophysiology*, *32*, 215-229.

Gunter, T. C., Jackson, J. L., & Mulder, G. (1996). Focussing on aging: an electrophysiological exploration of spatial and attentional processing during reading. *Biological Psychology*, *43*, 103-145.

Gunter, T. C., Stowe, L. A., & Mulder, G. (1997). When syntax meets semantics. *Psychophysiology*, *34*, 660-676.

Gunter, T. C., Vos, S. H., & Friederici, A. D. (1999b). Memory or aging? That's the question: An electrophysiological perspective on language. In S. Kemper & R. Kliegl (Hrsg.), *Constraints on language: Aging, grammar and memory* (S. 249-282). Dordrecht: Kluwer.

Hagoort, P., & Brown, C. M. (2000a). ERP effects of listening to speech compared to reading: the P600/SPS to syntactic violations in spoken sentences and rapid visual presentation. *Neuropsychologia*, *38*, 1531-1549.

Hagoort, P., & Brown, C. M. (2000b). ERP effects of listening to speech: semantic ERP effects. *Neuropsychologia*, *38*, 1518-1530.

Hagoort, P., Brown, C. M., & Groothusen, J. (1993). The syntactic positive shift (SPS) as an ERP measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processes*, *8*, 439-483.

Hagoort, P., Wassenaar, M., & Brown, C. M. (2003a). Real-time semantic compensation in patients with agrammatic comprehension: Electrophysiological evidence for multiple-route plasticity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, *100*, 4340-4345.

Hagoort, P., Wassenaar, M., & Brown, C. M. (2003b). Syntax-related ERP-effects in Dutch. *Cognitive Brain Research*, *16*, 38-50.

Hahne, A. (1998). *Charakteristika syntaktischer und semantischer Prozesse bei der auditiven Sprachverarbeitung.* MPI Series in Cognitive Neuroscience, 1.

Hahne, A. (2001). What's different in second-language processing? Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Psycholinguistic Research*, *30*, 251-265.

Hahne, A., & Friederici, A. D. (1999). Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis: Early automatic and late controlled processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*, 194-205.

Hahne, A., & Friederici, A. D. (2001). Processing a second language: Late learners' comprehension mechanisms as revealed by event-related brain potentials. *Bilingualism: Language and Cognition*, *4*, 123-141.

Hahne, A., & Friederici, A. D. (2002). Differential task effects on semantic and syntactic processes as revealed by ERP's. *Cognitive Brain Research*, *13*, 339-356.

Hahne, A., & Jescheniak, J. D. (2001). What's left if the jabberwock gets the semantics? An ERP investigation into semantic and syntactic processes during auditory sentence comprehension. *Cognitive Brain Research*, *11*, 199-212.

Hahne, A., Wolf, A., Kiefer, J., & Müller, J. (2001). Prozesse des Satzverstehens bei Cochlear-Implant-Trägern: Hirnelektrische Evidenz für ein Primat der Bedeutungsverarbeitung. *Zeitschrift für Audiologie*, *Supplementum IV*, 27-29.

Harbin, T. J., Marsh, G. R., & Harvey, M. T. (1984). Differences in the late components of the event-related potential due to age and to semantic and non-semantic tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *59*, 489-496.

Hellbrück, J. (1993). *Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie.* Göttingen: Hogrefe.

Hessel, H., Ziese, M., Wesarg, T., & von Specht, H. (2001). Überlegungen zur bilateralen CI-Versorgung. *HNO*, *49*, 883-887.

Hodges, A. V., Villasuso, E., Balkany, T., Bird, P. A., Butts, S., Lee, D., & Gomez, O. (1999). Hearing results with deep insertion of cochlear implant electrodes. *American Journal of Otology*, *20*, 53-55.

Holcomb, P. J. (1988). Automatic and attentional processing: An event-related brain potential analysis of semantic priming. *Brain and Language*, *35*, 66-85.

Holcomb, P. J., & McPherson, W. B. (1994). Event-related brain potentials reflect semantic priming in an object decision task. *Brain and Cognition*, *24*, 259-276.

Holcomb, P. J., & Neville, H. J. (1990). Auditory and visual semantic priming in lexical decision: A comparison using event-related brain potentials. *Language and Cognitive Processes*, *5*, 281-312.

Holcomb, P. J., & Neville, H. J. (1991). Natural speech processing: An analysis using event-related brain potentials. *Psychobiology*, *19*, 286-300.

Hoth, S. (1998). Die Messung später elektrisch evozierter Potentiale des auditorischen Systems bei CI-Patienten. *HNO*, *46*, 739-747.

Jacobson, G. P., Kraus, N., & McGee, T. J. (1997). Hearing as reflected by middle and long latency event-related potentials. *Advances in Oto-Rhino-Laryngology*, *53*, 46-84.

Jordan, K., Schmidt, A., Plotz, K., von Specht, H., Begall, K., Roth, N., & Scheich, H. (1997). Auditory event-related potentials in post- and prelingually deaf cochlear implant recipients. *The American Journal of Audiology*, *18*, 116-117.

