

Untersuchungen einer langsamen positiven Welle im Ereigniskorrelierten Hirnrindenpotential auf visuelle Reize

Inauguraldissertation zur Erlangung des Doktor rer. nat. im Fach
Psychologie im Fachbereich I der Universität Trier

Vorgelegt von:
Stefanie Thelen

Gutachter:
Prof. Dr. Dieter Bartussek
Dr. Ewald Naumann

1999

Dissertationsort: TRIER

„Well, „ said Pooh, „ we keep looking for Home and not finding it, so I thought that if we looked for the Pit, we'd be sure not to find it, which would be a Good Thing, because then we might find something that we *weren't* looking for, which might be just what we *were* looking for, really.“

„I don't see much sense in that,“ said Rabbit.

„No,“ said Pooh humbly, „ there isn't. But there was *going* to be when I began it. It's just that something happened to it on the way.“

Milne, 1987, pp. 120 - 121

Vorwort

Die hier vorgestellten Experimente wurden im Rahmen einer Forschungsreihe an der Universität Trier unter der Leitung von Prof. Dr. D. Bartussek und Dr. E. Naumann durchgeführt. In dieser Forschungsreihe wird die funktionale Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle im ereigniskorrelierten Hirnrindenpotential (EKP) auf visuelle Reize untersucht. Das erste der beiden beschriebenen Experimente testet eine Störhypothese, die besagt, dass die frontal positive langsame Welle ein Artefakt von Augenbewegung bei der Betrachtung der visuellen Reize ist. Im zweiten Experiment wird eine Hypothese zur funktionalen Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle getestet, die postuliert, dass die Auslösung der frontal positiven langsamen Welle von der Menge notwendiger inhaltlicher Informationsverarbeitungsprozessen beim Betrachten visueller Reize abhängig ist.

Viele Personen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte. Prof. Dr. Dieter Bartussek und Dr. Ewald Naumann, die mir im Rahmen meiner Projektmitarbeit wissenschaftlichen Freiraum gelassen haben, aber dennoch immer als Ansprechpartner für mich da waren. Mein Dank gilt zudem den Personen, ohne die das EEG-Labor und EEG-Untersuchungen in Trier undenkbar wären: Helmut Peifer (Technik), Dipl.-Psych. Alexander Lürken (Software) und Renate Freudenreich (Datenerhebung). Zudem danke ich meinen Kollegen Dr. Oliver Diedrich, Dipl.-Psych. Dirk Hagemann und Dipl.-Psych. Gabriele Becker für wertvolle Anregungen und Diskussionen. Daneben haben viele wissenschaftliche Hilfskräfte bei der Erhebung und Auswertung der Daten mitgewirkt, denen ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte. Abschließend sei auch den vielen Probanden gedankt, die zur Teilnahme an den Untersuchungen bereit waren. Martina Thoben danke ich für ihre Hilfe bei der alten und neuen Rechtschreibung.

Für die persönliche Unterstützung während dieser Zeit möchte ich mich bei meinem Mann Stefan, meinem Sohn Arthur, allen weiteren Familienangehörigen und meinen Freunden bedanken.

Trier, im Sommer 1999

Stefanie Thelen

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	7
2 Grundlagen visueller Wahrnehmung	10
2.1 Einleitung	10
2.2 Der Verlauf visueller Bahnen im Gehirn	10
2.2.1 Corpus geniculatum laterale	12
2.2.2 Der visuelle Kortex	15
2.2.2.1 Funktionelle Architektur im visuellen Kortex	17
2.2.2.2 Räumliches Filtern im visuellen Kortex	19
2.2.3 Hinter dem visuellen Kortex	22
2.2.3.1 Getrennte funktionale Bahnen im extrastriären Kortex	24
2.2.3.2 Hierarchische Verarbeitung in extrastriären Bahnen	27
2.2.4 Offene Fragen zur visuellen Informationsverarbeitung im Gehirn	29
2.2.4.1 Wie kodieren einzelne Zellen Informationen?	29
2.2.4.2 Welche Rolle spielen dynamische Zellverbände bei der visuellen Informationsübermittlung und -verarbeitung?	31
2.2.4.3 Welche Funktionen haben die Feedback-Verbindungen zwischen visuellen Areas?	32
2.2.5 Schlussfolgerung	35
2.3 Augenbewegungen	36
2.3.1 Anatomische Grundlagen von Augenbewegungen	37
2.3.1.1 Horizontale, vertikale und rotatorische Bewegungen der Augen	37
2.3.1.2 Augenmuskeln ermöglichen eine präzise Kontrolle	38
2.3.1.3 Augenbewegungen sind konjugiert	39
2.3.2 Die drei Nerven der Augenmuskeln	40
2.3.2.1 Der Lichtreflex und der Akkomodationsreflex	41
2.3.3 Kontrolle von Augenbewegungen	42
2.3.3.1 Klassifikation von Augenbewegungen	42
2.3.3.2 Afferente Verbindungen zu den Kernen der Nerven der Augenmuskeln	44
2.3.4 Die Zentren für die Kontrolle von Augenbewegungen im Hirnstamm	46
2.3.5 Korticale Zentren für die Kontrolle von Augenbewegungen	48
2.3.6 Das EOG als Methode zur Registrierung von Augenbewegungen	49
2.3.7 Schlussfolgerung	49
3 Die EKP-Methode	51
3.1 Einleitung	51
3.2 Messung und Analyse des ereigniskorrelierte Hirnrindenpotentials (EKP)	51
3.2.1 Generierung des EKP	52
3.2.2 Elektrodenplatzierung und Referenz	53
3.2.3 Aufbereitung des EEG-Signals	55

3.3 Die Bestimmung der Komponenten im EKP	57
3.3.1 Physiologische Ansätze der Komponentenbestimmung	59
3.3.2 Psychologische Ansätze der Komponentenidentifizierung	60
3.4 EKP-Komponenten	62
3.4.1 Komponenten, die einem Ereignis vorausgehen	63
3.4.2 EKP-Komponenten, die auf ein Ereignis folgen	64
3.4.2.1 Langsame Wellen: Einleitung	70
3.4.2.2 Langsame Wellen: Studien im Überblick	76
3.4.2.3 Abschließende Bemerkungen zu langsamen Wellen	88
3.5 Okulare Artefakte: Ein Problem für EEG- und EKP-Daten	90
3.5.1 Methoden zur Korrektur von Augenartefakten	95
3.5.2 Abschließende Bewertung der Methoden zur Korrektur okularer Artefakte	108
4 Experiment 1	112
4.1 Einleitung	112
4.2 Hypothesen	117
4.3 Methode	118
4.3.1 Probanden	118
4.3.2 Reizmaterial	119
4.3.3 Unabhängige Variablen	119
4.3.4 Erfassung der physiologischen Maße und der Verhaltensmaße	121
4.3.5 Experimentelle Prozedur	122
4.3.6 Auswertung der physiologischen Maße	124
4.4 Ergebnisse	127
4.4.1 Manipulationsüberprüfung	127
4.4.2 Ereigniskorrelierte Potentiale auf die Matrizen	131
4.5 Diskussion	145
4.5.1 Variation von Augenbewegung	145
4.5.2 Variation von Schwierigkeit	148
4.5.3 EKPs auf die Hintergrundmatrizen	149
4.5.4 Abschließende Diskussion von Experiment 1	152
5 Experiment 2	154
5.1 Einleitung	154
5.2 Hypothesen	159
5.3 Methode	160
5.3.1 Probanden	160
5.3.2 Reizmaterial	160
5.3.3 Unabhängige Variablen	162

5.3.4 Erfassung der physiologischen Maße	163
5.3.5 Experimentelle Prozedur	164
5.3.6 Auswertung der physiologischen Maße	165
5.4 Ergebnisse	167
5.4.1 Ereigniskorrelierte Potentiale auf die Bilder	167
5.5 Diskussion	182
5.5.1 Gemittelte Amplituden im Zeitbereich von 1000 bis 3500 ms	182
5.5.2 P3-Amplitude	185
5.5.3 Abschließende Diskussion von Experiment 2	187
6 Zusammenfassung und Bewertung	189
7 Literaturverzeichnis	192
8 Anhang	207

1 Einführung

Die Psychophysiologie untersucht die Beziehungen zwischen Verhalten und physiologischen Prozessen beim Menschen. Die Beobachtung des menschlichen Verhaltens erfolgt über die physiologische Ebene; die physiologischen Untersuchungstechniken stellen die wichtigsten Methoden zur Untersuchung abhängiger Variablen dar. In der Regel werden dazu an der Oberfläche eines intakten, menschlichen Organismus physiologische Prozesse registriert. Diese können den Funktionsbereichen des vegetativen Nervensystems, der zentralnervösen oder der somatisch-muskulären Aktivität entstammen (vergleiche Schandry, 1998).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der zentralnervösen Aktivität, genauer mit Ereigniskorrelierten Hirnrindenpotentialen (EKP), die durch die Darbietung visueller Reize ausgelöst werden. Bei der Verwendung von emotionalen Bildreizen konnte in mehreren Experimenten im Trierer EEG-Labor eine besondere Komponente im EKP ausgelöst werden: Eine langsame positive Welle, die sich insbesondere über dem Frontalkortex ausbildet. Diese frontal positive langsame Welle wurde ursprünglich als ein Index für affektive Informationsverarbeitung angesehen, konkret als Hemmung einer durch emotionale Bildreize automatisch initiierten motorischen Reaktion. Diese Interpretation ließ sich jedoch aufgrund eines experimentellen Befundes nicht aufrechterhalten. Es zeigte sich, dass die frontal positive langsame Welle mit der gleichen Intensität auftritt, wenn emotional neutrale Bilder während einer kognitiven Informationsverarbeitungsaufgabe betrachtet werden, bei der emotional ausgelöstes Annäherungs- oder Vermeidungsverhalten nicht zu erwarten ist. Die Frage nach der funktionalen Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle auf die Bildreize musste erneut gestellt werden. Zwei Experimente, die hier beschrieben werden, sollen dazu beitragen, mögliche Antworten einzugrenzen.

Zunächst werden jedoch im ersten Teil dieser Arbeit die als wesentlich erachteten physiologischen und methodischen Grundlagen eingeführt. Begonnen wird mit der Darstellung der Grundlagen visueller Wahrnehmung, insbesondere wird der Verlauf visueller Bahnen im Gehirn und die Steuerung von Augenbewegungen durch das Gehirn beschrieben. Danach werden die Grundlagen zur EKP-Methode beschrieben, wobei

dieser Abschnitt mit der Darstellung von Studien zu langsamen Wellen im EKP endet. Es folgt ein Abschnitt, der einen Überblick über Methoden zur Korrektur von okularen Artefakten im EKP gibt.

Im zweiten Teil der Arbeit werden zwei Experimente beschrieben. Aus den bisherigen Ergebnissen der Experimente zur frontal positiven langsamen Welle werden zwei Hypothesen abgeleitet, die dazu beitragen sollen, die funktionale Bedeutung dieser Komponente einzugrenzen. Das erste Experiment versucht eine Störhypothese auszuschließen, die besagt, dass die frontal positive langsame Welle ein Artefakt von Augenbewegung bei der Betrachtung visueller Reize ist. Dazu wurde ein neues Paradigma entwickelt, das die systematische Variation von Augenbewegungen bei der Betrachtung visueller Reize, hier Matrizen, ermöglichen sollte. Diese Untersuchung sollte auch die Frage klären, ob die von uns verwendete Korrektur von Augenartefakten geeignet ist, Augenartefakte aus den EKP-Daten zu eliminieren, so dass deren Interpretation sinnvoll ist.

Im zweiten Experiment wird die Menge inhaltlicher Verarbeitungsprozesse beim Betrachten der visuellen Reize, hier Bilder des International Affective Picture Systems (IAPS; Lang, Bradley & Cuthbert, 1997), variiert. Eine unterschiedliche Anzahl verschiedener Bilder wurde bei gleicher inhaltlicher Aufgabe, einer semantischen Kategorisierungsaufgabe, dargeboten. Dabei wurde die Hypothese untersucht, dass die inhaltliche Analyse unterschiedlicher Bilder eine notwendige Voraussetzung für die Entstehung der frontal positiven langsamen Welle ist und eine rein perzeptuelle Analyse nicht ausreicht, diese Komponente auszulösen.

Die Ergebnisse beider Untersuchungen bestätigten die aufgestellten Hypothesen. Die erste Untersuchung zeigte, dass die frontal positive langsame Welle kein Artefakt von Augenbewegung ist, wenngleich sich herausstellte, dass die intendierte Variation der Augenbewegung im Paradigma nicht gelungen ist. Die Ergebnisse der zweiten Untersuchung belegen, dass die frontal positive langsame Welle nur dann entsteht, wenn unterschiedliche Bilder inhaltlichen Informationsverarbeitungsprozessen unterzogen werden. Bei der wiederholten Darbietung von Bildern, wenn die Aufgabe aufgrund perzeptiver Bildanalysen gelöst werden kann, findet sich keine entsprechende Komponente im EKP.

Die abschließende Bewertung der Ergebnisse dieser Experimente zur frontal positiven langsamen Welle zeigt, dass hinsichtlich der funktionellen Bedeutung dieser Komponente weitere Fragen aufgeworfen werden, die jedoch nur durch experimentelle Untersuchungen zu klären sind.

2 Grundlagen visueller Wahrnehmung

2.1 Einleitung

Da in dieser Arbeit zwei Experimente beschrieben werden, die EKPs auf visuell dargebotene Reize messen, werden zu Beginn die Grundlagen visueller Wahrnehmung beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung aller Prozesse, die stattfinden, wenn ein Lichtreiz auf die Retina trifft bis hin zu einer subjektiven Erfahrung dieses Reizes, kann nicht erfolgen. Es werden jedoch die wesentlichen Stationen der Verarbeitung visueller Informationen im Gehirn unter Berücksichtigung neuerer Forschungsergebnisse dargestellt. Abschnitt 2.2 beschreibt nach einer kurzen Charakterisierung der Signalaufnahme und -verarbeitung in der Retina den Verlauf der visuellen Bahnen im Gehirn. Einige strittige Fragen zum Thema visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn werden aufgezeigt. Deutlich ist, dass die Prozesse der visuellen Informationsverarbeitung im Gehirn trotz umfangreicher Forschungsarbeiten bislang nicht vollständig verstehbar sind.

Visuelle Informationsverarbeitung beginnt damit, dass visuelle Reize mit den Augen betrachtet werden. Somit ergibt sich eine enge Verbindung zwischen visueller Informationsverarbeitung und der Steuerung der Augenbewegung durch das Gehirn. Im Anschluss an die Beschreibung der visuellen Bahnen im Gehirn, gibt Abschnitt 2.3 eine Einführung in die komplexen Zusammenhänge der Steuerung der Augenbewegung. Es zeigt sich, dass diese Prozesse bislang ebenfalls nicht vollständig erforscht sind.

2.2 Der Verlauf visueller Bahnen im Gehirn

Fällt ein Lichtreiz auf die Retina, werden die lichtsensitiven Photorezeptoren, die Stäbchen und die Zapfen, in der Retina aktiviert. Durch Lichteinfall zerfallen in den Außengliedern der Stäbchen und Zapfen die Sehfärbstoffe. Dies bewirkt eine Hyperpolarisation der Photosensoren. Die Photorezeptoren bilden den 'Eingang' und die Ganglienzellen den 'Ausgang' des lokalen Netzwerks der retinalen Nervenzellen. Dazwischen befinden sich als weitere Zellarten die Horizontal-, die Bipolarzellen und die Amakriden. Über synaptische Verbindungen findet die Informationsverarbeitung in den inneren Schichten der Retina statt. Dabei können zwei Hauptflussrichtungen der

neuronalen Signalverarbeitung beobachtet werden. Erstens eine zentriperitale Signalverarbeitung, die von den Photosensoren über die Bipolarzellen zu den Ganglienzellen verläuft und eine quer verlaufende Signalübertragung in den Horizontalzellen und Amakriden. Eine Besonderheit retinaler Signalverarbeitung ist, dass alle Zellen langsame, lokale Membranpotentiale ausbilden und nur die Ganglienzellen Aktionspotentiale ausbilden. Die Ganglienzellen weisen konzentrisch organisierte rezeptive Felder auf. Dabei lassen sich rezeptive Felder für das schwarz-weiße (skotopische) und für das farbige (photopische) Sehen nachweisen. Die Axone der Ganglienzellen verlassen die Retina und bilden den Sehnerven (Nervus opticus). Entlang des Sehnervs wird die in der Retina vorbereitete visuelle Information in das Gehirn übertragen.

Zunächst wird eine kurze allgemeine Beschreibung der visuellen Bahnen vom Auge bis zum Gehirn gegeben. Danach werden einzelne Stadien detaillierter dargestellt. Beim Menschen projizieren einige Ganglienzellen zur prätektalen Region und den vorderen vier Hügeln (Colliculi superiores), einer Struktur im Mittelhirn, die eine Reihe von geschichteten retinotopen Mappen des kontralateralen visuellen Feldes beinhaltet. Bei Primaten befinden sich in den drei Oberflächenschichten im Colliculi superiores Zellen, die auf bewegte Reize reagieren, nicht aber selektiv auf die Richtung der Bewegung oder für die Reizformen sind (Wurtz & Albano, 1980). Diese Kerngebiete im Hirnstamm steuern unsere Augenbewegungen (siehe Abschnitt 2.3).

Die Mehrheit der Axone der Ganglienzellen projizieren zum hinteren Teil der zwei seitlichen Kniehöcker (Corpus geniculatum laterale) des Thalamus. Diese Axone enden an den Synapsen der Zellen des Corpus geniculatum laterale, die in Schichten aufgebaut sind. Jede Schicht beinhaltet eine retinotope Mappe der Hälfte des visuellen Feldes. Das heißt, die rechten Schichten des Corpus geniculatum laterale beinhalten Mappen der linken Seite des visuellen Feldes und die linken Schichten beinhalten Mappen der rechten Seite. Dies ist bei Tieren mit seitlich am Kopf platzierten Augen notwendig, weil eine vollständige Kreuzung des Sehnervs über das Chiasma opticum zur gegenüberliegenden Seite des Gehirns erfolgt. Bei Tieren mit einer Überschneidung der zwei Augen und auch beim Menschen liegt eine teilweise Kreuzung des Sehnervs im Chiasma opticum vor. Die Axone der Ganglienzellen der linken Hälfte jeder Retina, die Informationen über die rechte Hälfte des visuellen Feldes übertragen, laufen zum linken Corpus geniculatum

laterale und entsprechend die der rechten Hälfte jeder Retina zum rechten Corpus geniculatum laterale. Dieses Verbindungsmuster bewirkt, dass Bilder des gleichen Objekts, die auf der rechten und der linken Retina abgebildet werden, zusammen in denselben Hirnregionen verarbeitet werden.

Die Axone der Zellen des Corpus geniculatum laterale bilden die Sehstrahlung (Radiatio optica) und projizieren zum visuellen Kortex, der auch als V1, Streifenkortex oder Area 17 bezeichnet wird. Die zwei wichtigsten Bahnen für visuelle Informationen im Gehirn von Säugetieren sind die Projektionen von der Retina über den Corpus geniculatum laterale zum visuellen Kortex und die von der Retina zum Colliculi superiores. Zwischen beiden Bahnen bestehen Verbindungen. Beim Menschen muss die erste Bahn vorhanden sein, damit eine bewusste Erfahrung des Gesehenen möglich ist. Menschen mit Schädigungen des visuellen Kortex berichten über vollständige Blindheit in Teilen oder dem gesamten visuellen Feld. Jedoch sind sie auch dann in der Lage, Objekte zu lokalisieren oder zu identifizieren, die sie jedoch nicht bewusst wahrnehmen können (Weiskrantz, 1986). Die zwei Bahnen funktionieren im gesunden Gehirn nicht unabhängig voneinander, beispielsweise gibt es eine Verbindung vom visuellen Kortex zum Colliculi superiores. Im Folgenden werden die Stationen visueller Verarbeitung im Gehirn ausführlicher dargestellt.

2.2.1 Corpus geniculatum laterale

Der Corpus geniculatum laterale besteht aus 6 Zellschichten, wobei jeweils 3 Schichten Zuflüsse von einem Auge und die anderen 3 Schichten Zuflüsse des anderen Auges erhalten. Jede Schicht bildet das kontralaterale visuelle Feld ab und alle 6 Abbildungen sind in präzise Register ausgerichtet. Da die Signalverarbeitung jeweils dreier Schichten im Wesentlichen durch das eine Auge bestimmt wird und die Interaktion zwischen den sich entsprechenden, aber jeweils kontralateralen Schichten auffallend gering ist, findet im Corpus geniculatum laterale noch keine binokulare Verarbeitung visueller Signale statt.

Die Zellen der unteren zwei Schichten sind größer und werden als magnozelluläre, die Zellen der oberen vier sind kleiner und werden als parvozelluläre Schichten bezeichnet. Die meisten retinalen Ganglienzellen vom M-Typ projizieren zu den magnozellulären

Schichten, der Rest zum Colliculi superiores. Hingegen projizieren alle Ganglienzellen vom P-Typ zu den parvozellulären Schichten (Leventhal, Rodieck & Dreher, 1981).

Die rezeptiven Felder der Zellen des Corpus geniculatum laterale sind im Allgemeinen ähnlich wie die der retinalen Ganglienzellen, die sie ausbilden (z.B. Derrington & Lennie, 1984). Die Ähnlichkeit zwischen den rezeptiven Feldern der retinalen Ganglienzellen und der Zellen des Corpus geniculatum laterale legt nahe, dass im Corpus geniculatum laterale die visuellen Informationen wenig gefiltert werden und er quasi als Übertragungsstation zwischen Retina und visuellem Kortex dient. Allerdings existieren auch Verbindungen zwischen dem visuellen Kortex und dem Corpus geniculatum laterale, sowie auch zwischen dem Corpus geniculatum laterale und dem Hirnstamm (Kaplan, Mukherjee & Shapley, 1993). Aufgrund der Feedback-Verbindungen zwischen dem visuellen Kortex und dem Corpus geniculatum laterale wird die Annahme einer reinen Übertragungsfunktion in Frage gestellt. Der Corpus geniculatum laterale scheint eher den Informationsfluss zu regulieren (Casagrande & Norton, 1991; Humphrey & Saul, 1994).

Die Forschung zum Corpus geniculatum laterale befasst sich hauptsächlich mit der Trennung zwischen den magnozellanen und parvozellulären Bahnen, die von der Retina bis zum visuellen Kortex bestehen soll. Eine einflussreiche Theorie wurde von Livingstone und Hubel (1988) vorangetrieben. Sie postulierten, die M- und P-Zellen seien die erste Station einer Zweiteilung der Funktionen, die sich weiter durch das visuelle System fortziehe. Danach werden die M-Zellen als erste Station eines Systems angesehen, welches Informationen der optischen Umgebung hinsichtlich der groben räumlichen Anordnungen und der Bewegungen extrahiert. Die P-Zellen hingegen sollen Informationen über Farben und die feine räumliche Strukturen extrahieren. Die Theorie basiert zum einen auf den Eigenschaften der rezeptiven Felder der Zellen des Corpus geniculatum laterale, besonders auf den farb-antagonistischen Eigenschaften der P-Zellen und der hohen Kontrastsensitivität der M-Zellen, zum anderen auf Experimenten mit Menschen, in denen visuelle Muster im Hinblick auf die Farbe nicht aber die Leuchtdichte variiert wurden. Dabei stellte sich heraus, dass es schwierig ist, Bewegungen und räumliche Strukturen bei geringer Leuchtdichte wahrzunehmen. Wird angenommen, die Leuchtdichte stimuliere nur die P-Zellen, unterstützen solche Befunde

die Theorie von Livingstone und Hubel. Jedoch gibt es wegen dieser Annahme eine Kontroverse (Schiller & Logothetis, 1990).

Ein anderer Zugang für die Untersuchung von M- und P-Zellen besteht darin, dass Läsionen der Schichten des Corpus geniculatum laterale bei Primaten vorgenommen werden und anschließend verschiedene visuelle Tests durchgeführt werden. Dies führte zu einem anderen Bild der rezeptiven Feldeigenschaften im Corpus geniculatum laterale. Schiller, Logothetis und Charles (1990) fanden bei Primaten mit einer Läsion der P-Schicht Defizite in Aufgaben, bei denen die Reize im betroffenen Teil des visuellen Feldes dargeboten wurden, einschließlich der Farbe, Textur und feinen räumlichen Struktur. Entgegen der Theorie von Livingstone und Hubel (1988) führte die Läsion der M-Schichten nicht zu Defiziten bei der Diskriminierung großflächiger, räumlicher Strukturen. Diese Aufgaben konnten ausgeführt werden, auch wenn nur die P-Schichten intakt waren. Hingegen verringerte sich die Fähigkeit, Bewegungen in einem komplexen Display zu entdecken und einen schnell flackernden Reiz von einem nicht bewegten zu unterscheiden (Merigan & Maunsell, 1993). Zudem zeigte sich, dass Läsionen der M-Schichten nicht die gesamte Bewegungswahrnehmung beeinträchtigten, sondern nur die Erkennbarkeit sich bewegendere Reize verminderten (Merigan, Byrne & Maunsell, 1991).

Weitere wichtige Befunde waren, dass sich die Schwelle für das Entdecken von Kontrast durch Läsionen der P-, nicht aber der M-Schichten beeinflussen lässt (Merigan, Katz & Maunsell, 1991; Schiller et al., 1990). Dies ist überraschend, da einzelne M-Zellen eine höhere Kontrastsensitivität als P-Zellen aufweisen. Hier verdeutlicht sich das Risiko, das darin besteht, von den Reaktionen einzelner Zellen auf das visuelle System als Ganzes zu schließen. Da die P-Zellen achtmal häufiger als M-Zellen je Gebietseinheit vorkommen, ist es möglich, dass die P-Zellen insgesamt eine größere Kontrastsensitivität als die M-Zellen aufweisen, trotz der geringeren Sensitivität der Einzelzelle.

Insgesamt zeigen die Läsionsstudien, dass der Anteil der parvozellulären Bahn auf die visuelle Kontrolle des Verhaltens größer ist und der Beitrag der magnozellanulären Bahn geringer ist, als dies die Theorie von Livingstone und Hubel (1988) postuliert. Die meisten visuellen Aufgaben lassen sich mit kleinen Defiziten ausführen, wenn die parvozellulären Schichten intakt sind. Die M-Zellen scheinen aber eine besondere Rolle für die Übertragung von Informationen über schnelle Bewegungen zu haben.

Die Identifizierung psychologisch unterscheidbarer visueller Funktionen des magno- und parvozellulären Bahnen ist schwierig, denn einige Informationen werden entlang beider Bahnen übermittelt. Die Funktionen der magnozellanulären und parvozellulären Bahnen werden besser hinsichtlich der Häufigkeitscharakteristika zeitlicher und räumlicher visueller Reizmuster, die sie übermitteln, beschrieben (z.B. van Essen, Anderson & Felleman, 1992). Entsprechend wird die parvozelluläre Bahn als ein Übertragungskanal für Informationen über die Muster des Lichtes aller räumlichen Frequenzen, aber nur bei niedrigen bis mittleren zeitlichen Frequenzen, angesehen. Die magnozellanuläre Bahn wirkt bei der Übertragung im Bereich hoher zeitlicher und niedriger räumlicher Frequenzen mit (Derrington & Lennie, 1984; Merigan & Maunsell, 1993). Zusätzlich dient die parvozelluläre Bahn der Übermittlung von Informationen über Kontraste der Leuchtdichte bei hohen räumlichen Frequenzen und über Wellenlängen (chromatische Kontraste) bei niedrigen räumlichen Frequenzen.

2.2.2 Der visuelle Kortex

Die Axone des Corpus geniculatum laterale verlaufen über die Sehstrahlung bis zum visuellen Kortex (vergleiche Abschnitt 2.2). Wie die anderen Bereiche des Neokortex besteht der visuelle Kortex aus einer stark gefalteten Schicht von Nervenzellen von etwa 2 mm Dicke. Da man im Schnitt Streifen unterschiedlicher Dicke erkennt, wird er auch als Streifenkortex bezeichnet. Unter dem visuellen Kortex befindet sich eine Schicht weiße Substanz, die aus Axonen besteht, die den visuellen Kortex mit anderen Gebieten des Kortex, mit dem Corpus geniculatum laterale und weiteren subkortikalen Strukturen verbinden. Die Axone der Corpus geniculatum laterale Zellen enden an Synapsen der kortikalen Zellen, die in sechs Schichten aufgebaut sind. Jedoch befinden sich die meisten der zahlreichen Verbindungen in der Schicht IVc, wo die P- und M-Zellen jeweils in getrennten Unterschichten enden, sowie in der Schicht II und III, wo die Zellen der Zwischenschicht enden. Die kortikalen Zellen bilden ein komplexes Netzwerk, in dem die Fasern vertikal zwischen Schichten und horizontal innerhalb der Schichten verlaufen (Lund, 1988). Sowohl die Anzahl unterschiedlicher Zellarten als auch die Komplexität der Verbindungen zwischen ihnen sind viel größer als in der Retina.

Erste Ableitungen einzelner Zellen des visuellen Kortex wurden bei Katzen (Hubel & Wiesel, 1959; Hubel & Wiesel, 1962) und später bei Primaten (Hubel & Wiesel, 1968)

durchgeführt. Einige Zellen, einschließlich aller in Schicht IVc, haben konzentrische Felder ähnlich denen im Corpus geniculatum laterale. Andere Zellen weisen unterschiedlichste Arten rezeptiver Feldorganisationen auf, beispielsweise liegen verlängerte erregende und hemmende Flächen benachbart und parallel zueinander. In einigen Zellen gibt es nur excitatorische und inhibitorische Flächen, während in anderen drei oder mehr parallel antagonistische Flächen vorhanden sind. Hubel und Wiesel (1968) klassifizierten diese Zellen als einfache (simple) Zellen. Da die einfachen Zellen eine lineare räumliche Addition der Lichtintensität in ihren rezeptiven Feldern durchführen, sind sie sensitiv auf den Kontrast und die Position eines Reizes.

Die verlängerte Form der rezeptiven Felder der Zellen im visuellen Kortex führt zu einer Eigenschaft, die in der Retina und im Corpus geniculatum laterale fehlt: Sie reagieren am besten auf eine besondere Ausrichtung eines Balkens oder einer Kante. Diese Orientierungspräferenz ist eng begrenzt. Schon das Drehen eines Reizes um 20° kann eine dramatische Reduzierung der Feuerungsrate bewirken. Einfache Zellen weisen eine Reihe weiterer Eigenschaften auf: Einige einfache Zellen sind selektiv auf die Wellenlänge (Thorell, De Valois & Albrecht, 1984). Manche verfügen über farb-antagonistische Eigenschaften, wie die P-Zellen des Corpus geniculatum laterale. Andere weisen komplexere Eigenschaften auf, wie duale farb-antagonistische Eigenschaften, bei denen unterschiedliche Regionen des rezeptiven Feldes gegenteilige Reaktionen auf eine Farbe zeigen (Livingstone & Hubel, 1984; Michael, 1978; Michael, 1981; T'so & Gilbert, 1988). Einfache Zellen reagieren schwach auf dauerhafte Reizung und zeigen auf bewegte Muster richtungsselektive Reaktionen. Einige einfache Zellen weisen eine End-Inhibierung auf. Das heißt, sie reagieren stärker auf kurze Balken oder Ecken, die innerhalb des rezeptiven Feldes liegen.

Die komplexen Zellen des visuellen Kortex weisen einige Gemeinsamkeiten mit einfachen Zellen auf, wie beispielsweise die Orientierungspräferenz und in variierendem Ausmaß Wellenlängenselektivität, Richtungsselektivität und End-Inhibierung. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass das rezeptive Feld nicht in hemmende oder erregende Bereiche aufgeteilt werden kann. Ein geeigneter Reiz ruft eine Reaktion hervor, gleichgültig in welchem Bereich des rezeptiven Feldes er sich befindet. Einfache und komplexe Zellen werden mittels eines einfachen Tests diskriminiert: Zieht man ein Gitter

über die rezeptiven Felder, reagieren die einfachen Zellen abwechselnd hoch und niedrig, die komplexen Zellen hingegen die ganze Zeit auf hohem Niveau (De Valois, Albrecht & Thorell, 1982).

Die komplexen Zellen und die M-Zellen des Corpus geniculatum laterale verfügen nicht über ein einfaches Verbindungsmuster. Die Mehrzahl der komplexen Zellen weist Zuflüsse von M- und P-Zellen oder von P-Zellen allein auf (Malpeli, Schiller & Colby, 1981).

2.2.2.1 Funktionelle Architektur im visuellen Kortex

Der visuelle Kortex besteht aus Schichten, die parallel zur Oberflächen liegen. In diesen Schichten weisen die Zellen unterschiedliche Eigenschaften auf. Zusätzlich ist der visuelle Kortex in einer erstaunlich präzisen und regelmäßigen Art und Weise in Spalten organisiert, die sich im rechten Winkel zu seiner Oberfläche befinden. Diesen Aufbau bezeichnet Hubel und Wiesel (1962) als funktionelle Architektur des visuellen Kortex. Im Folgenden werden die vier wichtigsten Merkmale dieser funktionellen Architektur beschrieben.

Das erste und grundlegende Merkmal der funktionellen Architektur ist die geordnete, *retinotope Anordnung* der visuellen Welt auf der Oberfläche des Kortex. Diese Anordnung ist genauso wie in den Schichten des Corpus geniculatum laterale. Die linken und rechten Hälften des visuellen Feldes werden auf die entsprechende rechte oder linke Hirnhälfte abgebildet. Diese Abbildung ist metrisch nicht exakt, da die kortikalen Areale, die dem zentralen Teil des visuellen Feldes zuzuordnen sind, proportional viel größer sind als die Peripherie des visuellen Feldes. Dies ist im Wesentlichen eine Folge der größeren Dichte retinaler Ganglienzellen in den zentralen Bereichen der Retina. Genau wie in der Retina sind die rezeptiven Felder der kortikalen Zellen im Zentrum des visuellen Feldes kleiner als in der Peripherie.

In der Schicht IVc im visuellen Kortex, in der die meisten Axone des Corpus geniculatum laterale enden, reagieren die Zellen auf einen Reiz, der in nur einem Auge dargeboten wird, ebenso wie die Zellen im Corpus geniculatum laterale. In anderen Schichten haben die Zellen binokulare Felder, das heißt, sie reagieren auf ihren optimalen Reiz, wenn er in beide Augen projiziert wird. Trotzdem reagieren sie stärker auf Reize in

einem Auge als in dem anderen, was als *okuläre Dominanz* bezeichnet wird und das zweite Merkmal der funktionalen Architektur des visuellen Kortex ist. Die Zellen mit gleicher okulärer Dominanz sind in Säulen gruppiert und bilden im visuellen Kortex ein sich abwechselndes Muster von rechts- und linksäugigen Säulen. Trotz des hohen Anteils an Überschneidungen rezeptiver Felder nahegelegener kortikaler Zellen impliziert die Anordnung der okulären Dominanzsäulen nicht, dass veränderte Ausschnitte des visuellen Raumes im Kortex durch Einflüsse nur eines Auges repräsentiert sind.

Das dritte Merkmal wurde durch das Einfärben des visuellen Kortex entdeckt, um das Niveau des Enzyms Cytochrom Oxidase (CO) zu bestimmen, das Zellen mit hoher metabolischer Aktivität kennzeichnet. Dabei zeigten sich regelmäßige Bereiche in Tropfenform mit viel CO-Aktivität, am deutlichsten in der Schicht II und III und fehlend in Schicht IV. Die Zellen der Tropfen-Regionen (*blob-region*) und Zwischen-Tropfen-Regionen (*inter-blob-region*) weisen biochemische Unterschiede auf (siehe Edwards, Purpura & Kaplan, 1995). Horton und Hubel (1981) beobachteten, dass die Tropfen in einer geraden Linie entlang der okulären Dominanzsäulen angeordnet sind. Bislang ist unklar, ob die Zellen der Tropfen- und Zwischen-Tropfen-Region unterschiedliche Aufgaben bei der Verarbeitung visueller Informationen erfüllen. Livingstone und Hubel (1988) postulierten, dass sich die Trennung der P- und M-Bahnen des Corpus geniculatum laterale im visuellen Kortex fortsetze. Dabei sollen die Tropfen-Zellen Teil der Bahn sein, die Farbinformationen verarbeitet, während die Zwischen-Tropfen-Region Informationen über räumliche Strukturen und Bewegungen verarbeite.

Die Befunde für dieses Modell sind nicht eindeutig, denn die anatomischen Verbindungen sind weniger spezifisch als das Modell postuliert. Die P-Zellen weisen Verbindungen zu Tropfen- und Zwischen-Tropfen-Zellen auf, während die Zuflüsse der M-Zellen auf die Tropfen konzentriert sind (Edwards et al., 1995). Auch die Daten aus Einzelzelleitungen sprechen nur teilweise für das Modell: Livingstone und Hubel (1984) berichteten, dass die Tropfen-Zellen selektiv auf Wellenlänge, nicht aber Orientierung seien, während die Zwischen-Tropfen-Zellen gegensätzliche Eigenschaften aufweisen. Keine Unterschiede hinsichtlich der Wellenlängenselektivität fanden Lennie, Krauskopf und Sclar (1990). Ein Problem der Unterscheidung der Tropfen und Zwischen-Tropfen-Regionen ist, dass die Grenzen zwischen ihnen nicht scharf sind.

Sowohl die Biochemie der Zellen als auch ihre Reaktion auf visuelle Reize, variiert nur leicht zwischen den Bereichen (Edwards et al., 1995).

Ein viertes Merkmal der funktionalen Architektur entsteht, wenn die Orientierungspräferenz der Zellen mit ihren räumlichen Positionen in Verbindung gebracht wird. Hubel und Wiesel (1974) und Hubel und Wiesel (1977) fanden bei Einzelzelleitungen, dass sich die Orientierungspräferenz der Zellen systematisch und linear auf dem visuellen Kortex in einer Entfernung von 0.5 bis 1 mm verändert. So weisen die Zellen über eine bestimmte Entfernung eine Orientierungspräferenz auf, die systematisch und schrittweise im Uhrzeigersinn verläuft und sich in einer Entfernung von 1 mm entgegen dem Uhrzeigersinn verändert. Da man auch Diskontinuitäten in dieser Abfolge und sogar Regionen ohne Orientierungspräferenz findet, nahmen Hubel und Wiesel an, orientierungsselektive Zellen seien in Säulen (slabs) organisiert. In den Säulen sollen alle Zellen die gleiche bevorzugte Orientierung aufweisen und angrenzende Säulen sollen angrenzende Orientierungen repräsentieren. Die Orientierungssäulen sollen im rechten Winkel zu den okulären Dominanzsäulen stehen.

Es ist natürlich nicht unproblematisch, eine vollständige zweidimensionale Karte der Orientierungspräferenz aus den eindimensionalen Proben mit Mikroelektroden abzuleiten. Überzeugender sind die Untersuchungen von Blasdel (1992), die mittels optischer Methoden die Aktivierungsmuster, die als Reaktionen auf Gitter mit verschiedenen Ausrichtungen gegeben wurden, über bestimmten Regionen des Gehirns von Primaten fotografierten. Durch die getrennte Darbietung von Reizen für das linke und rechte Auge konnte das Muster der Orientierungspräferenz mit der Struktur der okulären Dominanzsäulen verbunden werden (Obermayer & Blasdel, 1993).

2.2.2.2 Räumliches Filtern im visuellen Kortex

Im visuellen Kortex erfolgt eine komplexe Transformation der Zuflüsse des Corpus geniculatum laterale. Die Funktionen der Verarbeitung des visuellen Kortex sind sehr schwierig. Die bisher verfügbaren Antworten können als vorläufig und unvollständig angesehen werden.

Nach Barlow (1972) generiert der visuelle Kortex eine Repräsentation der visuellen Welt, die sich begrifflich mit Merkmalen der Objekte, wie z.B. Balken und Ecken, fassen

lässt. Die einfachen und komplexen Zellen dienen als Merkmalsdetektoren und jede Zelle signalisiert die Anwesenheit eines spezifischen geometrischen Merkmals durch Impulsfeuerung. Ein Problem dieses Modells ist, dass die Entdeckung geometrischer Merkmale in natürlichen Objekten viel schwieriger ist als zunächst angenommen. Zudem wird die Feuerungsrate der einfachen und komplexen Zellen durch viele Parameter des raumzeitlichen Lichtmusters, einschließlich beispielsweise Kontrast, Orientierung, Wellenlänge und Bewegung, bestimmt. Daher ist die Feuerungsrate einer Zelle allein kein geeigneter Parameter für die Anwesenheit eines *bestimmten* Merkmals, wie z.B. einer Ecke.