Kaan, E., Harris, A., Gibson, E., & Holcomb, P. (2000). The P600 as an index of syntactic integration difficulty. *Language and Cognitive Processes*, *15*, 159-201.

Kaga, K., Kodera, K., Hirota, E., & Tsuzuku, T. (1991). P300 response to tones and speech sounds after cochlear implant: a case report. *Laryngoscope*, *101*, 905-907.

Kelsall, D. C., Shallop, J. K., & Burnelli, T. (1995). Cochlear implantation in the elderly. *American Journal of Otology*, *16*, 609-615.

Kileney, P. R. (1991). Use of electrophysiologic measures in the management of children with cochlear implants: brainstem, middle latency and cognitive (P300) responses. *The American Journal of Otology*, *12 (Suppl.)*, 37-42.

Kileny, P. R., Boerst, A., & Zwolan, T. (1997). Cognitive evoked potentials to speech and tonal stimuli in children with implants. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, *117*, 161-169.

Klinke, R. (1996). Hören und Sprechen: Kommunikation des Menschen. In R. Klinke & S. Silbernagl (Hrsg.), *Lehrbuch der Physiologie* (2. Aufl., S. 569-584). Stuttgart, New York: Thieme.

Kluender, R., & Kutas, M. (1993). Bridging the gap: Evidence from ERPs on the processing of unbounded dependencies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *2*, 196-214.

Kluender, R., & Kutas, M. (1998). ERPs to grammatical and ungrammatical subject/object asymmetries in German wh-questions. *11th Annual CUNY Conference on Human Sentence Processing, New Brunswick/New Jersey*.

Kraus, N., McGee, T., Carrell, T. D., & Sharma, A. (1995). Neurophysiologic bases of speech discrimination. *Ear & Hearing*, *16*, 19-37.

Kraus, N., Micco, A. G., Koch, D. B., McGee, T., Carrell, T., Sharma, A., Wiet, R. J., & Weingarten, C. Z. (1993). The mismatch negativity cortical evoked potential elicited by speech in cochlear implant users. *Hearing Research*, *65*, 118-124.

Kubo, T., Yamamoto, K., Iwaki, T., Matsukawa, M., Doi, K., & Tamura, M. (2001). Significance of auditory evoked responses (EABR and P300) in cochlear implant subjects. *Acta Otolaryngologica*, *121*, 257-261.

Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 463-470.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980a). Event-related brain potentials to semantically inappropriate and surprisingly large words. *Biological Psychology*, *11*, 99-116.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980b). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, *207*, 203-205.

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.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1989). An electrophysiological probe of incidental semantic association. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *1*, 38-49.

Kutas, M., & Iragui, V. (1998). The N400 in a semantic categorization task across 6 decades. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *108*, 456-471.

Kutas, M., Lindamoon, T. E., & Hillyard, S. A. (1984). Word expectancy and event-related brain potentials during sentence processing. In S. Kornblum & J. Requin (Hrsg.), *Preparatory states and processes* (S. 217-237). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.

Kutas, M., Van Petten, C., & Besson, M. (1988). Event-related potential asymmetries during the reading of sentences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *69*, 218-233.

Kutas, M., & Van Petten, C. K. (1988). Event-related brain potential studies of language. In P. K. Ackles, J. R. Jennings, & M. G. H. Coles (Hrsg.), *Advances in psychophysiology, Vol. 3* (S. 139-187). Greenwich, Connecticut: JAI Press.

Kutas, M., & Van Petten, C. K. (1994). Psycholinguistics electrified: Event-related brain potential investigations. In M. A. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of psycholinguistics* (S. 83-143). San Diego: Academic Press.

Lehnhardt, E. (1996a). ERA - Electric Response Audiometry. In E. Lehnhardt (Hrsg.), *Praxis der Audiometrie* (7. Aufl., S. 251-319). Stuttgart, New York: Thieme.

Lehnhardt, E. (1996b). Sprachaudiometrie. In E. Lehnhardt (Hrsg.), *Praxis der Audiometrie* (7. Aufl., S. 174-197). Stuttgart, New York: Thieme.

Lehnhardt, E. (1998). Entwicklung des Cochlea-Implantats und das Cochlea-Implantat-Projekt in Hannover. In T. Lenarz (Hrsg.), *Cochlea-Implantat: Ein praktischer Leitfaden für die Versorgung von Kindern und Erwachsenen* (S. 1-8). Berlin, Heidelberg: Springer.

Lenarz, T. (1998). Cochlea-Implantate - Physiologische Grundlagen und klinische Anwendung. In T. Lenarz (Hrsg.), *Cochlea-Implantat: Ein praktischer Leitfaden für die Versorgung von Kindern und Erwachsenen* (S. 9-51). Berlin, Heidelberg: Springer.

Linebarger, M. C., Schwartz, M. F., & Saffran, E. M. (1983). Sensitivity to grammatical structure in so-called agrammatic aphasics. *Cognition*, *13*, 361-392.

Loizou, P. C. (1998). Introduction to cochlear implants. *IEEE Signal Processing Magazine*, *15*, 101-130.

Lück, M., Hahne, A., & Clahsen, H. (2001a). Dissociations of regular and irregular German plurals in an auditory ERP study. *23. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Sprachwissenschaft (DGfS), Leipzig*.

Lück, M., Hahne, A., & Clahsen, H. (2001b). How the brain processing of German plural nouns develops: Auditory ERP studies with adults and children. *Architecture and Mechanisms for Language Processing (AMLaP 2001), Saarbrücken*.

Makhdoum, M. J., Groenen, P. A. P., Snik, A. F. M., & van den Broek, P. (1998a). Intra- and interindividual correlations between auditory evoked potentials and speech perception in cochlear implant users. *Scandinavian Audiology*, *27*, 13-20.

Makhdoum, M. J. A., Hinderink, J. B., Snik, A. F. M., Groenen, P., & van den Broek, P. (1998b). Can event-related potentials be evoked by extra-cochlear stimulation and used for selection purposes in cochlear implantation? *Clinical Otolaryngoloy*, *23*, 432-438.

Marangos, N., & Laszig, R. (1998). Cochlear Implants: Die prothetische Versorgung bei Taubheit um die Jahrhundertwende. *HNO*, *46*, 12-26.

Marcus, G. F., Brinkmann, U., Clahsen, H., Wiese, R., & Pinker, S. (1995). German inflection: The expection that proves the rule. *Cognitive Psychology*, *29*, 189-256.

Marslen-Wilson, W. D. (1987). Functional parallelism in spoken word recognition. *Cognition*, *25*, 71-102.

Martin, R. C. (2003). Language processing: Functional organization and neuroanatomical basis. *Annual Review of Psychology*, *54*, 55-89.

Maurer, K. (1993). Akustisch evozierte Potentiale (AEP) und ereigniskorrelierte Potentiale (P300). In K. Lowitzsch, K. Maurer, H. C. Hopf, W. Tackmann, & D. Claus (Hrsg.), *Evozierte Potentiale bei Erwachsenen und Kindern* (2. Aufl., S. 142-212). Stuttgart, New York: Thieme.

McCallum, W. C., Farmer, S. F., & Pocock, P. V. (1984). The effect of physical and semantic incongruities on auditory event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *59*, 477-488.

Mecklinger, A., Schriefers, H., Steinhauer, K., & Friederici, A. D. (1995). Processing relative clauses varying on syntactic and semantic dimensions: An analysis with event-related potentials. *Memory and Cognition*, *23*, 477-494.

Micco, A. G., Kraus, N., Koch, D. B., McGee, T. J., Carrell, T. D., Sharma, A., Nicol, T., & Wiet, R. J. (1995). Speech-evoked cognitive P300 potentials in cochlear implant recipients. *The American Journal of Otology*, *4*, 514-520.

Miyamoto, T., Katayama, J., & Koyama, T. (1998). ERPs, semantic processing and age. *International Journal of Psychophysiology*, *29*, 43-51.

Møller, A. R. (2000). *Hearing: Its physiology and pathophysiology.* San Diego, London: Academic Press.

Müller, J., Schön, F., & Helms, J. (2000). Bilateral cochlear implant - new aspects for the future? *Advances in Oto-Rhino-Laryngology*, *57*, 22-27.

Müller, J., Schön, F., & Helms, J. (2002). Speech understanding in quiet and noise in bilateral users of the MED-EL COMBI 40/40+ cochlear implant system. *Ear & Hearing*, *23*, 198-206.

Münte, T. F., & Heinze, H.-J. (1994). ERP negativities during syntactic processing of written words. In H.-J. Heinze, T. F. Münte, & G. R. Mangun (Hrsg.), *Cognitive electrophysiology* (S. 211-238). Boston: Birkhäuser.

Münte, T. F., Heinze, H.-J., & Mangun, G. R. (1993). Dissociation of brain activity related to syntactic and semantic aspects of language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *5*, 335-344.

Münte, T. F., Heinze, H.-J., Matzke, M., Wieringa, B. M., & Johannes, S. (1998). Brain potentials and syntactic violations revisited: no evidence for specificity of the syntactic positive shift. *Neuropsychologia*, *36*, 217-226.

Münte, T. F., Matzke, M., & Johannes, S. (1997a). Brain activity associated with syntactic incongruencies in words and pseudo-words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*, 318-329.

Münte, T. F., Szentkuti, A., Wieringa, B. M., Matzke, M., & Johannes, S. (1997b). Human brain potentials to reading syntactic errors in sentences of different complexity. *Neuroscience Letters*, *235*, 105-108.

Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function.* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Näätänen, R. (2000). Mismatch negativity (MMN): perspectives for application. *International Journal of Psychophysiology*, *37*, 3-10.

Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked-potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, *42*, 313-329.

Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., Huotilainen, M., Iivonen, A., Vainio, M., Alku, P., Ilmoniemi, R. J., Luuk, A., Allik, J., Sinkkonen, J., & Alho, K. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, *385*, 432-434.

Näätänen, R., Tervaniemi, M., Sussman, E., Paavilainen, P., & Winkler, I. (2001). ‚Primitive intelligence‘ in the auditory cortex. *Trends in Neurosciences*, *24*, 283-288.

Naito, Y., Hirano, S., Honjo, I., Okazawa, H., Ishizu, K., Takahashi, H., Fujiki, N., Shiomi, Y., Yonekura, Y., & Konishi, J. (1997). Sound-induced activation of auditory cortices in cochlear implant users with post- and prelingual deafness demonstrated by positron emission tomography. *Acta Otolaryngologica (Stockholm)*, *117*, 490-496.

Naito, Y., Tateya, I., Fujiki, N., Hirano, S., Ishizu, K., Nagahama, Y., Fukuyama, H., & Kojima, H. (2000). Increased cortical activation during hearing of speech in cochlear implant users. *Hearing Research*, *143*, 139-146.

Neville, H. J. (1985). Biological constraints on semantic processing: A comparison of spoken and signed language. *Psychophysiology*, *22*, 576.

Neville, H. J., & Lawson, D. (1987a). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task: An event-related potential and behavioral study: I. Normal hearing adults. *Brain Research*, *405*, 253-267.

Neville, H. J., & Lawson, D. (1987b). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task: An event-related potential and behavioral study: II. Congenitally deaf adults. *Brain Research*, *405*, 268-283.

Neville, H. J., & Lawson, D. (1987c). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task: An event-related potential and behavioral study. III. Separate effects of auditory deprivation and aquisition of a visual language. *Brain Research*, *405*, 284-294.

Neville, H. J., Nicol, J. L., Barss, A., Forster, K. I., & Garrett, M. F. (1991). Syntactically based sentence processing classes: Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *3*, 151-165.

Nigam, A., Hoffman, J. E., & Simons, R. F. (1992). N400 to semantically anomalous pictures and words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *4*, 15-22.

Okazawa, H., Naito, Y., Yonekura, Y., Sadato, N., Hirano, S., Nishizawa, S., Magata, Y., Ishizu, K., Tamaki, N., Honjo, I., & Konishi, J. (1996). Cochlear implant efficiency in pre- and postlingually deaf subjects. A study with H2(15)O and PET. *Brain*, *119*, 1297–1306.

Okusa, M., Shiraishi, T., Kubo, T., & Nageishi, Y. (1999). Effects of discrimination difficulty on cognitive event-related brain potentials in patients with cochlear implants. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, *121*, 610-615.

Opitz, B. (1999). *Funktionelle Neuroanatomie der Verarbeitung einfacher und komplexer akustischer Reize: Integration haemodynamischer und elektrophysiologischer Maße.* MPI Series in Cognitive Neuroscience, 8.

Osterhout, L. (1997). On the brain response to syntactic anomalies: Manipulations of word position and word class reveal individual differences. *Brain and Language*, *59*, 494-522.

Osterhout, L., & Hagoort, P. (1999). A superficial resemblance does not necessarily mean you are part of the family: Counterarguments to coulson, king and kutas (1998) in the P600/SPS-P300 debate. *Language and Cognitive Processes*, *14*, 1-14.

Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, *31*, 785-806.

Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1993). Event-related potentials and syntactic anomaly: Evidence of anomaly detection during the perception of continuous speech. *Language and Cognitive Processes*, *8*, 413-437.

Osterhout, L., Holcomb, P. J., & Swinney, D. A. (1994). Brain potentials elicited by garden-path sentences: Evidence of the application of verb information during parsing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 786-803.

Osterhout, L., McKinnon, R., Bersick, M., & Corey, V. (1996). On the language specificity of the brain response to syntactic anomalies: Is the syntactic positive shift a member of the P300 family? *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*, 507-526.

Osterhout, L., & McLaughlin, J. (2000). What brain activity can tell us about second language learning. *23th Annual CUNY Conference on Human Sentence Processing, San Diego*.

Osterhout, L., & Mobley, L. A. (1995). Event-related brain potentials elicited by failure to agree. *Journal of Memory and Language*, *34*, 739-773.

Osterhout, L., & Nicol, J. (1999). On the distinctiveness, independence, and time course of the brain responses to syntactic and semantic anomalies. *Language and Cognitive Processes*, *14*, 283-317.

Oviatt, D. L., & Kileny, P. R. (1991). Auditory event-related potentials elicited from cochlear implant recipients and hearing subjects. *American Journal of Audiology*, *1*, 48-55.

Pandya, D. N. (1995). Anatomy of the auditory cortex. *Revue Neurologique*, *151*, 486-494.

Pantev, C., & Ross, B. (2002). Hören: Funktionelle Organisation und Plastizität. In T. Elbert & N. Birbaumer (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie: Biologische Psychologie, Band 6: Biologische Grundlagen der Psychologie* (S. 249-282). Göttingen: Hogrefe.