Es wurde die Ansicht vertreten, die Zellen im visuellen Kortex agierten als *Filter* für multiple Dimensionen eines Bildes, das auf ihre rezeptiven Felder fällt (van Essen et al., 1992). Ein Filteraspekt, nämlich die Rolle des visuellen Kortex beim Filtern räumlicher Muster, wird hier als ein Beispiel dargestellt. Die retinalen Ganglienzellen reagieren auf einen sinus-förmigen Reiz über einen weiten Bereich räumlicher Frequenzen. Diese Reaktion fällt nach einem hoch-frequenten Cut-Off steil ab, der durch die Größe des Zentrums des rezeptiven Feldes bestimmt wird, aber bei niedrigen Frequenzen, wegen der relativen Schwäche der umgebenden Komponenten, aufrechterhalten bleibt. Die retinalen Ganglienzellen reagieren somit auf einen geeigneten Reiz über einen breiten Bereich räumlicher Frequenzen. Dieser Bereich kann über die Bandbreite der Zelle als das Verhältnis der Frequenzen, bei denen die Hälfte der maximalen Kontrastsensitivität beobachtet wird, bestimmt werden und wird als 'Oktave' bezeichnet. Die Bandbreite der Zellen des Corpus geniculatum laterale liegt beispielsweise bei 5 Oktaven oder mehr. Die Zellen im visuellen Kortex haben eine engere Bandbreite, im Durchschnitt 1.5 Oktaven. Sie gelten somit als Bandpass-Filter, der auf eine besondere räumliche Frequenzen eingestellt ist. Jedoch variieren die Zellen des visuellen Kortex hinsichtlich der räumlichen Frequenzeinstellung (De Valois et al., 1982). Die räumliche Frequenzeinstellung einer Zelle ist sowohl durch die Größe als auch durch die Anzahl der rezeptiven Feldbereiche bestimmt.

Entsprechend könnte der visuelle Kortex so organisiert sein, dass räumliche Lichtmuster in jeder von vielen kleinen Regionen oder Flickern des retinalen Bildes im Hinblick auf die räumlichen Frequenzkomponenten analysiert werden. Wenn diese Annahme richtig ist, dann liefert die Feuerungsrate einer Zelle eine Messung der Amplitude der

Frequenzkomponente, auf die diese Zelle eingestellt ist, nämlich auf ihre bevorzugte Orientierung. Die Tatsache, dass es Zellen mit allen Kombinationen räumlicher Frequenz und Orientierungseinstellung gibt, unterstützt das Modell, der visuelle Kortex führe eine flickenmäßige Fourier-Analyse des retinalen Abbildes durch. Dabei wird jeder Flicker durch einen kleinen Block kortikalen Gewebes transformiert, der Zellen mit überlappenden rezeptiven Feldern und einen breiten Bereich von Frequenz- und Orientierungseinstellungen enthält (De Valois & De Valois, 1990; Robson, 1983).

Nach der Theorie stellen die einfachen Zellen ein Untersystem dar, in dem die Phasen der räumlichen Frequenzkomponenten enkodiert werden, während die komplexen Zellen ein paralleles Untersystem repräsentieren, in dem absolute Phaseninformationen zugunsten relativer Phaseninformationen aufgegeben werden. In Abschnitt 2.2.2 wurden die Eigenschaften der einfachen Zellen beschrieben: Nur einfache Zellen weisen rezeptive Felder mit erregenden und hemmenden Unterregionen auf. Die Informationen, die einfache Zellen liefern, könnten in Aufgaben wie der exakten Lokalisation von Objekten benutzt werden und die Informationen der komplexen Zellen beispielsweise für die Unterscheidung verschiedener Oberflächenmuster.

Es gibt Hinweise, dass die Blöcke kortikalen Gewebes, die jeden Flicker des Abbildes transformieren, möglicherweise auf die CO-Tropfen zentriert sind. Denn die Zellen im Bereich der Tropfen sind auf niedrige räumliche Frequenzen eingestellt, während die Zellen im Bereich zwischen den Tropfen auf einen weiten Bereich von Frequenzen eingestellt sind (Born & Tootell, 1991; Edwards et al., 1995; Tootell, Silverman, Hamilton, Switkes & De Valois, 1988). Da hohe Korrelationen zwischen der CO-Dichte und räumlicher Frequenzpräferenz bestehen (Silverman, Grosf, De Valois & Elfar, 1989), scheint sich bei der Bewegung von Tropfen- zu Zwischen-Tropfen-Regionen die bevorzugte räumliche Frequenz der Zellen systematisch zu erhöhen. Möglicherweise sind die Tropfen das Zentrum der Kortex-Blöcke, die dazu dienen, eine Fourier Transformation der kleinen Flicker des retinalen Abbildes zu repräsentieren (De Valois & De Valois, 1990).

Jones und Palmer (1987) zeigten, dass sich die rezeptiven Felder der einfachen Zellen sehr gut als Gabor-Funktion beschreiben lassen, obschon auch andere Funktionen verwendet werden können. Die Gabor-Funktion bietet den Vorteil, dass den rezeptiven

Feldern einfacher Zellen eine Balance zwischen den gegensätzlichen Bedürfnissen nach der Kodierung räumlicher Frequenzen und der Kodierung räumlicher Lokalisation ermöglicht wird. Denn um perfekt lokalisationspezifisch zu sein, müsste das rezeptive Feld die Größe eines einzelnen Rezeptors haben, für optimale Frequenzspezifität müsste es hingegen wesentlich größer sein (vergleiche Shapley & Lennie, 1985).

Nach Field (1987) stellt die 1.5 Oktaven Bandbreite der Zellen des visuellen Kortex möglicherweise eine effiziente visuelle Kodierungsstrategie dar. Diese wertet statistische Redundanzen natürlicher Abbilder aus und optimiert den Weg, in dem die Informationen des Abbildes über einen Bereich von Filtern aufgeteilt werden, die auf unterschiedliche Frequenzen eingestellt sind. Dennoch, das Verständnis der Bedeutung der flickenmäßigen Fourier-Transformation bleibt unvollständig. Neben dem Filtern räumlicher Frequenzen agieren einfache und komplexe Zellen ebenfalls als Filter für andere Variablen, wie Farbe, Bewegung und Tiefe. Demnach kann der visuelle Kortex als ein *unspezialisierter, multidimensionaler Filter* angesehen werden, der parallele Zuflüsse für eine Vielzahl von Filtern liefern kann, von denen jeder auf bestimmte Reizeigenschaften spezialisiert ist.

2.2.3 Hinter dem visuellen Kortex

In viele Regionen des Kortex, die den visuellen Kortex umgeben, finden sich Neurone, die auf visuelle Zuflüsse reagieren. Einige dieser extrastriären Areas können deutlich markiert werden, da sie retinotop Mappen der visuellen Felder beinhalten, ähnlich denen im visuellen Kortex. Andere beinhalten teilweise oder unordentliche Mappen oder beides, wodurch die Identifikation einiger Areale und ihrer Grenzen sehr schwierig ist (van Essen, 1985). Somit kann keine endgültige Liste aufgestellt werden. Bei Primaten sind über 30 visuelle Areale identifiziert, die räumlich einen großen Teil des okzipitalen, temporalen und parietalen Kortex einnehmen. Aufgrund der Faltung des Kortex, liegen nicht alle Areas auf der Oberfläche.

Zwischen den visuellen Areas besteht kein einfaches Verbindungsmuster im Sinne einer Aneinanderreihung von einer Area bis zur nächsten. Jede Area weist Verbindungen zu verschiedenen anderen auf und die meisten dieser Verbindungen sind reziproker Natur. Insgesamt gibt es mehr als 300 Projektionen zwischen extrastriären Areas und fast alle

können gemäß der kortikalen Schichten, denen sie entspringen oder in denen sie enden, als aszendente oder deszendente Verbindungen zum visuellen Kortex klassifiziert werden. Nach einer entsprechenden Klassifikation lassen sich die visuellen Areas in ein hierarchisches Schema organisieren, in dem sie auf unterschiedliche Stufen entsprechend ihrer Entfernung von V1 platziert werden (Maunsell & Newsome, 1987). Die meist hierarchische Anordnung der visuellen Areas entspricht jedoch nicht unbedingt einem hierarchischen Operationsmodus.

Einige Befunde sprechen dafür, dass sich die extrastriären Areas hinter Area V2 in zwei Hauptbahnen aufteilen: Die *dorsale Bahn* erstreckt sich über V2, V3, V3A zu den mitteltemporalen Area MT (oder V5) und von dort zur medialsuperior-temporalen Area MST und schließlich zu Area 7A im Parietallappen. Hingegen zieht sich die *ventrale Bahn* von V2 über V4 zu den posterioren und anterioren inferotemporalen Areas, PIT und AIT, des Temporallappens hin. Diese Teilung ist jedoch nicht eindeutig, denn zwischen beiden Bahnen bestehen Überschneidungen und Verbindungen. Außerdem passen einige visuelle Areas nicht in das Schema. Trotzdem gibt es für die Trennung Belege aus verschiedenen Quellen: Baizer, Ungerleider und Desimone (1991) verfolgten die Verbindungen vom posterioren parietalen Kortex und vom inferioren temporalen Kortex zurück und fanden eine strenge Trennung der zwei Bahnen in unterschiedlichen Teilen des extrastriären Kortex. Young (1992) analysierte die Verbundenheit extrastriärer Areas mathematisch, was ebenfalls die Teilung in zwei Systeme nahelegt.

Die innere Struktur von V1 und V2 ermöglicht es, die Aufteilung in zwei Bahnen nach V1 zurück zu verfolgen. In der Area V2 findet sich ein anderes Muster von Cytochrom Oxidase Aktivität als in V1. Während sich in V1 die Tropfen befinden, befinden sich in V2 Streifen. Dabei wechseln sich dunkle Streifen mit viel CO-Aktivität mit blassen Streifen ab. Die dunklen Streifen sind abwechselnd dick und dünn. Von V1-Tropfen- und Zwischen-Tropfen-Zellen teilen sich die Verbindungen nach V2 auf und zwar zu den Bereichen mit dünnen Streifen und den Zwischenstreifen (Livingstone & Hubel, 1983), während die dicken Streifen in V2 Zuflüsse aus der Schicht IVb in V1 erhalten. Die dünnen Streifen und Zwischenstreifen aus V2 haben Verbindungen nach V4, während die dicken Streifen Verbindungen mit der Area MT aufweisen (DeYoe & van Essen, 1985). Diese Verbindungsstruktur von V1 über V2 zu weiteren Areas zeigt, dass die Aufteilung

in die dorsale und ventrale Bahn in V1 ihren Ausgang nimmt, obwohl sich Querverbindungen in V1 und V2 zwischen den Bahnen auffinden lassen, wie auch zwischen den weiteren extrastriären Areas. Livingstone und Hubel (1988) argumentierten sogar, die dorsale und ventrale Bahn sei eine direkte Fortführung der subkortikalen magnozellulären und parvozellulären Bahnen. Dieses Modell zweier Bahnen der visuellen Verarbeitung von der Retina und bis zum extrastriären Kortex war einflussreich, ist aber aus mehreren Gründen zu einfach. Erstens laufen die magno- und parvozelluläre Bahn in V1 zusammen (vergleiche Abschnitt 2.2.2.1). Zweitens führt das Blocken von M- und P-Schichten im Corpus geniculatum laterale zu einer Reduzierung der Zellaktivität in V4. Dies dürfte nach dem Modell nur eine Folge des Blockens der P-Schicht sein (Livingstone & Hubel, 1988).

Andererseits gibt es Hinweise, dass der dorsale Weg weitgehend durch das magnozelluläre System versorgt wird. Blockt man die M-Schichten, führt das zu einer größeren Reduktion der Aktivität in Area MT als das Blocken der P-Schichten (Maunsell, Nealey & DePrist, 1990). Einen Überblick über die Beziehung zwischen subkortikalen und kortikalen Bahnen geben Merigan und Maunsell (1993). Somit besitzt der visuelle Kortex nicht einfach zwei unabhängige Leitungen für visuelle Informationen, sondern kombiniert und reorganisiert die Zuflüsse der magno- und parvozellulären Bahnen, was die Aufteilung in die dorsale und ventrale Bahn zur Folge hat.

2.2.3.1 Getrennte funktionale Bahnen im extrastriären Kortex

Ungerleider und Mishkin (1982) schlugen vor, dass die visuellen Funktionen auf einem hohen Niveau unabhängig durch zwei getrennte kortikale Systeme übertragen werden. Ein System im Parietallappen ist verantwortlich für das Extrahieren von Informationen über die räumliche Anordnung der Umgebung und über Bewegungen. Ein zweites System im Temporallappen extrahiert Informationen über die Form, Farbe und Identität eines Objektes. Vereinfacht dargestellt, soll das parietale System dafür verantwortlich sein, wo ein Objekt ist und das temporale, was für ein Objekt es ist. Untersuchungen zu dieser Trennung werden im Folgenden dargestellt.

Haxby et al. (1991) führten eine Studie mit der Positron-Emissions-Tomographie (PET) durch. Dabei verwendeten sie eine räumliche Aufgabe und eine Gesichtspassungsaufgabe. Beide Aufgaben führten zu erhöhter Aktivität im

Okzipitallappen. Die Gesichtspassungsaufgabe bedingte erhöhte temporale Aktivität, die räumliche Aufgabe erhöhte parietale Aktivität. Ähnliche Ergebnisse erzielten Zeki et al. (1991).

Bei der Untersuchung von Primaten zeigte sich, dass die Verbindungen zwischen den extrastriären Areas konsistent mit der Theorie sind. Bei der dorsalen Bahn erhalten die Areas im Parietalkortex Zuflüsse aus früheren extrastriären Areas (wie V2), in denen Zellen die peripheren Regionen des visuellen Feldes repräsentieren, während die Zuflüsse der ventralen Bahn in den inferotemporalen Kortex aus Regionen kommen, die das Zentrum des visuellen Feldes repräsentieren (Baizer et al., 1991). Dies legt nahe, dass die ventrale Bahn Informationen während der Fixierung von Objekten analysiert, während die dorsale Bahn Informationen über großflächige Bewegungen in der Peripherie des visuellen Feldes analysiert.

Newsome und Paré (1988) führten Läsionen der Area MT (dorsale Bahn) durch und fanden spezifische Defizite bei der Bewegungswahrnehmung, während die Fähigkeit zur Unterscheidung von Mustern nicht betroffen war. Eine Läsion in V4 (ventrale Bahn) verminderte die Fähigkeit, Farb- und Musterunterscheidungen zu lernen (Heywood & Cowey, 1987). Andere Befunde sprechen für eine komplexere Rolle der Area V4: Schiller und Lee (1991) trainierten Primaten, den Blick auf ein abweichendes Element in einem Display zu richten. Nach der Läsion von V4 wurde die Ausführung schlechter, jedoch nur, wenn das abweichende Element weniger auffallend als die anderen war. Dieses Ergebnis zeigte sich nicht nur bei Größen- und Helligkeitsaufgaben, sondern auch für eine Bewegungsaufgabe. Somit spielt die Area V4 möglicherweise eine wesentliche Rolle bei der Kontrolle von Aufmerksamkeitsstrategien und dient nicht nur als eine Stufe bei der Verarbeitung von Farb- und Forminformationen. Unterstützung für diese Ansicht findet sich bei Baizer et al. (1991): Demnach werden in Area V4 Verbindungen des temporalen und parietalen Kortex gemischt. Diese Befunde lassen sich kaum in die Theorie zweier Bahnen des visuellen Systems integrieren.

Der Mangel an Läsionsstudien, die direkt V4- und MT-läsionierte Tiere bei denselben Aufgaben vergleichen, lässt keine sicheren Aussagen zu. Jedoch sprechen mehr Befunde für die dorsale Bahn und die Area MT als spezialisierte Verarbeitungsorte für visuelle Informationen als für die ventrale Bahn und Area V4. Salzman, Murasugi, Britten und Newsome (1992) setzten unterschiedliche Untersuchungsmethoden ein und kamen zu

dem Ergebnis, dass die Area MT auf Bewegungswahrnehmung spezialisiert ist. Sie trainierten Primaten, die Richtung zu unterscheiden, in die sich eine Gruppe von Punkten bewegte. Dabei wurde die Aufgabenschwierigkeit variiert, indem diese Punkte mit andern gemischt wurden, die sich in zufällige Richtungen bewegten. Der Bildschirm wurde so gestellt, dass das retinale Abbild auf die rezeptiven Felder einer Gruppe von benachbarten Zellen der Area MT fiel, die die gleiche Präferenz für die Bewegungsrichtung haben. Während einiger Durchgänge wurden diese Zellen elektrisch stimuliert, was einen deutlichen Verhaltenseffekt zur Folge hatte: Die Reaktionswahrscheinlichkeit erhöhte sich, wenn die Bewegung in die bevorzugte Richtung ging. Somit scheint die Bewegungswahrnehmung in eine spezifische Richtung verändert worden zu sein.

Die Reaktionen einzelner Zellen in den verschiedenen extrastriären Gebieten liefern weitere Informationen über funktionale Unterschiede. Die Zellen in V1 agieren als multidimensionaler Filter, der auf viele unterschiedliche Reizparameter selektiv ist. Wenn der dorsale und ventrale extrastriäre Weg getrennte Funktionen aufweisen, sollten die einzelnen Zellen auf weniger Reizdimensionen und in den verschiedenen Areas auf unterschiedliche Reizdimensionen selektiv sein. Für V2 gibt es Belege für derartige Differenzierungen. Die Zellen, die auf Wellenlänge selektiv sind, befinden sich eher in den dünnen Streifen oder in den Zwischenstreifen, hingegen befinden sich orientierungsselektive Zellen eher in den dicken Streifen. Da dies nur die relative Anzahl betrifft und sich alle Zellarten in allen Regionen finden lassen, wurde diese Ansicht kritisiert (DeYoe & van Essen, 1985).

Auch in den späteren Stadien der extrastriären Areas sind die Zellen multidimensional. In Area MT (Malonek, Tootell & Grinvald, 1994) und in Area V4 (Desimone & Schein, 1987) sind die Zellen auf Orientierung und die meisten anderen Reizparameter selektiv, auf die auch die V1-Zellen selektiv sind. Es gibt Unterschiede in der relativen Anzahl der verschiedenen Zellreaktionen. Zum Beispiel findet man in V4 seltener Richtungsselektivität als in MT, während das Gegenteil für die Wellenlänge zutrifft (Zeki, 1978). Trotzdem ist unklar, welche funktionale Bedeutung diese Unterschiede im Verhältnis der verschiedenen Zelleigenschaften haben.

2.2.3.2 Hierarchische Verarbeitung in extrastriären Bahnen

Deutliche Belege für die funktionale Spezialisierung der extrastriären Areas ergaben sich nicht durch die Untersuchung spezifischer Beschränkungen in Reizdimensionen, auf die die Zellen selektiv sind, sondern durch die Erhöhung der Komplexität der betroffenen Dimensionen. Zeigt sich, dass eine extrastriäre Area auf komplexe Reizeigenschaften selektiver ist als Area V1, spricht dies für eine hierarchische Verarbeitung visueller Informationen.

Die Zellen in Area MT und MST sind beispielsweise auf komplexere Eigenschaften von Bewegung selektiv als nur auf die Richtung. Somit scheint die dorsale Bahn auf die Bewegungsverarbeitung spezialisiert zu sein.

Für eine Spezialisierung der ventralen Bahn auf Objektidentifikation spricht, dass die Zellen sukzessiv weniger selektiv auf die räumliche Lokalisation eines Reizes sind. In Area V4 sind die rezeptiven Felder 30-mal größer als in V1, die in Area AIT sogar 100-mal größer. Die rezeptiven Felder der Zellen der Area IT dehnen sich oft über das rechte und linke visuelle Feld aus und schließen immer die Region der Fovea mit ein. Die ventrale Bahn scheint auf die Objektidentifikation spezialisiert zu sein, ohne Informationen über die Position eines Reizes im visuellen Feld zu enkodieren.

Zwei weitere Eigenschaften der Zellen in Area V4 und Area IT wurden intensiv erforscht und liefern weitere Belege für hierarchisches Verarbeiten von Farb- und Forminformationen: Zeki (1980) zeigte, dass die Zellen in Area V4 eine größere Selektivität auf Wellenlänge haben als in V1 und die bevorzugten Wellenlängen ein breiteres Spektrum umfassen. Somit finden in Area V4 mehr Farbanalysen statt als in V1. De Monasterio und Schein (1982) kritisierten diese Ansicht, da die retinalen Ganglienzellen die gleiche Selektivität und Präferenz für Wellenlänge aufweisen wie die Zellen in Area V4.

Nach Zeki (1980) sollen einige V4-Zellen Farbkonstanz aufweisen (vergleiche Mollon, 1982). Es zeigte sich, dass die Farbwahrnehmung von einer Art Vergleich zwischen der spektralen Zusammensetzung eines Bildpunktes und des Lichtes der Umgebung abhängt. Zeki (1980) fand, dass einige Zellen in V4 auf eine besondere Farbe der Oberfläche selektiv sind. Die Zellreaktion bleibt auch dann erhalten, wenn sich die spektrale Zusammensetzung des Lichtes, das die Oberfläche illuminiert, ändert. Somit kann sich die spektrale Lichtzusammensetzung verändern, aber die Zellreaktion und die

Wahrnehmung des Beobachters bleiben konstant. Nach Zeki (1983) sollen die Zellen in V1 keine Farbkonstanz aufweisen, sondern alle auf Wellenlänge selektiv sein. Jacobs (1986) kritisierte diese Befunde, da die Experimente nicht berücksichtigen, dass die rezeptiven Felder in V1 wesentlich kleiner sind.

Trotzdem zeigen die Befunde von Zeki, dass Prozesse entweder in V1 oder zwischen V1 und V4 stattfinden, welche die wellenlängen-selektiven Reaktionen in Reaktionen umwandeln, die auf abstraktere Eigenschaften der wahrgenommenen Farbe empfänglich sind. Desimone und Schein (1987) nehmen an, die großen unterdrückenden Felder der V4-Zellen seien für die Farbkonstanz wichtig. Eine Reizung der Umgebung allein führt zu keiner Zellreaktion. Jedoch wird die Reaktion auf eine Farb- oder Musterreizung im Feldzentrum unterdrückt, wenn die gleiche Reizung in der Umgebung dargeboten wird. Möglicherweise ist dies ein Teil des Mechanismus, der für Farbkonstanz notwendig ist.

Weitere Befunde zur hierarchischen Verarbeitung in der ventralen Bahn zeigten, dass einige Zellen der inferotemporalen Areas (-IT) selektiv auf sehr elaborierte geometrische Formen sind. Durch eine systematische Vereinfachung von Formreizen bis die Zellreaktion verschwindet, konnte Tanaka (1993) sogenannte Minimum-Formen identifizieren. Zellen, die auf ähnliche Formen selektiv sind, sollen in Spalten in Area IT gruppiert sein.

Ein anderer Untersuchungsansatz verwendete komplexe, natürliche Bilder als Reize und bestimmte, welche Variationen in den Bildern die Zellreaktion verändern. Perrett, Rolls und Caan (1982) fanden bei 10% einer Probe von Zellen der Area IT eine Vorliebe für Gesichter (von Menschen oder Primaten). Diese reagierten 2-mal so stark auf Gesichter wie auf viele andere einfache oder komplexe Reize. Die Zellreaktion wurde nicht durch Variationen der Farbe, des Abstands etc. verändert, jedoch dann, wenn das Gesicht im Profil dargeboten wurde. Diese Zellen sind auch selektiv auf räumliche Konfigurationen von Gesichtsmerkmalen. Perrett et al. (1986) zeigten, dass einige Zellen selektiv auf die Gesichtsidentität sind, da sie am besten auf bestimmte Gesichter oder auf eine Ansicht, von der das Gesicht dargeboten wird, reagierten. Daher besteht kaum Zweifel, dass die Zellen der Area IT auf abstraktere Eigenschaften selektiv sind als die V1-Zellen und in der ventralen extrastriären Bahn eine hierarchische Verarbeitung stattfindet.

Ob diese Zellen als Gesichtsdetektoren in einer Art funktionieren, wie sie nach Barlow (1972) auf höherem Niveau der visuellen Bahnen möglich ist, ist jedoch fraglich. Danach

müsste ein Primat jeden Primaten, den er kennt, in einer einzelnen Zelle repräsentiert haben und die Reaktion dieser Zelle müsste die Gegenwart dieses Primaten signalisieren. Gegen diese Annahme sprechen zwei Argumente: Erstens erregt ein Gesicht viele Zellen und zweitens wird die gleiche Zelle durch mehr als ein Gesicht erregt und ist somit nicht auf ein besonderes Gesicht spezialisiert. Obwohl einige Zellen deutlicher zwischen Gesichtern unterscheiden als andere (Baylis, Rolls & Leonard, 1985), gibt es keine Zelle, die nur auf ein Gesicht reagiert.

Somit erfolgt das Wiedererkennen eines Gesichtes nicht durch eine einzelne Zelle, sondern durch ein spezifisches Muster von Aktivität in einer Zellpopulation. Weitere Untersuchungen zeigten, dass eine relativ kleine Zellpopulation der Area IT ausreichend sein kann, um ein Muster an Aktivität zu erzeugen, das eine einzigartige Kodierung für ein besonderes Gesicht zulässt (Young & Yamane, 1992). Eine Beschreibung des Konzepts der Populationskodierung und entsprechender theoretischer Modelle, nach denen die Rekognition von komplexen Objekten auf die verteilte Aktivierung von vielen einfachen Einheiten basieren, findet sich bei Bruce, Green und Georgeson (1995).

2.2.4 Offene Fragen zur visuellen Informationsverarbeitung im Gehirn

Die bisherigen Ausführungen zeigten, dass trotz beachtlicher Forschungsanstrengungen zum Teil sehr unterschiedliche Ansichten über grundlegende Aspekte visueller Informationsverarbeitung im Gehirn existieren, z.B. über die Funktion magno- und parvozellulärer Bahnen und das Ausmaß paralleler Verarbeitung in den visuellen Bahnen.

Abschließend werden einige Befunde vorgestellt, die verdeutlichen, dass auch sehr grundlegende Ansichten über die Funktionsweise der visuellen Bahnen im Gehirn noch nicht vollständig aufgeklärt sind. Das betrifft die Fragen, wie einzelne Zellen des visuellen Systems Informationen kodieren (Abschnitt 2.2.4.1), welche Rolle dynamische Zellverbände bei der visuellen Informationsübermittlung und -verarbeitung spielen (Abschnitt 2.2.4.2) und welche Funktionen die Feedback-Verbindungen zwischen den visuellen Areas erfüllen (Abschnitt 2.2.4.3).

2.2.4.1 Wie kodieren einzelne Zellen Informationen?

Im Allgemeinen wird angenommen, die Eigenschaften der räumlich-zeitlichen Lichtreize, die jedes Auge erreichen, werde in der Aktivität einzelner Zellen kodiert. Diese Aktivität

könne als die mittlere Feuerungsrate von Impulsen innerhalb kurzer Zeitperioden, im Bereich von 100stel ms, gemessen werden. Die Funktion einer einzelnen Zelle kann dann über die Messung ihrer durchschnittlichen Feuerungsrate bestimmt werden.

Neuere Befunde warfen jedoch die Frage auf, ob nicht das zeitliche Muster der Feuerungsimpulse ebenfalls eine Rolle spielt. Denn bei Katzen sollen die Zellen in Area 17 eine Feuerungsrate aufweisen, die mit einem Rhythmus zwischen 40 und 60 Hz oszilliert; dieser Rhythmus soll für die Kodierung visueller Informationen wichtig sein. Gray, König, Engel und Singer (1989) fanden, dass der Feuerungsrhythmus synchroner ist, je näher die rezeptiven Felder zueinander liegen und je ähnlicher ihre Orientierungspräferenz ist. Sie zeichneten den Feuerungsrhythmus von zwei Zellen mit gleicher Orientierungspräferenz und mit kollinearen rezeptiven Feldern auf. Wurden die benachbarten Zellen mit Balken stimuliert, die sich in entgegengesetzte Richtung bewegten, zeigte sich keine Synchronisation. Wurden die benachbarten Zellen mit Balken stimuliert, die sich in die gleiche Richtung bewegten, zeigte sich eine schwache Synchronisation. Bei der Stimulierung mit einem Balken, der über beide Zellen ausgedehnt war und in eine Richtung bewegt wurde, zeigte sich eine starke Synchronisation. Hierbei ist bemerkenswert, dass das Lichtmuster innerhalb der rezeptiven Felder bei den letzten beiden Bedingungen völlig identisch war.

Der Synchronisationsrhythmus der Feuerung von Zellen in unterschiedlichen Orten im Kortex kann dazu dienen, großflächige Lichtmuster weiterzugeben, wenn diese Lichtmuster größer als die rezeptiven Felder einzelner Zellen sind. Damit erklärt sich auch ein anderes Merkmal visueller Wahrnehmung, denn das visuelle System gruppiert in einem Muster, das aus kleinen Elementen besteht, schnellstens und 'automatisch' die Elemente mit ähnlichen Eigenschaften zusammen und trennt so Objekte von ihrem Hintergrund. Dieses Phänomen wird als Pop-out-Effekt bezeichnet (z.B. Treisman & Southern, 1985). Möglicherweise lässt sich mit Hilfe des Synchronisationsrhythmus dieser Effekt des visuellen Systems klären.

Tononi, Sporns und Edelman (1992) stellten ein Modell der kortikalen Verarbeitung visueller Informationen auf. Im Modell wirken Signale innerhalb und zwischen verschiedenen extrastriären Areas, um die Verarbeitung ungleicher Aspekte eines Abbildes, wie Farbe, Form, Bewegung zu synchronisieren und zusammenzubinden. Dadurch formt sich ein kohärentes Perzept. Hinweise auf entsprechende Vorgänge

fanden Bressler, Coppola und Nakamura (1993), die eine ansteigende Kohärenz zwischen der Aktivität im Streifen- und Motorkortex in spezifischen Phasen bei der Durchführung einer Diskriminationsaufgabe beobachten konnten.

Das Konzept des Synchronisationsrhythmus wurde kritisiert, denn die Befunde von Gray et al. (1989) wurden beim Primaten nicht repliziert (Bair, Koch, Newsome & Britten, 1994). Auch die statistische Basis der Befunde ist kritisiert worden (Young, Tanaka & Yamane, 1992). Die weitere Forschung muss zeigen, welche Rolle der Synchronisationsrhythmus für die Verarbeitung visueller Informationen spielt.

2.2.4.2 Welche Rolle spielen dynamische Zellverbände bei der visuellen Informationsübermittlung und -verarbeitung?

Aufgrund der Existenz relativ kleiner, stabiler und klar definierter rezeptiver Felder nahm man an, die Aktivität einzelner Zellen kodiere die räumlichen Charakteristika der Lichtreize, außer in IT und anderen höheren extrastriären Areas. Der Befund, dass kortikale Aktivität auch durch nicht-rezeptive Feldinformationen beeinflusst ist (Gray et al., 1989), führte zu der Frage, ob die rezeptiven Felder tatsächlich so stabil und klar definiert sind. Eine Reihe von Experimenten spricht dagegen: Wird zu einem Balken, der auf ein rezeptives Feld projiziert wird, ein zweiter Balken in die Umgebung eingeblendet, tritt eine Erhöhung oder Verminderung der Zellaktivität oder eine Veränderung der Orientierungspräferenz auf (Gilbert & Wiesel, 1990). Dieser Effekt tritt auf, ohne dass die alleinige Darbietung des zweiten Balkens irgendeinen Effekt hat. Der Befund von Gilbert und Wiesel (1990) ähnelt dem der unterdrückenden Umgebung der V4-Zellen (Desimone & Schein, 1987).

Möglicherweise werden diese Effekte durch langreichende horizontale Verbindungen innerhalb des visuellen Kortex verursacht, die sich weiter als das rezeptive Feld ausdehnen und spezielle Zellen ähnlicher okulärer Dominanz und Orientierungspräferenz verbinden (Malach, Amir, Harel & Grinvald, 1993). Interaktionen zwischen den Zellen über diese Verbindungen können großflächige Verbände (assemblies) kortikaler Zellen entstehen lassen oder sich in kontinuierlich verändernde Erregungsmuster umwandeln. Grinvald, Lieke, Frostig und Hildesheim (1994) zeigten mit Hilfe von Visualisierungsmethoden, dass die Stimulation durch ein bewegtes Gitter mit einer Größe $(1^\circ)^2$ in der Area V1 innerhalb von 200 ms eine sich ausbreitende neuronale Aktivität zur

Folge hat, die viel größer ist, als man für das rezeptive Feld erwarten würde. Diese neuronalen Verbindungen sind für konventionelle Einzelzelleitungen nicht sichtbar.

Gilbert und Wiesel (1992) blockierten den Zufluss vom Corpus geniculatum laterale zu einer kleinen Region des visuellen Kortex und fanden, dass die rezeptiven Felder der Umgebung des betroffenen Gebietes unmittelbar größer wurden. Da sich diese Veränderung innerhalb von Minuten ereignete, konnte sie keine Folge neu gewachsener Verbindungen sein. Diese Ergebnisse legen nahe, dass kortikale rezeptive Felder keine stabilen Eigenschaften aufweisen, sondern sich durch dynamische Interaktionen zwischen Zellen über weite Regionen verändern und ausdehnen.

Ob sich die Zellverbände in visuellen Areas durch Synchronisation der Feuerungsrhythmen oder durch andere Mechanismen ausbilden und lösen, ist unklar. Trotzdem ist es sehr wahrscheinlich, dass sie bei der Analyse großflächiger Lichtreize beteiligt sind. Dies zeigte sich auch beim Test orientierungsselektiver Zellen mit verlängerten Balken. Diese Balken wiesen an der Stelle des rezeptiven Feldes eine Lücke auf. Das heißt, die Balken waren nur auf jeder Seite außerhalb des rezeptiven Feldes präsent. Sowohl in V1 (Grosf, Shapley & Hawken, 1993) als auch in V2 (von der Heydt, Peterhans & Baumgartner, 1994) reagieren die Zellen, als sei der Balken durch das rezeptive Feld gezogen worden. Dieser Effekt wird mit dem Phänomen der illusorischen Konturen in Verbindung gebracht. Die schnelle Formation eines Zellverbandes aktiver Zellen mit gleicher Orientierungspräferenz über eine weite Kortexregion kann dieses Phänomen möglicherweise erklären.

2.2.4.3 Welche Funktionen haben die Feedback-Verbindungen zwischen visuellen Areas?

Die bisherigen Ausführungen sehen die verschiedenen visuellen Bahnen zwischen der Retina und den extrastriären Areas höherer Ordnung als Einbahnstraßen. In diesen werden über nervliche Aktivität eine Reihe von Transformationen der Lichtreize durchgeführt, wobei die Aktivitätsmuster jeder Stufe durch die vorhergehende bestimmt werden. Außerdem wird dabei angenommen, man könne die visuellen Bahnen als getrenntes Modul des Gehirns betrachten, das unabhängig arbeitet, um eine oder verschiedene Repräsentationen der umgebenden Welt zu ermöglichen.

Kritisch an dieser Ansicht ist, dass hinter dem Corpus geniculatum laterale nahezu alle Verbindungen zwischen visuellen Areas mit reziproken Feedback-Verbindungen gemischt sind. Die Feedback-Verbindung zwischen V1 und dem Corpus geniculatum laterale funktioniert in positiver Art und Weise, indem der Ertrag der Zellreaktionen des Corpus geniculatum laterale erhöht und das System bei besonderen räumlichen Lichtreizen 'eingelocked' gehalten wird. Sillito, Jones, Gerstein und West (1994) fanden, dass die Korrelation der Reaktionen von Zellpaaren des Corpus geniculatum laterale größer war, wenn sie durch ein Gitter stimuliert wurden, das über zwei rezeptive Felder ausgedehnt war als durch zwei einzelne Reize, auch wenn das Lichtmuster in beiden Zellen identisch war. Dieser Effekt verschwand, wenn das Feedback von Area V1 geblockt wurde. Somit kann das Feedback der Area V1 die Aktivität der Zellen des Corpus geniculatum laterale ankurbeln, die ihrerseits wieder die Zellen in V1 antreiben und somit die Reaktion in der Area V1 verstärken.

Wäre dies ein allgemeingültiges Funktionsprinzip aller Feedback-Verbindungen, dann wäre das Verarbeitungskonzept des visuellen Systems als Einbahnstraße nicht ernsthaft beeinträchtigt. Durch die Zellreaktionen in jeder Stufe können neue Bedingungen geschaffen werden, wobei es die Rolle des Feedbacks ist, diese Reaktionen zu verstärken oder zu modulieren.

Es gibt Hinweise, dass die Feedback-Verbindungen auch andere Effekte haben können als dieses Modell zulässt. Mignard und Malpeli (1991) zeigten, dass die Orientierungspräferenz der Zellen in Schicht 2 und 3 der Area V1 nicht durch das Blocken der Zuflüsse des Corpus geniculatum laterale beeinflusst wird, sondern dass die Verbindungen der Area V2 für das Aufrechterhalten der Reaktionen verantwortlich waren. Wenn aber die Orientierungsselektivität durch Zuflüsse vom Corpus geniculatum laterale oder von der Area V2 verändert werden kann, dann stellt sich die Frage, warum das eine als „feedforward“ und das andere als „feedback“ beschrieben wird.

Es gibt ältere Befunde, die die Area V1 nicht als ausschließlichen Ort der kortikalen visuellen Bahnen ansehen. Die Reaktion vieler einfacher und komplexer Zellen in Area 17 der Katze werden durch nicht-visuelle Reize beeinflusst, einschließlich der Lokalisation einer Geräuschquelle (Fishman & Michael, 1973) oder des Neigungswinkels des Tierkörpers (Horn & Hill, 1969). Die Selektivität für auditive und vestibuläre Reize kann nicht auf den Zuflüssen des Corpus geniculatum laterale basieren.

Weitere wichtige Befunde ergaben sich bei Einzelzellableitungen in der Area V4 und IT, während Primaten visuelle Aufgaben durchführten. Wenn die ventrale, extrastriäre Bahn sequentiell arbeitet, um einen Lichtreiz auf der Retina in irgendeine abstrakte Repräsentation der Identität der Objekte im visuellen Feld zu transformieren, dann erwartet man nicht, dass der verhaltensmäßige Zustand des Tieres, neben Kopf- und Augenbewegungen, die Zellreaktionen beeinflusst. Tatsächlich wurden deutliche Effekte dieser Art gefunden. Moran und Desimone (1985) untersuchten, ob sich die Reaktion der Zellen in Area V4 durch Veränderungen des Aufmerksamkeitszustands der Tiere beeinflussen lässt. Für jede Zelle wurden zunächst die Grenzen der rezeptiven Felder und die Reize, auf welche die Zellen reagieren, bestimmt. Sodann wurden ein effektiver und ein nicht-effektiver Reiz zusammen dargeboten, jedoch an unterschiedlichen Orten innerhalb des rezeptiven Feldes. Wurde der Primat zuvor trainiert, den Ort des effektiven Reizes zu beachten, um eine Belohnung zu erhalten, reagierten die Zellen stark. Wurde der Primat trainiert, den Ort des nicht effektiven Reizes zu beachten, war die Reaktion viel schwächer, auch wenn der Lichtreiz im rezeptiven Feld identisch war. Fast die Hälfte der Zellen in V4 zeigen diese Form der Aufmerksamkeitskontrolle.

In der Area AIT weisen viele Zellen Eigenschaften auf, die nahelegen, dass sie in Gedächtnisprozesse eingebunden sind. Miller, Li und Desimone (1993) gaben Primaten Aufgaben, bei denen der Teil eines Bildes in die sehr großen rezeptiven Felder der Zellen der Area AIT geblitzt wurden. Nach einer Pause wurde das gleiche Teilbild ergänzt mit einem anderen Teil dargeboten. Die richtige Reaktion der Primaten war es, den Blick dem Bild zuzuwenden, das zum Teilbild passte. Während der Pause testeten Miller et al. (1993) die Reaktionen der Zellen auf verschiedene Bilder. Bei ungefähr der Hälfte der getesteten Zellen war die Antwort, die normalerweise auf Bilder beobachtet wird, unterdrückt, wenn das Bild das Teilbild war. Mit andern Worten, die Reaktionen waren nicht nur von den tatsächlichen visuellen Reizen bestimmt, sondern auch dadurch, dass das Teilbild nicht in diesem Kontext erwartet wurde.

Viele weitere Befunde verdeutlichen Aufmerksamkeits- und Gedächtniseffekte der ventralen Bahn. Ein Überblick über diese Befunde gibt Desimone und Duncan (1995). Sie postulieren, dass die extrastriären Bahnen nicht unabhängig von anderen Prozessen im Gehirn funktionieren, um eine Repräsentation der visuellen Welt zu ermöglichen. Die Verarbeitungsschritte der extrastriären Bahnen werden im Anschluss an ganz frühe

Stadien sehr stark durch Prozesse beeinflusst, die für Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Verhaltensorganisation verantwortlich sind. Diese Einflüsse basieren teilweise auf den Feedback-Verbindungen zwischen den extrastriären Areas. Es gibt viele Befunde, dass die Erwartungen und das Wissen eines Betrachters seine Wahrnehmung beeinflusst. Somit müssen Interaktionen zwischen diesen Informationen und den visuellen Informationen, die von der Retina in das Gehirn gelangen, irgendwo im Gehirn möglich sein.

2.2.5 Schlussfolgerung

Dieser Abschnitt gab einen Überblick über gegenwärtige Kenntnisse der Strukturen und Funktionen der Gehirnregionen, die an der Analyse der Lichtreize beteiligt sind. Die Organisation einiger visueller Areas ist bekannt, beispielsweise die der Area V1, obwohl einige Befunde überraschend sind, wie die dynamischen Eigenschaften rezeptiver Felder. Trotz extensiver Forschung in diesem Bereich sind die allgemeinen Prinzipien, nach denen die extrastriären visuellen Bahnen organisiert sind, weiterhin mysteriös. Denn obwohl es Befunde gibt, die dafür sprechen, dass verschiedene Eigenschaften des sich verändernden retinalen Abbilds zum Teil unabhängig und parallel analysiert werden, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die visuellen Bahnen wie sequentielle Stadien organisiert sind, die zu irgendeiner abstrakten, zentralen Repräsentation der visuellen Welt führen. Andererseits existiert bislang kein befriedigendes Modell, welches dieses Modell ersetzen kann. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es bislang kein vollständiges Verständnis der visuellen Informationsverarbeitung gibt. Insbesondere der Prozesse, die in den visuellen Bahnen des Gehirns bis zu dem Zeitpunkt stattfinden, an dem eine subjektive Empfindung eines visuellen Reizes beim Menschen erfolgt.

Zudem wurden die meisten Untersuchungen zur visuellen Informationsverarbeitung im Gehirn aus ethischen Gründen beim Primaten durchgeführt. Selbst bei höher entwickelten Primaten unterscheidet sich aber die Signalverarbeitung optischer Informationen wesentlich von derjenigen des Menschen. Als ein Beispiel seien hier die visuell-konstruktiven Fähigkeiten des Menschen genannt, die im Hinblick auf die Komplexität der Verarbeitung visueller Reize innerhalb des Gehirns weit über das hinausgehen, was je mittels experimenteller Tierforschung zu erfassen ist.

Andererseits zeigt sich jedoch schon auf dem Niveau des Primatengehirns, dass wesentliche Teile des Neokortex an der Verarbeitung visueller Reize beteiligt sind: Mittlerweile sind über 32 extrastriäre visuellen Areas beim Primaten bekannt. Es ist nachgewiesen, dass etwa 60% der Kortexoberfläche am Sehen beteiligt sind (DeYoe & van Essen, 1988; Felleman & van Essen, 1991; Maunsell & Newsome, 1987; van Essen et al., 1992). Sind neben der reinen visuellen Informationsverarbeitung weitere Aufgaben zu bewältigen, wie beispielsweise die Lösung einer bestimmten Informationsverarbeitungsaufgabe mit anschließender Reaktion, wie sie in den hier vorgestellten empirischen Arbeiten durchgeführt wurden, scheint der Einsatz der EKP-Methode als Untersuchungsinstrument zur Bestimmung von Korrelaten visueller Informationsverarbeitung beim Menschen bestens geeignet. Da qualitativ und quantitativ wesentliche Teile des Neokortex an der Verarbeitung visueller Informationen beteiligt sind, bietet sich der Einsatz der EKP-Methode an, denn die EKPs können als Aufzeichnung der Aktivität des Neokortex angesehen werden, wie der Abschnitt 3.2 aufzeigt. Anders formuliert, fände die Verarbeitung visueller Reize in einem umschriebenen Areal des Kortex statt, hätte eine andere Untersuchungsmethode gewählt werden müssen, nämlich eine, die eine eindeutigere Lokalisation im Kortex ermöglicht, wie dies zum Beispiel mit Hilfe der sogenannten bildgebenden Verfahren möglich ist.

Zunächst werden im folgenden Abschnitt 2.3 die physiologischen Grundlagen der Augenbewegung dargestellt. Denn obwohl die Messung von EKPs auf visuelle Reize eine Methode ist, um Korrelate der visuellen Informationsverarbeitung zu bestimmen, tritt dabei immer ein Problem auf: Die Darbietung visueller Reize, die einen größeren visuellen Winkel als 1° haben, führt unweigerlich zu Augenbewegungen und stellt für die EKP-Registrierung ein großes Problem dar, wie in Abschnitt 3.5 erläutert wird. Der folgende Abschnitt gibt daher einen Überblick über die Physiologie von Augenbewegungen.

2.3 Augenbewegungen

Die folgende Darstellung beschreibt die physiologischen Grundlagen von Augenbewegungen. Abschnitt 2.3.1 führt zunächst in die anatomischen Grundlagen der Augenbewegung ein. Dann beschreibt Abschnitt 2.3.2, dass die Augenmuskeln durch drei Nerven innerviert werden. Der Kontrolle von Augenbewegung widmet sich der Abschnitt 2.3.3, wobei anschließend die Zentren für die Kontrolle von Augenbewegung

im Hirnstamm (Abschnitt 2.3.4) und kortikalen Zentren für die Kontrolle von Augenbewegungen (Abschnitt 2.3.5) aufgezeigt werden. Im letzten Abschnitt 2.3.6 wird das EOG als Methode für die Aufzeichnung von Augenbewegungen dargestellt.

2.3.1 Anatomische Grundlagen von Augenbewegungen

Der Augapfel ist in einer ihn umgebenden, weichen, aber stramm sitzenden Gelenkkapsel gelagert. Es gibt eine Öffnung für den Eintritt des Lichts und eine Öffnung für den Austritt des Sehnervs. Der Augapfel ist in der Kapsel nach allen Richtungen frei beweglich. Ausgeführt werden die Augenbewegungen über die koordinierte Aktivität von sechs Muskeln, dem Musculus obliquus superior, Musculus rectus lateralis, Musculus rectus superior, Musculus rectus medialis, Musculus rectus inferior und Musculus obliquus inferior. Diese sechs Muskeln werden durch drei Hirnnerven innerviert, den Nervus trochlearis, den Nervus abducens und den Nervus oculomotorius, deren Kerne im medialen Anteil des pontinen und mesenzephalen Tegmentums liegen (siehe Abschnitt 2.3.2). Ein vollständiges Bild der neuronalen Mechanismen der Kontrolle der Augenbewegungen gibt es bis heute nicht (unter anderem Nieuwenhuys, Voogd & van Huijzen, 1991). Abschnitt 2.3.3 beschreibt einige relativ abgesicherten Neuronensysteme.

Der Nervus abducens, trochlearis und oculomotorius versorgen die äußeren Augenmuskeln mit somatischen efferenten Fasern. Zusätzlich führen vom Nervus oculomotorius viscerale efferente (parasympathische) Fasern zu den glatten, inneren Augenmuskeln. Durch die Bewegung des Auges stellen die äußeren Muskeln sicher, dass die Bilder auf den zentralen Teil der Retina fallen, während die inneren Augenmuskeln die Menge an Licht kontrollieren, die in die Retina fällt und die Krümmung der Linse so einstellen, dass das retinale Bild immer im Fokus ist. Die meisten dieser Aufgaben werden reflektorisch ausgeführt und für gewöhnlich werden Augenposition, Lichteinfall und Linsenkrümmung simultan kontrolliert.

2.3.1.1 Horizontale, vertikale und rotatorische Bewegungen der Augen

Das Auge kann in jeder Richtung um sein Zentrum frei rotieren. Die rotierenden Bewegungen des Auges werden mit Hilfe von drei Achsen beschrieben, die durch das Zentrum laufen und im rechten Winkel zueinander angeordnet sind. Vereinfacht werden die Bewegungen so beschrieben, als fänden sie in drei Ebenen statt, einer frontalen, einer

sagittalen und einer transversalen oder horizontalen Ebene. Eine Bewegung in der horizontalen Ebene findet um die vertikale Achse statt und der vordere Teil des Auges - und somit der Blick - wandert von einer Seite zur anderen Seite. Bei horizontalen Augenbewegungen wird also zur Seite geblickt. Blickt man zur rechten Seite, rotiert das linke Auge seitlich und das rechte Auge zur Mitte. Eine Bewegung in der sagittalen Ebene findet um die transversale Achse statt und der vordere Teil des Auges bewegt sich hoch und runter, d.h. es finden vertikale Augenbewegungen statt. Bewegungen in der frontalen Ebene finden um die sagittale Ebene statt und das Auge rotiert Bewegungen. Aus praktischen Gründen wird diese Bewegung als rotatorisch oder cyto-rotatorisch bezeichnet, denn tatsächlich sind alle Augenbewegungen Rotationen um das Zentrum des Augapfels (Brodal, 1992).

Die sechs äußeren Augenmuskeln stellen sicher, dass die optischen Achsen der Augen präzise auf jeden Punkt im visuellen Feld gerichtet werden können. Die Bewegungen der Augenmuskeln produzieren vertikale, horizontale und rotatorische Bewegungen. Vereinfacht produzieren zwei der Muskeln, der Musculus rectus lateralis und der Musculus rectus medialis, hauptsächlich horizontale Bewegungen, zwei der Muskeln, Musculus rectus superior und Musculus rectus inferior, hauptsächlich vertikale Bewegungen und zwei der Muskeln, Musculus obliquus superior und Musculus obliquus inferior, hauptsächlich rotatorische Bewegungen.

2.3.1.2 Augenmuskeln ermöglichen eine präzise Kontrolle

Die Struktur der äußeren Augenmuskeln spiegelt ihre Verwendung in äußerst präzisen Augenbewegungen wider. Die Muskelfasern sind sehr dünn im Vergleich zu gewöhnlicher Skelettmuskulatur und die Bewegungseinheiten sind mit nur 5-10 Muskelfasern pro Motoneuron die kleinsten des Körpers. Entsprechend beinhalten die Nerven zu den äußeren Augenmuskeln viele Nervenfasern: Beim Menschen enthält der Nervus abducens, der nur einen Muskel versorgt, 6000 Axone. Die äußeren Augenmuskeln bestehen aus einer Mischung von Fasern für schnelle und langsame Kontraktionen, da die Muskeln sowohl eine bestimmte Spannung über eine lange Zeit halten müssen, als auch extrem schnelle Augenbewegungen ausführen müssen. Im Vergleich zu anderen Skelettmuskelfasern ist die Kontraktionsgeschwindigkeit sehr hoch. Die maximale Feuerungsfrequenz von Motoneuronen, welche die äußeren Augenmuskeln innervieren, ist ungewöhnlich hoch und tritt auf, wenn Sakkaden ausgeführt werden.

EMG Aufzeichnungen wacher Probanden mit offenen Augen zeigen, dass in allen Augenmuskeln zu jeder Zeit eine gewisse Aktivität vorhanden ist. Die Spannung, die durch jeden Muskel produziert wird, variiert mit der Position des Auges.

Auffällig ist die hohe Dichte von Muskelspindeln in den äußeren Augenmuskeln. Abgesehen von der allgemeinen Regel, dass in Muskeln, die präzise Kontrolle ausüben müssen, eine hohe Dichte an Muskelspindeln vorhanden ist, ist ihre funktionelle Rolle im Fall der äußeren Augenmuskeln unklar (Brodal, 1992). Denn die Signale von den äußeren Augenmuskelspindeln sind offensichtlich nicht bewusst wahrnehmbar, das heißt, sie tragen nicht zur Bewusstheit der Augenposition und -bewegungen bei. In dieser Hinsicht unterscheiden sie sich von den Muskelspindeln an anderen Stellen im Körper. Außerdem evozieren die Signale der Augenmuskelspindeln keinen Dehnungsreflex. Nach Brodal (1992) scheint es wahrscheinlich, dass die Muskelspindel signale Informationen über die Länge und die Veränderung der Länge der äußeren Augenmuskeln liefern. Diese Informationen können dann mit Signalen, die Informationen über die Bewegungen des Kopfes durch das Labyrinth geben und mit Signalen der Retina integriert werden. Die Signale der Retina informieren darüber, ob ein Bild stationär ist oder über die Retina gleitet.

2.3.1.3 Augenbewegungen sind konjugiert

Alle natürlichen Augenbewegungen sind eine Kombination der verschiedenen Bewegungen, die oben beschrieben wurden. Die meisten natürlichen Augenbewegungen sind *konjugiert*. Die zwei Augen bewegen sich gemeinsam, um sicherzustellen, dass das Bild immer auf die korrespondierenden Punkte der zwei Retinas fällt. Doppelbilder entstehen, wenn die Augenbewegungen nicht konjugiert erfolgen. Dies ist ein typisches Symptom von Paresen der äußeren Augenmuskeln, die am häufigsten durch Läsionen eines Nerven zu den Augenmuskeln verursacht werden. Andere typische Symptome von Paresen sind Schielen, Schwindel und eine veränderte Position des Kopfes, um das Sehen von Doppelbildern zu vermeiden.

Fast alle Augenbewegungen erfordern eine komplizierte Kooperation von verschiedenen Muskeln, mit Aktivierungen und Hemmungen. Schaut man beispielsweise nach links, wird der linke Musculus rectus lateralis aktiviert und der linke Musculus rectus medialis gehemmt, der rechte Musculus rectus medialis wird aktiviert und der rechte Musculus

rectus lateralis gehemmt. Dies ist das einfachste mögliche Beispiel einer rein horizontalen Bewegung. In den meisten Situationen ist die Kooperation zwischen verschiedenen Muskeln sehr viel komplizierter, und deren Kontrolle erfordert ein ausgedehntes neuronales Netzwerk.

2.3.2 Die drei Nerven der Augenmuskeln

Die Augenmuskeln werden durch drei Nerven innerviert, deren Kerne im medialen Anteil des pontinen und mesenzephalen Tegmentums liegen. Der *Nervus abducens* versorgt nur einen Muskel, den Musculus rectus lateralis. Dieser Muskel bewirkt laterale Bewegungen des Auges. Auch durch den Musculus obliquus superior und Musculus obliquus inferior kann das Auge etwas seitlich bewegt werden. Für große seitliche Bewegungen ist der Musculus rectus lateralis notwendig. Eine Person mit einer unilateralen Läsion des Nervus abducens hält den Kopf zur Läsionsseite gedreht, um den Verlust der lateralen Bewegung des Auges zu kompensieren. Der *Nervus trochlearis* innerviert den Musculus obliquus superior, der den Blick nach unten und seitlich richtet.

Der *Nervus oculomotorius* ist der größte der drei Nerven, die die äußeren Augenmuskeln versorgen und beinhaltet somatisch und visceral efferente Fasern. Die *somatisch efferenten Fasern* gehen vom großen Nucleus nervi oculomotorii aus, der nahe der Mittellinie im Mesencephalon liegt. Die Fasciculus longitudinalis medialis mit absteigenden Fasern vom Nucleus vestibularis liegt nahe dem Nucleus nervi oculomotorii, dem Nucleus nervi abducentis und dem Nucleus nervi trochlearis. Die visceralen efferenten Fasern (parasymphatische) Fasern kommen von dem kleinen Nuclei Edinger-Westphal, der in der Nähe des Nucleus nervi oculomotorii liegt. Für die somatischen und visceralen efferenten Kerne wird der Begriff okulomotorischer Komplex verwendet (Brodal, 1992).

Die somatisch efferenten Fasern des Nervus oculomotorius innervieren die folgenden äußeren Augenmuskeln: Musculus rectus inferior, Musculus rectus superior, Musculus rectus medialis und den Musculus obliquus inferior. Diese Muskeln bewegen das Auge auf und ab und drehen es um die sagittale Achse. Zusätzlich innerviert der Nervus oculomotorius den Musculus levator palpebrae superiores, der dazu dient, das obere Augenlid zu heben.

Die visceralen efferenten Fasern des Nervus oculomotorius enden in dem kleinen Ganglion ciliaris, das hinter dem Auge platziert ist. Die Fasern bilden Synapsen mit den postganglionären Neuronen aus, die ihre Axone in die Wand des Auges senden, um die inneren Muskeln des Auges zu innervieren: Die *Musculus sphincter pupillae* und den *Musculus ciliaris*. Kontraktionen des Musculus ciliaris erhöhen die Linsenkrümmung, wenn man auf nahe Objekte schaut (Akkommodation). Der Musculus sphincter pupillae verengt die Pupille, um die Menge an Licht zu reduzieren, die auf die Retina fällt.

Eine Läsion des Nervus oculomotorius führt neben anderen Symptomen zu einer abnormalen Position des Auges, welches sich nach unten und der Seite richtet. Wie auch bei Läsionen der beiden anderen Nerven sehen die Betroffenen Doppelbilder. Zusätzlich hängt das obere Augenlid wegen der Lähmung des entsprechenden Muskels herunter. Die Unterbrechung der parasymphatischen Fasern weitet die Pupille aufgrund des Verlustes der Aktion des Musculus sphincter pupillae. Ebenfalls fehlt der Lichtreflex. Bei einer unilateralen Läsion des Nervs kann die Pupille etwas größer wirken und die Reaktion auf Licht träger sein als auf der normalen Seite. Da die Fähigkeit der Linse zu akkomodieren fehlt, können nahe Objekte nicht scharf gesehen werden. Aufgrund seines intrakranialen Verlaufs reagiert der Nervus oculomotorius besonders empfindlich auf Fälle von temporaler Herniation. Die Untersuchung der Größe der Pupillen und ihre Reaktion auf Licht ist von großem praktischem Wert bei Patienten, die nach einem Hirntrauma ohne Bewusstsein sind.

2.3.2.1 Der Lichtreflex und der Akkomodationsreflex

Der Nervus oculomotorius ist die efferente Verbindung beider Reflexe, auch wenn diese ansonsten sehr unterschiedlich sind. Der *Lichtreflex* ist relativ einfach organisiert, mit einem Reflexzentrum im Hirnstamm. Eine Erhöhung der Menge an Licht, die die Retina erreicht, bewirkt eine Kontraktion des Musculus sphincter pupillae. Beide Pupillen verengen sich, auch wenn das Licht nur auf das eine Auge fällt. Die afferenten Verbindungen bestehen aus Fasern des Nervus opticus, die den Tractus opticus verlassen, bevor er den Corpus geniculatum laterale erreicht. Die Fasern enden in den prätektalen Kernen auf beiden Seiten. Von diesen Kernen werden Impulse zu den Nuclei Edinger-Westphal auf beiden Seiten übermittelt und über das Ganglion ciliare erreichen die Impulse den Musculus sphincter pupillae. Die Bilateralität dieser Verbindungen erklärt, warum ein unilateraler Reiz eine bilaterale Reaktion verursacht.

Unterbrechungen des Nervus oculomotorius verhindern den Lichtreflex in dem Auge auf der Seite der Läsion, jedoch bleibt der Reflex im anderen Auge erhalten. In Falle der Unterbrechung der afferenten Verbindung zu einer Seite, z.B. bei einem Schaden der Retina oder des Nervus opticus, fehlt der Lichtreflex in beiden Augen, wenn Licht in das Auge auf der läsierten Seite scheint. Der Lichtreflex ist aber auf beiden Seiten vorhanden, wenn das andere Auge illuminiert wird. Die Untersuchung des Lichtreflexes kann im Hinblick auf die Läsionsseite wertvolle Informationen liefern.

Der *Akkomodationsreflex* ist ein kortikaler Reflex: Der Reflexbogen geht durch den zerebralen Kortex. Die afferenten Verbindungen besteht aus Fasern, die den Nervus opticus von der Retina erreichen und die efferenten Verbindungen beinhalten parasymphatische Fasern vom Nervus oculomotorius zum Ganglion ciliare. Von dort gehen die postganglionären Fasern zum Musculus ciliaris. Details über das Reflexzentrum sind nicht bekannt (Brodal, 1992). Der Akkomodationsreflex wird ausgelöst, wenn ein Objekt fixiert wird, dass sich dem Betrachter nähert. Gleichzeitig mit der Akkomodation tritt eine Pupillenverengung auf.

2.3.3 Kontrolle von Augenbewegungen

Alle okularen Bewegungen werden durch Impulse von den Kernen des sechsten, vierten und dritten Nervi craniales auf die äußeren Augenmuskeln produziert. Die Aktivität der Motoneurone muss präzise durch diese drei Kerne koordiniert werden und ist tatsächlich durch ein hoch komplexes Set von untereinander verbundenen neuronalen Gruppen kontrolliert. Studien solcher 'präokulomotorischen' Kerne und Netzwerke lieferten eine Fülle interessanter Daten. Am besten bekannt sind die Netzwerke, die in die Kontrolle von sakkadischen (schnellen) Augenbewegungen eingebunden sind, während die anatomische Basis für die Kontrolle von langsamen Folgebewegungen weniger gut erforscht ist (Brodal, 1992). Zunächst folgt ein Überblick über die verschiedenen Arten von Augenbewegungen.

2.3.3.1 Klassifikation von Augenbewegungen

Das Kontrollsystem für Augenbewegungen muss sicherstellen, dass der Blick schnellstens von einem Punkt der Fixation zu einem anderen Punkt bewegt werden kann. Dies geschieht mit Sakkaden. Zudem muss das Kontrollsystem garantieren, dass der Blick stationär auf ein Objekt gerichtet werden kann, wenn sich das Objekt oder der

Kopf bewegt. Dies geschieht mit gleitenden Folgebewegungen. Rhythmische Änderungen zwischen Sakkaden und Folgebewegungen werden als Nystagmus bezeichnet. Die Augenbewegungen können *freiwillig* sein, wenn beispielsweise ein bewegtes Objekt mit den Augen verfolgt wird oder *reflexiv*, wenn sich der Kopf bewegt (vestibulookulärer Reflex) oder sich die Umgebung bewegt (optokinetischer Reflex). Nystagmus kann durch vestibuläre oder optokinetische Reizung verursacht werden. Im Folgenden wird eine schematische Klassifikation von Augenbewegungen gegeben.

1. *Sakkaden* sind konjugierte Bewegungen, welche die optische Achse von einem Fixationspunkt mit maximaler Geschwindigkeit auf einen anderen richten. Sakkaden können freiwillig sein, wenn man beispielsweise auf eine Landkarte schaut, dann den Blick für einen Moment auf einen Punkt fixiert und ihn dann (mit einer Sakkade) zu einem anderen Fixationspunkt bewegt. Sakkaden können ebenfalls reflexiv sein, wie beim vestibulären oder optokinetischen Nystagmus. Im Wachzustand werden ständig Sakkaden ausgeführt. Die Dauer von Sakkaden kann zwischen 10 und 80 ms schwanken, die Fixationsdauer zwischen zwei Sakkaden beträgt 0.2 bis 2 s. Sakkaden können eine Winkelgeschwindigkeit von $500^\circ/\text{s}$ erreichen und benötigen für ihre Auslösung eine Zeit von ungefähr 200 ms (Röhler, 1979). Daneben werden *Mikrosakkaden* beschrieben, die eine Amplitude von $2'$ - $50'$ haben und je nach Größe 10 bis 20 ms dauern.
2. *Gleitende Folgebewegungen* werden ausgeführt, wenn der Betrachter ein bewegtes Objekt verfolgt, um das Bild stationär auf dem zentralen Punkt der Retina zu halten. Dies gelingt nur dann, wenn die Winkelgeschwindigkeit des verfolgten Objektes nicht zu groß ist. In der Regel werden Folgebewegungen der Augen und des Kopfes eingesetzt, wenn ein bewegtes Objekt betrachtet wird. Dabei lösen die Bewegungen des Kopfes keine konjugierten Bewegungen zur gegenüberliegenden Seite aus. Da der vestibulookuläre Reflex nicht auftritt, muss er während solcher gleitender Folgebewegungen unterdrückt werden. Von den gleitenden Folgebewegungen werden sogenannte *Driftbewegungen* abgegrenzt, das heißt, langsame und kleine Bewegungen mit einer Amplitude von $1'$ - $6'$ und einer Geschwindigkeit von ca. $0.1^\circ/\text{s}$, die während der Fixation von Objekten auftreten können. Bei jeder Fixation tritt außerdem ein *Mikrotremor* beider Augen auf. Diese schnelle Zitterbewegung umfasst Frequenzen

um 70-90 Hz und weist Amplituden von 10''-15'' auf (Grüsser & Grüsser-Cornehls, 1995).

3. *Optokinetischer Reflex* Bewegungen sind Sakkaden oder Folgebewegungen, die darauf abzielen, das retinale Bild zu stabilisieren, wenn sich das gesamte visuelle Feld relativ zum Kopf bewegt.
4. *Vestibulookulärer Reflex* Bewegungen sind gleitende Folgebewegungen und Sakkaden, die durch die Bewegung des Kopfes ausgelöst werden.
5. *Vergenzbewegungen* verändern die visuellen Achsen der Augen in Relation zueinander. Sie treten auf, wenn der Fixationspunkt sich vom Auge weg oder zum Auge hin bewegt. Dies ist notwendig, um das Bild auf korrespondierenden Punkten der Retina zu halten. Konvergenz der optischen Achsen, die stattfindet, wenn eine Objekt sich dem Auge nähert, hängt primär von der Aktivierung des Musculus rectus medialis ab, mit Beteiligungen des Musculus rectus superior und Musculus rectus inferior. Konvergenzbewegungen werden begleitet von Akkomodation und Kontraktion der Pupille.

Jede der Bewegungsarten wird durch unterschiedliche zentrale neuronale Strukturen kontrolliert und basiert letztendlich auf den Motoneuronen der Augenmuskelkerne. Wie schon beschrieben sind Sakkaden und Blickfolgebewegungen oft mit Folgebewegungen des Kopfes koordiniert. Die Steuerung all dieser Bewegungen zusammen mit den eingeschobenen Fixationsperioden steuern unterschiedliche motorische Programme aus den blick- oder augenmotorischen Zentren des Hirnstammes, nämlich die prätectale Region und der Colliculi superiores. Zu diesen Zentren gelangen aber nicht nur visuelle, sondern auch Informationen aus anderen Quellen, wie beispielsweise aus dem Gleichgewichtsorgan oder aus dem Hörsystem. Wie die Steuerung der Augenbewegungen und die sensomotorischen Integration aller Informationen erfolgt, wird im Weiteren ausgeführt.

2.3.3.2 Afferente Verbindungen zu den Kernen der Nerven der Augenmuskeln

Die Verbindungen von den *Nuclei vestibularis*, die über die *Fasciculus longitudinalis medialis* die Kerne der Nervi craniales der Augenmuskeln erreichen, sind sowohl gekreuzt als auch nicht gekreuzt. Einige der vestibulären Neurone, die ihre Axone in die Fasciculus longitudinalis medialis schicken, sind excitatorisch, andere sind inhibitorisch

(GABA). Die Verbindungen sind präzise organisiert, was spezifische Aktivierungen und Hemmungen im Hinblick auf die intendierten Augenbewegungen ermöglicht. Andere efferente Fasern von den Nuclei vestibularis enden in Zellgruppen, die in der Nähe der Augenmuskelkerne liegen. Der *Nucleus praepositus hypoglossi* ist ein Beispiel für solch eine 'präokulomotorische' Zellgruppe (Baker, Berthoz & Delgado-Garcia, 1977). Diese Kerne liegen um den Nucleus nervi hypoglossi in der Medulla oblongata. Zusätzlich zu Afferenzen von den Nuclei vestibularis, erhält der *Nucleus praepositus hypoglossi* Afferenzen von anderen Strukturen, die in die Kontrolle der Augenbewegung eingebunden sind, wie z.B. die von der Formation reticularis und des Cerebellum.

Der direkte und indirekte Impulsweg von den Nuclei vestibularis zu den Kernen der Augenmuskeln liegt zwischen dem vestibulookulären Reflex und ist möglicherweise ebenso in den optokinetischen Reflex eingebunden.

Proprioceptive Impulse von Muskelspindeln der äußeren Augenmuskeln erreichen die Kerne der Nerven der Augenmuskeln von dem Nucleus mesencephalicus nervi trigemini.

Optische Impulse gelangen nicht direkt von der Retina in die Kerne der Nerven der Augenmuskeln, sondern sind durch verschiedene Kerne des Hirnstamms vermittelt, die auch andere, nicht visuelle Impulse erhalten. Dabei handelt es sich um den Colliculi superiores und die Nuclei pretectalis. Diese Kerne erhalten Afferenzen von der Retina und von Teilen des Kortex, des frontalen Augenfeldes, des posterioren parietalen Kortex und Teilen der extrastriären visuellen Areas, die in die Kontrolle von Augenbewegungen eingebunden sind.

Es existieren keine direkten Verbindungen vom Kortex zu den Kernen der Nerven der Augenmuskeln. Aktivierung durch den Kortex der äußeren Augenmuskeln bei freiwilligen Augenbewegungen werden durch andere Zellgruppen des Hirnstamms vermittelt, primär spezifischen Regionen der Formatio reticularis in der Umgebung der Kerne der Nerven der Augenmuskeln.

Die Koordination der Informationen aus dem Vestibularorgan und des visuellen Apparats soll im Wesentlichen in der Formatio reticularis erfolgen. Dort befinden sich unter anderem Neurone, die auf Fixation und Blickfolge spezialisiert sind (Jung, 1978). Die visuelle Information gelangt über den Colliculi superiores dorthin und von dort laufen wiederum Nervenverbindungen zu den verschiedenen Augenmuskeln. Viele der Signale

der verschiedenen Quellen, die oben erwähnt sind, werden durch Zellgruppen der *Formatio reticularis* integriert, die nahe bei den Kernen der Augenmuskeln liegen. Diese 'prämotorischen' Zellgruppen geben die letzten Befehle zu den Motoneuronen. Die 'prämotorischen' Zellgruppen erhalten z.B. Signale des Kortex, der *Nuclei vestibularis* und des *Colliculi superiores*. Ein *Zentrum für horizontale Augenbewegungen* wurde nahe dem *Nucleus abducens* in der Pons entdeckt und ein *Zentrum für vertikale Augenbewegungen* liegt nahe zum *Nucleus oculomotorii* im Mesencephalon.

2.3.4 Die Zentren für die Kontrolle von Augenbewegungen im Hirnstamm

Durch die Kombination anatomischer Daten mit physiologischen Ergebnissen, die durch Einzelzelleitungen, elektrischer Stimulierung und Läsion beobachtet werden, konnten Zellgruppen im Hirnstamm entdeckt werden, die von besonderer Bedeutung für Augenbewegungen sind. Ein *Zentrum für horizontale Augenbewegungen* wurde im paramedianen pontinen Abschnitten der *Formatio reticularis* (PPFR) entdeckt (King, Precht & Dieringer, 1978; Steiger & Büttner-Ennever, 1979). Dieses Zentrum liegt nahe beim *Nucleus abducentis* und sendet zu diesem Fasern. Es sendet ebenfalls Fasern zu einem Teil des *Nucleus oculomotorii*, der die Motoneurone des *Musculus rectus medialis* beinhaltet. Zusammen mit dem *Musculus rectus lateralis*, der durch den *Nucleus abducentis* innerviert wird, nimmt der *Musculus rectus medialis* an den horizontalen Augenbewegungen teil. Zusätzlich existieren internukleäre Neurone im *Nucleus abducentis*, die Axone zu den Motoneuronen des *Musculus rectus medialis* der gegenüberliegenden Seite senden. Dieses 'prämotorische' Netzwerk stellt simultane Aktivierungen vom *Musculus rectus lateralis* auf der einen Seite und des *Musculus rectus medialis* auf der anderen Seite und Hemmung der Antagonisten sicher.

Eine *Läsion in der Region des PPFR* vermindert horizontale konjugierte Bewegungen auf der Läsionsseite. Besonders deutlich ist eine Reduktion von Sakkaden. Eine einseitige Läsion des *Fasciculus longitudinalis medialis* zwischen dem *Nucleus abducentis* und *oculomotorii* führt zu einem Verlust aller schnellen gleichseitigen Augenbewegungen. Trotzdem sind Vergenzbewegungen möglich, obwohl der *Musculus rectus medialis* hierfür ebenfalls verantwortlich ist. Somit sind für die Aktivierung des *Musculus rectus medialis* während Vergenzbewegungen andere Bahnen als die *Fasciculus longitudinalis medialis* verantwortlich.

Wie berichtet, erhält des PPFR Impulse direkt und indirekt von den Nuclei vestibularis, dem Colliculi superiores und dem frontalen Augenzentrum. Es scheint als letzte 'prämotorische' Station für die Initiierung von konjugierten horizontalen Sakkaden zu dienen (Brodal, 1992). In Übereinstimmung damit findet man im PPFR Neurone, die unmittelbar vor und während einer Sakkade zur gleichen Seite aktiviert werden, während sie bei gleitenden Folgebewegungen und bei Fixation inaktiv sind. Diese sogenannten excitatorischen 'burst'-Neurone sollen excitatorische Verbindungen mit den Motoneuronen, die für Sakkaden verantwortlich sind, aufbauen. Es soll ebenfalls inhibitorische 'burst'-Neurone geben, die nahe des PPFR gelegen sind, mit einem ähnlichen Aktivitätsmuster wie die excitatorischen 'burst'-Neurone. Sie hemmen die Motoneurone des Nucleus abducentis der gegenüberliegenden Seite. Die Aktivität beider Arten von 'burst'-Neuronen scheint durch eine dritte Art von Neuronen im PPFR kontrolliert zu werden, die tonisch aktiviert sind. Diese 'omnipause'-Neurone hemmen möglicherweise die 'burst'-Neurone tonisch, außer im Zusammenhang mit Sakkaden. Die 'omnipause'-Neurone sind unmittelbar vor und während Sakkaden ruhig, unabhängig von der Richtung und Amplitude der Bewegung. Studien haben gezeigt, dass die 'omnipause'-Neurone direkte Verbindungen sowohl vom Colliculi superiores als auch vom frontalen Augenzentrum erhalten. Vermutlich erhalten sie auch Impulse von den Nuclei vestibularis, da Sakkaden auch durch die vestibuläre Signale ausgelöst werden können.

Ein Zentrum für vertikale und rotatorische Augenbewegungen wurde in der *Formatio reticularis* nahe des Nucleus oculomotorii entdeckt (Büttner-Ennever & Büttner, 1978; Büttner-Ennever, Büttner, Cohen & Baumgartner, 1982). Diese Region schließt den rostralen Nucleus interstitialis des Fasciculus longitudinalis medialis (RIFLM) ein und möglicherweise ebenfalls eine andere kleine Zellgruppe, den Nucleus interstitialis (Cajal). Die Region erhält wahrscheinlich Afferenzen von den Nuclei vestibularis, den paramedianen pontinen Abschnitten der *Formatio reticularis* und dem frontalen Augenzentrum. Physiologische Studien zeigen, dass monosynaptische Verbindungen von der Region des RIFLM zu der Nucleus trochlearis und Gruppen von Motoneuronen innerhalb des Nucleus oculomotorius existieren, die vertikale Augenbewegungen produzieren.

Die Regionen PPFR und RIFLM sind untereinander verbunden und scheinen nicht unabhängig voneinander zu arbeiten (Brodal, 1992). Die meisten Augenbewegungen sind

weder rein horizontale noch rein vertikale Bewegungen, sondern Kombinationen von beiden. Somit müssen die Zentren für horizontale und vertikale Bewegungen ihre Aktivität koordinieren (Büttner-Ennever, 1988).

2.3.5 Kortikale Zentren für die Kontrolle von Augenbewegungen

Das *frontale Augenfeld* (Area 8) liegt im hinteren Teil des Gyrus frontalis. Es ist besonders wichtig für *freiwillige Sakkaden*, die unabhängig von visuellen Reizen erfolgen (Latto, 1986). Elektrische Stimulierung des frontalen Augenfeldes löst konjugierte Augenbewegungen zur gegenüberliegenden Seite aus. Diesen Effekt vermitteln Fasern, die in die Capsula interna bis zu den 'prämotorischen' Zellgruppen des Hirnstamms, beispielsweise des Colliculi superiores, der Nuclei pretectalis und des PPRF absteigen. Die Zellgruppen ihrerseits aktivieren Motoneurone der Kerne der Augenmuskeln. Nach einer einseitigen Läsion des frontalen Augenfeldes kann der Blick nicht freiwillig zur gegenüberliegenden Seite der Läsion gerichtet werden. Die Fähigkeit, den Blick seitlich zu bewegen, ist aber nicht vollständig verloren. Es treten gleitende Folgebewegungen auf, wenn ein Objekt in das visuelle Feld gebracht und langsam seitlich bewegt wird. Die Fähigkeit, dem Objekt mit dem Blick zu folgen, bleibt erhalten.

Im Hinblick auf die kortikale Kontrolle von langsamen Folgebewegungen ist eine Region in der okzipitalen Region (Area 17, 18 und 19) besonders wichtig. Dies zeigte sich unter anderem in Beobachtungen der Aktivität einzelner Zellen in Verbindung mit Augenbewegungen. Die subkortikalen Zellgruppen, die sich zwischen diese kortikalen Regionen und den Kernen der Augenmuskeln schalten, sind nicht mit Sicherheit identifiziert. Die *Fähigkeit, den Blick zu fixieren*, ist eine Vorstufe für gleitende Folgebewegungen. Ein *Fixationszentrum* wird innerhalb der kortikalen Region angenommen, die für die Initiierung von langsamen Folgebewegungen verantwortlich ist.

Der Begriff *Fixationsreflex* legt nahe, dass die Tendenz, den Blick auf ein Objekt zu fixieren, nicht vollständig freiwillig ist. Trotzdem ist Fixation davon abhängig, dass eine Person bei Bewusstsein ist. Optokinetischer Nystagmus ist Ausdruck der Fixationstendenz oder des Fixationsreflexs.

2.3.6 Das EOG als Methode zur Registrierung von Augenbewegungen

Ionenflüsse zwischen den retinalen Pigmentzellen und den Photosensoren bedingen ein corneo-retinales Bestandpotential. Die Hornhaut des Auges ist relativ zur Retina elektrisch positiv geladen, wodurch das Auge einen elektrischen Dipol ausbildet. Aufgrund der mittels der Dipol-Lokalisierungsmethode gewonnenen Ergebnissen wurde postuliert, dass der Augendipol wesentlich durch die Polarisierung der Retina zustande kommt und die Hornhaut wenig dazu beiträgt (z.B. Berg, 1989). Da jedoch bei dieser Methode einige nicht unkritische Annahmen gemacht werden müssen, sind die Ergebnisse umstritten. Die Entstehung des Dipols spielt letztendlich auch nur eine untergeordnete Rolle. Wichtig ist, dass dieser Dipol existiert und gemessen werden kann.

Werden Elektroden am äußeren Rand der Augenhöhle befestigt, kann das elektrische Feld dieses Dipols bei Bewegungen des Auges registriert werden. Diese Methode bezeichnet man als EOG. Das EOG stellt eine einfache und zuverlässige Methode der Registrierung von Augenbewegungen dar (Birbaumer & Schmidt, 1990).

2.3.7 Schlussfolgerung

Dieser Abschnitt führte in die Physiologie der Augenbewegung ein. Neben den anatomischen Grundlagen und den verschiedenen Augenbewegungsarten wurde insbesondere die Kontrolle von Augenbewegung durch das Gehirn dargestellt. Es zeigte sich, dass Augenbewegungen im Wesentlichen subkortikal durch Zentren im Hirnstamm, einem Zentrum für horizontale Augenbewegungen im paramedianen pontinen Abschnitt der *Formatio reticularis* und einem Zentrum für vertikale und rotatorische Augenbewegungen in der *Formatio reticularis* nahe des *Nucleus oculomotorius*, gesteuert werden. Jedoch sollen auch kortikale Strukturen an der Steuerung von Augenbewegung beteiligt sein, das frontale Augenfeld (Area 8) und eine okzipitale Region (Area 17, 18, 19), deren Einfluss jedoch als geringer angesehen werden kann.

Es ist daher unwahrscheinlich, dass mit der Aufzeichnung von EKPs auf visuelle Reize zugleich kortikale Korrelate der Steuerung der Augenbewegung mitaufgezeichnet werden. Demgegenüber ist es sehr wahrscheinlich, dass durch die Augenbewegungen Artefakte in den EKP-Daten entstehen, was jedoch durch die Ausbreitung des elektrischen Feldes des Augendipols zustande kommt. Mit diesem Problem beschäftigt

sich Abschnitt 3.5. Zunächst folgt jedoch ein allgemeiner Überblick über die EKP-Methode.

3 Die EKP-Methode

3.1 Einleitung

In dieser Arbeit werden zwei Experimente vorgestellt, die EKPs auf visuelle Reize messen. Kapitel 2 präsentierte die Grundlagen visueller Wahrnehmung mit den Schwerpunkten Verlauf visueller Bahnen im Gehirn und die Grundlagen von Augenbewegungen mit dem Schwerpunkt der Steuerung von Augenbewegung durch das Gehirn. Dabei zeigte sich, dass die visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn bislang nur annähernd erklärt werden kann und auch die neuronalen Grundlagen von Augenbewegungen nicht erschöpfend erforscht sind. Es zeigte sich aber auch, dass wesentliche Teile des Kortex an der Verarbeitung visueller Informationen beteiligt sind. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die EKP-Methode einzusetzen, um Korrelate visueller Informationsverarbeitung im Gehirn zu bestimmen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die EKP-Methode, also die Messung und Analyse des EKPs und damit verbundener Probleme. Im Abschnitt 3.3 wird das Problem der Bestimmung von Komponenten aus dem EKP dargestellt, wobei verschiedene Definitionen von Komponenten diskutiert und ein kurzer Überblick über wichtige Komponenten gegeben wird. Die Diskussion langsamer Wellen nimmt eine herausgehobene Stellung ein, da die zwei hier vorgestellten Experimente langsame Wellen bestimmen. Ein wesentliches Problem der EKP-Forschung bei der Verwendung visueller Reize ist die Behandlung von Augenartefakten. Da dieses Problem für die hier vorgestellten Experimente eine entscheidende Rolle spielt, beschreibt Abschnitt 3.5 die bislang vorgeschlagenen Korrekturverfahren für okulare Artefakte.