Penke, M., Weyerts, H., Gross, M., Zander, E., Münte, T. F., & Clahsen, H. (1997). How the brain processes complex words: an event-related potential study of German verb inflections. *Cognitive Brain Research*, *6*, 37-52.

Pfeifer, E., Nowagk, R., & Grigutsch, M. (1996-2002). *EEP - ERP Evaluation Package.* MPI für neuropsychologische Forschung.

Pickles, J. O. (1988). *An introduction to the physiology of hearing* (2. Aufl.). London: Academic Press.

Picton, T. W. (1995). The neurophysiological evaluation of auditory discrimination. *Ear & Hearing*, *16*, 1-5.

Picton, T. W., Lins, O. G., & Scherg, M. (1995). The recording and analysis of event-related potentials. In F. Boller & J. Grafmann (Hrsg.), *Handbook of neuropsychology* (Bd. 10, S. 3-73). Amsterdam, New York, Oxford: Elsevier.

Pinker, S. (1991). Rules of language. *Science*, *253*, 530-535.

Pinker, S., & Prince, A. (1991). Regular and irregular morphology and the psychological status of rules of grammar. *Proceedings of the 17th Annual Meeting of the Berkeley Linguistics Society. Berkeley, CA*.

Plath, P. (1992). *Das Hörorgan und seine Funktion. Einführung in die Audiometrie* (5. Aufl.). Berlin: Edition Marhold.

Ponton, C. W., & Don, M. (1995). The mismatch negativity in cochlear implant users. *Ear & Hearing*, *16*, 131-146.

Ponton, C. W., Don, M., Eggermont, J. J., Waring, M. D., Kwong, B., & Masuda, A. (1996a). Auditory system plasticity in children after long periods of complete deafness. *NeuroReport*, *8*, 61-65.

Ponton, C. W., Don, M., Eggermont, J. J., Waring, M. D., & Masuda, A. (1996b). Maturation of human cortical auditory function: Differences between normal-hearing children and children with cochlear implants. *Ear & Hearing*, *17*, 430-437.

Ponton, C. W., Don, M., Waring, M. D., Eggermont, J. J., & Masuda, A. (1993). Spatio-temporal source modeling of evoked potentials to acoustic and cochlear implant stimulation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *88*, 478-493.

Ponton, C. W., Don, M., Waring, M. D., Eggermont, J. J., & Masuda, A. (1994). Regional dipole source analysis of evoked potentials to acoustic and cochlear implant stimulation. In I. J. Hochmair-Desoyer & E. S. Hochmair (Hrsg.), *Advances in cochlear implants* (S. 3-7). Wien: Manz.

Ponton, C. W., & Eggermont, J. J. (2001). Of kittens and kids: Altered cortical maturation following profound deafness and cochlear implant use. *Audiology & Neuro-Otology*, *6*, 363-380.

Ponton, C. W., Eggermont, J. J., Don, M., Waring, M. D., Kwong, D., Cunningham, J., & Trautwein, P. (2000). Maturation of the mismatch negativity: effects of profound deafness and cochlear implant use. *Audiology & Neuro-Otology*, *5*, 167-185.

Ponton, C. W., Moore, J. K., & Eggermont, J. J. (1999). Prolonged deafness limits auditory system developmental plasticity: Evidence from an evoked potentials study in children with cochlear implants. *Scandinavian Audiology*, *28, Supplementum 51*, 13-22.

Preilowski, B. (1996). Funktionelle Anatomie des Nervensystems: Anmerkungen zur strukturellen Grundlage der Neuropsychologie. In H. J. Markowitsch (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie: Biologische Psychologie, Band 1: Grundlagen der Neuropsychologie* (S. 103-180). Göttingen: Hogrefe.

Probst, R. (1998). Cochlear Implants: Eine Erfolgsgeschichte und einige Fragen dazu. *HNO*, *46*, 4-6.

Read, H. L., Winer, J. A., & Schreiner, C. E. (2002). Functional architecture of auditory cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *12*, 433-440.

Rettenbach, R., Diller, G., & Sireteanu, R. (1999). Do deaf people see better? Texture segmentation and visual search compensate in adult but not in juvenile subjects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*, 560-583.

Rohen, J. W. (1994). *Funktionelle Anatomie des Nervensystems: Lehrbuch und Atlas* (5. Aufl.). Stuttgart, New York: Schattauer.

Rösler, F., Friederici, A. D., Pütz, P., & Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials while encountering semantic and syntactic constraint violations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *5*, 345-362.

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.

Rugg, M. D. (1985). The effects of semantic priming and word repetition on event-related potentials. *Psychophysiology*, *22*, 642-647.

Rugg, M. D. (1987). Dissociation of semantic priming, word and non-word repetition effects by event-related potentials. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *39A*, 123-148.

Rugg, M. D. (1990). Event-related brain potentials dissociate repetition effects of high- and low-frequency words. *Memory and Cognition*, *18*, 367-379.

Rugg, M. D. (1999). Functional neuroimaging in cognitive neuroscience. In C. M. Brown & P. Hagoort (Hrsg.), *The neurocognition of language* (S. 15-36). New York: Oxford University Press.

Rugg, M. D., & Coles, M. G. H. (1995). The ERP and cognitive psychology. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Hrsg.), *Electrophysiology of mind: Event-related brain potentials and cognition* (S. 27-39). New York: Oxford University Press.

Schön, F., Müller, J., & Helms, J. (2002). Speech reception thresholds obtained in a symmetrical four-loudspeaker arrangement from bilateral users of MED-EL cochlear implants. *Otology & Neurotology*, *23*, 710-714.

Schröger, E. (1998). Measurement and interpretation of the mismatch negativity. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *30*, 131-145.

Sendlmaier, W. F. (1992). *Sprachverarbeitung bei pathologischem Gehör.* Stuttgart, New York: Thieme.

Shannon, R. V., Zeng, F.-G., Kamath, V., Wygonski, J., & Ekelid, M. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, *270*, 303-304.

Sharbrough, F., Chatrian, G.-E., Lesser, R. P., Lüders, H., Nuwer, M., & Picton, T. W. (1991). American Encephalographic Society guidelines for standard electrode position nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*, *8*, 200-202.

Sharma, A., Dorman, M. F., & Spahr, A. J. (2002a). Rapid development of cortical auditory evoked potentials after early cochlear implantation. *NeuroReport*, *13*, 1365-1368.

Sharma, A., Dorman, M. F., Spahr, A. J., & Todd, N. W. (2002b). Early cochlear implantation in children allows normal development of central auditory pathways. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology - Supplement*, *189*, 38-41.

Smith, M. E., & Halgren, E. (1987). Event-related potentials during lexical decision: Effects of repetition, word frequency, pronounceability and concreteness. In J. R. Johnson, J. W. Rohrbaugh, & R. Parasuraman (Hrsg.), *Current trend in event-related potential research: Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Supplement 40* (S. 417-421). Amsterdam: Elsevier.

Steinhauer, K. (2003). Electrophysiological correlates of prosody and punctuation. *Brain and Language*, *86*, 142-164.

Steinhauer, K., Alter, K., & Friederici, A. D. (1999). Brain potentials indicate immediate use of prosodic cues in natural speech processing. *Nature Neuroscience*, *2*, 191-196.

Steinhauer, K., & Friederici, A. D. (2001). Prosodic boundaries, comma rules, and brain responses: The closure positive shift in ERP's as a universal marker for prosodic phrasing in listeners and readers. *Journal of Psycholinguistic Research*, *30*, 267-295.

Stolterfoht, B., Friederici, A. D., Alter, K., & Steube, A. (2003). The difference between the processing of implicit prosody and focus structure during reading: Evidence from event-related brain potentials. *16th Annual CUNY Conference on Human Sentence Processing, Cambridge / MA*.

Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, *150*, 1187-1188.

Taylor, W. L. (1953). „Cloze" procedure: A new tool for measuring readability. *Journalism Quarterly*, *30*, 415.

Tyler, R. S., Parkinson, A., Wilson, B., Parkinson, W., Lowder, M., Witt, S., Rubinstein, J., & Gantz, B. (2000). Evaluation of different choices of n in an n of m processor for cochlear implants. *Advances in Oto-Rhino-Laryngology*, *57*, 311-315.

Tyler, R. S., & Tye-Murray, N. (1991). Cochlear implant signal-processing strategies and patient perception of speech and environmental sounds. In H. Cooper (Hrsg.), *Cochlear implants: A practical guide* (S. 58-83). London: Whurr Publishers.

Ullman, M. T. (2001). The neural basis of lexicon and grammar in first and second language. *Bilingualism: Language and Cognition*, *4*, 105-122.

Van Berkum, J. J. A., Hagoort, P., & Brown, C. M. (1999). Semantic integration in sentences and discourse: Evidence from the N400. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*, 657-671.

van Dijk, J. E., van Olphen, A. F., Langereis, M. C., Mens, L. H. M., Brokx, J. P. L., & Smoorenburg, G. F. (1999). Predictors of cochlear implant performance. *Audiology*, *38*, 109-116.

van Hoesel, R., Ramsden, R., & O'Driscoll, M. (2002). Sound-direction identification, interaural time delay discrimination, and speech intelligibility advantages in noise for a bilateral cochlear implant user. *Ear & Hearing*, *23*, 137-149.

Van Petten, C. K. (1995). Words and sentences: Event-related brain potential measures. *Psychophysiology*, *32*, 511-525.

Van Petten, C. K., & Kutas, M. (1990). Interactions between sentence context and word frequency in event-related brain potentials. *Memory and Cognition*, *18*, 380-393.

Van Petten, C. K., Kutas, M., Kluender, R., Mitchiner, M., & McIsaac, H. (1991). Fractionating the word repetition effect with event-related potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *3*, 131-150.