3.2 Messung und Analyse des ereigniskorrelierten Hirnrindenpotentials (EKP)

Wird ein Elektrodenpaar auf der Schädeloberfläche befestigt und die Elektroden mit einem Differentialverstärker verbunden, zeigt sich in der Ausgabe des Verstärkers ein Verlauf von Spannungsveränderungen über die Zeit. Diese Spannungsveränderungen werden als Elektroenzephalographie (EEG) bezeichnet. Die Amplituden des 'normalen' EEG variieren ungefähr zwischen -100 und $+100 \mu\text{V}$, wobei die Frequenz einen Bereich von 40 Hz oder mehr umfasst. Wird während der Erfassung des EEG ein Reiz dargeboten, kann im EEG ein Zeitabschnitt definiert werden, der mit dem Reiz zeitlich

verbunden ist. Innerhalb dieses Zeitabschnitts können Spannungsveränderungen im EEG auftreten, die spezifisch für die Reaktion des Gehirns auf diesen Reiz sind. Diese Spannungsveränderungen auf Reize sind die Grundlage des ereigniskorrelierten Hirnrindenpotentials (EKP). Zunächst wurde der Begriff evoziertes Potential (EP) verwendet, da angenommen wurde, diese Potentiale reflektierten Hirnaktivität, die ausschließlich durch die Darbietung der Reize hervorgerufen oder 'evoziert' würde und die mit sensorischen Grundprozessen in Zusammenhang stehe. Die weitere Forschung zeigte aber, dass zumindest einige dieser kortikalen Potentiale mit einer Reihe von Prozessen verbunden sind, die durch die psychologischen Anforderungen der Situation hervorgerufen werden (Donchin, Ritter & McCallum, 1978). Die Erkenntnis, dass die kortikalen Potentiale mehr als nur evozierte Aktivität reflektieren, führte zur Verwendung des neutraleren Begriffs 'ereigniskorreliert'. Als ereigniskorrelierte Hirnrindenpotentiale (EKP) werden daher alle elektrokortikalen Potentiale bezeichnet, die vor, während und nach einem sensorischen, motorischen oder psychologischen Ereignis im EEG messbar sind (Birbaumer & Schmidt, 1990). Ein solches Ereignis löst einen charakteristischen Verlauf der Spannung über die Zeit aus, wobei die Amplituden des EKP in ihrer Größe zwischen 1 und 30 μV variieren. Die Abfolge der negativen und positiven Spannungsgipfel (Peaks) im EKP werden auch als Komponenten bezeichnet und in Abschnitt 3.3 genauer beschrieben.

3.2.1 Generierung des EKP

Allgemein wird akzeptiert, dass das EKP Aktivität reflektiert, die innerhalb des Gehirns entsteht (siehe aber Abschnitt 3.2.3 zu Artefakten). Die Beziehung zwischen dem, was im Gehirn passiert und dem, was an der Schädeloberfläche beobachtet wird, ist nicht vollständig geklärt. Über die folgenden Punkte besteht Einigkeit (Nunez, 1981; Scherg & Picton, 1991; Wood, 1987; Williamson & Kaufman, 1990; Zschocke, 1995):

- (1) Das auf der Schädeloberfläche registrierte EKP repräsentiert die Summe kortikaler Feldpotentiale, die mit der Aktivität umfangreicher Neuronenpopulationen assoziiert sind.
- (2) Die einzelnen Neurone einer solchen Neuronenpopulation müssen gleichzeitig aktiv sein und eine bestimmte geometrische Konfiguration aufweisen, wenn sie elektrische Felder erzeugen sollen, die auf der Schädeloberfläche gemessen werden

können. Insbesondere müssen die Neurone so konfiguriert sein, dass sich die einzelnen elektrischen Felder summieren können und ein dipolares elektrisches Feld ergeben, also ein Feld mit negativen und positiven Ladungen zwischen denen Strom fließt. Derartige Konfigurationen werden als 'offene Felder' bezeichnet und beinhalten eine parallele Ausrichtung der Neuronen.

- (3) Nach biophysikalischen und neurophysiologischen Annahmen spiegelt das von der Schädeloberfläche registrierte ERP im Wesentlichen die postsynaptischen (dendritischen) Potentiale und nicht die axonalen Aktionspotentiale wider (Allison, Wood & McCarthy, 1986).

Die Annahmen über die dem EKP zugrundeliegenden neuronalen Prozesse haben wichtige Konsequenzen für deren Interpretation. Es besteht kein Zweifel daran, dass sich viel der neuronalen Aktivität des Gehirns niemals auf der Schädeloberfläche registrieren lässt. In vielen neuronalen Populationen, auch in denen mit einer offenen Feldkonfiguration, kann die Aktivität nicht ausreichend synchron sein, um ein elektrisches Feld zu erzeugen, das mit einem gewissen räumlichen Abstand noch aufgezeichnet werden kann. In einigen anatomischen Strukturen, wie z.B. im Neokortex, ist die geometrische Anordnung der Neurone für die Summierung und Ausbreitung ihrer elektrischen Aktivität förderlich. Die Neurone weisen dann die gleiche Ausrichtung auf, nämlich senkrecht zur kortikalen Oberfläche. In anderen Strukturen, wie beispielsweise dem Thalamus, sind die Neurone so angeordnet, dass die Aufzeichnung durch Elektroden, die in einem gewissen räumlichen Abstand befestigt sind, verhindert wird. Dabei sind die Neurone so angeordnet, dass sie kein messbares elektrisches Feld außerhalb ihrer selbst erzeugen.

Die sich daraus ergebende Selektivität des EKP bietet Vor- und Nachteile. Wäre die Gesamtaktivität des Gehirns beobachtbar, könnten die sich ergebenden Messungen derart komplex sein, dass ihre Analyse nahezu unmöglich ist (Coles & Rugg, 1995). Trotzdem ist stets zu berücksichtigen, dass einige funktional bedeutsame neuronale Prozesse nicht mittels der EKP-Technik beobachtbar sind.

3.2.2 Elektrodenplatzierung und Referenz

Um ein EKP zu erhalten, werden die Spannungsunterschiede in Volt zwischen zwei Elektroden gemessen. Dabei stellt sich die Frage, wo diese Elektroden auf der

Schädeloberfläche zu platzieren sind. Die Platzierung der Elektroden wird meistens mittels des 10-20 Systems (Jaspers, 1958) beschrieben. In diesem System wird die Position der Elektroden aufgrund der Nähe zu bestimmten Regionen des Gehirns, nämlich frontal, zentral, temporal, parietal und okzipital und wegen ihrer Position in der seitlichen Ebene (gerade Nummern für links, z für die Mittellinie und ungerade Nummern für rechts) bezeichnet. Die Verwendung dieser Elektrodenbezeichnungen impliziert nicht, dass sich die an einer bestimmten Region des Gehirns aufgezeichnete Aktivität unmittelbar auf die Aktivität in der entsprechenden Hirnregion zurückführen lässt. Da sich das Gehirn wie ein Volumenleiter verhält, kann elektrische Aktivität, die in einer bestimmten Region erzeugt wird, auch an anderen, entfernten Stellen aufgezeichnet werden. In den vergangenen Jahren besteht ein zunehmendes Interesse an den Vorgängen innerhalb des Gehirns. Es werden daher auch Methoden angewendet, die eine größere räumliche Auflösung der Elektrodenplatzierung erfordern als mittels des 10-20 Systems möglich ist. In der Folge werden auch nicht-standardisierte Elektrodenpositionen verwendet, die mit einer größeren Dichte über der Schädeloberfläche angeordnet sind (z.B. Tucker, 1993).

Da zur Messung des EKP die Spannungsunterschiede in Volt zwischen zwei Elektroden gemessen werden, wird jede Elektrode einer Elektrodenanordnung auf der Schädeloberfläche mit einer Referenz verbunden. Die Referenz kann entweder aus einer anderen Elektrode oder einem verbundenen Elektrodenpaar bestehen. Werden beispielsweise die verbundenen Mastoiden als Referenz gewählt, wird jeweils auf die Mastoiden, den Knochen hinter jedem Ohr, eine Elektrode platziert und diese miteinander verbunden. Der Referenzort wird so gewählt, dass er durch die elektrische Aktivität, die von experimentellem Interesse ist, relativ unbeeinflusst ist. Die EEG-Aufzeichnungen basieren dann auf dem Spannungsunterschied zwischen jeder 'untersuchenden' Elektrode und der oder den Referenzelektroden. Es sind auch komplexere Aufzeichnungsanordnungen möglich. Beispielsweise lassen sich Spannungsunterschiede zwischen Untergruppen benachbarter Elektroden berechnen, wie dies in der CSD-Analyse (current-source density; Nunez, 1990; Perrin, Pernier, Bertrand & Echallier, 1989) geschieht. Eine andere Möglichkeit besteht darin, von jeder Elektrode den Mittelwert über alle Elektroden, der über eine gewöhnliche Referenz gewonnen wird, abzuziehen. Man erhält dann die EEG-Aufzeichnungen einer gemittelten Referenz

(Lehmann, 1987). Diese Referenzverfahren werden verwendet, um regionale Unterschiede der elektrischen Felder zu akzentuieren und dadurch Kenntnisse über die zugrundeliegenden Generatoren der elektrischen Felder zu gewinnen. Einen neueren Überblick zu Referenzmethoden und -problemen gibt Dien (1998).

3.2.3 Aufbereitung des EEG-Signals

Die Aufbereitung des EEG-Signals muss erfolgen, da das aufgezeichnete EEG-Signal in der Regel auch Frequenzen enthält, die außerhalb des Bereiches liegen, die in der EKP-Forschung interessant sind. Aus diesem Grund haben die EEG-Verstärker für gewöhnlich optionale Filtereinstellungen, die es ermöglichen, Aktivität oberhalb und unterhalb ausgewählter Frequenzen abzuschwächen. In diesem Zusammenhang ist unter anderem hochfrequente Aktivität zu nennen, die der Aktivität von Muskeln, z.B. der Kinnmuskulatur, zugeschrieben wird anstatt der Aktivität des Gehirns. Die Muskelaktivität umfasst Frequenzen zwischen 50 und 60 Hz und lässt sich mittels eines Tiefpassfilters aus dem Signal entfernen. Es kann ebenso die Aktivität niedriger Frequenzen, z.B. langsame Drifts, aus dem EEG-Signal gefiltert werden. Dazu eignen sich sogenannte Hochpassfilter. Die Verwendung von Filtern sollte so angelegt sein, dass sich nicht die Aktivität des EKP vermindert. Außerdem ist bei der Einstellung der Tiefpassfilter das sogenannte 'Aliasing' zu vermeiden, indem alle Frequenzen über der kritischen Frequenz aus dem EEG-Signal gefiltert werden (siehe Srinivasan, Tucker & Murias, 1998).

Filter können teilweise auch dazu verwendet werden, die Aktivität von Artefakten im EEG-Signal abzuschwächen oder zu eliminieren. Artefakte sind alle elektrischen Quellen, die sich nicht auf das Gehirn zurückführen lassen. Die Artefakte, die Muskelaktivität oder Körperbewegungen hervorrufen, haben gewöhnlich größere Amplituden oder Frequenzen als das EEG-Signal und können daher problemlos im EEG-Signal entdeckt werden. Jedoch lassen sich zwei wichtige Quellen von Artefakten nicht durch Filter beseitigen, da sie ähnliche Frequenzbereiche umfassen wie das EKP selbst: Bewegungen der Augen und Bewegungen der Augenlider. Die Artefakte durch Augenbewegungen und Blinzelartefakte entstehen, weil der Augapfel wie ein elektrischer Dipol mit negativer und positiver Ladung auf jeder Seite funktioniert (vergleiche Abschnitt 2.3.6) und demzufolge Veränderungen der elektrischen Felder hervorrufen, die sich nach hinten über die Schädeloberfläche ausbreiten. Diese Felder werden von den Elektroden auf der

Schädeloberfläche aufgezeichnet und ‘verunreinigen’ das EEG-Signal, das die Aktivität des Gehirns registrieren soll. Mehrere Ansätze zur Verminderung oder zur Entfernung von Augenartefakten wurden beschrieben. Da die Beseitigung von Augenartefakten für die hier vorgestellten Experimenten eine wesentliche Rolle spielt, stellt Abschnitt 3.5 die verschiedenen Korrekturmethode dar.

Im Folgenden wird kurz die Extraktion des EKP-Signals aus den EEG-Daten beschrieben. Wie bereits weiter oben erwähnt, ist das EKP ein Muster von Spannungsveränderungen in Volt innerhalb einer EEG-Epoche, das mit irgendeinem Ereignis zeitlich verbunden ist. In der Regel sind diese Veränderungen sehr klein und liegen im Vergleich zum EEG im Bereich von Mikrovolt. Daher ist es notwendig, das ‘Signal’ (das EKP) aus dem ‘Rauschen’ (dem Hintergrund-EEG) zu extrahieren. Die am häufigsten verwendete Technik ist die Mittelung: Dabei wird eine Anzahl von EEG-Epochen jeweils zeitgleich auf Wiederholungen eines gleichen Ereignisses oder gleicher Ereignisklassen aufgezeichnet. Die digitalen EEG-Werte für jeden Zeitpunkt innerhalb dieser Epoche werden dann gemittelt, um einen einzigen Vektor von Werten zu erhalten. Dieser spiegelt die gemittelte Aktivität zu jedem Zeitpunkt der Epoche wider und wird als gemittelt EKP bezeichnet. Der Mittelung liegt die Annahme zugrunde, dass die EEG-Aktivität, die nicht zeitgleich zum Ereignis ist, zufällig innerhalb dieser Epochen variiert und sich daher zu Null addiert. Der sich nach dem Mitteln ergebende Potentialverlauf soll die Aktivität repräsentieren, die in einem festen zeitlichen Verhältnis zu dem Ereignis steht.

Ein wesentlicher Nachteil der Mittelungstechnik ist, dass die Registrierung eines EKP auf ein einzelnes Ereignis nicht möglich ist. Somit können die gemittelten EKPs nicht direkt mit anderen Messungen (wie z.B. Reaktionszeiten) verglichen werden, die sich aus individuellen experimentellen Durchgängen ergeben. Zudem gleicht der gemittelte Potentialverlauf nicht notwendigerweise dem aktuellen Potentialverlauf in einzelnen experimentellen Durchgängen. Denkbar ist, dass in individuellen Durchgängen einzelne Amplituden eine bipolare Verteilung aufweisen oder für einzelne Amplituden große Latenzvariabilität besteht. Derartige Informationen lassen sich aus den gemittelten Potentialverläufen nicht gewinnen.

Aufgrund dieser Probleme wurden Signal-Extraktions-Verfahren entwickelt, die den Potentialverlauf einzelner experimenteller Durchgänge zeigen. Das einfachste Verfahren

dieser Art verwendet Analog- oder Digitalfilter, um die EEG-Frequenzen abzuschwächen, die höher oder niedriger sind als die, die das interessierende EKP-Signal enthält. Komplexere Filter verwenden Kreuz-Korrelations-Verfahren, die in jedem einzelnen Durchgang effektiv die Epochen nach Bereichen maximaler Übereinstimmung mit einer vorher definierten Schablone absuchen. Wird für eine Epoche erwartet, dass sie ein EKP mit besonderen Charakteristiken, also einen Potentialverlauf mit einer charakteristischen Form, enthält, kann der Anteil der Epoche bestimmt werden, der am besten mit ihr übereinstimmt (Glaser & Ruchkin, 1976; Woody, 1967; van Boxtel, 1998). Derartige Schablonen können aufgrund theoretischer Überlegungen oder empirisch bestimmt werden. Hierbei verwendet man Techniken wie die schrittweise Diskriminanzanalyse (Squires & Donchin, 1976). Die Schablonen müssen ebenfalls die erwartete Verteilung der EKPs über die Schädeloberfläche berücksichtigen. In diesem Fall reagiert der Filter auf Aktivität, die eine besondere Topographie hat (Gratton, Coles & Donchin, 1989).

3.3 Die Bestimmung der Komponenten im EKP

Kein anderer methodischer Aspekt innerhalb der EKP-Forschung hat mehr Kontroversen ausgelöst als die Frage, was eine EKP-Komponente ist. Die einfachste Antwort auf diese Frage ist, dass man sich auf ein Merkmal im Potentialverlauf, beispielsweise einen Peak des EKP fokussiert, wodurch dieses Merkmal dann zu der interessierenden Komponente wird. Diese Komponente kann in relativ einfacher Weise gemessen werden, indem die Amplitude (in μV) oder die Latenz (in ms) bestimmt wird. Eine Amplitude kann auch in Relation zu anderen Merkmalen des Potentialverlaufs bestimmt werden. Bei der Peak-to-Peak-Messung wird die Differenz zweier aufeinanderfolgender Peaks bestimmt. Bei der Baseline-to-Peak-Messung wird die Amplitude in Relation zu der Baseline, die als das mittlere elektrische Niveau für eine Zeitperiode vor Reizeinsatz definiert wird, bestimmt. Mit diesem einfachen Ansatz sind jedoch einige Probleme verbunden (vergleiche auch Donchin et al., 1978; Picton & Stuss, 1980; Rugg, 1995).

Ein großes Problem stellt die Überlappung von Komponenten dar. Komponenten überlappen sich, wenn der Potentialverlauf die Summe elektrischer Aktivität reflektiert, die in unterschiedlichen Quellen des Gehirns generiert wird. Da das Gehirn ein leitendes Medium ist, kann sich die elektrische Aktivität, die an einem Ort entsteht, im Gewebe

des Gehirns ausbreiten und dann an einem anderen Ort gemessen werden. Demzufolge kann die Messung der Aktivität an einer bestimmten Elektrode zu einer bestimmten Zeit der elektrischen Aktivität einer Vielzahl unterschiedlicher Generatorquellen an verschiedenen Orten zugeschrieben werden.

Eine Konsequenz dieser Volumenleitung ist, dass keine direkte Übereinstimmung zwischen bestimmten Merkmalen des Potentialverlaufs und der zeitlichen Charakterisierung des neuronalen Systems, dessen elektrische Aktivität durch den Potentialverlauf reflektiert wird, bestehen muss. Somit kann ein Peak mit einer bestimmten Latenz auch die kombinierte Aktivität von mehreren Generatoren widerspiegeln, die vor oder nach dieser Latenz aktiv sind. Daher wurde vorgeschlagen, die Merkmale im Potentialverlauf mit dem theoretisch neutraleren Begriff Abweichung (deflection) zu bezeichnen und den Begriff Komponente nur für Merkmale zu verwenden, deren Aktivität spezifischen neuronalen Populationen zugeschrieben werden können (Näätänen & Picton, 1987).

Dieser Ansatz der Komponentendefinition wird als *physiologischer Ansatz* bezeichnet, denn die definierende Charakterisierung einer EKP-Komponente ist ihre anatomische Quelle innerhalb des Gehirns. Die Messung einer bestimmten Komponente setzt dann eine Methode voraus, die zweifelsfrei die Quellen bestimmen kann. Demgegenüber wird ein *funktionaler Ansatz* der Komponentenbestimmung vertreten (z.B. Donchin, 1979; Donchin, 1981). In diesem Ansatz definiert sich eine EKP-Komponente als die Varianzquelle im Potentialverlauf, die einer einzigen, elementaren kognitiven Operation zugeschrieben werden kann. Die kognitive Operation wird über die Manipulation unabhängiger Variablen spezifiziert und über die Beziehungen, die zwischen der Komponente und anderen Messungen bestehen (z.B. offene Verhaltensmaße wie Reaktionsschnelligkeit). Entsprechend kann eine Komponente mit einem bestimmten Merkmal im Potentialverlauf identifiziert werden, auch wenn sie die Aktivität von vielen Generatoren des Gehirns reflektiert, solange diese Generatoren ein funktional homogenes System bilden.

Obwohl sich die Ansätze der psychologischen und der physiologischen Komponentendefinition unterscheiden lassen, werden beide Ansätze für die Komponentendefinition häufig kombiniert. Donchin et al. (1978) schlägt vor, eine Komponente über die Kombination ihrer Polarität, ihrer charakteristischen Latenz, ihrer

Verteilung über den Skalp und ihrer Sensitivität gegenüber charakteristischen experimentellen Manipulationen zu definieren. Dabei implizieren Polarität und Verteilung eine Konsistenz der neuronalen Quellen, während Latenz und Sensitivität gegenüber experimentellen Manipulationen eine Konsistenz der psychologischen Funktionen implizieren. Im Folgenden werden beide Ansätze zur Komponentenbestimmung ausführlicher vorgestellt.

3.3.1 Physiologische Ansätze der Komponentenbestimmung

Die vergangenen Jahren sind durch ein verstärktes Interesse gekennzeichnet, die intrakranialen Quellen der an der Schädeloberfläche gemessenen elektrischen Aktivität zu identifizieren. Dabei wurde und wird eine Vielzahl verschiedener Ansätze verwendet. Diese sind die intrakranialen Ableitungen beim Menschen (z.B. Halgren et al., 1980; McCarthy & Wood, 1987), wobei elektrische Aktivität von Elektroden innerhalb des Gehirns mit der auf der Schädeloberfläche gemessenen Aktivität in Verbindung gebracht wird. Daneben werden die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und andere funktionale bildgebende Verfahren eingesetzt, um die auf der Schädeloberfläche gemessene Aktivität mit lokalisierter neuronaler Aktivität in Verbindung zu bringen, die bei analogen Aufgaben gewonnen werden (Compton, Grossenbacher, Posner & Tucker, 1991). In einem anderen Ansatz werden Tiermodelle entwickelt (z.B. Pineda & Swick, 1992), wobei Techniken der Neurowissenschaften, wie z.B. Läsionen, Neurochemie, Einzel- und Mehrzelleableitungen, eingesetzt werden, um die neuronalen Systeme bei Tieren zu untersuchen, die möglicherweise mit den menschlichen Systemen übereinstimmen, die für die Entstehung des EEG verantwortlich sind. Auch Studien neurologischer Fälle ermöglichen es, Beziehungen zwischen Hirnläsionen und der Veränderung der elektrischen Aktivität auf der Schädeloberfläche zu identifizieren (Knight, 1991; Rugg, 1992; Rugg, 1995). All diese Ansätze verfolgen das Ziel, die Lokalisation und die Anzahl der Generatoren zu bestimmen, die für eine gegebene EKP-Komponente verantwortlich sind, wobei die gewonnenen Informationen indirekter Natur sind.

Die Methoden, die einen direkten Zugang zu diesen Informationen ermöglichen, haben sich in den letzten Jahren ebenfalls kontinuierlich weiterentwickelt. Eine dieser Methoden ist die BESA (Brain Electrical Source Analysis; Scherg, 1990). Die Methode basiert auf der Annahme, dass der EKP-Potentialverlauf die Summe der Aktivität einer Vielzahl

verschiedener Generatoren darstellt, die eine feste Lokalisation innerhalb des Gehirns haben, und dass diese Generatoren als äquivalente Dipole modelliert werden können. Eine sogenannte BESA-Lösung besteht aus der Spezifikation dieser Generatoren hinsichtlich ihrer Anzahl, ihrer Lokalisation, ihrer Orientierung, ihres zeitlichen Verlaufs und der relativen Stärke ihrer Aktivität. Dabei wird ein Passungsindex (goodness of fit) zwischen den vorhergesagten elektrischen Feldern und denen, die empirisch gemessen wurden, bestimmt. Ein Vorteil dieser Methode ist es, dass der Anteil, der durch jeden Generator auf das EKP gemacht wird, als unabhängige EKP-Komponente betrachtet wird. Somit bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, die EKP-Daten zu reduzieren und sie mittels einer relativ kleinen Anzahl zugrundeliegender Komponenten zu beschreiben.

Aufgrund steigender Verfügbarkeit von Programmen zur Lokalisation von Generatoren werden die physiologischen Ansätze häufiger verwendet. Dennoch können damit nicht alle Probleme der EKP-Forschung überwunden werden. Werden diese Verfahren zur Hypothesengenerierung eingesetzt, sind sie nicht in der Lage, das 'Invers-Problem' zu lösen. Da sie keine eindeutige Lösung erzeugen, können für die gleichen EKP-Daten mehrere gut-passende Generatorkonfigurationen ausgemacht werden. Zudem müssen die EKP-Generatoren mathematisch als äquivalente Dipole modelliert werden. Die Lokalisation eines äquivalenten Dipols kann aus mathematischen Gründen bei größeren aktiven Gewebebereichen tiefer innerhalb des Gehirns erscheinen, als dies tatsächlich der Fall ist.

3.3.2 Psychologische Ansätze der Komponentenidentifizierung

Im psychologischen Ansatz der Komponentenidentifizierung wird ein besonderes Merkmal des Potentialverlaufs ausgewählt und mit einem spezifischen psychologischen Prozess in Zusammenhang gebracht. Unter der Annahme, dass Informationsverarbeitungsprozesse parallel auftreten können, kann jedes Merkmal im Potentialverlauf auch mehrere Informationsverarbeitungsprozesse reflektieren.

Ein Ansatz zur Lösung des Problems der Komponentenüberlappung besteht darin, die Potentialverläufe in unterschiedlichen experimentellen Bedingungen voneinander zu subtrahieren, um die Komponente zu isolieren, deren Auftreten sich zwischen den Bedingungen unterscheidet. Somit betrachtet man die Unterschiede zwischen den Potentialverläufen als interessierende Komponente. Diese Komponente kann mit einem

kognitiven Prozess in Verbindung gebracht werden, von dem angenommen wird, dass er zwischen den Bedingungen diskriminiert. Einige Komponenten wurden auf diese Art bestimmt, unter anderem die Nd-Komponente, die auch als Verarbeitungsnegativität oder „processing negativity“ bezeichnet wird (Hillyard & Hansen, 1986; Näätänen, 1992), die „mismatch negativity“ (Näätänen, 1992) und die Dm-Komponente (Paller, Kutas & Mayes, 1987).

Der Subtraktionsansatz wird ebenfalls in PET-Studien verwendet, um die Muster des Gehirnstoffwechsels zu isolieren, die mit spezifischen kognitiven Operationen und Prozessen assoziiert werden (unter anderem Buckner & Tulving, 1995). Er wird ebenfalls in der Kognitionspsychologie verwendet (Donders, 1969). Eine Annahme der Kognitionspsychologie kann auch auf die Subtraktionsprozedur bei EKP-Daten angewendet werden: Zwei experimentelle Bedingungen können so konstruiert werden, dass sie sich nur hinsichtlich des interessierenden kognitiven Prozesses unterscheiden und im Hinblick auf alle anderen Prozesse gleich sind. Dies legt nahe, Subtraktionsverfahren nur dann zu verwenden, wenn sich diese Annahme belegen lässt.

Ein zusätzliches Problem der Anwendung dieses Verfahrens mit EKP-Daten resultiert daraus, dass Latenzunterschiede der gleichen Komponente in verschiedenen experimentellen Bedingungen auftreten können. Wird dennoch das Verfahren angewendet, kann aufgrund der Latenzunterschiede eine Komponente auftreten, die tatsächlich nur Latenzunterschiede in den zwei Bedingungen widerspiegelt.

Ein andere Gruppe von Ansätzen zur Komponentenbestimmung verwenden die Kovariationen in den EKP-Daten. Am bekanntesten ist die PCA (principal components analysis; Donchin & Heffley, 1978). Das Ziel der PCA ist es, gemeinsame Varianzquellen im Datensatz zu identifizieren. Insbesondere soll die PCA die Merkmale des Potentialverlaufs identifizieren, die eine Kovariation über die experimentellen Bedingungen und die Topographie aufweisen. Die PCA kann somit als ein Ansatz verstanden werden, der Merkmale des physiologischen und des psychologischen Ansatzes der Komponentendefinition verbindet (Coles & Rugg, 1995).

Bei der Verwendung der PCA ist es kritisch, dass sie zunächst nur die Muster von Kovarianzen in einem Potentialverlauf identifiziert, die danach ein Untersucher interpretiert. Bei dieser Interpretation wird gewöhnlich die Polarität, die Latenz, die

topographische Verteilung der Komponente und ihre Sensitivität gegenüber der experimentellen Manipulationen berücksichtigt (Donchin & Heffley, 1978).

Obwohl die PCA lange Jahre die bevorzugte Analyseverfahren war, wurde sie in den letzten Jahren aufgrund einiger Probleme weniger populär. Unter anderem kann die PCA falsche Komponenten nahelegen, auch wenn tatsächlich nur die Latenz der Komponenten zwischen experimentellen Bedingungen variiert. Eine Simulationsstudie von Wood und McCarthy (1984) zeigte, dass die PCA dazu tendiert, die Varianzen zwischen den extrahierten Komponenten falsch zuzuweisen. Aus diesem und weiteren Gründen empfiehlt sich die PCA nicht als *via regia* der Komponentenidentifizierung oder -quantifizierung.

Es kann festgehalten werden, dass die Bestimmung und das Auffinden von Komponenten ein zentrales Problem der EKP-Methode ist. Das Problem der Komponentenüberlappung stellt sich immer, wenn eine Komponente definiert wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Komponentendefinition in Begriffen der Gehirnsysteme, die sie generieren oder in Begriffen der psychologischen Prozesse, die sie manifestieren, erfolgt.

Da es sehr unwahrscheinlich ist, dass bestimmte Regionen des Gehirns und bestimmte kognitive Prozesse isoliert aktiviert werden, sind Verfahren notwendig, die eine eindeutige Komponentenbestimmung erlauben. Beide vorgestellten Ansätze, der physiologische und der psychologische Ansatz sowie die Kombination von beiden, bieten bisher keine umfassenden Lösungen für die mit ihnen verbundenen Probleme an. Der folgende Abschnitt stellt wichtige Komponenten vor.

3.4 EKP-Komponenten

Die Komponenten werden hier anhand eines zeitlichen Kriteriums gegliedert, danach ob eine Komponente *vor* oder *nach* einem Ereignis auftritt (vergleiche Coles & Rugg, 1995). Das Auftreten einer Komponente wird somit abhängig zu einem externen Kriterium gesetzt. Das Kriterium ist der Zeitpunkt, zu dem ein bestimmter Reiz dargeboten wird oder zu dem eine Verhaltensreaktion erfolgt. Die Wahl eines Kriteriums ist notwendig, da eine Entscheidung darüber getroffen werden muss, an welcher Stelle im fortlaufenden EEG die EKPs gesucht werden. Im Falle der Komponenten, die einem Ereignis vorausgehen, bedeutet das, dass sich das EKP auf vor dem Ereignis liegende Zeitpunkte bezieht.

Es gibt andere Möglichkeiten der Klassifikation von EKP-Komponenten. Eine eher physiologisch begründete Komponenteneinteilung gibt Näätänen (1992). Häufig wird zwischen tonischen, kurzen und phasischen, länger andauernden Komponenten unterschieden (z.B. Rockstroh, Elbert, Canavan, Lutzenberger & Bierbaumer, 1989). Die phasischen, länger andauernden Komponenten, die auch als langsame kortikale Potentiale oder langsame Wellen bezeichnet werden, grenzen sich über ihre längere zeitliche Erstreckung von den eher tonischen Komponenten ab. Rockstroh et al. (1989) und Lutzenberger, Elbert, Rockstroh & Birbaumer (1985b) geben einen Zeitbereich von 0.5 bis mehrere Sekunden Dauer an. Elbert (1993) stellt ein gesondertes Entstehungsmodell für langsame kortikale Potentiale auf, dass jedoch keine wesentlich anderen physiologischen Grundlagen und -annahmen postuliert, als die schon in Abschnitt 2.3 genannten. Allerdings wird auch die Ansicht vertreten (z.B. Rösler, Schumacher & Sojka, 1990), dass die Generierung in kortikalen Schichten für langsame kortikale Potentiale besser belegt sei (Creutzfeld, 1983; Speckman, Caspers & Elger, 1984) als für phasische Komponenten. Obgleich die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente langsame Wellen messen, werden hier alle bekannten Komponenten kurz vorgestellt.

3.4.1 Komponenten, die einem Ereignis vorausgehen

Bereitschaftspotential: Diese Komponente wurde von Kornhuber und Deeke (1965) in Untersuchungen freiwilliger Bewegungen entdeckt. Das Bereitschaftspotential ist durch einen langsamen, rampen-ähnlichen negativen Anstieg gekennzeichnet und geht beispielsweise einer freiwilligen Handbewegung in einem Zeitraum von über 1000 ms voraus. Die Negativität ist an den präzentralen Elektrodenpositionen maximal und steigt zwischen 10 - 15 μ V bis zum Zeitpunkt der erfolgten Reaktion an. Dabei wird die Negativität über der kontralateralen Seite der Schädeloberfläche maximal, das heißt über der linken Seite, wenn eine Bewegung der rechten Hand erfolgt und umgekehrt. Dieser Lateralitätseffekt wurde für Arm-, Hand- und Fingerbewegungen nachgewiesen (Vaughan, Costa & Ritter, 1968). Deshalb wird die Komponente auch als lateralisiertes Bereitschaftspotential bezeichnet. Die präzise Topographie dieser Komponente wurde mit der somatotopen Organisation des Motorkortex in Verbindung gebracht. Außerdem soll die Komponente die Bewegungsvorbereitung widerspiegeln (vergleiche Coles, 1989).

CNV (Contingent Negative Variation): Die CNV wurde erstmals von Walter, Cooper, Aldridge, McCallum und Winter (1964) berichtet. In ihrem Paradigma wurden Reizpaare dargeboten, die durch ein Zeitintervall getrennt waren, wodurch eine Kontingenz zwischen den Reizen geschaffen wurde. Im Experiment war der erste Reiz ein Klick-Geräusch, der zweite ein Lichtreiz mit einem Intervall von 1 s. Die Probanden sollten bei Darbietung des zweiten Reizes einen Knopf drücken. Während des Intervalls kann im EKP eine langsame negative Welle beobachtet werden, die bis zu 20 μV groß werden kann und über der fronto-zentralen Region maximal wird. Sie hat eine rampen-förmige Gestalt und wird zum Zeitpunkt des zweiten Reizes maximal. Die CNV tritt nicht auf, wenn die zwei Reize isoliert dargeboten werden oder wenn keine Reaktion auf den zweiten Reiz verlangt wird. Die CNV wurde zunächst als Erwartungswelle beschrieben, später wurde sie eher motorischen und nicht-motorischen Vorbereitungsprozessen zugeschrieben.

O- und E-Wellen: Ein Experiment von Loveless und Sanford (1974) legte nahe, dass sich die CNV aus mindestens zwei Komponenten zusammensetzt. Diese treten auf, wenn sich das Intervall zwischen den zwei Reizen verlängert. In ihrer Arbeit verwendeten sie Intervalle von 6 bis 15 s. Im EKP sind dabei zwei Prozesse beobachtbar: Ein anfänglich negativer Anstieg nach dem ersten Reiz und eine spätere negative Welle, die dem zweiten Reiz vorausgeht. Loveless und Sanford bezeichneten den frühen Prozess als O-Welle, da er ein Anzeichen von Orientierung darstellt und den zweiten Prozess als E-Welle (Erwartung), wobei sie die Ähnlichkeit dieses Prozesses zum Bereitschaftspotential betonen. Es besteht eine Kontroverse darüber, ob die E-Welle ein Bereitschaftspotential sei und ob es für die Auslösung notwendig ist, dass auf den zweiten Reiz reagiert wird. Demgegenüber wird auch postuliert, dass eine nicht-motorische E-Welle existiere, die mit der Vorbereitung sensorischer Informationsverarbeitung oder der Rückmeldung über eine ausgeführte Reaktion verbunden ist (vergleiche Brunia, 1993).

3.4.2 EKP-Komponenten, die auf ein Ereignis folgen

Bei diesen EKP-Komponenten wird in der Regel zwischen exogenen und endogenen Komponenten diskriminiert. *Exogene* Komponenten des EKP treten innerhalb von 10 bis 100 ms nach Reizdarbietung auf. Sie weisen eine Reihe von Charakteristika auf, unter anderem modalitätsspezifische Topographie, hohe inter- und intraindividuelle Stabilität,

Abhängigkeit von physikalischen Reizparametern wie beispielsweise Reizintensität. Intraindividuelle Stabilität bedeutet, dass exogene Komponenten im Hinblick auf den situativen Zustand von Personen invariant sind, ebenso auf die Art der Interaktion zwischen der Person und dem Reiz (interindividuelle Stabilität). Die Charakteristika dieser Komponenten selbst, also Amplitude, Latenz und Topographie, sind mehr von den physikalischen Gegebenheiten der sensorischen Reize, wie beispielsweise ihrer Modalität und ihrer Intensität, abhängig und können nicht durch kognitive Manipulationen beeinflusst werden (unter anderem Rockstroh et al., 1989; Coles & Rugg, 1995). Exogene Komponenten reflektieren die Ausbreitung von Aktivität innerhalb der klassischen sensorischen Bahnen und können somit im Rahmen neurophysiologischer Untersuchungen zu diagnostischen Zwecken eingesetzt werden (Stöhr, Dichgans, Diener & Buettner, 1982).

Endogene Komponenten mit einem Latenzbereich ab ca. 100 ms nach Reizeinsatz sind in der Regel durch eine modalitätsunabhängige Topographie charakterisiert. Sie sind abhängig von den verhaltensmäßigen und den psychologischen Prozessen, die entsprechend der Aufgaben, der Instruktion oder des experimentellen Settings variieren. Ihre Charakteristika oder ihr Auftreten selbst ist somit von der Interaktion zwischen Person und Reiz abhängig. Die endogenen Komponenten variieren als Funktion von Faktoren wie Aufmerksamkeit, Aufgabenrelevanz und der Art der Verarbeitung, die durch einen Reiz notwendig ist. Endogene Komponenten können sogar in Abwesenheit eines externen Ereignisses hervorgerufen werden, wenn beispielsweise ein erwarteter Reiz nicht auftritt (Sutton, Tueting, Zubin & John, 1967).

Die Einteilung in exogene und endogene Komponenten ist nicht unproblematisch. Für fast alle exogenen, sensorischen Komponenten lässt sich nachweisen, dass sie durch kognitive Manipulationen, z.B. der Aufmerksamkeit, beeinflusst werden können. Für viele der endogenen, kognitiven Komponenten konnte gezeigt werden, dass sie durch die physikalische Eigenschaften der auslösenden Bedingungen, beispielsweise der Modalität des Reizes (unter anderem Johnson, 1989; Kritik: Naumann et al., 1992), beeinflussbar sind. Aus diesem Grund schlägt Coles und Rugg (1995) vor, statt einer einfachen Dichotomie eine kontinuierliche endogen-exogen Dimension anzunehmen, die zeitlich mehr oder weniger ausgeprägt sein kann: Die innerhalb der ersten 100 ms nach

Reizdarbietung auftretenden Komponenten sollen im stärkeren Maße exogen sein, während spätere Komponenten mehr endogen sein sollen.

Sensorische Komponenten: Sensorische Reize aller Modalitäten sind mit einer Reihe von Veränderungen im EKP assoziiert. Diese stehen mit der Übertragung der sensorischen Information vom peripheren sensorischen System zum Kortex und/oder der Ankunft dieser Information im Kortex in Zusammenhang. Für einige Modalitäten dauern die Latenzen dieser frühen Veränderungen nur wenige ms an und reflektieren die Übertragung sensorischer Information in den sensorischen Bahnen.

Für auditive Reize werden sogenannte *Hirnstamm-Potentiale* beobachtet. Diese weisen eine Latenz von 10 ms auf und reflektieren die Aktivierung verschiedener Kerne des Hirnstamms. Spätere sensorische Komponenten mit einer Latenz von bis zu 100 ms reflektieren die Ankunft der auditiven Information in verschiedenen Regionen des Kortex. Obwohl für alle Modalitäten gilt, dass viele der sensorischen Komponenten durch Manipulationen, beispielsweise der Aufmerksamkeit, beeinflussbar sind, sind sie obligatorisch in dem Sinne, dass sie bei jedem Menschen und bei jeder Gelegenheit beobachtbar sind.

Nd/Verarbeitungsnegativität: Im Unterschied zu den obligatorischen, sensorischen Komponenten sind die Nd (negative difference wave; Hillyard & Hansen, 1986) und die Verarbeitungsnegativität (processing negativity; Näätänen, Gaillard & Mantysalo, 1978) Beispiele optionaler, endogener EKP-Komponenten. Beide Komponenten, Nd und Verarbeitungsnegativität, beschreiben die gleiche EKP-Komponente. Es werden jedoch unterschiedliche Annahmen zur funktionalen Bedeutung gemacht.