Vos, S. H., Gunter, T. C., Kolg, H. H. J., & Mulder, G. (2001). Working memory constraints on syntactic processing: An electrophysiological investigation. *Psychophysiology*, *38*, 41-63.

Wable, J., van der Abbeele, T., Gallégo, S., & Frachet, B. (2000). Mismatch negativity: a tool for the assessment of stimuli discrimination in cochlear implant subjects. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 743-751.

Waltzman, S. B., Cohen, N. L., & Shapiro, W. H. (1993). The benefits of cochlear implantation in the geriatric population. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, *108*, 329-333.

Waltzman, S. B., Fisher, S. G., Niparko, J. K., & Cohen, N. L. (1995). Predictors of postoperative performance with cochlear implants. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology - Supplement*, *165*, 15-18.

Weber-Fox, C., & Neville, H. J. (1996). Maturational constraints on functional specializations for language processing: ERP and behavioral evidence in bilingual speakers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*, 231-256.

Wendler, J., Seidner, W., Kittel, G., & Eysholdt, U. (1996). *Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie* (3. Aufl.). Stuttgart, New York: Thieme.

Weston, S. C., & Waltzman, S. B. (1995). Performance as a function of time: a study of three cochlear implant devices. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology - Supplement*, *165*, 19-24.

Weyerts, H., Penke, M., Dohrn, U., Clahsen, H., & Münte, T. F. (1997). Brain potentials indicate differences between regular and irregular German plurals. *NeuroReport*, *8*, 957-962.

Wilson, B. S., Finley, C. C., Lawson, D. T., Wolford, R., Eddington, D. K., & Rabinowiz, W. M. (1991). Better speech recognition with cochlear implants. *Nature*, *352*, 236-238.

Wolf, A. (2000). *Sprachverstehensprozesse bei Cochlea-Implantat-Trägern: Eine Untersuchung mit ereigniskorrelierten Hirnpotentialen.* Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Sprechwissenschaft und Phonetik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

Wong, D., Miyamoto, R. T., Pisoni, D. B., Sehgal, M., & Hutchins, G. D. (1999). PET imaging of cochlear-implant and normal-hearing subjects listening to speech and nonspeech. *Hearing Research*, *132*, 34-42.

Woodward, S. A., Ford, J. M., & Hammett, S. C. (1993). N4 to spoken sentences in young and older subjects. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *87*, 306-320.

Yost, W. A. (2000). *Fundamentals of hearing: An introduction* (4. Aufl.). San Diego, London: Academic Press.

Zenner, H.-P. (1994). *Hören: Physiologie, Biochemie, Zell- und Neurobiologie.* Stuttgart, New York: Thieme.

Zenner, H.-P. (1995). Hören. In R. F. Schmidt (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (2. Aufl., S. 305-328). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Zwitserlood, P. (1989). The locus of the effects on sentential-semantic context in spoken-word processing. *Cognition*, *32*, 25-64.

Lebenslauf

Name	Angelika Wolf
Geburtsdatum	21.05.1975
Geburtsort	Dresden
1981 – 1989	Polytechnische Oberschule (Gera und Dresden)
1989 – 1993	Erweiterte Oberschule / Romain-Rolland-Gymnasium (Dresden)
1993	Abitur
1993 – 1994	Au-Pair-Aufenthalt (St. Tropez / Frankreich)
1994 – 2000	Studium im Fach Sprechwissenschaft (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg)
1996	Vordiplom im Fach Sprechwissenschaft
1999 – 2000	Studentische Hilfskraft bei Dr. Anja Hahne, MPI für neuropsychologische Forschung, Leipzig
2000	Diplom im Fach Sprechwissenschaft
2000 – 2002	Wissenschaftliche Mitarbeiterin im DFG-Projekt „Verstehen von Sprache mittels Cochlea-Implantaten“ (MPI für neuropsychologische Forschung, Leipzig)
2002 – 2003	Wissenschaftliche Mitarbeiterin (MPI für neuropsychologische Forschung, Leipzig)

MPI Series in Human Cognitive and Brain Sciences:

1 Anja Hahne

Charakteristika syntaktischer und semantischer Prozesse bei der auditiven Sprachverarbeitung: Evidenz aus ereigniskorrelierten Potentialstudien

2 Ricarda Schubotz

Erinnern kurzer Zeitdauern: Behaviorale und neurophysiologische Korrelate einer Arbeitsgedächtnisfunktion

3 Volker Bosch

Das Halten von Information im Arbeitsgedächtnis: Dissoziationen langsamer corticaler Potentiale

4 Jorge Jovicich

An investigation of the use of Gradient- and Spin-Echo (GRASE) imaging for functional MRI of the human brain

5 Rosemary C. Dymond

Spatial Specificity and Temporal Accuracy in Functional Magnetic Resonance Investigations

6 Stefan Zysset

Eine experimentalpsychologische Studie zu Gedächtnisabrufprozessen unter Verwendung der funktionellen Magnetresonanztomographie