Nd bezieht sich auf die Polarität und Operation zur Identifizierung der Komponente, nämlich die Differenzbildung zwischen zwei Potentialverläufen. Verglichen werden dabei in der Regel Potentialverläufe auf die gleichen Reize, wobei diese einmal zu beachten sind und einmal nicht. Verarbeitungsnegativität hingegen spiegelt wider, dass die Komponente mit zusätzlichem Verarbeitungsaufwand auf beachtete Ereignisse aufgrund eines vorausgehenden Selektionsprozesses gewonnen wird.

Im typischen Paradigma wird einer Serie von Reizen mit sehr kurzen Darbietungszeiten vorgegeben, wobei die Reize als Funktion eines oder mehrerer kritischer Attribute variieren. In der Studie von Hillyard, Hink, Schwent und Picton (1973) hörten die

Probanden eine Sequenz von Tönen, die mit unterschiedlichen Frequenzen entweder in das linke oder rechte Ohr oder in beide Ohren dargeboten wurden. Die Aufgabe bestand darin, die Töne mit einer bestimmten Frequenz zu zählen. Verglichen wurden die Potentialverläufe auf die beachteten und die unbeachteten Reize. Die EKP auf beachtete Reize waren negativer mit einem Maximum ca. 100 ms nach Reizdarbietung. Nach Hillyard et al. (1973) soll die Amplitude der N1-Komponente durch einen Aufmerksamkeitseffekt moduliert werden und die Tatsache reflektieren, dass unbeachtete, sensorische Zuflüsse von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen werden. Hingegen argumentieren Näätänen et al. (1978), der Aufmerksamkeitseffekt führe dazu, dass sich eine negative Welle auf das EKP der unbeachteten Reize addiere, die nicht notwendigerweise mit der N1-Komponente zeitgleich sein müsse. Die negative Welle reflektiere die Verarbeitung einer Zielreizdimension. Eine Synthese beider Interpretationen findet sich bei Näätänen (1992).

Mismatch Negativity und die N2: Ca. 200 ms nach Darbietung einer bestimmten Klasse von visuellen und auditiven Reizen, tritt eine negative Komponente im EKP auf, die als N200 oder N2 bezeichnet wird. Kritisch für die Auslösung dieser Komponente ist, dass sich ein Reiz in irgendeiner Art und Weise vom vorherrschenden Kontext unterscheiden muss. Im typischen Paradigma kann jeder Reiz zwei oder mehreren Reizklassen zugeordnet werden, wobei eine Reizklasse unwahrscheinlicher ist. In den Studien von Näätänen et al. (1978) unterschieden sich die wahrscheinlichen und unwahrscheinlichen auditiver Reize hinsichtlich ihrer Intensität und Frequenz. Die Aufgabe der Probanden war es, die Aufmerksamkeit auf eines der beiden Ohren zu richten und die Zielreize zu zählen. Um die „mismatch negativity“ zu erhalten, wird das Differenzpotential zwischen dem EKP auf die Standardreize und dem EKP auf die Zielreize gebildet. Diese Differenzpotentiale werden getrennt für das beachtete und das nicht-beachtete Ohr berechnet. In beiden Differenzpotentialen zeigt sich eine Negativität, die um 200 ms maximal gipfelt. Für das EKP auf das beachtete Ohr zeigt sich zudem eine auf die Negativität folgende Positivität, die P3.

Da die „mismatch negativity“ auch auftritt, wenn Reize nicht beachtet werden, soll diese Komponente eine automatische Erkennung von physikalischen Abweichungen reflektieren (Näätänen et al., 1978). Die „mismatch negativity“ soll von der physikalischen Abweichung eines Reizes von dem ihn umgebenden Kontext abhängig

sein. Verschiedene Studien zeigten, dass die Amplitude der „mismatch negativity“ sensitiv auf das Ausmaß dieser Abweichung ist. Woldorff, Hackley und Hillyard (1991) kritisierten die Ansicht, diese Komponente reflektiere ausschließlich automatische Prozesse, da die Amplitude der N2 nachweislich durch Aufmerksamkeit beeinflussbar ist.

Die „mismatch negativity“ wird von der N2b diskriminiert. Das Auftreten der N2b soll davon abhängen, ob Reize aufgabenrelevant sind. Die N2b scheint in vielen Fällen mit der P3 (P3b) zu kovariieren.

P300, P3, P3a, P3b: Keine andere Komponente hat vermutlich soviel Interesse hervorgerufen, wie die P3 und mit ihr verbundene positive Abweichungen im Potentialverlauf. Im Originalexperiment von Sutton, Braren, Zubin und John (1965) wurde den Probanden eine Serie von Reizpaaren, ein Hinweisreiz und ein Testreiz, dargeboten. Die Testreize waren Töne oder Lichtreize. Bei einigen Paaren folgte auf den Hinweisreiz immer der gleiche Testreiz. Die Probanden konnten sich somit über die sensorische Qualität des Testreizes sicher sein, bevor er dargeboten wurde. Bei einigen Paaren folgte auf den Hinweisreiz entweder ein visueller oder ein auditiver Testreiz. Nach der Darbietung des Hinweisreizes sollten die Probanden die Modalität des nachfolgenden Testreizes einschätzen. Verglichen wurde das EKP auf die Testreize in der sicheren und der unsicheren Bedingung. Obwohl die beiden Potentialverläufe eine Reihe von Unterschieden aufweisen, war der deutlichste Unterschied die Positivität, die bei einer Latenz von 300 ms auftritt und dort gipfelt. Diese Komponente wird als P3 oder P3b bezeichnet.

In der nachfolgenden Zeit wurde das Paradigma verändert und nun eine Reihe von Reizen aus zwei Reizklassen dargeboten. Dabei ist eine Reizklasse seltener als die andere und die Probanden reagieren in irgendeiner Form auf die seltenen Reize, was als „oddball task“ bezeichnet wird. Die P3 wird über der parietalen und zentralen Region maximal und weist eine Latenz von 300 bis zu 900 ms auf. Die Latenzvariabilität hängt von der Schwierigkeit ab, mit der ein Reiz in eine der zwei Reizklassen kategorisiert werden kann. Je schwieriger die Kategorisierung, desto größer die Latenz der P3. Die Latenz der P3 wird daher als Messung der Reizbeurteilungszeit angesehen (siehe unter anderem Donchin & Coles, 1988a, Donchin & Coles, 1988b).

Bei Aufgaben, die eine einfache Oddball-Struktur aufweisen, variiert die Amplitude der P3 mit der Wahrscheinlichkeit des seltenen Ereignisses. Je seltener ein Ereignis, desto

größer wird die Amplitude der P3. Die Amplitude hängt auch davon ab, wie viel Informationen aus dem Ereignis extrahiert werden können.

Es wurde vorgeschlagen, die P3 reflektiere den Prozess des „context updating“ oder ‘Gedächtnis-updatings’, durch den ein aktuelles Modell der Umwelt durch hinzukommende Informationen modifiziert wird (siehe Donchin & Coles, 1988a; Donchin & Coles, 1988b). Dieses Modell wurde unter anderem von Verleger (1988) kritisiert, der eine alternative Interpretation der P3 vornimmt: Demnach wird der P3-Komplex als ein Indikator von Überschussaktivierung angesehen, die aus perzeptuellen Kontroll-Areas herausgelassen wird. Gemäß dem Modell werden Informationen durch das Zusammenschließen von Reizen in größere Einheiten verarbeitet, ähnlich wie Wörter in einem Satz. Die Schließung einer Einheit soll eine weit streuende positive Welle auslösen.

Es wurde zudem verschiedentlich (unter anderem Johnson, 1986) darauf hingewiesen, dass die P3 keine einheitliche Komponente sei, sondern eher die Aktivität eines weit streuenden Systems reflektiere. Die dieses System konstituierenden Bestandteile sollen je nach situativen Anforderungen mehr oder weniger aktiviert werden. Die exakte funktionale Bedeutung des postulierten Komponentenkomplexes wird aber erst dann verfügbar sein, wenn die beteiligten neuronalen Systeme besser erforscht sind.

Die P3a ist ein Bestandteil des Komponentenkomplexes. Sie entsteht, wenn zu einer Oddball-Aufgabe eine dritte, neue Reizklasse hinzugefügt wird. Die dritte Reizklasse bedingt eine frontal maximale Positivität und weist entsprechend eine andere Topographie auf als die klassische P3 (Knight, Scabini, Woods & Clayworth, 1989). Diese Komponente wird auch als frontale P3 bezeichnet. Nach Befunden von Knight (1991) sind die P3a und P3b von der Integrität unterschiedlicher Hirnregionen abhängig, da die P3a durch Läsionen im Frontalkortex beeinflusst wird, nicht aber die P3b.

N400: Während die N2-Komponente dann auftritt, wenn sich die Reize physikalisch vom Kontext unterscheiden, ist die N400 sensitiv auf Abweichungen der auslösenden Reize, die eher abstraktere Eigenschaften reflektieren, wie z.B. die semantische Bedeutung des auslösenden Reizes. Kutas und Hillyard (1980) beobachteten in einer Studie über die Verarbeitung von Sätzen die N400. Die Probanden sollten Sätze lesen, die aus sieben Wörtern bestanden. In einigen Sätzen war das letzte Wort semantisch unpassend, jedoch syntaktisch korrekt. In anderen Sätzen wurde das letzte Wort nur größer dargestellt als

die vorhergehenden Wörter. Die semantisch abweichenden Worte bedingten einen negativen Peak mit einer Latenz von 400 ms, hingegen bedingten die in der Größe abweichenden Worte eine klassische P3 mit einer Latenz von 560 ms.

In weiteren Studien zeigte sich, dass die Amplitude der N400 eine inverse Funktion zum semantischen Zusammenhang eines Wortes zum Satzinhalt aufweist. Die N400 kann auch im semantischen Priming-Paradigma ausgelöst werden. Die Darbietung isolierter Wörter, also kontextlos, kann ebenfalls eine große N400 auslösen, wenn diese im Hinblick auf ihre Bedeutung verarbeitet werden. Die N400 scheint somit eine Default-Komponente zu sein, die bei Wörter auftritt, deren Bedeutung entweder nicht mit dem vorherigen Kontext in Zusammenhang steht oder deren Bedeutung sich nicht aus dem vorherigen Kontext des Wortes vorhergesagen lässt. Aufgrund der Abhängigkeit der N400 von semantischer Bedeutung ist sie für die Untersuchung semantischer Prozesse in geschriebener und gesprochener Sprache sehr interessant. Die N400 ist auch sensitiv gegenüber phonologischen oder orthographischen Informationen (z.B. Rugg & Barrett, 1987) und auch bei nicht-verbale Reizen, wie z.B. bei Bildern (Barrett & Rugg, 1990), wurden N400 ähnliche Komponenten beobachtet.

3.4.2.1 Langsame Wellen¹: Einleitung

Ein zentrales Ziel der in Kapitel 4 und 5 beschriebenen Experimente ist die Untersuchung einer frontal positiven langsamen Welle. Die Darstellung der langsamen negativen und positiven Wellen, die auf ein Ereignis folgen, wird daher umfangreicher als die bisher beschriebenen Komponenten. Viele ältere EKP-Studien wiesen eine so kurze Messdauer auf, dass langsame Wellen, die weniger durch einen distinkten Gipfel sondern eher durch langsame, DC-ähnliche Abweichungen von mehreren hundert Millisekunden bis zu mehreren Sekunden gekennzeichnet sind, nicht entdeckt wurden. Wurde das Signal zudem mit einer Hochpassfilterung verstärkt, so konnten die DC-ähnlichen Veränderungen nicht beobachtet werden (Rösler, Heil & Röder, 1997). Langsame Wellen wurden in sehr unterschiedlichen Paradigmen gemessen (siehe z.B. Ruchkin, Johnson, Mahaffey & Sutton, 1988; Rockstroh et al., 1989; Birbaumer, Elbert, Canavan & Rockstroh, 1990; Rösler & Heil, 1991; Rösler et al., 1997). Es zeigt sich, dass verschiedene Autoren unterschiedliche Positionen zur funktionalen Bedeutung der

langsamen Wellen beziehen, häufig in enger Anlehnung zum untersuchten Paradigma. Hier werden zunächst einige dieser Positionen präsentiert. Abschnitt 3.4.2.2 stellt exemplarisch einige Studien zu langsamen Wellen im Überblick dar, um die Vielfältigkeit der Forschung zu langsamen Wellen aufzuzeigen.

Im Zeitraum nach der P3 wurden positive und negative langsame Wellen beschrieben, deren Amplituden mit den Erfordernissen der Aufgaben in Verbindung gebracht wurden (Übersichten finden sich bei McCallum, 1987; Ruchkin et al., 1988; Rösler et al., 1997). Diese langsamen Wellen umfassen einen Latenzbereich von 500 ms bis 1500 ms nach Reizeinsatz. Squires, Squires und Hillyard (1975a) bezeichneten sie als langsame Wellen (slow waves). Sie sollen die Informationsverarbeitung reflektieren, die nach der Verarbeitung auftritt, die der P3 zugrunde liegt. Die Informationsverarbeitung, die die langsamen Wellen bedingt, wird durch spezifische Aufgabenerfordernisse hervorgerufen.

Relativ hohe Übereinstimmung besteht darin, dass die Parameter der langsamen Wellen, also Latenz, Polarität und Topographie, als Funktion der Aufgabenerfordernisse variieren. Die Latenz der langsamen Wellen soll den Zeitpunkt anzeigen, zu dem zusätzliche Verarbeitung notwendig wird. Die Amplitude der langsamen Wellen soll mit erhöhter Ladung auf das Gedächtnis (memoryload) und erhöhter Reizbedeutung ansteigen (Rohrbaugh, Syndulko & Lindsley, 1978; Rohrbaugh & Gaillard, 1983; Rohrbaugh, Newlin, Varner & Ellingson, 1984; Gaillard & Van Arkel, 1986), wenn z.B. seltene Reize gezählt werden müssen oder akustische Reize unterschieden werden müssen. Positive langsame Wellen zeigen sich sensitiv auf Reizwahrscheinlichkeit, indem weniger wahrscheinliche Reize eine größere Amplitude hervorrufen als Reize mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (Rohrbaugh et al., 1978; Gaillard, 1984; Rösler et al., 1986).

Ruchkin et al. (1988) unterscheiden nach der Variation konzeptueller (arithmetischer Operationen) und perzeptueller Aufgabenanforderungen (Musterunterscheidungen) drei langsame Wellen mit unterschiedlichen Latenzbereichen:

- Eine P3b mit einer Latenz von 700 ms und einem parietalen Maximum, die sich sensitiv auf die subjektive Kategorisierung von einfachen und schwierigen konzeptuellen Operationen zeigte und eine ansteigende Amplitude für gering wahrscheinliche Operationen aufwies.

¹ Die Begriffe langsame Welle oder langsame kortikale Potentiale werden meist äquivalent verwendet.

- Eine zentro-parietale positive langsame Welle mit einer Latenz von 750 ms und einer Dauer von 800 ms, die als Funktion perzeptueller Schwierigkeit ansteigen soll.
- Eine späte langsame Welle, die bis zum Ende der Messdauer von 2700 ms auftrat und über den posterioren Elektrodenpositionen negative Werte aufwies, jedoch positive Werte an Fpz. Sie soll mit konzeptueller Schwierigkeit ansteigen, während sie bei perzeptueller Schwierigkeit eine spätere Latenz aufweist.

Positive langsame Wellen können sich mit nachfolgenden negativen langsamen Wellen überlappen, jedoch trennen viele Autoren positive und negative langsame Wellen voneinander (z.B. Picton & Stuss, 1980; Friedman, Brown, Vaughan, Cornblatt & Erlenmeyer-Kimling, 1984; McCallum, 1987). Überlappungen können aber beispielsweise Befunde einer reduzierten Negativität in einer Aufgabe zum Gedächtnisabruf mit ansteigender Größe des Gedächtnissets erklären (Roth et al., 1975; Roth, Rothbart & Kopell, 1978). Bei Aufgaben, die eine fortlaufende Bearbeitung des Probanden von 0.5 bis zu mehreren Sekunden erfordern, wird die positive langsame Welle durch eine negativen Shift innerhalb der ersten Sekunden ersetzt (unter anderem Lang, Lang, Uhl & Kornhuber, 1987; Lutzenberger, Elbert, Rockstroh & Birbaumer, 1985a). Auch die negativen langsamen Wellen während der Ausführung von Aufgaben sind durch eine aufgabenspezifische Topographie gekennzeichnet. Lang et al. (1987) berichteten frontal und links zentral negative langsame Wellen während der Verarbeitung verbalen Materials. In einer Tracking-Aufgabe beobachteten Lang, Lang, Kornhuber und Kornhuber (1986) fronto-zentral negative Wellen mit größerer Amplitude für die schwierige als für die einfache Aufgabe. Bei der Antizipation wie auch bei der Ausführung von motorischen Aufgaben mit zwei Fingern von jeder Hand beobachteten Lutzenberger et al. (1985a) größere negative langsame Wellen über der zentralen Area kontralateral zur reagierenden Hand.

Langsame Wellen zeigen häufig einen Gradienten von frontal nach parietal mit positiven Werten an zentralen und posterioren und negativen Werten an frontalen Elektrodenpositionen (Rockstroh et al., 1989). Dieser Gradient kann mit Aufgabenerfordernissen variieren: Negative langsame Wellen scheinen eher mit Absuchen (Scannen) und mentaler Vorstellung verbunden zu sein, während positive langsame Wellen eher mit Einprägen in das Gedächtnis, Regellernen und perzeptuellen

Operationen verbunden sind. Topographische Unterschiede wurden daher als eine Funktion der Aufgabe angesehen, die „the nature of the additional processing, in the sense that different tasks may involve different neural generators“ widerspiegeln (Ruchkin et al., 1988, pp. 340-341).

Nach Ruchkin et al. (1988) variiert die Topographie langsamer Wellen über verschiedene Aufgaben. Bei perzeptueller Schwierigkeit sollen langsame Wellen über den posterioren und zentralen Elektrodenpositionen positiv sein. Allerdings werden auch positive Amplituden über frontalen Elektrodenpositionen (z.B. Johnson & Donchin, 1978; Kok & DeJong, 1980) oder frontal negative Amplituden (z.B. McCallum, Curry, Cooper, Pocock & Papakostopoulos, 1983; Ruchkin, Sutton, Kietzman & Silver, 1980) berichtet. Ruchkin et al. (1988) postulieren größere Unterschiede hinsichtlich der Topographie bei verschiedenen konzeptuellen Aufgaben: Positive langsame Wellen, die über der zentro-parietalen Region maximal waren, wurden während des Reaktivierens von gespeicherten abstrakten Informationen beobachtet (Rösler, Clausen & Sojka, 1986), bei semantischem Matching (Sanquist, Rohrbaugh, Syndulko & Lindsley, 1980) und beim Regellernen (unter anderem Johnson & Donchin, 1982). Karis, Fabiani und Donchin (1984) beobachteten eine relativ große, frontal maximale positive langsame Welle in einem Experiment, in dem komplexe Memorierungsstrategien beim Einprägen angewendet wurden, während Neville, Kutas, Chesney und Schmidt (1986) eine langsame Welle beobachtete, die in einem Paradigma mit semantischen Urteilen und zum inzidentellen Gedächtnis positiv über den frontalen und parietalen Elektrodenpositionen war.

In einem Gedächtnis-Scanning-Paradigma fanden Okita, Wijers, Mulder und Mulder (1985) kurz andauernde negative langsame Wellen von 400 bis 700 ms, die maximal über dem zentro-posterioren Skalp waren, während Kramer, Schneider, Fisk und Donchin (1986) länger andauernde negative langsame Wellen von 500 bis 1200 ms berichteten, die maximal über dem frontalen Skalp waren. Stuss, Sarazin, Leech und Picton (1983) und Peronnet und Farah (1987) berichteten zentro-parietal negative langsame Wellen während der mentalen Rotation visueller Bildern. Stuss et al. (1983) zeigten, dass die späte negative Komponente nicht für andere Aufgaben mit komplexen Figuren auftrat. Nach Peronnet und Farah (1987) war die Amplitude der Negativität direkt mit dem Ausmaß verbunden, in dem die Figuren gedreht werden mussten. Schließlich beobachteten Johnson, Cox und Fedio (1987) eine negative langsame Welle mit einer frontalen

Topographie in einem mentalen Rotationsexperiment. Es ist jedoch unklar, zu welchem Ausmaß diese Aktivität wahre Rotationsverarbeitung reflektiert, da die Reize verbal enkodiert werden konnten. Diesen Studien ist gemeinsam, dass die Amplitude der langsamen Welle als Funktion der Aufgabenanforderung und/oder mit Anzeichen von verbesserter Verarbeitungseffizienz im Verhalten ansteigt, wenn beispielsweise höhere Recall-Werte in einem Gedächtnisexperiment erzielt wurden.

Es wurden Versuche unternommen, die P3b und langsame Wellen zu trennen: Roth, Ford und Kopell (1978) fanden, dass die Amplituden von P3b und langsamer Wellen invers als Funktion der Reaktionszeit in einen auditivem GO/NOGO Paradigma variierten. Rösler et al. (1986) bestimmten die langsamen Wellen als ein Element der LPC (Late Positive Component) und postulierten, dass langsame Wellen mit aufwendigem, kontrolliertem Verarbeiten in Zusammenhang stehe. Johnson und Donchin (1985) beobachteten neben einer P3 eine oder zwei zusätzliche positive Wellen, wenn die Unterscheidbarkeit von Tonpaaren in einer Aufgabe zur Zeitschätzung manipuliert wurde, wobei die EKPs bis 1500 ms nach Reizdarbietung aufgezeichnet wurden. Die Ähnlichkeiten in der Sensitivität dieser Peaks und der P3 auf experimentelle Manipulationen und somit die Erfüllung der operationalen Kriterien einer P3-Komponente, ließen die Autoren zu dem Schluss kommen, dass ihre Peaks ebenfalls P3-Aktivität repräsentieren. Sie nahmen an, die P3 bestehe aus multiplen Komponentenanteilen (siehe Abschnitt 3.4.2). Die P3 auf Töne wurde als ein Anzeichen der Identifikation und Klassifikation des Tones interpretiert. Die spätere positive langsame Welle wurde mit der Verwertung dieser Information in Zusammenhang gebracht.

Eine Reihe von Autoren haben sowohl die P3b als auch die langsamen Wellen mit Ladung in das Gedächtnis verbunden (z.B. Rösler, 1982; Roth et al., 1978; Donchin & Coles, 1988a). Loveless, Simpson und Näätänen (1987) postulieren die Trennung einer frontal negativen und parietal positiven langsamen Welle, da sie verschiedene Gehirnereignisse widerspiegeln, die in ähnlichen experimentellen Bedingungen eines auditiven Paradigmas mit verschiedenen abweichenden Tönen auftreten.

Rösler et al. (1990) vertreten die Ansicht, dass langsame Wellen durch ihre Polarität, ihre Topographie, ihr Amplitudenniveau und ihre Dauer charakterisiert sind. Da langsame Wellen als Manifestation besonderer Verarbeitungsstadien angesehen werden, sind sie

nach Ansicht der Autoren aus mehreren Gründen von besonderem Interesse für die kognitive Psychologie: Die Annahmen über neurophysiologische Generatoren der langsamen Wellen sollen begründeter sein als die für phasische EKP-Komponenten. Langsame Wellen sollen ihren Ursprung in kortikalen Schichten haben (Creutzfeld, 1983; Speckman et al., 1984). Dieses könne nicht mit Sicherheit für phasische Komponenten behauptet werden. Zudem sollen langsame Wellen durch eine Veränderung des Niveaus der Basisaktivität des kortikalen Gewebes bedingt sein, also einer synchronisierten Veränderung des bestehenden Potentials an den apikalen Dendriten der kortikalen Neurone.

Die Polarität der langsamen Wellen soll zudem Hinweise über die Art der Veränderungen liefern. Dabei könne angenommen werden, dass negative langsame Wellen durch einem Anstieg der excitatorischen postsynaptischen Potentiale (EPSPs) in den oberen Schichten des Kortex resultieren und somit den Anstieg der Aktivität der zugrundeliegenden kortikalen Areas anzeigen. Positive langsame Wellen sollen mit einem Abfall von EPSPs oder auch einem Anstieg der inhibitorischen postsynaptischen Potentiale (IPSPs) einhergehen. Sie zeigten somit eine Verminderung der Aktivität oder eine relative Hemmung der besonderen kortikalen Areas an. Elbert und Rockstroh (1987) nahmen zudem an, dass langsame Wellen Manifestationen eines Schwellen-Regulationsmechanismus seien, der kortikale Areas entsprechend erwarteter und/oder aktueller Verarbeitungsanforderungen anpasst.

Rösler et al. (1990) leiten daher folgende Hypothesen ab:

1. Die Topographie der langsamen Wellen spiegelt die relative Aktivität/Inaktivität von kortikalen Areas während der Informationsverarbeitung wider.
2. Die Dauer und Amplitude der langsamen Welle zeigt die Dauer eines besonderen Informationsverarbeitungsschrittes.
3. Die Veränderung von einer langsamen Welle zu einer anderen innerhalb einer Aufgabe entspricht der Abfolge von Verarbeitungsschritten oder -stadien.

Ein neuerer Überblick von Rösler et al. (1997) vertritt keine grundsätzlich neuen Ansichten zur Entstehung langsamer Wellen, sondern fokussiert ausschließlich auf negativen langsamen Wellen. Dies verdeutlicht einen allgemeinen Trend der letzten Jahre: Viele Autoren untersuchen gezielt negative langsame Wellen.

3.4.2.2 Langsame Wellen: Studien im Überblick

Hier werden einige häufig untersuchte Themenkomplexe der Forschung zu langsamen Wellen dargestellt.

Mentale Arithmetik und mentale Rotation: Eine ganze Reihe von Studien untersucht mentale Arithmetik und Rotation. In der Studie von Ruchkin et al. (1988) wurden bei mentaler Arithmetik frontal positive langsame Wellen gefunden. In der Studie von Rösler et al. (1990) fanden sich bei Arithmetik ebenfalls frontal positive Amplituden wie bei Ruchkin et al. (1988). Rösler und Heil (1991) unternahmen einen Replikationsversuch der Studie von Ruchkin et al. (1988) mit kleinen Veränderungen. Dabei sollten die Effekte der perzeptuellen und konzeptuellen Aufgabenanforderungen auf die langsamen Wellen getrennt werden, denn die von Ruchkin et al. (1988) berichtete negative langsame Welle an zentro-posterioren Elektrodenpositionen, wurde in Frage gestellt. Die von Ruchkin et al. (1988) verwendete Aufgabe zur mentalen Arithmetik soll durch das System der Anordnung der Reize überlagert gewesen sein. Daher habe sich eine Erwartungswelle über die langsame Welle legen können.

Rösler und Heil (1991) fanden ebenfalls positivere Amplituden an den frontopolaren Positionen für mentales Teilen im Vergleich zu mentalem Subtrahieren und der Speicherung von Informationen im Kurzzeitgedächtnis. Diese Positivierung im frontalen Kortex wurde als ein Stadium relativer Hemmung bei den Aufgaben angesehen. Dabei bleibe jedoch unklar, ob die frontalen Areas bei den Aufgaben nicht benötigt werden oder ob die Aufgaben eine Hemmung der frontalen Areale erfordern, um die Effektivität der aufgabenspezifischen kortikalen Module zu erhöhen. Bei mentaler Rotation fand sich ein relativer Anstieg der Aktivität an posterioren kortikalen Areas. Dies entspreche der Annahme, dass visuelle Bilder während der mentalen Rotation transformiert werden und stimme mit neurologischen Befunden überein beispielsweise der Messung des regionalen zerebralen Blutflusses. Diese Befunde belegen, dass der parieto-okzipitale Hirnbereich für diese Art von Verarbeitung wesentlich sei (Deutsch, Bourbon, Papanicolaou & Eisenberg, 1988). Rösler und Heil (1991) fanden keine negativen langsamen Wellen an den posterioren Elektrodenpositionen, die als Funktion der Rechenaufgabe selbst variierten. Daher folgerten die Autoren, dass Ladung auf das Arbeitsgedächtnis (Einprägen, Subtraktion oder Division) eher mit positiven als mit negativen langsamen Wellen einhergehe. Die Bestimmung der funktionalen Signifikanz langsamer Wellen sei

aufwendig, da zukünftige und vergangene Ereignisse im experimentellen Ablauf als Modulatoren der Amplituden der langsamen Wellen berücksichtigt werden müssen. Daher wird empfohlen, lange Aufzeichnungsepochen zu verwenden, um diese Effekte beobachten zu können.

Ruchkin und Johnson (1991) erklärten die Ergebnisse von Rösler und Heil (1991) durch reduzierte Unterschiede zwischen den konzeptuellen Schwierigkeitsniveaus und aufgrund einer zusätzlichen Aufgabe bei der Ausführung der Reaktion. Angesichts höherer Fehlerraten müsse angenommen werden, die Probanden hätten ein höheres Maß an Verarbeitung aufbringen müssen. Diese zusätzliche Verarbeitung sei in allen Bedingungen erforderlich gewesen. Eine weitere Studie von Ruchkin, Johnson, Canoune und Ritter (1991) sollte die Ambiguitäten der früheren Experimente klären. Insbesondere die Frage, ob die Negativität an den posterioren Elektrodenpositionen, die für mentale Rotation und Arithmetik beobachtet wurde, die gleichen sind. Daher wurden hier beide Aufgaben, Rotation und Arithmetik, zufällig von Durchgang zu Durchgang variierend gegeben. Die an den posterioren Elektrodenpositionen gefundene negative und an den präfrontalen Elektrodenpositionen gefundene positive langsame Welle während mentaler Arithmetik, repliziert Ruchkin et al. (1988). Die Daten zeigen zudem, dass die parietale Negativität am deutlichsten in der Epoche nach der Reaktion ist. Dies widerspreche der Erklärung von Rösler und Heil (1991), es handele sich um die Antizipation eines imperativen Reizes, der die verzögerte Reaktion anzeige, denn in dieser Untersuchung wurde kein Hinweisreiz verwendet.

Eine Studie von Pauli et al. (1994) untersuchte, wie sich das Üben arithmetischer Aufgaben auf das Gehirn auswirkt. Dazu trainierten Probanden in vier Sitzungen arithmetische Aufgaben, was sich unter anderem in schnelleren Reaktionszeiten widerspiegelte. Die während der arithmetischen Aufgaben aufgezeichneten EKPs waren durch eine ausgeprägte späte Positivität nach der Aufgabenpräsentation charakterisiert, die nach der Antwort durch eine positive langsame Welle und eine Negativität gefolgt wurde. Die Komponenten reagierten auf Übung und Schwierigkeit unterschiedlich. Übung beeinflusste hauptsächlich die Topographie der Amplitude der Positivität und deren Offset-Latenz. Schwierigkeit wirkte hauptsächlich auf die Latenz der langsamen Welle und die Negativität vor der Reaktion. Die in den EKPs beobachtete fronto-zentrale Positivität reduzierte sich von Sitzung zu Sitzung. Schließlich fand sich Positivität nur

noch in der zentro-parietalen Region. Der Frontallappen soll für die Verarbeitung nur notwendig sein, solange eine Aufgabenausführung nicht automatisiert ist, während die automatisierte Arithmetik für die Verarbeitung nur Aktivität parietaler Regionen des Gehirns erfordert. Die Negativität vor der Reaktion soll excitatorische vorbereitende Prozesse reflektieren, die mit der Aktivierung von Strategien zum Berechnen verbunden sind.

In einer weiteren Studie untersuchten Pauli, Lutzenberger, Birbaumer, Rickard und Bourne (1996), wie sich ein erweitertes Training mit weniger arithmetischen Problemen auf Reaktionszeit und EKPs auswirkt, da in der ersten Studie von Pauli et al. (1994) möglicherweise trotz Übung keine automatisierte Berechnungen stattgefunden haben. Die Ergebnisse des erweiterten Trainings zeigten, dass Übung in einer beschleunigten Reaktionszeit resultiert und in einer Verminderung des Problemgröße-Effekts, der bedeutet, dass sich die Reaktionszeit bei größeren Problemen verlängert. Wurden nach dem Training nicht geübte arithmetische Probleme hinzugefügt, führte das zu einem Rebound der Ausführungen auf das Niveau vor dem Training. Somit war die Spezifität des Trainings belegt. Die EKPs waren durch eine positive langsame Welle charakterisiert. Die Offset-Latenz der positiven langsame Welle und die Amplitude an den parietalen Elektroden zeigten spezifische Übungseffekte. Dadurch liegt nach Ansicht der Autoren eine Verbindung zu Ladung auf das Arbeitsgedächtnis nahe. Der Peak des späten positiven Komplexes soll Aufgabenlernen oder Adaptationseffekte reflektieren, da er durch Übung vorrangig an den frontalen Elektroden abgeschwächt wurde, keine Übungsspezifität aufwies und nicht durch die Problemgröße beeinflusst wurde. Diese Komponente soll sehr allgemeine Informationsverarbeitungsprozesse betreffen und nicht spezifisch für mentale Arithmetik sein.

Die Studie von Rösler, Heil, Pauls, Bajric und Hennighausen (1994) untersucht eine mentale Rotationsaufgabe und eine Aufgabe zu mentaler Größenskalierung. Die Daten wurden getrennt für zwei Gruppen analysiert, für eine Gruppe, die in einem räumlichen Untertest eines Intelligenztests hohe Werte erzielte und eine Gruppe, die niedrige Werte erzielte. In beiden Gruppen zeigten sich für beide Aufgaben eine ausgeprägte negative langsame Welle über der hinteren Schädelregion. Das Maximum dieser Negativität wird als ein Zeichen der Aktivierung der zugrundeliegenden kortikalen Areas interpretiert. Die Amplitude an den parietalen Elektroden variierte in beiden Gruppen mit der

Schwierigkeit der Transformationsoperationen, das heißt, sie steigt an, wenn der Rotationswinkel bzw. der Transmissionsfaktor größer wurde. Die Gruppe mit hohen Testwerten in dem Intelligenzuntertest bildet weniger kortikale Aktivierung aus, weist also eine kleinere negative langsame Welle über dem linken hinteren Teil des Kortex auf. Über der rechten Hemisphäre haben beide Gruppen die gleichen Amplituden an allen Elektroden. Die Ergebnisse werden auf der Basis der Theorie von Kosslyn, Flynn, Amsterdam und Wang (1990) interpretiert. Danach sollen besondere Module, die in der linken Hemisphäre lokalisiert sind, häufiger aktiviert werden, wenn Probanden weniger effizient im Transformieren mentaler Bilder sind.

Die Studie von Rösler, Heil, Bajric, Pauls und Hennighausen (1995) führte die gleiche Untersuchung wie in Rösler et al. (1994) durch, jedoch ohne differentialpsychologische Gruppeneinteilung. Beide Aufgaben, die Rotation und die Größentransformation, waren durch eine negative langsame Welle von mehreren Sekunden Dauer gekennzeichnet. Das relative Maximum dieser Welle bildete sich an zentralen bis okzipitalen Elektrodenpositionen aus. Über dem okzipitalen Kortex hatten die negativen Potentiale ein ähnliches Amplitudenniveau in allen Bedingungen und bei beiden Aufgaben. An parietalen und zentralen Areas veränderte sich die negative langsame Welle abhängig von der Schwierigkeit der Aufgabe. Bei erhöhter Schwierigkeit stieg die Amplitude an.

Gedächtnis: Zum Gedächtnis liegen eine Vielzahl von Untersuchungen vor. Die Studie von Rösler, Heil und Glowalla (1993) untersucht den Abruf aus dem Langzeitgedächtnis mit dem Fan-Paradigma. In allen Abrufbedingungen fand sich eine sehr ausgeprägte negative langsame Welle über dem linken frontalen Kortex. Besondere Abrufbedingungen führten zu unterschiedlichen Effekten auf die langsamen Wellen: Die Amplitude, der auf beiden Hemisphärenseiten negativen langsamen Welle, erhöhte sich beim Abruf verschiedenartiger assoziativer Strukturen. Die Amplitude der negativen langsamen Welle mit einem beidseitigen parietalen Maximum wurde durch die Art des Konzepts beeinflusst, das abgerufen werden musste. Die Amplitude dieser Komponente war bei allgemeinen Konzepten größer und bei spezifischen Konzepten kleiner. Die Ergebnisse wurden so interpretiert, dass Probanden unterschiedliche Strategien einsetzen, wenn Entscheidungen über verschiedene Inhalte, die dauerhaft in einem assoziativen Netzwerk gespeichert sind, getroffen werden müssen.

Die Studie von Rösler, Heil und Hennighausen (1995) leitet EKPs ab, während die Probanden verbale, räumliche oder Farbinformationen aus dem Langzeitgedächtnis abrufen. Zunächst wurde trainiert, Assoziation zwischen Bildern und einer räumlichen Position oder einem Wort oder einer Farbe zu bilden. Einen Tag später folgte ein Abruftest. Die langsamen Wellen wiesen für die drei Bedingungen unterschiedliche Topographien auf. In der verbalen Bedingung wurde eine maximal negative langsame Welle über dem frontalen, in der räumlichen Bedingung über der parietalen und in der Farbenbedingung über dem rechten okzipitalen bis temporalen Kortex gefunden. Diese Ergebnisse sprächen dafür, dass Gedächtnisrepräsentationen entweder in kortikale Verarbeitungsmodule 'runtergeladen' werden oder direkt innerhalb der kortikalen Verarbeitungsmodule reaktiviert werden, in denen das Material während der Wahrnehmung verarbeitet wird. Da in den Reaktionszeiten keinerlei Unterschiede zwischen den drei Bedingungen gefunden wurden, zeigt diese Studie die präzisierte Auflösung von Informationsverarbeitungsprozessen mittels EKP.

Heil, Rösler und Hennighausen (1996) untersuchen ebenfalls den Abruf räumlicher und verbaler Informationen aus dem Langzeitgedächtnis mittels EKP. Dazu wurde das Fan-Paradigma, das schon in Rösler et al. (1993) verwendet wurde, leicht verändert. Die Probanden mussten Assoziationen zwischen Zeichnungen und einem, zwei oder drei Mediatoren lernen. Diese waren Lokalisierungen in Experiment 1 und Substantive in Experiment 2. In der Abrufphase mussten die Probanden entscheiden, ob zwei Zeichnungen einen gemeinsamen Mediator haben. Das EEG wurde in der Lern- und Abrufphase aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigten, dass unabhängig von der Qualität des Mediators die Reaktionszeit eine lineare Funktion der Anzahl von Mediatoren war, die erinnert werden musste. Die negativen langsamen Wellen, die während des Assoziationslernens und des Hinweisabrufs die Reaktivierung von Informationen begleiteten, wiesen eine materialspezifische Topographie auf: Für räumliche Informationen wurde das Maximum über dem parietalen Kortex gefunden und für verbale Informationen über dem linken frontalen Kortex. Die Amplitude der langsamen Wellen variierte an diesen Elektrodenpositionen mit der Menge der abzurufenden Information. Dies stütze die Annahme, topographisch unterschiedliche Zellverbände seien für die Speicherung und den Abruf verschiedener Informationsarten spezialisiert (siehe auch Hinton, McClelland und Rumelhart 1986).

Arbeitsgedächtnis: Das Arbeitsgedächtnis wurde ebenfalls im Zusammenhang mit langsamen Wellen untersucht. Mecklinger, Kramer und Strayer (1992) finden in einer semantischen Gedächtnissuchaufgabe eine P3 und eine negative langsame Welle, die reziprok mit Ladung auf das Gedächtnis verbunden sein sollen. Demnach verringerte sich die P3. Die negative langsame Welle, die an Cz maximal war, vergrößerte sich in der Amplitude mit ansteigender Größe des Gedächtnissets. Nach Mecklinger et al. (1992) ist die Sensitivität einer negativen langsamen Welle für Gedächtnisvergleichsprozesse konsistent mit früheren Studien (z.B. Wijers, Mulder, Okita, Mulder & Scheffers, 1989), wonach sich die Negativität mit ansteigender Größe des Gedächtnissets erhöhte. Diese negative Komponente soll zudem in Topographie und Funktionalität anderen negativen langsamen Wellen ähnlich sein, von denen gezeigt wurde, dass sie mit wachsender Schwierigkeit der konzeptuellen Operationen ansteigen (z.B. Ruchkin et al., 1988). Diese negativen langsame Wellen sollen ausgedehnte Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis widerspiegeln.

Ruchkin, Canoune, Johnson und Ritter (1995) untersuchten, ob die negativen langsamen Wellen, die in Gedächtnisuntersuchungen mit dem S1-S2 Paradigma gefunden wurden, mit der Aufgabe S1 einprägen und mit S2 vergleichen, durch das Behalten des Items im Arbeitsgedächtnis bedingt sei oder eher allgemeine vorbereitende Prozesse für die Reaktion auf S2, wie in der CNV gemessen, widerspiegeln. Es wurden zwei visuelle Verarbeitungsaufgaben verwendet, die eine ähnliche Vorbereitung auf S2 einmal Wiederaufsagen (rehearsal) und die Vorbereitung und einmal nur die Vorbereitung beinhalten. Die Ergebnisse zeigten, dass die negativen langsamen Wellen, die mit Gedächtnis variieren, andere sind als die für allgemeine vorbereitende Prozesse: Es fand sich eine wesentlich höhere Negativität für die Gedächtnisbedingung, die sich mit höherer Ladung vergrößerte, was in der Vorbereitungsbedingung nicht der Fall war.

Die Studie von Mecklinger und Pfeifer (1996) untersuchte, ob sich Prozesse des Arbeitsgedächtnisses für Objekt und räumliche Informationen durch unterschiedliche EKP-Aktivität abbilden lassen. Dazu führten die Probanden ein S1-S2 Paradigma durch. Dabei bestand die Aufgabe darin, zu entscheiden, ob der erste Reiz derselbe wie der zweite Reiz sei. In einer räumlichen Bedingung wurden 3 bis 5 Punkte in einer räumlichen Anordnung und in einer Objektbedingung 3 bis 5 kleine geometrische Figuren in einer bestimmten Reihenfolge, z.B. Dreieck, Parallelogramm, Raute, usw., für 1800

ms dargeboten. Nach 6800 ms erschien S2 und die Probanden mussten ihr Urteil abgeben. Die Ergebnisse zeigten, dass die Aktivität der negativen langsamen Welle mit beidem variierte, mit der Art der Gedächtnisaufgabe und der Menge an Material, das im Gedächtnis gehalten werden musste. Bei räumlichen Informationen entwickelte sich eine rasch ansteigende Negativität an den posterioren parietalen und okzipitalen Areas. An allen Aufzeichnungsorten stieg die Amplitude mit zunehmender Ladung an. Bei den Objektinformationen zeigte sich erst 2000 ms später eine über den mittleren frontalen Aufzeichnungsorten maximale Negativität. Eine ausgeprägtere negative langsame Welle wurde über den rechten vorderen temporalen Aufzeichnungsorten gefunden. Dies bedeute die größere Beteiligung des rechten Temporallappens an der Verarbeitung von Objektinformationen verglichen mit räumlichen Informationen. Enkodierungs- und Behaltensprozesse für Objektinformationen und für räumliche Informationen sollen funktional unterschieden werden können und unterschiedliche Muster neuronaler Aktivierung bedingen. Kritisch anzumerken ist, dass die Objektreize eine verbale Kodierung nahelegen und daher eine Konfundierung aufgetreten sein könnte. Ebenfalls sind Unterschiede hinsichtlich der Schwierigkeit zwischen beiden Bedingungen möglich.

Eine weitere Studie von Mecklinger und Müller (1996) verwendete verändertes Reizmaterial. Die Reize bestanden aus geometrischen Objekten, die in einer 4 x 4 Matrix dargeboten wurden. Sie waren somit für die beiden Aufgaben identisch, wobei einmal die Objekte und einmal deren räumliche Anordnung eingepägt werden sollte. Das EEG wurde in der Studien- und der Rekognitionsphase aufgezeichnet. Die Rekognitionsleistung war für beide Aufgaben identisch. Die EKP-Komponenten wurden mittels einer PCA bestimmt. Topographische Unterschiede konnten für die beiden Aufgaben und für die P3 festgestellt werden. Nur die EKPs auf die Objekte, die später erinnert wurden, waren ab 400 ms positiver als die EKPs auf nicht erinnerte Objekte. Gemäß der PCA müssen P3 und die langsame Welle nach der P3 an den frontalen Elektrodenpositionen zu diesem Effekt geführt haben. Nachfolgende Analysen zeigten, dass der Effekt in der räumlichen Bedingung nicht aufgrund mangelnder elaborierter Enkodierung fehlte. Die Enkodierung und der Abruf von Objektinformationen und räumlichen Informationen sollen in funktionell und anatomisch unterschiedlichen Subsystemen angesiedelt sein.

Blinde im Vergleich zu Sehenden: Eine Reihe von Arbeiten hat langsame Wellen bei Blinden und Sehenden untersucht. Die Studie von Rösler, Röder, Heil und Hennigshausen (1993) erhob EKPs, während die Probanden jeweils zwei taktile Reize erhielten. Dabei bestand die Aufgaben darin, zu beurteilen, ob der eine Reiz eine Spiegelung des anderen sei. Die Topographie der langsamen Wellen unterschied sich zwischen Sehenden und Blinden, entgegen den Hypothesen aber nicht zwischen angeborenen Blinden und später Erblindeten. Während der Enkodierung der Reize zeigten die Blinden eine ausgeprägte okzipitale und die Sehenden eine ausgeprägte frontale Aktivierung. In der aufgabenspezifischen Erhöhung der negativen langsamen Welle aufgrund der Rotation zeigten sich Unterschiede: In beiden Gruppen hatte die negative langsame Welle ihr Maximum über der zentralen bis parietalen Region, ähnlich wie in den Experimenten mit visuellen Rotationsreizen. Bei den blinden Probanden war sie über der okzipitalen Region ausgedehnter. Die Ähnlichkeiten der zwei blinden Probandengruppen deuten möglicherweise darauf hin, dass die Reorganisationen des Kortex bei angeborener und erworbener Blindheit ähnlich ist.

In der Studie von Röder, Rösler, Hennigshausen und Näcker (1996) wurden EKPs gemessen, während die blinden und sehenden Probanden jeweils eine auditive und eine somatosensorische Oddball-Aufgabe erhielten, wobei als zusätzlicher Faktor Schwierigkeit variiert wurde. Die eigentliche Aufgabe bestand darin, dass die Probanden einige Sekunden später eine Entscheidung darüber treffen mussten, ob ein Zielreiz gleich oder ungleich war. Bei den Sehenden fand sich für die auditive und somatosensorische Aufgabe eine negative langsame Welle an frontalen und zentralen Positionen. Bei den Blinden kam eine ausgeprägte negative langsame Welle an den okzipitalen Positionen hinzu. Die P3 war bei den Blinden signifikant kleiner als bei den Sehenden. Der okzipitale Kortex von Blinden soll immer dann zusätzlich aktiviert werden, wenn das System in Aufgaben eingebunden ist, die eine andauernde Aufmerksamkeit erfordern. Zudem würde der okzipitale Kortex bei Blinden weniger effektiv am Ende eines perzeptuellen Zeitraumes gehemmt. Die Daten ließen jedoch Zweifel an der Hypothese aufkommen, der okzipitale Kortex Blinder sei an modalitätsspezifischer, nicht visueller Informationsverarbeitung beteiligt.

Röder, Rösler und Hennigshausen (1997) untersuchten erneut, ob der okzipitale Kortex von Blinden während der Wahrnehmung und Transformation haptischer Bilder aktiviert

wird. Zu diesem Zweck wurde eine haptische mentale Rotationsaufgabe bei Blinden und Sehenden durchgeführt. In beiden Gruppen fanden sich negative langsame Wellen über (a) dem frontalen Kortex zu Beginn der Aufzeichnungsepoche, (b) dem linken zentralen bis parietalen Kortex während der Enkodierung und der Aufrechterhaltung des mentalen Bildes, (c) dem zentralen bis parietalen Kortex während der Bildtransformation. Eine deutliche negative langsame Welle, welche die gesamte Aufzeichnungsepoche über andauerte, fand sich über dem okzipitalen Kortex nur bei den Blinden. Die Amplitude dieser Negativität stieg mit der Menge an Verarbeitungsladung an. Diese negative langsame Welle der Blinden soll ein Kennzeichen dafür sein, dass okzipitale Areas entweder an spezifischen, nicht visuellen Funktionen teilnehmen oder dass eine Kovariation okzipitaler Areas auftritt, wenn das Aktivierungsniveau aufgabenspezifischer Verarbeitungsmodule durch nicht spezifischen, thalamo-kortikalen Zufluss an anderer Stelle im Kortex gesteigert würde.

Unterschwellige Wahrnehmung: Langsame Wellen wurden auch im Zusammenhang mit Untersuchungen zur unterschweligen Wahrnehmung bestimmt. In einer Studie von Wong, Shevrin & Williams (1994) wurde die unbewusste Auslösung einer vorher konditionierten Reaktion mit EKPs untersucht. Für den CS+, ein unfreundliches Gesicht, fanden sich unterschiedlich langsame Wellen bis kurz vor dem Zeitpunkt, zu dem der Schock in der Konditionierungsphase verabreicht wurde. Für den CS-, ein freundliches Gesicht, wurden keine langsamen Wellen gefunden. Die langsame Welle wurde von den Autoren als eine Art Erwartungswelle interpretiert. Die Studie habe zudem deutlich gezeigt, dass antizipatorische Prozesse jenseits des Bewusstseins ausgelöst werden können.

Die Studie von Pietrowsky, Stoll, Mölle, Fehm und Born (1996) untersucht EKPs nach der tachistoskopischen, unterschweligen Präsentation von Wörtern und Nicht-Wörtern. Dabei mussten die Probanden bei den wiederholten Darbietungen anzeigen, wann sie ein Wort oder Nicht-Wort erkannt hatten. In den EKPs zeigte sich eine P3 und eine sich anschließende positive langsame Welle. Bei späteren Darbietungen der Reize war die P3-Amplitude für Wörter höher. Die Darbietung eines Wortes, das mit jeder weiteren Darbietung bedeutungshaltiger für einen Probanden wird, soll mit einer stärkeren Auflösung semantischer Unsicherheit einhergehen. Unterschiede zwischen Wörtern und Nicht-Wörtern zeigten sich deutlich für die langsame Welle. Die parietal positive

langsame Welle wird deutlich positiver mit ansteigender Darbietungsanzahl, dies jedoch nur für Wörter. Pietrowsky, Stoll et al. (1996) interpretierten diesen Anstieg als Kennzeichen einer graduellen Identifikation von Wortreizen, die mit ansteigender, ausgedehnter Hemmung von nicht relevanten Aktivierungen innerhalb des semantischen Gedächtnis einhergeht.

Pietrowsky, Stoll et al. (1996) verwendete in dieser Untersuchung Landschaftsfotos und Mosaikbilder, die aus den Landschaftsfotos gebildet wurden. Für die Mosaikbilder wurden die Landschaftsfotos in 24 Quadrate geteilt und zufällig zusammengesetzt. Der experimentelle Aufbau war derselbe wie in Pietrowsky, Kuhmann et al. (1996). Die Ergebnisse zeigten, dass die Bilder im Vergleich zu den Wörtern einige Darbietungen mehr benötigten, ehe sie erkannt wurden, was durch den höheren Informationsgehalt der Bilder bedingt sein kann. Die P3-Amplitude verminderte sich mit steigender Darbietungsanzahl, erhöhte sich aber bei den Landschaftsfotos vor der Identifizierung. Die langsame Welle nach der P3 erhöht sich über die Darbietungen. Dieser Anstieg war für die Landschaftsbilder deutlicher. Die EPK Veränderungen wurden als eine stufenweise Hemmung von sich ausgebreiteter Aktivierung innerhalb des semantischen Gedächtnisses mit fortschreitender Identifizierung der Bilder interpretiert.

Emotionale Bildreize: Einige Untersuchungen wurden auch mit emotionalen Bildreizen vorgenommen. In der Studie von Kayser et al. (1997) wurden EKPs auf emotional negative und positive Bilder (dermatologische Fälle und normale Gesichter) untersucht, wobei insbesondere Hemisphärenasymmetrien im Fokus des Interesses standen. Die Messdauer der EKPs betrug 1000 ms. Komponenten wurden ausschließlich mittels der PCA bestimmt und ausgewertet. Eine positive langsame Welle mit einem zentralen Maximum war leicht positiver für die negativen als für die neutralen Bilder.

Im Trierer EEG-Labor wurden ebenfalls eine Reihe von Studien, die emotionales Bildmaterial verwendeten, durchgeführt. In der Studie von Diedrich, Naumann, Maier, Becker und Bartussek (1997) wurden EKPs abgeleitet, während die Probanden emotional negative, neutrale oder positive Bilder betrachteten. Die Probanden sollten entweder ein strukturelles Merkmal oder den emotionalen Gehalt der Bilder beachten. Es wurde erwartet, dass in der emotions-fokussierten Bedingung eine positive langsame Welle ein frontales Maximum aufweise. Zudem sollten sich die Effekte der positiven langsamen Welle an den frontalen und parietalen Elektrodenpositionen unterscheiden und

für die negativen und positiven Bilder wurde im Vergleich zu den neutralen Bildern eine größere P3 erwartet. Die Ergebnisse zeigten, dass beide Verarbeitungsgruppen ab 1000 ms eine frontal maximal positiv langsame Welle ausbildeten und dass die emotionsfokussierte Verarbeitung positivere Amplituden schon ab 600 ms bedingte. Die Potentialverläufe an frontalen und parietalen Positionen waren ab 500 ms unterschiedlich. Im Zeitbereich zwischen 600 und 800 ms fand sich ein parietal maximaler Peak (P3), der den erwarteten Valenzeffekt, nämlich größere Amplituden für negative und positive Bilder, aufwies. Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Modells interpretiert, nach dem langsame Potentiale die Regulation der kortikalen Erregung repräsentieren sollen (vergleiche Elbert, 1993). Im Zusammenhang mit emotionalen Bildern soll die frontal positive langsame Welle ein Index für motorische Hemmung sein, der als Gegenregulation eines automatisch initiierten emotionalen Verhaltens diene. Die Ergebnisse konnten jedoch einige kritische Punkte nicht abklären. So zeigte sich in dieser Studie eine Konfundierung zwischen der Darbietungszeit von 500 ms und der Auslösung der langsamen positiven Welle nach 500 ms, da durch das Abschalten des Bildes ein Offset-Potential hervorgerufen wurde. Die Dissoziationen zwischen frontalen und parietalen Effekten der langsamen Welle waren weniger deutlich ausgeprägt als erwartet. Dadurch drängte sich die Frage auf, ob es sich tatsächlich exklusiv um emotionale Effekte handelt oder ob nicht allgemeine Prozesse der Bildverarbeitung ebenfalls eine wichtige Rolle spielen. Ein weiterer Aspekt betraf die Interpretation der frontal positiven langsamen Welle als Index für die Hemmung einer motorischen Reaktion. Ob die frontal positive langsame Welle im Zusammenhang mit emotionalen Bildern tatsächlich diese funktionale Bedeutung habe, bedürfe eines direkten Tests.

Die Arbeit von Diedrich (1996) untersucht, ob die frontal positive langsame Welle im Zusammenhang mit emotionalen Bildreizen tatsächlich als ein Index der Hemmung einer motorischen Reaktion angesehen werden kann. Dafür wurden in zwei Experimenten emotionale Bilder dargeboten und während der Darbietung im ersten Experiment zu variablen Zeitpunkten und im zweiten Experiment zu festen Zeitpunkten Schreckreize appliziert. Die Ergebnisse beider Experimente belegten deutlich, dass sich durch die Darbietung der emotionalen Bilder eine lang andauernde positive Welle über dem Frontalkortex ausbildete. Die Schreckreiz-evozierten Potentiale zeigten, dass die frontale Positivierung kortikale Deaktivierung indiziert, denn in den Schreckreiz-evozierten

Potentialen war die P2 deutlich reduziert. Dass die Funktion der frontalen Positivierung in der Hemmung von Motorik liege, konnte jedoch nicht belegt werden: Der Lidschlagreflex wurde nicht durch das Ausmaß kortikaler Deaktivierung beeinflusst.

Ein weiteres Experiment (Naumann, Becker, Maier, Diedrich & Bartussek, 1997) sollte klären, welchen Einfluss die Darbietungsdauer der emotionalen Bilder auf die Auflösung der frontal positiven langsamen Welle hat. Im Experiment wurden die Bilder für 250 ms, 500 ms oder 2000 ms dargeboten. Die Probanden bearbeiteten eine strukturelle und eine emotions-fokussierte Aufgabe. Die Ergebnisse zeigten erneut den Valenzeffekt, d.h. erhöhte Amplituden im P3-Bereich auf emotionale im Vergleich zu neutralen Bildern. Der Potentialverlauf zeigte sich bis 1200 ms nach Reizdarbietung völlig unabhängig von der Darbietungsdauer der Bilder. Somit ließ sich eine Konfundierung der frontal positiven langsamen Welle mit der Darbietungsdauer der Bilder ausschließen. Im Gegensatz zur Studie von Diedrich et al. (1997) konnten jedoch nicht die Unterschiede hinsichtlich der frontal positiven langsamen Welle repliziert werden, denn hier trat für beide Verarbeitungsbedingungen eine frontal positive langsame Welle auf. Das Misslingen der Replikation wurde durch die veränderte Zusammensetzung des Reizmaterials erklärt. Im Unterschied zur Studie von Diedrich et al. (1997) wurden Bildreize selektiert, die extrem negativer und positiver waren. Möglich ist, dass die Probanden auch bei der strukturellen Aufgabe, die darin bestand zu beurteilen, ob in das Bild mehr horizontale oder mehr vertikale Linien eingeblendet waren, den emotionalen Gehalt des Bildes wahrgenommen haben. Alternativ wurde angenommen, die frontale Positivierung trete immer dann auf, wenn Bilder inhaltlichen Verarbeitungsprozessen unterzogen werden.

Ein weiteres Experiment (Maier, Diedrich, Becker, Naumann & Bartussek, 1996) untersuchte, ob die emotions-fokussierte Verarbeitung bei der Betrachtung der emotionalen Bilder für die Auslösung der frontal positiven langsamen Welle verantwortlich sei, auch wenn ausschließlich emotional neutrale Bilder betrachtet werden. Um diese Hypothese zu testen, wurde der folgende Versuchsplan entwickelt, in dem Verarbeitungsaufgabe (emotions-fokussiert vs. kognitiv) und emotionale Valenz der Bilder (neutral vs. negativ) variiert wurden: Vier Gruppen (siehe *Tabelle 1*) wurden untersucht und durchliefen 3 experimentelle Phasen. In der Phase 1 betrachteten die Probanden neutrale Bilder und führten eine kognitive Aufgabe aus. In der Phase 2 wurde

eine von vier möglichen Kombinationen der Valenz des Bildes und der Verarbeitungsaufgabe realisiert. In der Phase 3 führten alle Probanden die emotions-fokussierte Verarbeitung mit emotional negativen Bildern durch.

		Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Phase 1	<i>Valenz</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
	Aufgabe	kognitiv	kognitiv	kognitiv	kognitiv
Phase 2	<i>Valenz</i>	<i>neutral</i>	<i>negativ</i>	<i>neutral</i>	<i>negativ</i>
	Aufgabe	kognitiv	kognitiv	emo-fokus	emo-fokus
Phase 3	<i>Valenz</i>	<i>negativ</i>	<i>negativ</i>	<i>negativ</i>	<i>negativ</i>
	Aufgabe	emo-fokus	emo-fokus	emo-fokus	emo-fokus

Tabelle 1: Experimentelles Design in Maier et al. (1996; emo-fokus = emotions-fokussiert).

In der kognitiven Verarbeitungsbedingung beurteilten die Probanden die Bilder entlang der Dimensionen Form (länglich - rundlich) und Größe (groß - klein) und in der emotions-fokussierten Verarbeitungsbedingung entlang der Dimensionen Arousal (erregend - lässt mich kalt) und Valenz (unangenehm - angenehm). Für die emotions-fokussierte Bedingung wurde eine frontal positive langsame Welle erwartet, die unabhängig von der emotionalen Valenz der Bilder auftreten sollte und nicht in der kognitiven Bedingung erwartet wurde.

Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass sowohl in Phase 1 als auch in Phase 3 nahezu identische frontal positive langsame Wellen auftraten. Auch bei der Auswertung der Phase 2 ließen sich keine Belege für die Hypothese finden. Somit wurde erneut nahegelegt, dass die funktionale Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle im Kontext emotionaler Bilder eher eine Folge inhaltlicher Verarbeitungsprozesse der Bilder ist. Kapitel 4 und 5 greift diese Überlegungen bei der Beschreibung der Experimente erneut auf.

3.4.2.3 Abschließende Bemerkungen zu langsamen Wellen

Nach der Beschreibung der EKP-Methode wurde bei der Darstellung der verschiedenen Komponenten ein deutlicher Schwerpunkt auf die langsamen Wellen gelegt, da die in Kapitel 4 und 5 vorgestellten Experimente ebenfalls langsame Wellen im EKP untersuchen. Im Abschnitt 3.4.2.1 zeigte sich, dass verschiedene Autoren unterschiedliche Konzepte zu langsamen Wellen vertreten. Neben der allgemeinen

Darstellung verschiedener Konzepte von langsamen Wellen findet sich ein Überblick über Studien, die langsame Wellen zu bestimmten Themenkomplexen gemessen haben. Es zeigte sich deutlich, dass die funktionale Bedeutung von negativen und positiven Wellen meist in enger Anlehnung an die Paradigmen bzw. aus den übergeordneten Fragestellungen abgeleitet wird. Dabei können die interessierenden Phänomene kognitiver Informationsverarbeitung wesentlich genauer untersucht werden als es allein durch Verhaltensdaten möglich ist. Als Beispiele seien die Untersuchungen zur unterschwelligem Wahrnehmung genannt (unter anderem Pietrowsky, Stoll et al., 1996; Pietrowsky, Kuhmann et al., 1996) und zu Abrufprozessen aus dem Langzeitgedächtnis von der Arbeitsgruppe um Frank Rösler (Rösler et al., 1993; Rösler et al., 1995; Heil et al., 1996).

Abschnitt 3.4.2.2 zeigte ebenfalls, dass in den letzten Jahren ein vermehrtes Interesse an der Bestimmung negativer langsamer Wellen besteht. Dies erklärt sich letztendlich dadurch, dass den negativen langsamen Wellen entsprechende Aktivität in den kortikalen Regionen zugeschrieben wird, über denen sie auftreten (vergleiche aber Abschnitt 3.2.2). Dies kann wiederum mit den zu dieser Zeit aktiven Informationsverarbeitungsprozessen in Verbindung gesetzt werden. Trotz dieser vermehrten Hinwendung zu negativen langsamen Wellen spricht aus theoretischen Überlegungen nichts dagegen, positive langsame Wellen zu untersuchen, auch wenn nicht abschließend geklärt ist, ob die positiven langsamen Wellen durch den Abfall von EPSPs oder durch den Anstieg der inhibitorischen postsynaptischen Potentiale (IPSPs) bedingt sind. Positive langsame Wellen gehen mit einer Verminderung der Aktivität oder eine relative Hemmung der entsprechenden kortikalen Areas einher, über denen sie auftreten. Die im Trierer EEG-Labor im Zusammenhang mit emotionalen Bildern aufgetretene langsame positive Welle im EKP (Diedrich, 1996; Diedrich et al., 1997; Naumann et al., 1997; Maier et al., 1996), deren funktionale Bedeutung wie in Abschnitt 3.4.2.2 beschrieben noch nicht geklärt ist, stellt ein interessantes Phänomen dar, dem sich die in Kapitel 4 und 5 aufgeführten Experimente zuwenden.

Zunächst wird aber ein zentrales Problem der EKP-Methode im Zusammenhang mit der Darbietung visueller Reize beschrieben, der Umgang mit okularen Artefakten. Da sich dieses Problem immer stellt, wenn EKPs auf visuelle Reize gemessen werden und es in dem im Kapitel 4 vorgestellten Experiment eine zentrale Rolle spielt, werden im

Folgenden die bisher veröffentlichten Methoden zur Korrektur der okularen Artefakte aus dem EKP erläutert.

3.5 Okulare Artefakte: Ein Problem für EEG- und EKP-Daten

Abschnitt 3.2.3 beschrieb verschiedene Artefaktquellen, die die EEG- und EKP-Daten verunreinigen können. Bei der Verwendung von visuellen Reizen zur EKP-Evozierung spielen okulare Artefakte eine besondere Rolle. Im Folgenden werden daher die Verfahren beschrieben, wie mit diesem Problem umzugehen ist.

Abschnitt 2.3.6 erklärte, dass die Hornhaut des Auges relativ zur Retina elektrisch positiv geladen ist, wodurch das Auge einen elektrischen Dipol ausbildet. Dieser elektrische Dipol lässt sich über das EOG aufzeichnen und kann sich mit der auf der Schädeloberfläche gemessenen elektrischen Aktivität des Gehirns vermischen. Wäre dieser Dipol zeitlich konstant, wäre auch sein Einfluss auf das EEG konstant. Da das EEG (siehe Abschnitt 3.2.2) als Veränderung im Hinblick auf einen Baseline-Wert gemessen wird, wäre der Effekt eines konstanten EOG unbedeutend. Tatsächlich aber treten Verunreinigungen des EEG immer dann auf, wenn sich das Auge bewegt oder wenn der elektrische Dipol der Augen bei der Ausbreitung über den Skalp zeitlich variiert. Diese Art von Verunreinigung des EEG wird als *EOG-Artefakte*, *okulare Artefakte* oder *Augenbewegungsartefakte* bezeichnet (z.B. Gratton, 1998).

Die okularen Artefakte haben eine große Bedeutung für die Registrierung des EEG und des EKP, da die Größe der okularen Artefakte, die auf der Schädeloberfläche und dabei insbesondere an den frontalen Elektrodenpositionen nahe des Auges gemessen werden, im Bereich von mehreren hundert Mikrovolt liegt. Die okularen Artefakte sind somit um ein Vielfaches größer als die durch das Gehirn erzeugte elektrische Aktivität, die im Bereich von weniger als 50 μV liegt. Augenbewegungen und Lidschläge treten sehr häufig auf und führen jeweils zu massiven Verunreinigungen des EEG. Sie können während der Durchführung verschiedener Aufgaben oder als Folge unterschiedlicher Stimulierungsarten auftreten. Die Frequenz und Größe der okularen Artefakte variiert in Abhängigkeit der untersuchten Population und der Aufgabenerfordernisse. Dies kann systematische Unterschiede zur Folge haben, die sich mit den experimentellen EEG- und EKP-Effekten vermischen. Donchin et al. (1977) forderten, in jeder EEG- und EKP-Studie die Maßnahmen zur Kontrolle der okularen Artefakte zu beschreiben. Vor der

Beschreibung verschiedener Methoden zur Korrektur von Augenartefakten, werden in Anlehnung an Gratton (1998) Faktoren genannt, die bestimmen, in welchem Ausmaß der Augendipol Einfluss auf die Schädeloberfläche nimmt.

Zunächst kann die *Veränderung in der Ausrichtung des Augapfels* genannt werden. Augenbewegungen können in jede Richtung erfolgen (vergleiche Abschnitt 2.3.1.1), werden jedoch meist als Kombination von vertikalen und horizontalen Bewegungen beschrieben. Nach Gratton (1998) bedingen vertikale und horizontale Bewegungen unterschiedliche Veränderungen des elektrischen Feldes, das sich über die gesamte Schädeloberfläche ausbreitet. Danach sollen vertikale Bewegungen hauptsächlich Veränderungen entlang der sagitalen Achse bedingen, während horizontale Bewegungen hauptsächlich Veränderungen entlang der medialen Achse verursachen. In den meisten Fällen sind die Bewegungen beider Augen konjugiert (vergleiche Abschnitt 2.3.3.1) und die elektrischen Felder beider Augen identisch. Nur bei Konvergenzbewegungen können getrennte Einflüsse beider Augendipole erwartet werden.

Ein zweiter Faktor sind *die Messungsorte auf der Schädeloberfläche*. Der Gradient des elektrischen Potentials soll im Allgemeinen stärker an Orten sein, die in Augennähe liegen, z.B. an frontalen Orten, und schwächer an den Orten, die sich weiter entfernt vom Auge befinden, z.B. an okzipitalen Orten. Dies soll mit der Richtung der Augenbewegung interagieren. Vertikale Augenbewegungen sollen die Elektroden der Mittellinie stärker beeinflussen als die lateralen Elektroden und horizontale Augenbewegungen sollen auf die lateralen Elektroden stärker einwirken (Gratton, 1998).

Ein dritter Faktor ist die *Ausbreitung des elektrischen Feldes über den Kopf*. Aufgrund des hohen spezifischen Widerstandes des Schädels ist die Kopfhaut das wesentliche leitende Medium für die elektrischen Felder der Augen. Die leitenden Eigenschaften der Kopfhaut sollen größtenteils konstant über die Zeit sein, was sich jedoch bei Hitze oder bei Feuchtigkeit verändern kann. Die Augenlider sollen einen Spezialfall darstellen, da ihre Position im Hinblick auf das Auge nicht fixiert ist. Bewegungen der Augenlider können die Art und Weise beeinflussen, wie sich die okularen elektrischen Felder über den Schädel ausbreiten (Corby & Kopell, 1972; Matsuo, Peters & Reilly, 1975). Lidschläge sollen daher zu besonderen Artefakten in der EEG-Aufzeichnung führen (Gratton, 1998). Während Lidschlägen können zusätzlich Augenbewegungen auftreten. Die Ausbreitung, der mit den Augenbewegungen verbundenen Potentiale, soll sich auch

in Augen-auf und Augen-zu Bedingungen unterscheiden (Gasser, Sroka & Möcks, 1985). Nach Gratton (1998) unterscheidet sich die relative Beeinflussung von Bewegungen des Augenlides für freiwillige und unfreiwillige Bewegungen sowie für nach unten oder oben gerichtete Blickveränderungen. Die Ansicht, dass sich das mit Augenbewegungen einhergehende elektrische Feld durch Faktoren beispielsweise die Art der Augenbewegung unterschiedlich über den Schädel ausbreitet, ist in jüngster Zeit kritisiert worden (Croft & Barry, 1998b; Croft & Barry, 1998a) und wird im Abschnitt 3.5.1 und 3.5.2 diskutiert.

Mehrere Untersuchungen zeigten, dass die relativen Effekte der Augenbewegung auf zwei Elektrodenpaare innerhalb gewisser Grenzen annähernd linear sind (Corby & Kopell, 1972; Hillyard & Calambos, 1972; Overton & Shagass, 1969). Dieses Verhältnis wird bei Gratton (1998) mit der folgenden Formel 1 beschrieben:

$$\begin{aligned} \Delta v\text{EOG}_{ab} &\approx k_{v(ab/cd)} \Delta v\text{EOG}_{cd} && \text{und} \\ \Delta h\text{EOG}_{ab} &\approx k_{h(ab/cd)} \Delta h\text{EOG}_{cd} \end{aligned} \quad (1)$$

Dabei entsprechen $\Delta v\text{EOG}_{ab}$ und $\Delta h\text{EOG}_{ab}$ den vertikalen und horizontalen Komponenten des EOG und $k_{v(ab/cd)}$ und $k_{h(ab/cd)}$ dem Verhältnis zwischen den Effekten der okularen Artefakte an den Elektrodenpaaren ab und cd , entsprechend für die vertikalen und horizontalen Komponenten.

Nach Gratton (1998) bestätigte sich diese Beziehung relativ gut für horizontale Augenbewegungen und in gewissem Umfang für nach unten gerichtete, vertikale Augenbewegungen (Corby & Kopell, 1972; Hillyard & Calambos, 1972; Overton & Shagass, 1969). Für nach unten gerichtete, vertikale Augenbewegungen variiere $k_{v(ab/cd)}$ leicht, wobei vermutet wurde, dass die Bewegungen der Augenlider dazu beitragen (Hillyard & Calambos, 1972) oder wegen der Exzentrizität des Augendipols im Hinblick auf den Augapfel (Berg, 1989). Nach Gratton (1998) sind diese Abweichungen von der Linearität vernachlässigbar, wenn die Augenbewegungen nicht zu groß sind. Nach Corby und Kopell (1972) und Overton und Shagass (1969) ist $k_{v(ab/cd)}$ für Lidschläge systematisch kleiner als für Augenbewegungen. Möcks, Gasser und Sroka (1989) argumentierten, die unterschiedliche Ausbreitung der Potentiale auf die Schädelelektroden der Lidschläge und der Augenbewegungen sei durch die komplexen Augenbewegungen verbunden mit Lidschlägen verursacht. Die Formel 1 kann nur auf

konjugierte Augenbewegungen angewendet werden, da sie nicht den Einfluss der Augen getrennt berücksichtigt, wie er z.B. bei Konvergenzbewegungen der Augen zu erwarten ist. In der Regel werden Konvergenzbewegungen in EEG-Experimenten nicht erwartet, da die Probanden häufig aufgefordert werden, den Blick schon vor der Reizdarbietung auf eine Projektionsfläche oder ähnliches zu richten (van den Berg-Lenssen & Brunia, 1989). Nach Gratton (1998) sind die beiden Koeffizienten $k_{v(ab/cd)}$ und $k_{h(ab/cd)}$ von verschiedenen physiologischen Variablen abhängig und über die Zeit und über Probanden variabel. Davon ausgehend, dass die vertikalen und horizontalen Augenbewegungen orthogonal sind, konstruiert Gratton (1998) die folgende Formel 2:

$$\Delta vEOG_{ab} + \Delta hEOG_{ab} \approx k_{v(ab/cd)} \Delta vEOG_{cd} + k_{h(ab/cd)} \Delta hEOG_{cd} \quad (2)$$

Dabei werden $k_{v(ab/cd)}$ und $k_{h(ab/cd)}$ getrennt für Augenbewegungen und für Lidschläge berechnet. Der linke Term der Gleichung - $\Delta vEOG_{ab} + \Delta hEOG_{ab}$ - stellt das okulare Artefakt gemessen am Elektrodenpaar ab dar. Die vertikalen und horizontalen Komponenten des EOG - $\Delta vEOG_{cd}$ und $\Delta hEOG_{cd}$ - werden über zwei Paare bipolarer Ableitungen getrennt erfasst. Die vertikale Komponente wird durch Elektroden, die über und unter dem Auge platziert sind, bestimmt, die horizontale Komponente durch Elektroden, die neben den äußeren Augenwinkeln jedes Auges platziert sind.

Es ist unumstritten, dass die in der Nähe des Auges befestigten Elektrodenpaare auch elektrische Aktivität aufzeichnen, die innerhalb des Gehirns erzeugt wird (unter anderem Iacono & Lykken, 1981; Berg & Scherg, 1991). Nach Gratton (1998) ist das elektrische Feld, das durch das Auge hervorgerufen wird, um ein Vielfaches größer als die elektrische Aktivität des Gehirns und könne daher vernachlässigt bzw. könne das EOG als valide Messung betrachtet werden. Kritisch dazu: Croft und Barry (1998b) und Berg und Scherg (1991).

Mit Ausnahme der Ausschlussmethode, bei der Strecken mit okularen Artefakten von der weiteren Analyse ausgenommen werden, basieren fast alle Methoden zur Korrektur von Augenartefakten auf der Grundannahme, dass die Verunreinigung des EEG durch okulare Artefakte auf der Grundlage einer unabhängigen Messung des EOG geschätzt werden kann. Häufig wird eine Art Regressionsmethode verwendet, um die okularen Artefakte zu berechnen. Anschließend werden die Artefakte von den EEG-Daten subtrahiert, um artefaktfreie EEG-Aufzeichnungen zu erhalten. Das heißt, viele

Methoden basieren auf der Validität der Gleichung 2 oder ähnlicher Gleichungen. Bevor die verschiedenen Methoden zur Korrektur von Augenartefakten vorgestellt werden, wird die Ausschlussmethode beschrieben, da sie noch verwendet wird.

Ausschlussmethode: Bei der Ausschlussmethode werden die EEG-Epochen, in denen Augenartefakte auftreten, von der weiteren Auswertung ausgenommen. Die Bestimmung der EEG-Strecken, in denen die Augenartefakte auftreten, kann durch visuelle Inspektion der individuellen Aufzeichnungen geschehen. In der Regel wird die Entdeckung der Artefakte über die Bestimmung eines automatischen Kriteriums durchgeführt, z.B. Aktivität über $50 \mu\text{V}$ im Hinblick auf einen Baseline-Wert. Die Methode kann online und offline angewendet werden. Die online Anwendung bietet den Vorteil, dass sich zusätzliche experimentelle Durchgänge durchführen lassen, um ausreichend EEG-Strecken für die EKP-Mittelung zu erhalten. Dieses Vorgehen darf jedoch nur gewählt werden, wenn die Wiederholung experimenteller Durchgänge keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Die Ausschlussmethode ist einfach anzuwenden und bedarf keines großen technischen Aufwands. Kritisch ist, dass die Methode zu einem substantiellen Verlust von Daten führen kann, z.B. bei Probandengruppen, wie Kinder oder klinische Populationen, bei denen vermehrt Augenbewegungen zu erwarten sind. Experimente, in denen Augenbewegungen Bestandteil der Untersuchung sind, wie beispielsweise Untersuchungen des Schreckreflexs mittels EKP (Diedrich, 1996), können nicht durchgeführt werden. Die Methode kann dazu führen, dass die artefaktfreien Strecken z.B. aufgrund eines Selektionsbias keine repräsentative Stichprobe für eine bestimmte Population sind. Dies tritt besonders dann auf, wenn die Bedingungen oder die Populationen, die verglichen werden, unterschiedliche Frequenzen für Augenbewegungen und Lidschläge haben (vergleiche Gasser, Ziegler & Gattaz, 1992).

Ein weiteres Problem ist die Festlegung des geeigneten Kriteriums für die Artefaktentdeckung (van den Berg-Lenssen & Brunia, 1989). Das Kriterium sollte so gewählt werden, dass alle Durchgänge mit Artefakten entdeckt werden, nicht aber zu falschem Alarm und exzessivem Datenverlust führen. Ein derartiges Kriterium kann nach Gratton (1998) für Lidschläge einfacher bestimmt werden als für Augenbewegungen, die in der Höhe der Amplituden sehr stark variieren können.

Probleme können sich auch ergeben, wenn Probanden über Instruktionen aufgefordert werden, Augenbewegungen und Blinzeln zu vermeiden, da diese Aufforderung eine zweite Aufgabe für die Probanden darstellt. Wird die Aufforderung befolgt, kann die erste, experimentelle Aufgabe überlagert und gestört werden. So zeigte Verleger (1991), dass die Instruktion, nicht zu blinzeln, die N1- und P3-Amplituden des auditiven EKP veränderte.

3.5.1 Methoden zur Korrektur von Augenartefakten

Die Nachteile der Ausschlussmethode führten zur Entwicklung verschiedener Methoden zur Korrektur der Augenartefakte, die ohne Datenverlust durchgeführt werden können. Die meisten Techniken basieren auf der folgenden Formel 3.

$$bEEG_{ab} = nEEG_{ab} + vEOG_{ab} + hEOG_{ab} \quad (3)$$

Dabei wird der an einem bestimmten Elektrodenpaar ab beobachtete EEG-Wert ($bEEG$) als die Summe des nicht-verunreinigten EEG ($nEEG$) und den Effekten des vertikalen und horizontalen EOG-Artefakts ($vEOG$ und $hEOG$) an diesem besonderen Elektrodenpaar gedacht. Durch Kombination von Gleichung 2 und 3 erhält man die Formel 4, die in vielen EOG-Korrekturen verwendet wird.

$$nEEG_{ab} = bEEG_{ab} - (k_{v(ab/cd)} vEOG_{cd} + k_{h(ab/cd)} hEOG_{cd}) \quad (4)$$

Diese Formel berechnet das nicht-verunreinigte EEG ($nEEG$). Vom beobachteten EEG ($bEEG$) werden die EOG-Artefakte ($vEOG$ und $hEOG$) subtrahiert. Die vertikalen und horizontalen Komponenten des EOG lassen sich berechnen, indem für die Aufzeichnung verschiedene Elektroden verwendet werden.

Die verschiedenen Korrekturtechniken unterscheiden sich im Hinblick auf die Annahmen, die sie zu den Transmissionskoeffizienten machen und dadurch, welche Prozedur für deren Berechnung eingesetzt wird.

Techniken der Zeit-Domäne

Die Techniken der Zeit-Domäne basieren auf der Annahme, dass die Transmissionskoeffizienten ($k_{v(ab/cd)}$ und $k_{h(ab/cd)}$) für alle Frequenzen von EOG-Aktivität konstant sind. Zudem soll die Ausbreitung der okularen Artefakte von den Augen auf die Schädeloberfläche unmittelbar erfolgen. Für die Berechnung der

Transmissionskoeffizienten werden lineare Regressionsmethoden oder ähnliche mathematische oder statistische Methoden verwendet. Eine Fülle von Methoden wurden vorgeschlagen, so von Elbert, Lutzenberger, Rockstroh und Birbaumer (1985), Fortgens und De Bruin (1983), Gasser, Sroka und Möcks (1986), Gratton, Coles und Donchin (1983), Jervis, Nichols, Allen, Hudson und Johnson (1985) und Verleger, Gasser und Möcks (1982).

Die Annahme der unmittelbaren Ausbreitung der okularen Artefakte über den Kopf gründet auf der Beobachtung, dass das elektrische Feld des Augapfels elektrostatische Eigenschaften hat. Demgegenüber wurde auch postuliert, der Kopf leite elektrische Aktivität in Abhängigkeit der Frequenz unterschiedlich (Gasser et al., 1985). In diesem Fall soll der Kopf wie ein Filter wirken. Andere Daten stützen die Ansicht, der Widerstand des Kopfgewebes sei über den Bereich von Frequenzen, die betrachtet werden, nämlich von 0.1 - 100 Hz (Nunez, 1981), relativ konstant. Während Gasser et al. (1986) eine Verzögerung von einigen Millisekunden in den Peaks der EOG-Aktivität über Elektroden berichteten, konnten nachfolgende Arbeiten diesen Befund nicht replizieren (siehe Berg, 1989; van den Berg-Lenssen, Brunia & Blom, 1989). Wird die okulare Aktivität bei verschiedenen Frequenzen unterschiedlich geleitet, ist die Annahme eines konstanten Transmissionskoeffizienten falsch. Die okularen Potentiale, die mit Lidschlägen einhergehen, sollen spezifische Frequenzcharakteristika aufweisen, die sich von denen, die mit Augenbewegungen einhergehen, unterscheiden. Die okularen Artefakte von Lidschlägen und von Augenbewegungen sollen sich entsprechend unterschiedlich über dem Kopf ausbreiten. Daher verwenden Gratton et al. (1983) unterschiedliche Transmissionskoeffizienten für okulare Artefakte, die mit Lidschlägen und mit Augenbewegungen einhergehen.