7 Ulrich Hartmann

Ein mechanisches Finite-Elemente-Modell des menschlichen Kopfes

8 Bertram Opitz

Funktionelle Neuroanatomie der Verarbeitung einfacher und komplexer akustischer Reize: Integration haemodynamischer und elektrophysiologischer Maße

9 Gisela Müller-Plath

Formale Modellierung visueller Suchstrategien mit Anwendungen bei der Lokalisation von Hirnfunktionen und in der Diagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen

10 Thomas Jacobsen

Characteristics of processing morphological structural and inherent case in language comprehension

11 Stefan Kölsch

Brain and Music
A contribution to the investigation of central auditory processing with a new electrophysiological approach

12 Stefan Frisch

Verb-Argument-Struktur, Kasus und thematische Interpretation beim Sprachverstehen

13 Markus Ullsperger

The role of retrieval inhibition in directed forgetting – an event-related brain potential analysis

14 Martin Koch

Measurement of the Self-Diffusion Tensor of Water in the Human Brain

15 Axel Hutt

Methoden zur Untersuchung der Dynamik raumzeitlicher Signale

16 Frithjof Kruggel

Detektion und Quantifizierung von Hirnaktivität mit der funktionellen Magnetresonanztomographie

17 Anja Dove

Lokalisierung an internen Kontrollprozessen beteiligter Hirngebiete mithilfe des Aufgabenwechselparadigmas und der ereigniskorrelierten funktionellen Magnetresonanztomographie

18 Karsten Steinhauer

Hirnphysiologische Korrelate prosodischer Satzverarbeitung bei gesprochener und geschriebener Sprache

19 Silke Urban

Verbinformationen im Satzverstehen

20 Katja Werheid

Implizites Sequenzlernen bei Morbus Parkinson

21 Doreen Nessler

Is it Memory or Illusion? Electrophysiological Characteristics of True and False Recognition

22 Christoph Herrmann

Die Bedeutung von 40-Hz-Oszillationen für kognitive Prozesse

23 Christian Fiebach

Working Memory and Syntax during Sentence Processing. A neurocognitive investigation with event-related brain potentials and functional magnetic resonance imaging

24 Grit Hein

Lokalisation von Doppelaufgabendefiziten bei gesunden älteren Personen und neurologischen Patienten

25 Monica de Filippis

Die visuelle Verarbeitung unbeachteter Wörter. Ein elektrophysiologischer Ansatz

26 Ulrich Müller

Die katecholaminerge Modulation präfrontaler kognitiver Funktionen beim Menschen

27 Kristina Uhl

Kontrollfunktion des Arbeitsgedächtnisses über interferierende Information

28 Ina Bornkessel

The Argument Dependency Model: A Neurocognitive Approach to Incremental Interpretation

29 Sonja Lattner

Neurophysiologische Untersuchungen zur auditorischen Verarbeitung von Stimminformationen

30 Christin Grünewald

Die Rolle motorischer Schemata bei der Objektrepräsentation: Untersuchungen mit funktioneller Magnetresonanztomographie

31 Annett Schirmer

Emotional Speech Perception: Electrophysiological Insights into the Processing of Emotional Prosody and Word Valence in Men and Women

32 André J. Szameitat

Die Funktionalität des lateral-präfrontalen Cortex für die Verarbeitung von Doppelaufgaben

33 Susanne Wagner

Verbales Arbeitsgedächtnis und die Verarbeitung ambiger Wörter in Wort- und Satzkontexten

34 Sophie Manthey

Hirn und Handlung: Untersuchung der Handlungsrepräsentation im ventralen prämotorischen Cortex mit Hilfe der funktionellen Magnet-Resonanz-Tomographie

35 Stefan Heim

Towards a Common Neural Network Model of Language Production and Comprehension: fMRI Evidence for the Processing of Phonological and Syntactic Information in Single Words

36 Claudia Friedrich

Prosody and spoken word recognition: Behavioral and ERP correlates

37 Ulrike Lex

Sprachlateralisierung bei Rechts- und Linkshändern mit funktioneller Magnetresonanztomographie

38 Thomas Arnold

Computergestützte Befundung klinischer Elektroenzephalogramme

39 Carsten H. Wolters

Influence of Tissue Conductivity Inhomogeneity and Anisotropy on EEG/MEG based Source Localization in the Human Brain

40 Ansgar Hantsch

Fisch oder Karpfen? Lexikale Aktivierung von Benennungsalternativen bei der Objektbenennung

41 Peggy Bungert

Zentralnervöse Verarbeitung akustischer Informationen Signalidentifikation, Signallateralisation und zeitgebundene Informationsverarbeitung bei Patienten mit erworbenen Hirnschädigungen

42 Daniel Senkowski

Neuronal correlates of selective attention: An investigation of electrophysiological brain responses in the EEG and MEG

43 Gert Wollny

Analysis of Changes in Temporal Series of Medical Images