Die verschiedenen Techniken der Zeit-Domäne unterscheiden sich in der Art und Weise, wie die Transmissionskoeffizienten berechnet werden. Girton und Kamiya (1973) schlugen vor, die Transmissionskoeffizienten zu berechnen, während die Probanden aufgefordert wurden, ihre Augen zu bewegen (vergleiche auch Fortgens & De Bruin, 1983). Diese Transmissionskoeffizienten wurden dann verwendet, um die EEG-Daten online zu korrigieren. Das Problem der meisten online Methoden ist die Notwendigkeit von Eichungsdurchgängen mit Augenbewegungen.

Regressionsmethoden wurden durch Quilter, McGillivray und Wadbrook (1977) und später durch Verleger et al. (1982) eingeführt. Diese Regressionsmethoden verwenden für die Berechnung der Transmissionskoeffizienten nur große okulare Potentiale. Der Ansatz von Verleger et al. (1982) berechnet die Transmissionskoeffizienten für jede Epoche getrennt und mittelt sie dann zusammen.

Gratton et al. (1983) schlugen eine elaborierte Methode vor, die sich im Hinblick auf die vorherigen in zwei Kriterien unterscheidet. Erstens werden getrennte Transmissionskoeffizienten für die EOG-Aktivität von Lidschlägen und Augenbewegungen berechnet. Dies geschieht durch eine vorläufige Trennung der Daten mit Lidschlägen vom Rest der Aufzeichnung, wobei für die Trennung ein Muster-Wiedererkennens-Algorithmus verwendet wird. Zweitens werden die Transmissionskoeffizienten auf der Basis der okularen Aktivität nicht synchronisiert im Hinblick auf die Stimulierung berechnet. Dies soll die Wahrscheinlichkeit minimieren, dass nicht kausale, zeitliche Übereinstimmungen zwischen EOG- und EEG-Potential die Berechnung der Transmissionskoeffizienten beeinflussen. Dergleichen kann passieren, wenn ein Reiz sowohl EKP, z.B. eine P3, als auch EOG-Aktivität, z.B. eine Augenbewegung mit gleicher Latenz, hervorruft. Die Originalverfahren berücksichtigen nur einen EOG-Kanal (unter anderem Quilter et al., 1977; Verleger et al., 1982). Später wurde der Ansatz auf mehrere EOG-Kanäle erweitert, wobei die Methode der multiplen Regression verwendet wurde (Gratton et al., 1983; Miller, Gratton & Yee, 1988).

Jervis, Ifeachor und Coelho (1989) schlugen ebenfalls einen multiplen Regressionsansatz vor (siehe auch Ifeachor, Jervis, Morris, Allen & Hudson, 1986; Jervis, Nichols, Allen, Hudson & Johnson, 1985). Im Unterschied zu den anderen Methoden werden drei Augenelektrodenpaare benutzt, ein vertikales und zwei horizontale, und eine iterative Methode für die Berechnung der Transmissionskoeffizienten eingesetzt. Die Verwendung eines zusätzlichen EOG-Kanals erleichtert möglicherweise die Entdeckung einer radialen Komponente des EOG (Elbert et al., 1985). Der Einfluss einer radialen Komponente wird in den Techniken der Zeit-Domäne von Elbert et al. (1985) und Gasser et al. (1986) berücksichtigt (vergleiche auch Möcks et al., 1989). Semlitsch, Anderer, Schuster und Presslich (1986) empfehlen ebenfalls eine Regressionsmethode in der Zeit-Domäne, in der die mit Lidschlägen verbundene Aktivität benutzt wird, um den Einfluss der Kohärenz zwischen EKP- und EOG-Aktivität zu reduzieren. Van den Berg-

Lenssen und Brunia (1989) setzen eine andere Technik ein, in der die Transmissionskoeffizienten zwischen den EOG- und EEG-Kanälen mittels eines autoregressiven Modells des EEG berechnet werden. Mit diesem Ansatz sollen Zeitverzögerungen erklärt werden, zu denen die okularen Artefakte im EEG-Kanal erscheinen. Es ist jedoch unklar, ob dies tatsächlich sinnvoll und notwendig ist, denn die Ausbreitung der okularen Artefakte über den Schädel soll unmittelbar erfolgen (Berg, 1989). Ein anderer innovativer Aspekt der Methode von van den Berg-Lenssen und Brunia (1989) war die Verwendung einer Maximum-likelihood Prozedur anstatt der Methode der kleinsten Quadrate, um die Transmissionskoeffizienten zu berechnen.

Techniken der Frequenz-Domäne

Die Techniken der Frequenz-Domäne gehen davon aus, dass die Transmissionskoeffizienten, mittels derer die Ausbreitung des okularen elektrischen Feldes über den Kopf beschrieben wird, mit der Frequenz der EOG-Aktivität variieren (unter anderem Gasser et al., 1986; Möcks et al., 1989; van Driel, Woestenburg & van Blokland-Vogelsang, 1989; Whitton, Lue & Moldofsky, 1978; Woestenburg, Verbaten & Slagen, 1983).

Ein Vorteil dieser Techniken ist, dass die Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit der Frequenz variieren dürfen, wodurch Unterschiede zwischen Lidschlägen und Augenbewegungen berücksichtigt werden können (vergleiche aber den Ansatz von Gratton et al., 1983, der ebenfalls diese Unterscheidung zulässt). Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Technik während längerer Aufzeichnungsepochen besser mit langsamen Drifts in den Potentialen umgehen kann. Die langsamen Drifts können eine Ursache für Ungenauigkeiten bei der Korrektur mit den Techniken der Zeit-Domäne sein. Jedoch können Drifts auch durch geeignete Filter reduziert werden.

Ein Nachteil der Technik der Frequenz-Domäne ist der höhere Aufwand für die Berechnung im Vergleich zu den Techniken der Zeit-Domäne. Bei der Berechnung werden z.B. nach Gasser et al. (1985) für jeden Durchgang i die EEG- und die EOG-Daten in Frequenzbereiche getrennt, auf die Fourier Transformationen angewendet werden, was zu den Fourier Koeffizienten $EEG(\omega)_i$ und $EOG(\omega)_i$ führt, wobei ω den Multiplikationsfaktor der zugrundeliegenden Frequenz kennzeichnet. Die komplex-berechneten Regressionskoeffizienten werden gemäß Formel 5 berechnet.

$$\beta(\omega) = \frac{\sum(\text{EEG}(\omega)_i \text{EOG}^*(\omega)_i)}{\sum(\text{EOG}(\omega)_i \text{EOG}^*(\omega)_i)} \quad (5)$$

Dabei läuft die Summe über i Anzahl von Durchgängen und $*$ bezeichnet die Konjugation. In diesem Ausdruck beinhaltet der Nenner das mittlere EOG-Periodogramm und der Zähler beinhaltet das EEG-EOG-Kreuzperiodogramm. Nach der Einschätzung des $B(\omega)$ für jeden Durchgang und jedes Frequenzband wird das gewichtete EOG vom EEG gemäß der folgenden Formel subtrahiert:

$$\text{EEG}_{i,\text{true}}(\omega) = \text{EEG}_{i,\text{cont}}(\omega) - B(\omega)\text{EOG}_i(\omega) \quad (6)$$

Die korrigierten EEG-Daten werden dann in die Zeit-Domäne zurückgerechnet. Unter den vorgeschlagenen Modellen beschäftigt sich nur das von Gasser et al. (1986) mit der Unterscheidung zwischen synchroner und asynchroner Aktivität. Die anderen Methoden können daher für Ungenauigkeiten anfällig sein, die durch Pseudokorrelationen zwischen EOG und der Aktivität des Gehirns entstehen. Ein weiteres Problem kommt hinzu, wenn niedrig-amplitudige/hoch-frequente EEG-Aktivität (z.B. $\geq 5\text{Hz}$) die EOG-Power-Spektren verunreinigen (Iacono & Lykken, 1981; Oster & Stern, 1980). Dieses Problem spielt bei den Techniken der Zeit-Domäne keine Rolle, da das EOG-Signal durch niedrige Frequenzen dominiert wird, die um ein Vielfaches größer als die EEG-Signale sind. Im Fall der Technik der Frequenz-Domäne tendiert die Regressionsmethode dazu, die Korrekturfaktoren bei hohen Frequenzen künstlich zu vergrößern. Aus diesem Grund kann es notwendig sein, die Transmissionskoeffizienten zu filtern, um die Werte bei hohen Frequenzen zu unterdrücken (siehe Möcks et al., 1989; van Driel et al., 1989).

Multipler Quellenansatz zur Augenkorrektur

Kürzlich haben Berg und Scherg (1994) einen multiplen Quellenansatz zur Augenkorrektur (multiple source eye correction, MSEC) vorgestellt (vergleiche Berg & Scherg, 1991; Lins, Picton, Berg & Scherg, 1993). Dabei werden die EOG-Artefakte unter Einsatz des Dipol-Modell-Ansatzes modelliert. Die auf der Schädeloberfläche aufgezeichnete Aktivität wird als das Ergebnis von Veränderungen in der Stärke und Orientierung einer begrenzten Anzahl an Dipolen angesehen, die in verschiedenen Regionen des Gehirns und Kopfes lokalisiert sind. Im Ansatz werden zwei oder mehr Dipole innerhalb des Auges lokalisiert. Die Beteiligung der okularen Artefakte an der Aufzeichnung auf dem Schädel kann geschätzt werden, indem sie von anderen Arten der Gehirnaktivität getrennt wird.

Bei der MSEC-Methode werden empirisch bestimmte Komponenten definiert, welche die Topographie der Augenaktivität beschreiben. Sie werden wie äquivalente Dipol-Quellen behandelt, die zur Aktivität des Gehirns innerhalb des Kopfes gezählt werden. Die Augenkomponenten und die Dipol-Quellen werden dabei als gleichzeitige, sich überlappende Prozesse angesehen, die jedoch durch ihre Topographie unterschieden und getrennt werden können. Dieses Konzept berücksichtigt, dass alle Kanäle zu einem unterschiedlichen Ausmaß Informationen über das Auge *und* das Gehirn beinhalten. Die Aufmerksamkeit verlagert sich daher von der Betrachtung der Beziehung zwischen EOG- und EEG-Kanälen, die in traditionellen Ansätzen verwendet wird, hin zu einer Betrachtung aller Kanäle untereinander. Anstelle des Begriffs Transmissionskoeffizient für den Einfluss der Augenaktivität, werden Quellen-Vektoren definiert. Diese beschreiben die topographische Verteilungen, d.h., die relativen Amplituden an jeder Elektrode, die sich aufgrund mehrerer Quellenprozesse ergeben. Die Quellen-Vektoren beschreiben die Aktivität des Auges und des Gehirnes ähnlich, unterscheiden sich aber im Hinblick darauf, wie sie berechnet werden. Der Augen Quellen-Vektor wird empirisch durch Berechnung des Transmissionskoeffizienten während freiwilliger Augenbewegungen bestimmt, wobei eine Regression verwendet wird. Der Quellen-Vektor des Gehirns wird über Koeffizienten äquivalenter Dipole angenähert.

Nach Berg und Scherg (1994) ist ein wichtiger Aspekt der Quellenmodellierung die Trennung der Daten in topographische und zeit-variiierende Anteile. Der Definition von Berg und Scherg (1994) zufolge besteht eine Quellenkomponente aus der Kombination beider Teile. Die Topographie definiert sich über den Quellen-Vektor und der zeitliche Anteil definiert sich über die Form der Quellen-Welle. Die Form der Quellen-Welle ist eine Amplitudenfunktion, definiert als die Höhe der Quellenkomponente über die Zeit. Nach Berg und Scherg (1994) besteht die Aufgabe darin, ein räumlich-zeitliches Modell, das aus Quellenkomponenten mit spezifischer Topographie und der Aktivität der Form der Quellen-Welle besteht, die sich auf der Schädeloberfläche überlappen, zu bestimmen. Dieses Modell soll die beste Passung an die gemessenen Daten liefern und gleichzeitig die Aktivität von Augen und Gehirn in einem größtmöglichen Ausmaß trennen.

Daraus ergeben sich nach Berg und Scherg (1994) drei wichtige Konsequenzen. Erstens wird die Augen-Artefakt-Korrektur durch die Subtraktion der Form der Quellen-Wellen im Verhältnis der relativen Stärke der Quellenkomponente an jeder Elektrode

durchgeführt, anstatt einer Subtraktion des EOG-Signals von den EEG-Daten. Zweitens wird mit einer geeigneten Rotation der Komponenten die Form der Quellen-Wellen verwendet, um den zeitlichen Verlauf spezifischer Augenaktivität zu beschreiben. Drittens können aufgrund der gleichen Behandlung aller Elektroden in der MSEC-Methode nach der Entfernung der Augenartefakte die EOG-Elektroden prinzipiell weiter für die EEG-Analyse verwendet werden.

Nach Berg und Scherg (1994) können die mathematischen Prinzipien der Quellen-Modellierung des EEG oder der EKPs, die an anderen Stellen beschrieben wurden (z.B. Scherg, 1990; Scherg & Picton, 1991), ebenso auf Artefakte angewendet werden. Das elektrische Potential $u_k(t)$ an der Elektrode k und Zeit t wird als Summe der Bestandteile (Quellenkomponenten) des Gehirns, der Augen oder anderer Quellen (z.B. Muskeln) gedacht:

$$u_k(t) = \sum_{i=1}^{NS} \mathbf{c}_{ki} s_i(t) \quad (7)$$

Dabei ist \mathbf{c}_{ki} der Quellen-Vektor, gegeben bei dem relativen Anteil der Quelle i an der Elektrode k , d.h., er beschreibt die Topographie der Quelle i . $s_i(t)$ ist die Form der Quellen-Welle, welche die Amplitude der Quelle i zur Zeit t beschreibt, d.h. die zeit-variierenden Anteile. NS ist die Anzahl von Quellen.

Für ein gegebenes Dipol-Quellen-Modell des elektrischen Potentials sind die Quellen-Vektoren \mathbf{c}_{ki} eine Funktion des Ortes und der Orientierung jeder Quelle und der Kopfparameter, d.h. der Geometrie und Leitungseigenschaften des Gehirns, der cerebrospinalen Flüssigkeit, der Haut und des Schädelknochens. Durch die Anwendung linearer Optimierungsmethoden kann die Formel 7 gelöst werden, um die Form der Quellen-Welle $s_i(t)$ zu beobachten. Diese stellt die beste Passung des Modells an die Daten dar und liefert die Anzahl von Quellen, welche die Anzahl von Elektroden nicht überschreitet. Die über Elektroden quadrierte Summe der Unterschiede zwischen dem gemessenen und vorhergesagten Potential wird als Prozentsatz der gesamten Datenvarianz ausgedrückt, also als Residualvarianz. Je geringer die Residualvarianz, desto besser die Passung zwischen Modell und Daten.

Zur Eingliederung der Augenkorrekturmethode werden die Quellen des Auges und des Gehirn durch eine Aufspaltung unterschieden, wie Formel 8 zeigt.

$$u_k(t) = \sum_{i=1}^{NB} c_{ki} s_i(t) + \sum_{j=1}^{NE} e_{kj} o_j(t) \quad (8)$$

Dabei beschreibt c_{ki} die Quellen-Vektoren des Gehirns, die durch Dipole modelliert werden und e_{kj} die Quellen-Vektoren des Auges, die durch eine empirische Eichung bestimmt werden. $s_i(t)$ und $o_j(t)$ sind korrespondierende Formen der Quellen-Wellen. Die Anzahl von Quellen NS ist die Kombination von Gehirn NB und Augen NE Quellen.

$$NS = NB + NE \quad (9)$$

Die rechte Seite der Gleichung 8 beschreibt die Augenaktivität bei Gehirnaktivität. Dies ist nach Berg und Scherg (1994) die Hauptunterscheidung zwischen der MSEC-Methode und den anderen Verfahren zur Korrektur von Augenartefakten. Nach Lösung der Gleichung, kann die Korrektur der Augenartefakte durchgeführt werden, indem das Element der rechten Seite der Gleichung 8 von den Daten abgezogen wird.

$$w_k(t) = u_k(t) - \sum_{j=1}^{NE} e_{kj} o_j(t) \quad (10)$$

Dabei stellt $w_k(t)$ die korrigierte Wellenform dar. Die Methode beinhaltet nach Berg und Scherg (1994) die folgenden zwei Notwendigkeiten. Erstens sollte eine ausreichende Anzahl von Komponenten (NE) benutzt werden, um die Augenaktivität zu beschreiben. Dies ist äquivalent mit der Frage in traditionellen Ansätzen, wie viele EOG-Kanäle zu verwenden sind. Zweitens sollte ein vernünftiges Modell verwendet werden, um die Aktivität des Gehirns zu beschreiben.

Den Augen-Quellen-Vektor erhält man über die akkurate Bestimmung eines Datensatzes, der Augenbewegungen enthält, die ausreichend groß genug sind, um diesen Vektor von der Hintergrundaktivität des EEG zu unterscheiden. Berg und Scherg (1994) schlagen dafür Eichungsdurchgänge vor. Sollen nur Lidschläge korrigiert werden, sei die eigentliche Messung während der EEG-Aufzeichnung ausreichend. In Übereinstimmung mit den traditionellen Methoden braucht man eine ausreichende Anzahl von Augen Quellen-Vektoren, um die verschiedenen Arten von Augenaktivität zu beschreiben. Berg

und Scherg (1994) erörtern mehrere Arten den Quellen-Vektor aus den Eichungsdaten zu extrahieren. Es wurde der traditionelle Regressionsansatz verwendet, aber auch ein PCA-Ansatz, der orthogonale Vektoren liefert. Einige der Vektoren sollen durch Augenbewegungen, andere durch EEG und Störungen entstehen. Bei entsprechend großer Augenaktivität fanden Berg und Scherg (1994) drei Vektoren, welche einen Großteil der Varianz der Eichungsdaten ausmachten und somit einen Großteil der Augenaktivität beschreiben konnten. Eine Möglichkeit die Topographie der Komponenten zusammenzufassen, besteht darin, das Zentrum der Dichte (centre of gravity) der Lokalisation und Orientierung zu berechnen (Scherg & Von Cramon, 1984). Die Zentren der Dichte der Komponenten aufgrund von Augenaktivität sollen in Augennähe lokalisiert sein.

Abschließend ist festzustellen, dass die Methode interessante Einsichten in die Natur der okularen Artefakte liefert. Es zeigte sich insbesondere der unterschiedliche Einfluss von nach oben gerichteten und nach unten gerichteten Augenbewegungen und Unterschiede zwischen Lidschlägen und Augenbewegungen (Berg & Scherg, 1994). Da die Berechnungen für diesen Ansatz sehr aufwendig sind, ist er als Standardkorrekturmethode okulärer Artefakte weniger geeignet (Gratton, 1998). Die Dipol-Modell-Prozedur basiert zudem auf Annahmen über die Ausbreitung der elektrischen Potentiale, die schwer zu überprüfen sind. Ein besonderes Problem ergibt sich, da die Modellierung der komplexen Augenanatomie schwierig ist und der Einfluss des Augenlids zu berücksichtigen ist. Insgesamt kommt dieser Ansatz daher in erster Linie für Untersuchungen in Frage, in denen die BESA-Methode (Brain Electrical Source Analysis; Scherg, 1990) verwendet wird. In EEG- und EKP-Untersuchungen, die mittels traditioneller Ansätze Komponenten bestimmen, kann diese Methode zur Korrektur der Augenartefakte nicht implementiert werden.

Nicht-lineare Methoden

Kürzlich haben Sadasivan und Dutt (1994) und Sadasivan und Dutt (1996) eine neue Technik vorgeschlagen, die auf dem „neural network approach“ und einer adaptiven Filtertheorie basiert. Dabei wird keine lineare Beziehung zwischen den EOG-Kanälen und dem Artefakt angenommen, das auf dem EEG-Kanal beobachtet wird.

Nach Sadasivan und Dutt (1994) wurde bislang nicht die Effizienz des „neural network approach“ für die Minimierung von Augenartefakten untersucht. „Neural like networks“

wurden als effiziente Gestaltung kombinatorischer Optimierungsprobleme vorgeschlagen. Die konventionellen Methoden zur Artefaktminimierung haben nur lineare Schemen der Signalmodellierung verwendet. Sadasivan und Dutt (1994) schlagen anstelle des konventionellen linearen Modells ein nicht-lineares Modell durch die Einführung einer Volterra Funktion zweiter Ordnung vor. Durch die Verwendung des „neural network approach“ soll das EEG-Signal in der Gegenwart von EOG-Signalen erhöht werden. Die Nicht-Linearität wurde eingeführt, da nach Sadasivan und Dutt (1994) bekannt sei, dass die Signalverarbeitung im Gehirn aufgrund von nicht-linearer Übertragungsfunktion der biologischen Neurone selbst nicht linear sei. Durch die Einführung der Nicht-Linearität würde somit eher dem Modus der Signalverarbeitung entsprechen, der im Gehirn stattfindet. Sadasivan und Dutt (1994) übersetzen das Problem der EEG-Erhöhung in den Rahmen eines Optimierungsproblems und das Problem der Artefaktminimierung in den Rahmen der Theorie künstlicher neuronaler Netzwerke (ANN; Lippman, 1987).

Abbildung 1 zeigt ein Diagramm des Artefakt Minimierungsschema, das Sadasivan und Dutt (1994) verwendeten. Dabei ist $x(n)$ der primäre Input und $y(n)$ der Referenz Input für den Artefaktminimierer. Die geschätzten Werte der n ten Stichprobe des Referenz Inputs sind als der Ausgang des nicht-linearen Filtermodells gegeben. Wie die optimale Filterfunktion aufgefunden werden kann, wird von Sadasivan und Dutt (1994) detailliert beschrieben. Sie zeigen ebenfalls, wie sich das Minimierungsproblem lösen lässt. Der dafür entwickelte Algorithmus wurde in der Studie effektiv angewendet, um die EOG-Artefakte vom EEG-Signal zu minimieren.

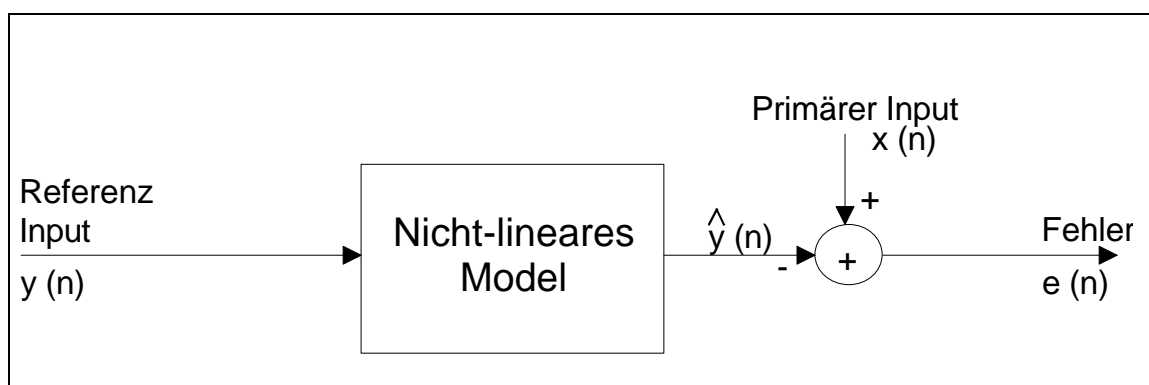


Abbildung 1: Diagramm des vorgeschlagenen Artefakt Minimierungsschemas (siehe Sadasivan & Dutt, 1996).

Sadasivan und Dutt (1996) stellen zwei Algorithmen dar, um die Filterparameter zu adjustieren, den „least-mean-square“ (LMS) und den „recursive least-squares“ (RLS)

Algorithmus. Dabei soll der „recursive least-squares“ Algorithmus stabil und schnell, jedoch aufwendiger zu programmieren sein.

Leider gibt es bislang keine Vergleichsstudien, die diese Methode mit den traditionellen Ansätzen vergleichen. Daher kann eine Bewertung dieses interessanten Ansatzes im Vergleich zu den anderen Methoden kaum erfolgen.

Methode der „aligned-artifact averages“ (AAA)

Nach Croft und Barry (1998b) weisen die Technik der Frequenz-Domäne und die Technik der Zeit-Domäne Probleme auf (Berg, 1989), die dazu führten, dass EOG-Korrekturen häufig nicht verwendet werden. Nach Ansicht der Autoren ist es verwunderlich, dass Diskrepanzen für die Transmissionskoeffizienten (B) sowohl für verschiedene Arten als auch für verschiedene Frequenzen von Augenbewegungen gefunden wurden.

Ein Problem dieser Methoden bestehe in der B -Inflation, womit die künstliche Vergrößerung der B gemeint ist. Die Berechnung der B basiert auf der Korrelation zwischen EOG- und EEG-Kanälen (r) und wird als Messung der mit den Augenbewegungen verbundenen Potentiale in beiden Kanälen angesehen. Nach Croft und Barry (1998b) reflektiere r zudem das neuronale Potential beider Kanäle (vergleiche Iacono & Lykken, 1981; Berg & Scherg, 1994) und auch weitere Störungen wie beispielsweise DC-Drifts beider Kanäle. Daher können r und das entsprechende B vergrößert sein. Eine traditionelle Korrektur füge demnach Artefakte ein, indem sie zu viel ‘EOG-Aktivität’ aus dem EEG entferne.

Croft und Barry (1998b) kritisieren zudem, dass über die Ausbreitungen des EOG zu den EEG-Elektroden wenig bekannt sei. Bei der Technik der Zeit-Domäne variere die Ausbreitung des EOG auf das EEG mit der Art von Augenbewegung, während bei der Technik der Frequenz-Domäne der Anteil der EOG-Ausbreitung durch die Frequenz der Augenbewegungen bestimmt würde. Daher sei weder klar, welche Technik richtig sei, noch zu welchem Ausmaß Fehler durch die Korrektur eingebunden werden. Auch innerhalb der Technik der Zeit-Domäne sei unklar, ob sich Lidschläge und vertikale Augenbewegungen unterschiedlich ausbreiten. Einige Studien hätten B berichtet, die für Lidschläge 25% größer waren (z.B. Corby & Kopell, 1972; Gratton et al., 1983), andere nicht (z.B. Gratton & Coles, 1989). Gäbe es unterschiedliche Ausbreitungen, dann sei

unklar, an welcher Stelle in der Aufzeichnungsepoche oder auch bei welchen Frequenzen die Veränderungen von einem B zu einem anderen auftritt.

Nach Croft und Barry (1998b) sollen die verschiedenen B bei verschiedenen Augenbewegungsartefakten (Sakkaden, Lidschlägen etc.) durch die Höhe der EOG-Amplitude in der Regressionsgleichung bedingt sein. Demnach führen Lidschläge zu kleineren B , weil sie relativ zum EEG-Kanal zu groß sind, um durch die Einflüsse des EEG oder anderer Störungen beeinflusst zu werden. Somit spielt die Amplitudenhöhe des EOG eine Rolle, inwieweit sich Einflüsse des EEG und anderer Störungen auf das EOG niederschlagen. Croft und Barry (1998b) nehmen an, die Ausbreitungen des EEG bedingen größere Effekte in der Regressionsgleichung, wenn das EOG klein ist. Ebenso sollen andere Störungen das B eher vergrößern, wenn die EOG-Amplituden klein sind. Die mathematische Beschreibung dieser Effekte findet sich in Anhang A bei Croft und Barry (1998b). Die Unterschiede in den berichteten B lassen sich somit durch Einflüsse der EOG-Höhe erklären. Lidschläge, die mit einer größeren Amplitude als die meisten anderen Augenbewegungen einhergehen, werden weniger beeinflusst und führen daher zu valideren B . Kleinere EOG-Amplituden können vergrößerte B zur Folge haben.

Die wesentlichen Hypothesen von Croft und Barry (1998b) lauten, die Ausbreitung der okularen Artefakte auf die EEG-Elektroden sei konstant und die berichteten B Unterschiede seien künstlich, bedingt durch die Verwendung kleiner EOG-Amplituden bei der Berechnung. Diese Hypothesen wurden in zwei Experimenten überprüft.

Ein Experiment mit simulierten Daten zeigte bei kleinem EOG/EEG-Verhältnis, wenn ein DC-Shift in beide Kanäle eingefügt wurde oder sich das EEG auf das EOG ausbreitete, dass sich die B vergrößerten. Wenn das EOG/EEG-Verhältnis anstieg, verminderte sich der Effekt dieser Artefakte. Ein zweites Experiment zeigte, dass die B exponentiell ansteigen, wenn das Verhältnis von EOG und EEG kleiner wird. Somit zeigten sich für die simulierten und realen Daten relativ ähnliche Ergebnisse.

Croft und Barry (1998b) interpretierten diese Ergebnisse als Beleg ihrer Hypothesen. Die Ausbreitung der okularen Artefakte sei konstant. B vergrößere sich künstlich bei relativ kleiner EOG-Höhe, weil die Regressionsgleichung eine akkurate Berechnung nicht ermögliche, wenn EEG und EOG ähnliche Höhen aufweisen.

Croft und Barry (1998a) verwendeten die Methode der „aligned-artifact averages“ (AAA), um zu untersuchen, ob die Ausbreitung über verschiedenen Arten von Augenbewegungen und Frequenzen konstant ist und um die Methode als EOG-Korrektur zu testen.

Bei der AAA-Methode werden EOG-Strecken gemittelt, die zeitgleich mit verschiedenen Augenbewegungen auftreten. Das B wird aus diesen Mittelungen berechnet. Für diese Mittelungen wird die Bezeichnung „aligned-artifact averages“ (AAA) verwendet, um sie von traditionellen EKPs zu unterscheiden, da die AAA nicht notwendigerweise zeitlich an ein Ereignis gebunden sind. Sie können z.B. an einem Lidschlagmaximum ausgerichtet werden. Durch die Mittelung soll das EEG im EOG minimiert und das Verhältnis zwischen EOG und EEG maximiert werden. Das Verhältnis EOG/EEG sollte dann groß genug sein, um eine richtige B Berechnung an allen Elektrodenpositionen zu erhalten. Der Einfluss anderer Störungen soll durch die Berechnung eliminiert werden. B soll annähernd die wahre Ausbreitung widerspiegeln.

Croft und Barry (1998a) führten mehrere Experimente durch. Zwei Experimente manipulierten das Störungsniveau in einem Datensatz, um zu bestimmen, ob Störungen die Ausbreitungskoeffizienten B beeinflussen. Ein drittes Experiment testete den Effekt der EEG-Ausbreitung auf die mit den Augenbewegungen verbundenen Potentiale und auf die B . Das vierte Experiment verwendete eine Computersimulation, um die Effektivität der neuen AAA-Korrekturmethode zu überprüfen. Die Ergebnisse zeigen nach Croft und Barry (1998a), dass die B bei niedrigen EOG-Amplituden durch Störungen wie Drifts vergrößert wurden und dass die AAA-Methode dem traditionellen Gratton-Ansatz überlegen sei.

Croft und Barry (1998a) kamen daher zu folgenden Schlüssen: Die EOG-Ausbreitung sei über verschiedene Arten von mit den Augenbewegungen verbundenen Potentialen konstant, das heißt, unabhängig vom Artefakttyp. Die unterschiedlichen Ausbreitungskoeffizienten, die früher für Sakkaden, Lidschläge und für unterschiedliche Frequenzen berichtet wurden, entstanden aufgrund eines Defizits der Regressionsgleichung, das aber nur bei niedrigen EOG-Amplituden zum Tragen kommt. Koeffizienten, die von niedrigen EOG-Amplituden und/oder an hinteren Elektrodenpositionen berechnet wurden, waren bei den anderen Methoden hoch variabel und vergrößert. Die entsprechenden Korrekturen fügen daher wahrscheinlich EOG-

Artefakte in die Daten ein und sollten vermieden werden. Dagegen sei die AAA-Methode akkurat.

3.5.2 Abschließende Bewertung der Methoden zur Korrektur okularer Artefakte

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Verunreinigung des EEG und EKP durch okulare Artefakte ein großes Problem darstellt. Daten, die sich diesem Problem nicht stellen, sollten nicht veröffentlicht werden (Donchin et al., 1977). Im Allgemeinen sollte das Auftreten von Augenbewegungen und Lidschlägen mit EOG-Kanälen aufgezeichnet und eine ausschließliche Verwendung von EEG-Kanälen vermieden werden. In den Empfehlungen, wie viele EOG-Kanäle zu verwenden sind, unterscheiden sich die verschiedenen Methoden. Nach Gratton (1998) genügt ein vertikaler EOG-Kanal für die Aufzeichnung von Lidschlägen und vertikalen Augenbewegungen, jedoch nicht, um seitliche, horizontale Augenbewegungen aufzuzeichnen. Dies kann bei seitlichen Elektrodenplatzierungen und wenn eine asymmetrische Referenz verwendet wird problematisch sein. Gratton (1998) fordert die Aufzeichnung von mindestens zwei EOG-Kanälen, vertikal und horizontal, jedoch wurde auch die Notwendigkeit eines dritten Kanals diskutiert (vergleiche die Kommentare zu dem Artikel von Brunia et al., 1989). Berg und Scherg (1994) verwenden drei EOG-Kanäle, während neuere Methoden teilweise wiederum nur einen EOG-Kanal für ausreichend halten (siehe z.B. Sadasivan & Dutt, 1994; Croft & Barry, 1998a).

Zwei allgemeine Strategien, mit okularen Artefakten umzugehen, wurden beschrieben. Bei der ersten werden Durchgänge aussortiert, in denen Augenbewegungen beziehungsweise Lidschläge auftreten. Diese Ausschlussmethode ist einfach zu implementieren, kann aber einen substanziellen Datenverlust oder einen Bias der aufgezeichneten Daten bedingen. Die zweite Strategie nutzt eines der vielen vorgeschlagenen Korrekturverfahren für okulare Artefakte.

Die in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Korrekturmethode basieren auf unterschiedlichen Annahmen, welches Modell okularer Artefakte am geeignetsten ist. Sowohl online als auch offline Verfahren sind einsetzbar. Gratton (1998) bewertet die offline Methoden als flexibler und reliabler. Aufgrund der Kapazität von Computern bedeutet die Anwendung von offline Korrekturmethode nur einen geringen Mehraufwand an Zeit.

EOG-Korrekturtechniken der Zeit- und der Frequenz-Domäne können durchgeführt werden. Die Techniken der Zeit-Domäne sind einfacher zu berechnen und weniger sensitiv auf hoch-frequente EEG-Verunreinigungen des EOG-Kanals. Andererseits sind die Techniken der Frequenz-Domäne weniger sensitiv auf Ungenauigkeiten aufgrund langsamer Drifts in den Potentialen. Für beide Techniken existieren geeignete Methoden, die diese Probleme minimieren. Werden diese Methoden angewendet, nähern sich die Ergebnisse der verschiedenen Techniken an. Wie in Abschnitt 3.5.1 dargestellt, wurde kürzlich sowohl ein multipler Regressionsansatz (Sadasivan & Dutt, 1994; Sadasivan & Dutt, 1996) und mit der AAA-Methode (Croft & Barry, 1998b; Croft & Barry, 1998a) ein völlig anderes Vorgehen für die Korrektur von okularen Artefakten vorgeschlagen. Obwohl beide Ansätze interessante neue Aspekte in die Diskussion über die Methoden zur Korrektur von okularen Artefakten einbringen, fehlen bislang Studien, die diese Methoden einem kritischen Vergleich mit den bisher verwendeten Verfahren unterziehen. Die von Berg und Scherg (1994) vorgeschlagene Methode des multiplen Quellenansatzes zur Augenkorrektur kann nur dann angewendet werden, wenn die EKPs im Rahmen von Dipolmodellen ausgewertet werden, jedoch nicht wenn traditionelle Parametrisierungsansätze verwendet werden.

Ein praktischer Unterschied zwischen den Korrekturmethode besteht in der Notwendigkeit von Eichungsdurchgängen. Der Vorteil der Eichungsdurchgänge liegt darin begründet, dass sich die Korrektur online durchführen lässt. Die Anwendung von Eichungsdurchgängen empfiehlt sich auch, um das Problem zu reduzieren, das 'wahre' EKP zu korrigieren, wenn EKP- und EOG-Effekte zeitgleich auf den Reiz folgen oder wenn im Fall der Technik der Frequenz-Domäne EKP und EOG ein ähnliches Power-Spektrum aufweisen. Wie in Abschnitt 3.5.1 dargelegt, kann dies aber durch die Verwendung der 'nicht-Zeit-verbundenen' EEG-Aktivität für die Berechnung der Transmissionskoeffizienten vermieden werden (siehe Gratton et al., 1983). Im Falle der Techniken der Frequenz-Domäne erfordert dies die Berechnung der Power-Spektren, nachdem die zeit-verbundene Aktivität subtrahiert wurde.

Die Verwendung von Eichungsdurchgängen ist nicht unproblematisch. Die Aufzeichnung der Eichungsdurchgänge erfordert zusätzliche Zeit, was bei längeren EEG-Untersuchungen stören kann. Die Eichungsdurchgänge können natürlich ebenfalls von EEG-Aktivität begleitet sein, die sich wahrscheinlich von der EEG-Aktivität während des

Experiments unterscheidet. Die Transmissionskoeffizienten, die während des Eichungsdurchgangs aufgezeichnet wurden, können daher für die Korrektur des eigentlichen Experiments ungeeignet sein. Zudem können die Augenbewegungen während der Eichungsdurchgänge nicht repräsentativ für die Bewegungsarten sein, die während des regulären Experiments auftreten, da freiwillige Augenbewegungen das Augenlid zu einem anderen Ausmaß einschließen sollen als unfreiwillige oder reflexive Augenbewegungen (Gratton, 1998). Insgesamt kann auf Eichungsdurchgänge verzichtet werden, wenn Verfahren angewendet werden, die sicherstellen, dass die Transmissionskoeffizienten nicht durch Pseudokorrelationen zwischen dem zeitlichen Verlauf der EOG- und EKP-Aktivität beeinflusst werden. Obwohl die meisten EOG-Korrekturen die Qualität der Daten verbessern, sollte nach Gratton (1998) kontrolliert werden, ob die Transmissionskoeffizienten richtig berechnet wurden, wozu auch Kriterien genannt werden (siehe aber die Kritik von Croft & Barry, 1998b).

Nach Gratton (1998) können zwei wesentliche Fehler bei der Berechnung der Transmissionskoeffizienten auftreten. Erstens kann die Qualität der Daten wegen großer Drifts oder anderer Arten von Störungen schlecht sein. Dieses Problem kann teilweise durch die Eliminierung von Durchgängen mit Artefakten nicht-okularer Quellen gelöst werden, bevor die Augenkorrektur angewendet wird. Zweitens können zu wenig okulare Artefakte aufgetreten sein, so dass keine reliable Berechnung der Transmissionskoeffizienten möglich ist.

Kleine Fehler in der Berechnung der Transmissionskoeffizienten sind schwer zu entdecken, führen aber auch nur zu kleinen Fehlern in der Berechnung des EKP. Sind jedoch kleinste Effekte im Bereich von μV von Interesse, sollten die Bedingungen im Experiment so angelegt sein, dass die Wahrscheinlichkeit einer Unter- oder Überkorrektur der okularen Artefakte gering ist. Dies lässt sich erreichen, indem experimentelle Bedingungen geschaffen werden, in denen die Augenbewegungen so ähnlich wie möglich sind. Da viele EOG-Korrektur-Methoden existieren, bleibt die Frage berechtigt, welche die geeignetste ist. Auf diese Frage eine abschließende Antwort zu geben fällt schwer, da weder das 'wahre' EKP noch das 'wahre' EOG (Berg & Scherg, 1994) bekannt ist.

Mit der Darstellung des Problems okulärer Artefakte für EEG- und EKP-Daten und mit Möglichkeiten dieses Problem zu handhaben, wurde das Kapitel 3 beendet, das mit einer

ausführlichen Beschreibung der EKP-Methode begonnen hatte. An dieser Stelle sind die wesentlichen physiologischen und methodischen Grundlagen für diese Arbeit abgehandelt. In den folgenden beiden Kapiteln 4 und 5 werden die beiden zugrunde liegenden Experimente dargestellt.

4 Experiment 1

In einer Serie von Experimenten, die Bilder des International Affective Picture Systems (IAPS; Lang et al., 1997) darboten (vergleiche Abschnitt 3.4.2.2), wurde eine frontal positive langsame Welle im EKP ausgelöst. Die funktionale Bedeutung dieser langsamen Welle ist bislang unklar. Das erste Experiment soll ausschließen, dass die frontal positive Welle ein Artefakt von Augenbewegung während der Präsentation von visuellen Reizen ist. Dazu wurde ein neues Paradigma entwickelt, indem die Menge an Augenbewegungen bei der Betrachtung visueller Reize systematisch variiert werden kann. Verschiedene 6 x 6 Matrizen wurden erzeugt, in denen ein vorher definierter Zielreiz, der aus einer 2 x 2 Matrix bestand, entdeckt werden sollte. Die wesentliche Hypothese lautet, dass kein systematischer Einfluss der Augenbewegung an den frontalen Elektrodenpositionen beobachtbar sein soll, nachdem ein Korrekturverfahren für okulare Artefakte angewendet wurde. Dafür wurde sowohl das EOG als auch das EKP auf die Matrizen registriert und ausgewertet.

4.1 Einleitung

In einer Serie von Experimenten (Diedrich, 1996; Diedrich et al., 1997; Naumann et al., 1997; Maier et al., 1996) wurden emotionale Bilder des International Affective Picture Systems (Lang et al., 1997) dargeboten und eine frontal positive langsame Welle im EKP im Zeitbereich ab 700 ms bis zu einer Dauer von 6 Sekunden nach Reizdarbietung ausgelöst (vergleiche Abschnitt 3.4.2.2). Im Rahmen emotionstheoretischer, neurobiologischer und physiologischer Befunde wurde angenommen, dass die frontal positive langsame Welle die Hemmung einer durch die emotionalen Bildreize ausgelösten motorischen Reaktion indiziert. Um diese Annahmen zu überprüfen, wurde ein Experiment durchgeführt, das die Frage klären sollte, ob die frontal positive langsame Welle nicht auftritt, wenn nur neutrale Reize in einer kognitiven Verarbeitungsaufgabe dargeboten werden (Maier et al., 1996). Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass die frontal positive langsame Welle unabhängig von der Art der Verarbeitung, kognitiv oder emotions-fokussiert, und unabhängig von der emotionalen Valenz der Bilder, neutral oder negativ, auftrat. In **Abbildung 2** sind die beiden extremsten Bedingungen des Experiments dargestellt.

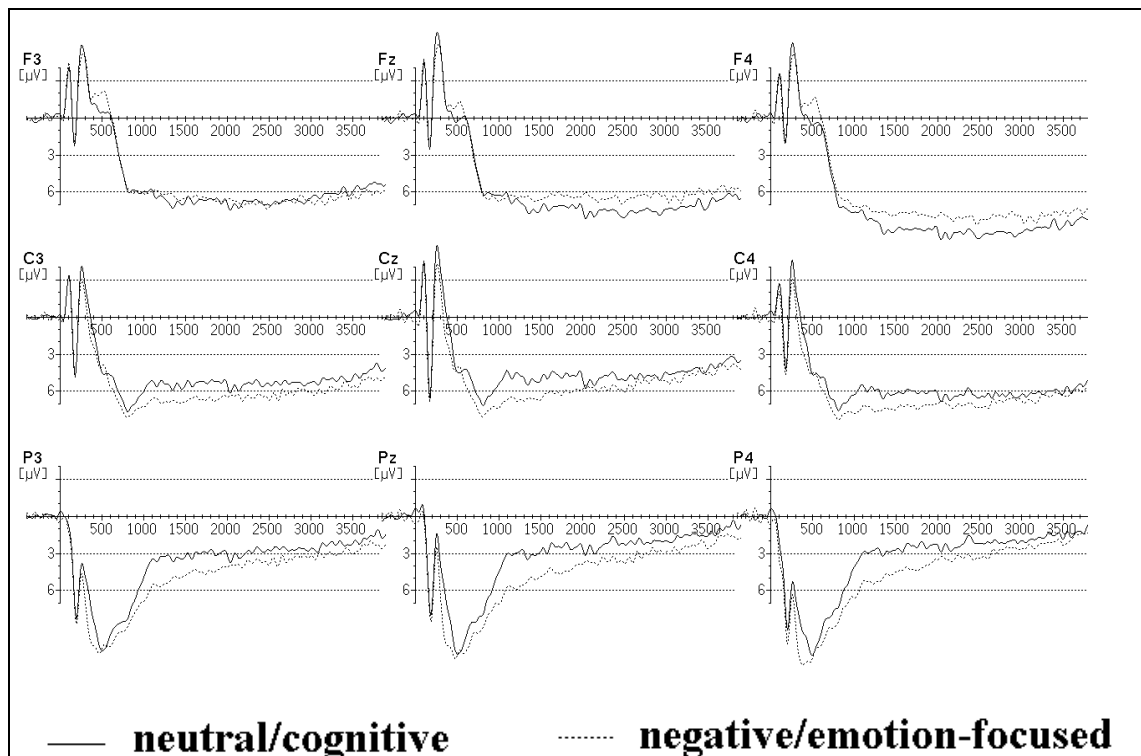


Abbildung 2: Grand Means ($n = 60$) ausgelöst durch neutrale Bilder in einer kognitiven Verarbeitungsaufgabe und durch negative Bilder in einer emotions-fokussierten Verarbeitungsaufgabe (aus Maier et al., 1996).

Somit ließ sich ausschließen, dass verschiedene Arten von Informationsverarbeitung beziehungsweise der emotionale Gehalt der Bilder diese langsame Welle auslösten. Die funktionale Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle ist daher weiterhin unklar.

Kritisch bei der Darbietung von visuellen Reizen ist, dass selbst wenn ein kleiner visueller Winkel verwendet wird, das EEG mit okularen Artefakten verunreinigt ist (vergleiche Abschnitt 3.5). Die frontal positive langsame Welle, die im Zusammenhang mit der Darbietung der emotionalen Bilder gefunden wurde, könnte somit ein Artefakt der Augenbewegung während der Reizdarbietung sein. Es ist denkbar, dass die Kortexareale, die an der Steuerung der Augenbewegung beteiligt sind, insbesondere das frontale Augenfeld (vergleiche Abschnitt 2.3.3), ebenfalls eine Rolle bei der Betrachtung der visuellen Reize spielen und zum Entstehen der frontal positiven langsamen Welle beitragen.

Es gibt jedoch eine Reihe von Argumenten, die diese kritischen Aspekte relativieren. Das erste Argument betrifft die Frage, ob die Steuerung der Augenbewegung durch kortikale Regionen einen messbaren Einfluss auf das EEG hat, das während der Darbietung von visuellen Reizen erhoben wird. Abschnitt 2.3.3 stellte ausführlich dar, welche Teile des

Gehirns an der Kontrolle und Steuerung der Augenbewegung beteiligt sind. Dabei zeigte sich sehr deutlich, dass der überwiegende Anteil von Strukturen, mit Ausnahme des frontalen Augenfeldes und einer Region in der okzipitalen Region (Area 17, 18 und 19), nicht in den kortikalen, sondern in tiefer liegenden Strukturen des Gehirns anzusiedeln sind. Daher scheint es sehr unwahrscheinlich, dass Aktivierungen und Hemmungen der umgrenzten kortikalen Regionen, die bei der Steuerung von Augenbewegungen eine Rolle spielen, im Verhältnis zu den kortikalen Regionen, die an der Verarbeitung visueller Informationen beteiligt sind (vergleiche die Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3), einen wesentlichen Einfluss auf das EEG und dort insbesondere an den frontalen Elektrodenpositionen haben.

Die weiteren Argumente beziehen sich auf den Einfluss okularer Artefakte auf das EEG. Zunächst ließ sich die frontal positive langsame Welle ebenfalls auslösen, wenn sehr kurze Darbietungszeiten gewählt wurden. Naumann et al. (1997) verwendeten drei unterschiedliche Darbietungszeiten für die IAPS-Bilder, 250 ms, 500 ms und 2000 ms. Es zeigten sich keine Unterschiede in den Amplituden an den frontalen Elektrodenpositionen bis 1200 ms nach Reizdarbietung. Bei allen drei Darbietungszeiten wurde die frontal positive langsame Welle mit einer Latenz von 800 bis 1000 ms ausgelöst und blieb erhalten. Es ist äußerst fraglich, ob systematische Augenbewegungen auch *nach* dem Abschalten der visuellen Reize auftreten, die eine frontal positive langsame Welle im EKP hervorrufen.

In allen Experimenten, die visuelle Reize verwendeten, wurde zudem eine Korrektur der okularen Artefakte durchgeführt (vergleiche Abschnitt 3.5). Dafür wurde die von Gratton et al. (1983) vorgeschlagene Methode durch den Ansatz von Miller et al. (1988) erweitert. Lidschläge werden mit dem Regressionsansatz von Gratton et al. (1983) in einem ersten Schritt entfernt. Dann werden zwei zusätzliche Regressionsgleichungen angewendet. Die erste Regression entfernt die Einflüsse der vertikalen Augenbewegungen, die neben den Lidschlägen auftreten, aus dem EEG, die zweite Regression zieht den Einfluss horizontaler Augenbewegungen vom EEG ab. Nachdem diese Methode angewendet wurde, sind EOG und EEG nicht mehr korreliert.

Drittens zeigte sich in der Studie von Diedrich et al. (1997), dass weder die horizontal noch die vertikal aufgezeichneten Augenbewegungen systematisch mit verschiedenen Verarbeitungsaufgaben oder mit verschiedenen Charakteristika der IAPS-Bilder

variieren. In einer Studie von Lang et al. (1998) zeigte sich zudem, dass sich horizontale und vertikale Augenbewegungen nicht als Funktion des Bildinhalts unterscheiden. Das heißt, die Augenbewegung beim Betrachten neutraler und emotionaler Bilder unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Neben dem Ansatz von Gratton et al. (1983) wurden andere Korrekturmethode veröffentlicht, die ausführlich in Abschnitt 3.5 dargestellt sind. Es zeigte sich, dass die verschiedenen Ansätze auf unterschiedlichen Annahmen basieren, unterschiedliche Algorithmen verwenden und zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist unklar, welche Kriterien für den Vergleich der verschiedenen Methoden untereinander geeignet sind. Bislang fehlen Studien, die insbesondere die kürzlich vorgeschlagenen Methoden (Sadasivan & Dutt, 1994; Sadasivan & Dutt, 1996; Croft & Barry, 1998a) mit den traditionell verwendeten Techniken der Zeit-Domäne und der Frequenz-Domäne vergleichen. Aufgrund des Vergleichs von EKPs, die mit verschiedenen Korrekturverfahren erzeugt wurden, gaben Lutzenberger und Elbert (in Brunia et al., 1989, p. 37) zu Bedenken, „that biological and technical noise must result in a limited accuracy of *any* correction procedure“. Sie kommen zu dem Schluss, dass keine ideale Korrektur für okulare Artefakte existiert.

Visuelle Reize, besonders bei langer Darbietungsdauer, führen zu horizontalen und vertikalen Augenbewegungen. Es existiert keine andere Alternative, die okularen Artefakte aus dem EEG zu entfernen, als eines der veröffentlichten Korrekturverfahren zu verwenden. Wenn alle Strecken mit okularen Artefakten entfernt werden, blieben nach der Darbietung visueller Reize nicht genügend Strecken übrig, um ein visuelles EKP zu mitteln. Bislang wurde in den Experimenten mit den Bildern des IAPS der Trierer Arbeitsgruppe (Diedrich, 1996; Diedrich et al., 1997; Naumann et al., 1997; Maier et al., 1996) der von Miller et al. (1988) erweiterte Ansatz von Gratton et al. (1983) verwendet. Dieser Ansatz wird auch in diesem und im folgenden Experiment zur Korrektur der okularen Artefakte verwendet. Die Kritik, die an diesem und anderen Regressionsansätzen von Croft und Barry (1998b) geübt wurde, spielt für die Fragestellung hier aus zwei Gründen eine untergeordnete Rolle. Erstens sind in diesem Experiment massive Augenbewegungen zu erwarten, wodurch eine falsche Berechnung der Transmissionskoeffizienten aufgrund zu geringer Augenbewegung nicht zu erwarten ist. Zweitens konnten Croft und Barry (1998a, b) zeigen, dass nicht die frontalen,

sondern die weiter hinten am Schädel liegenden Elektrodenpositionen durch ‘falsche Berechnungen’ des Regressionsansatzes betroffen sind. Da in diesem Experiment der Einfluss von Augenbewegung auf die frontalen Elektrodenpositionen untersucht werden soll, kann der Regressionsansatz von Gratton et al. (1983) in der Erweiterung von Miller et al. (1988) dennoch angewendet werden. Es ist jedoch wünschenswert und erforderlich, dass zukünftige Untersuchungen die AAA-Methode von Croft und Barry (1998a) und die Methode von Sadasivan und Dutt (1994, 1996) mit den traditionellen Methoden vergleichen.

Trotz der genannten Argumente soll ein Experiment die Frage klären, ob die frontal positive langsame Welle ein Artefakt von Augenbewegungen während der Darbietung visueller Reize ist. Dazu wird ein Experiment realisiert, in dem die Aufgabe explizit Augenbewegungen erfordert. Unter der Annahme, dass die frontal positive langsame Welle, die im Zusammenhang mit den Bildern des IAPS gefunden wurde, eher eine Folge der Informationsverarbeitungsprozesse inhaltlicher Aspekte der Bilder ist, werden in dieser Untersuchung ‘bedeutungslose Bilder’ verwendet. Damit soll eine Konfundierung mit inhaltlichen Informationsverarbeitungsprozessen ausgeschlossen werden. Um die Menge an Augenbewegungen variieren zu können, wurde ein visuelles Suchparadigma entwickelt. Verschiedene Matrizen, bestehend aus 6 Spalten und 6 Reihen, die mit unterschiedlichen Zeichen angefüllt sind, wurden erzeugt. In diesen Hintergrundmatrizen soll ein vorher definierter Zielreiz, der aus einer 2 x 2 Matrix besteht, gesucht werden. Die grundlegenden Bedingungen der Darbietung der visuellen Reize dieses Experiments wird mit den Experimenten, in denen die IAPS-Bilder dargeboten wurden, in Übereinstimmung gebracht. Dazu zählt unter anderem der visuelle Winkel der dargebotenen visuellen Reize, die Darbietungsdauer, der Antwortmodus (vergleiche Abschnitt 4.3). Die Untersuchung variiert systematisch die Menge an Augenbewegungen durch die Platzierung des Zielreizes innerhalb der Matrix: In der Bedingung *wenig* Augenbewegung werden die Zielmatrizen nur in der dritten und vierten Reihe der Hintergrundmatrizen platziert. In der Bedingung *viel* Augenbewegung sind die Zielmatrizen zufällig an jeder Position innerhalb der Hintergrundmatrix platziert.

Zusätzlich wird Schwierigkeit durch die Verwendung unterschiedlicher Zeichen für die Hintergrundmatrizen variiert. Bei *leichter* Schwierigkeit werden zwei unterschiedliche Zeichen verwendet, um die Hintergrundmatrizen zu erzeugen. Bei *schwerer*

Schwierigkeit werden vier unterschiedliche Zeichen benutzt, um die Hintergrundmatrizen zu erzeugen. Davon werden zwei Zeichen ebenfalls für die Zielreizmatrix verwendet. Da im Zusammenhang mit langsamen Wellen häufig Schwierigkeit als ein Faktor für die Höhe der Amplitude berichtet wurde (vergleiche Abschnitt 3.4.2.1), soll der Einfluss der Schwierigkeit überprüft werden.

Das wesentliche Ziel dieses Experiments besteht jedoch in der Untersuchung des Einflusses von Augenbewegung auf die Auslösung einer frontal positiven langsamen Welle im Zusammenhang mit visuell dargebotenen Reizen. Die einzelnen Hypothesen legt der folgende Abschnitt dar.

4.2 Hypothesen

Um den Einfluss der Augenbewegung auf die Auslösung einer frontal positiven langsamen Welle im Zusammenhang mit visuell dargebotenen Reizen zu überprüfen, ist zunächst zu klären, ob sich die intendierte Variation der Augenbewegung anhand der Aktivität an den EOG-Kanälen belegen lässt. Erst wenn dies nachgewiesen ist, lassen sich die Hypothesen in Bezug auf das visuelle EKP überprüfen. Die Überprüfung der Schwierigkeitsvariation erfolgt über eine von den Probanden am Ende der Untersuchung abgegebene subjektive Schwierigkeitseinschätzung.

EOG-Maße

Die Variation der Augenbewegung in der visuellen Suchaufgabe führt zu einem systematischen Einfluss am vertikalen und am horizontalen EOG-Kanal. Um diesen Einfluss zu bestimmen, wird die durchschnittliche Varianz an den EOG-Kanälen in bestimmten Zeitabschnitten nach Reizeinsatz berechnet. Es wird erwartet, dass die intendierte Variation von viel Augenbewegung im Vergleich zu wenig Augenbewegung zu höheren Varianzwerten ab 1000 ms nach Reizeinsatz auf beiden EOG-Kanälen führt. Auf dem statistischen Niveau wird ein Haupteffekt für Augenbewegung bzw. eine Interaktion zwischen EOG und Augenbewegung zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizeinsatz erwartet.

Schwierigkeitsmaß

Für die Variation von Schwierigkeit rechnet man mit Gruppenunterschiede in den subjektiven Einschätzungen von Schwierigkeit. Die Gruppen mit schwerer Schwierigkeit

sollten höhere Einschätzungen vornehmen als die Gruppen mit leichter Schwierigkeit. Auf dem statistischen Niveau wird ein Haupteffekt für Gruppe erwartet.

EKP-Maße

Die Variation der Augenbewegung in der visuellen Suchaufgabe führt zu keinen systematischen Einflüssen an den frontalen Elektrodenpositionen, nachdem eine Korrekturprozedur für okulare Artefakte angewendet wurde. Auf dem statistischen Niveau wird keine Interaktion zwischen Frontalität und Augenbewegung für den Zeitbereich zwischen 1000 bis 3500 ms nach Reizeinsatz erwartet.

Die Variation der Schwierigkeit in der visuellen Suchaufgabe führt zu systematischen Einflüssen auf die EKPs, wobei im Zeitbereich der langsamen Welle zwischen 1000 und 3500 ms höhere Amplituden für schwere Schwierigkeit auftreten sollen. Dies sollte sich auf statistischem Niveau in einem Haupteffekt von Schwierigkeit oder einer Interaktion von Schwierigkeit mit einem der Topographiefaktoren Frontalität oder Hemisphäre zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizeinsatz zeigen.

Da bislang auf die hier verwendeten Matrizen noch keine EKPs gemessen wurden, lassen sich für Elektrodenpositionseffekte keine Hypothesen formulieren, denn der Verlauf des EKP auf die Matrizen ist nicht bekannt. Davon ausgehend, dass die frontal positive langsame Welle im Zusammenhang mit Bildern eher eine Folge inhaltlicher Verarbeitungsprozesse ist, verwendet dieses Experiment 'bedeutungslose Bilder' als Reizmaterial. Für den Zeitbereich der langsamen Welle nach 1000 bis 3500 ms wird daher mit einer anderen topographischen Verteilung gerechnet als für die EKPs auf die Bilder des IAPS.

Da das Paradigma zum ersten Mal durchgeführt wird, wird im frühen Zeitbereich des EKP die P3-Amplitude parametrisiert und ausgewertet. Für die P3-Amplitude werden keine Hypothesen aufgestellt.

4.3 Methode

4.3.1 Probanden

60 Studenten aus verschiedenen Fachbereichen der Universität Trier nahmen an dem Experiment teil. Die Probanden wurden über Aushänge angeworben und erhielten für die Teilnahme 15.- DM. Das Alter der Probanden lag zwischen 20 und 41 Jahren, mit einem

Mittelwert von 24.02 Jahren. Die untersuchte Gruppe bestand aus 27 Männern und 33 Frauen. Die Probanden verfügten über normale oder korrigierte Sehkraft (Brille). Sie wurden schriftlich über die Ziele der Studie informiert. Es wurde ihnen zugesichert, dass sie die Untersuchung jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen können, wovon niemand Gebrauch machte.

4.3.2 Reizmaterial

Hintergrundmatrizen

300 unterschiedliche Matrizen wurden angefertigt. Die Matrizen bestanden aus 6 Spalten und 6 Zeilen, die als Quadrat angeordnet waren. Der horizontale visuelle Winkel einer einzelnen 6 x 6 Matrix betrug 4.6° Grad bei einem Betrachtungsabstand von 150 cm. Die Matrizen waren mit unterschiedlichen Zeichen (Zeichensatz: MS Line Draw, unter Windows 95) gefüllt. 150 Matrizen wurden mit 4 unterschiedlichen Zeichen (*, †, ‡, ⊥) besetzt. Die anderen 150 Matrizen wurden mit 2 unterschiedlichen Zeichen (‡, ⊥) gefüllt. Der visuelle Winkel der einzelnen Zeichen lag zwischen 0.49° und 0.57° , der visuelle Winkel des horizontalen Abstandes zwischen zwei Zeichen lag bei 1.7° .

Zielreizmatrix

Als Zielreiz diente eine Matrix, die aus 2 Spalten und 2 Zeilen bestand. Der Zielreiz war mit 2 unterschiedlichen Zeichen des oben genannten Zeichensatzes (*, †) angefüllt. Diese zwei Zeichen waren diagonal zueinander angeordnet. Die Anzahl von Zielreizen, die in die Hintergrundmatrizen eingebettet wurden, wurde variiert. Entweder wurden kein, ein oder zwei Zielreize in die Hintergrundmatrizen eingebettet. 100 Matrizen enthielten keinen Zielreiz, 100 Matrizen enthielten einen Zielreiz und 100 Matrizen enthielten zwei Zielreize. In den Matrizen, die zwei Zielreize enthielten, waren diese so platziert, dass sie nicht aneinandergrenzten und sich nicht überlappten.

4.3.3 Unabhängige Variablen

Zwei unabhängige Variablen wurden verwendet. Die erste Variable *Augenbewegung* (*wenig, viel*) wurde durch die unterschiedliche Anordnung der Zielreize innerhalb der Hintergrundmatrizen manipuliert. In der Bedingung *wenig Augenbewegung* waren die Zielreize nur in den zwei mittleren horizontalen Zeilen, also in Zeile 3 und 4, positioniert.

In der Bedingung *viel Augenbewegung* wurden die Zielreize zufällig an jeder Position der 6 x 6 Matrix angeordnet.

Die zweite Variable *Schwierigkeit* (*leicht*, *schwer*) realisierte sich über die Auswahl von Zeichen, aus denen sich die Ziel- und Hintergrundmatrizen zusammensetzten. In der Bedingung *Schwierigkeit leicht* setzten sich die Zielmatrix und die Hintergrundmatrix jeweils aus zwei unterschiedlichen Zeichen zusammen. In der Bedingung *Schwierigkeit schwer* setzte sich die Zielmatrix aus zwei Zeichen zusammen und die Hintergrundmatrix aus vier Zeichen, wobei zwei dieser Zeichen die Zeichen waren, die auch für die Zielmatrix verwendet wurden. Diese zwei Zeichen dienten also gleichzeitig zur Definition des Zielreizes und als Distraktoren in den Hintergrundmatrizen.

Durch die Kombination dieser zwei experimentellen Variablen ergaben sich vier experimentelle Bedingungen (siehe **Tabelle 2**), die untersucht wurden.

<i>Schwierigkeit</i>	<i>Augenbewegung</i>	
	wenig	viel
leicht	Bedingung 1	Bedingung 2
schwer	Bedingung 3	Bedingung 4

Tabelle 2: Experimentelles Design

In jeder der vier Bedingungen wurden 75 Matrizen dargeboten, die entweder keinen Zielreiz ($p = .33$), einen Zielreiz ($p = .33$) oder zwei Zielreize ($p = .33$) enthielten. Im Anhang 1 (siehe Abschnitt 8) sind Beispiele der unterschiedlichen Hintergrundmatrizen mit jeweils keinem, einem und zwei Zielreizen für die vier experimentellen Bedingungen und die Zielreizmatrix dargeboten. Die Variation der Anzahl der Zielreize sollte ein gründliches Absuchen der Hintergrundmatrizen bewirken. Da sich in einigen Hintergrundmatrizen kein Zielreiz befand, musste jede Matrix komplett durchsucht werden. Eine Übersicht über die Verteilung der Zielreize auf die Matrixpositionen für die vier Bedingungen befindet sich in **Abbildung 3**.

Die Matrizen wurden in einer pseudo-zufälligen Reihenfolge dargeboten. Bedingung war, dass niemals mehr als drei Zielreiz-Bedingungen (kein Zielreiz, ein Zielreiz, zwei Zielreize) in Folge dargeboten wurden. Die Matrizen wurden auf einem elektrisch abgeschirmten Monitor (EIZO T662-T, 20") dargeboten, der sich innerhalb der EEG-

Kabine befand. Die Steuerung der Reizdarbietung erfolgte über einen PC (486 DX2 66; Grafikkarte: ET4000 - Standard VGA Grafikmodus 640 x 480, Bildwiederholungsrate: 72 Hz) außerhalb der EEG-Kabine.

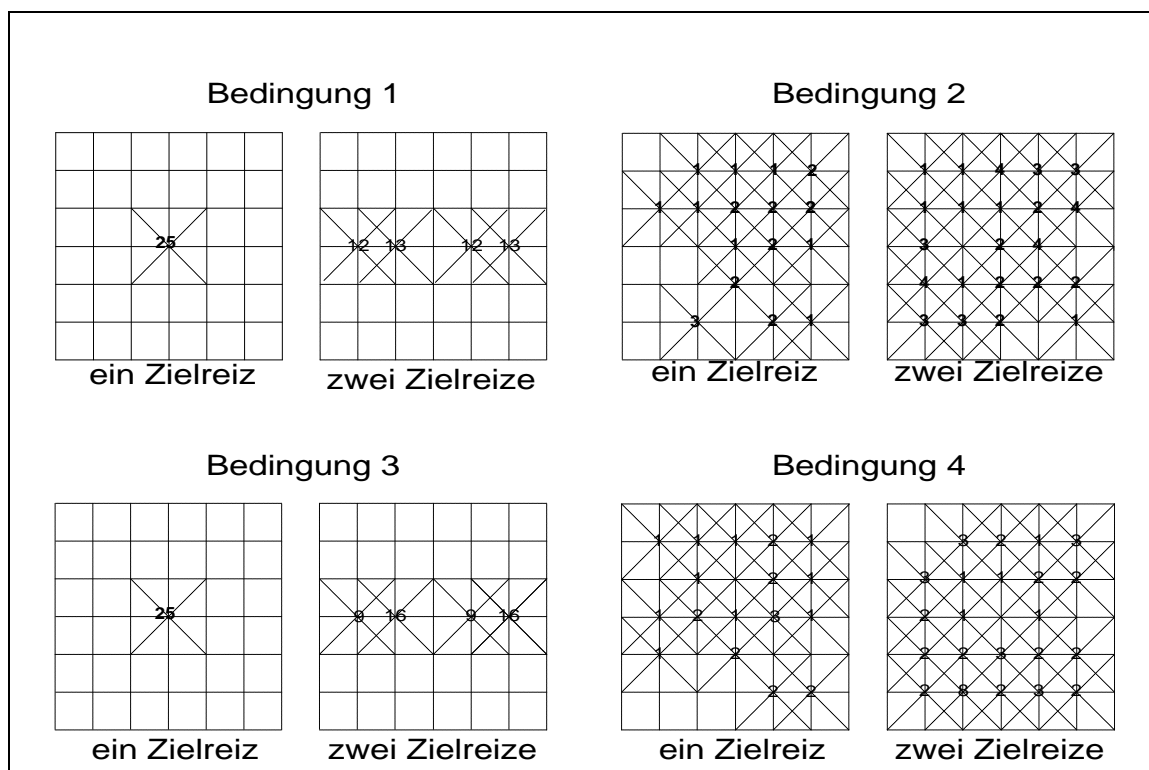


Abbildung 3: Verteilung der Zielreize auf die verschiedenen Matrixpositionen. Die Zahlen geben die Häufigkeit an, mit der die Zielreize an den entsprechenden Positionen dargeboten wurden. Die gestrichelten Linien verdeutlichen, dass die Zielreizmatrix jeweils über vier Matrixpositionen angeordnet war.

4.3.4 Erfassung der physiologischen Maße und der Verhaltensmaße

Messung und Digitalisierung des EEG und EOG

Das EEG wurde in einer elektrisch abgeschirmten Kabine aufgezeichnet. Abgeleitet wurde mittels einer Elektrodenkappe (Elektrocap der Firma ECI) mit eingearbeiteten Zinnelektroden (Blom & Anneveldt, 1982) von neun Elektrodenpositionen (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) gegen die verbundenen Mastoiden als Referenz. Die Übergangswiderstände lagen unter 3 kOhm. Das EEG-Signal wurde vor der Digitalisierung von einem Nihon-Kohden-Verstärker mit einer Zeitkonstante von 10 Sekunden (entsprechend einem Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 0.016 Hz) und einem Tiefpassfilter von 35 Hz verstärkt. Die Referenzelektroden und die EOG-Elektroden waren Silber/Silberchlorid-Elektroden.

Das vertikale und horizontale EOG wurde mit jeweils zwei Elektroden über und unter dem rechten Auge bzw. neben den äußeren Augenwinkeln erfasst. Während des gesamten Experiments wurden zur visuellen Kontrolle auf Artefakte EEG und EOG auf einem Analogschreiber ausgegeben.

Die neun EEG- und die zwei EOG-Kanäle wurden auf die Matrizen von 460 ms vor bis 4540 ms nach Reizeinsatz mit 100 Hz digitalisiert. Für die Digitalisierung wurde ein selbst entwickelter AD-Wandler verwendet. Die Erfassung und Speicherung der Daten übernahm ein Mikrocomputer GMX-030 (Betriebssystem OS/9). Die Reizgabe steuerte der unter 4.3.3 genannte PC.

Einschätzung der subjektiven Schwierigkeit

Im Anschluss an die EEG-Aufzeichnung erhielt jeder Proband einen Fragebogen. Auf diesem wurde die Schwierigkeit (neunstufige Skala; 1 = leicht, 9 = schwierig) und die Interessantheit der Aufgabe (neunstufige Skala; 1 = wenig, 9 = sehr) eingeschätzt. Zusätzlich wurde gefragt, ob zur Lösung der Aufgabe eine Strategie angewendet wurde. Wenn diese Frage mit 'ja' beantwortet wurde, sollte diese Strategie kurz charakterisiert werden. Von diesem Fragebogen werden nur die Schwierigkeitseinschätzungen berichtet.

4.3.5 Experimentelle Prozedur

Ablauf des Experiments

Nach der Ankunft im Labor unterzeichneten die Probanden eine Erklärung, in der sie darauf hingewiesen wurden, dass sie das Experiment jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen können. Danach nahmen die Probanden in einem bequemen Sessel Platz, der sich in einer elektrisch abgeschirmten, schall- und lichtisolierten Kabine befand. Die Elektrodenkappe, die EOG-Elektroden und die Referenzelektroden wurden angelegt. Die Probanden wurden zufällig den vier experimentellen Bedingungen zugewiesen, wodurch sich vier Gruppen (jede Gruppe $N = 15$) ergaben.

Mittels schriftlicher Instruktionen wurden die Probanden darüber informiert, dass verschiedene Matrizen auf einem Monitor dargeboten würden und ihre Aufgabe darin bestehe, diese Matrizen zu betrachten und zu entscheiden, ob ein Zielreiz einmal, zweimal oder nicht in der Matrix enthalten sei. Die Probanden wurden informiert, dass der Zielreiz immer derselbe sei und dass dieser vor Beginn des Experiments ausreichend

lange dargeboten würde, damit sie sich diesen einprägen könnten. Zusätzlich wurde den Probanden der Gruppe 1 und 3, also die Gruppen, in denen wenig Augenbewegungen erzeugt werden sollten, mitgeteilt, dass sich der bzw. die Zielreize nur in den zwei mittleren horizontalen Zeilen (also Zeile 3 und Zeile 4) der Matrix befinden würden.

Nach der Darbietung jeder Hintergrundmatrix wurde auf dem Bildschirm die Aufforderung zur Antwort eingeblendet. Die Probanden gaben die Antwort mündlich über ein Mikrofon, das an der Lehne des Sessels befestigt war. Die Antwort lautete entweder 'kein', 'ein' oder 'zwei' Zielreize entdeckt und wurde außerhalb der Kabine vom Versuchsleiter mittels einer Tastatur eingegeben. Bevor die eigentliche EEG-Messung startete, hatten die Probanden die Gelegenheit eine Übung durchzuführen, in der zehn Matrizen dargeboten wurden. Für diese Übung wurden andere Hintergrundmatrizen verwendet als im eigentlichen Experiment. Vor der Übung wurde die Zielreizmatrix für 8000 ms dargeboten. Nach der Übung wurden die Probanden gefragt, ob sie noch Fragen hätten, ansonsten wurde mit dem eigentlichen Experiment begonnen. Vor Beginn des eigentlichen Experiments wurde die Zielreizmatrix nochmals für 8000 ms dargeboten, danach wurden die 75 Matrizen nacheinander in einem Block dargeboten.

Ablauf der Matrix-Darbietung

Ein einzelner experimenteller Durchgang mit Matrix-Darbietung hatte den folgenden Ablauf (siehe **Abbildung 4**): Ein kleines Kreuz wurde für 1000 ms in der Mitte des Bildschirms dargeboten. Die Probanden wurden aufgefordert das Kreuz zu fixieren. Nach einem Zufallsintervall zwischen 500 bis 1000 ms wurde die Matrix für 5500 bis 7500 ms dargeboten. Nach einem weiteren Zufallsintervall von 750 bis 3500 ms wurden die Probanden aufgefordert, mündlich ihre Antwort zu geben. Nachdem die Probanden geantwortet hatten, begann nach 2000 ms der nächste Durchgang mit der Darbietung des Fixierkreuzes.

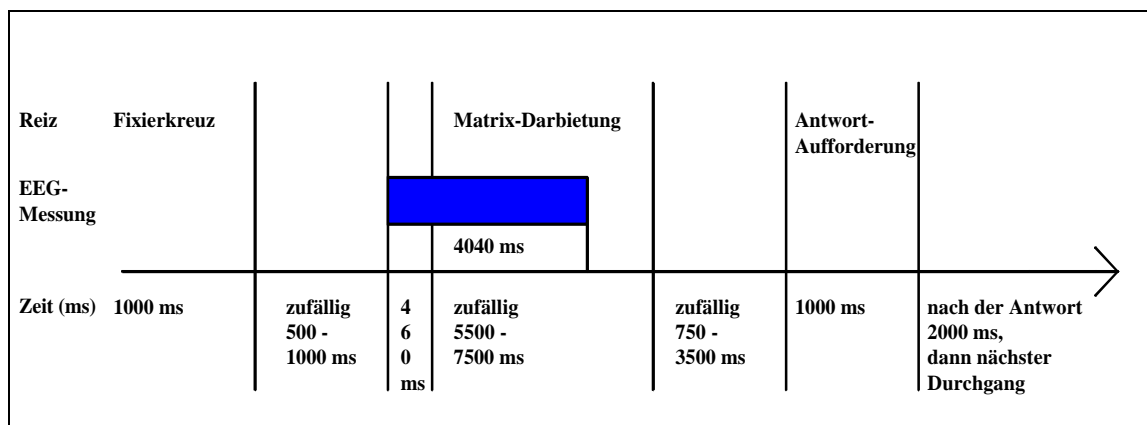


Abbildung 4: Der zeitliche Verlauf eines einzelnen Durchgangs der experimentellen Matrix-Darbietung. Zusätzlich ist die EEG-Messung eingetragen.

4.3.6 Auswertung der physiologischen Maße

EKPs und EOGs auf die Matrizen

Die EEG- und EOG-Aufzeichnungen nach der Matrix-Darbietung wurden auf der Grundlage der richtigen Zielreizerkennung gemittelt. Das heißt, es wurden die EEG- und EOG-Strecken gemittelt, in denen in den Matrizen kein, ein und zwei Zielreize richtig entdeckt wurden. Die Strecken, in denen die Probanden falsch antworteten, wurden von der Mittelung ausgeschlossen. Als falsche Antwort galt, wenn in einer Matrix ohne Zielreiz ein oder zwei Zielreize entdeckt wurden, wenn in einer Matrix mit einem Zielreiz kein oder zwei Zielreize entdeckt wurden und wenn in einer Matrix mit zwei Zielreizen kein oder ein Zielreiz entdeckt wurde². Die einzelnen EEG-Messungen werden vor dem Mitteln auf Gleichspannungsverstärkung umgerechnet. Verwendet wurde dabei die Methode von Elbert und Rockstroh (1980) und der dort beschriebene Algorithmus. Zusätzlich werden Augenartefakte nach dem Ansatz von Gratton et al. (1983) in der Erweiterung von Miller et al. (1988) entfernt. Die Begründung dieses Vorgehens wurde in der Einleitung zu diesem Experiment dargelegt (vergleiche Abschnitt 4.1). Alle Messungen, bei denen der Messbereich des AD-Wandlers überschritten war, wurden ausgeschlossen.

Aus den EKPs auf keinen, einen oder zwei Zielreize wurden an jeder der neun abgeleiteten Elektrodenpositionen neun abhängige Variablen extrahiert: Fünf mittlere Amplituden über jeweils 500 ms ab dem Zeitfenster 1010 ms bis 3500 ms (1010 bis 1500

² Die nachfolgende Auswertung der Treffer (die richtig erkannte Zielreizanzahl) zeigte keine signifikanten Gruppenunterschiede hinsichtlich der Trefferanzahl. Daher wurde der Ausschluss der Messstrecken mit falschen Antworten als unbedenklich eingeschätzt.

ms, 1510 bis 2000 ms, ..., 3010 bis 3500 ms). Die Wahl der Zeitfenster für diese mittleren Amplituden liegt zum einen darin begründet, dass sie den Hypothesen, die Aussagen über die Zeitbereiche bestimmter Effekte treffen, besser gerecht werden, zum anderen wird der Verlauf der experimentellen Effekte über die Zeit besser beschrieben, was sich besonders bei der Verwendung eines neuen Paradigmas anbietet. Die mittleren Amplituden werden als Differenzmaße zur Baseline, definiert als mittlere Amplitude 300 ms vor Reizdarbietung, bestimmt. Vor Berechnung der Baseline und der mittleren Amplituden werden die Daten tiefpassgefiltert (6 Hz Grenzfrequenz). Dann werden zwei Peak-Amplituden und deren Latenzen bestimmt. Da dieses Paradigma das erste Mal durchgeführt wurde, wurden bezüglich der Peak-Amplituden keine Hypothesen aufgestellt. Dennoch sollen die Ergebnisse der positiven Amplituden im P3-Latenzbereich berichtet werden. Wie aus *Abbildung 6a* und *6b* ersichtlich, können zwei positive Amplituden nach der P2 beobachtet werden, die den P3-Komplex ausmachen. Es wurden daher zwei positive Amplituden parametrisiert und ausgewertet: Eine sogenannte P3, die als die positivste Amplitude zwischen 350 und 500 ms definiert wird und eine sogenannte P4, die als die positivste Amplitude zwischen 500 und 700 ms definiert wird. Diese positiven Peak-Amplituden werden als Differenz zur empirischen Baseline berechnet. Die Daten wurden tiefpassgefiltert (6 Hz Grenzfrequenz). Die Parametrisierung der Peak-Amplituden wird mit einem interaktiven Programm durchgeführt, bei der die Peak-Amplituden bei jedem Probanden individuell bestimmt werden können.

Für die statistische Analyse werden die neun Elektrodenpositionen in zwei Faktoren Frontalität (frontal, zentral und parietal, dies entspricht den Elektrodenpositionen F, C, und P) und Hemisphäre (links, Mitte und rechts, was den Elektrodenpositionen 3, z und 4 entspricht) orthogonalisiert. Die EKP-Daten werden mittels einer fünffaktoriellen Varianzanalyse mit den Faktoren AUGENBEWEGUNG (wenig, viel), SCHWIERIGKEIT (leicht, schwer), ZIELREIZANZAHL (kein, ein, zwei), FRONTALITÄT (frontal, zentral, parietal) und HEMISPHERE (links, Mitte, rechts) mit Messwiederholung auf den letzten drei Faktoren ausgewertet.

Aus den EOGs auf keinen, einen oder zwei Zielreize wurden für jeden der zwei EOG-Kanäle zunächst die Varianzwerte berechnet. Anstelle der absoluten Amplitudenwerte werden die Varianzwerte verwendet, da die Varianz als das geeignetere Maß zur

Abbildung der durchschnittlichen Aktivität auf den EOG-Kanälen angesehen wird. Nach der Berechnung der Varianzwerte wurden an jedem der zwei EOG-Kanäle fünf abhängige Variablen definiert: Mittlere Amplituden über jeweils 500 ms ab dem Zeitfenster 1010 bis 3500 ms (1010 bis 1500 ms, 1510 bis 2000 ms, ..., 3010 bis 3500 ms). Die Varianzdaten der EOG-Kanäle werden mittels einer vierfaktoriellen Varianzanalyse AUGENBEWEGUNG (wenig, viel), SCHWIERIGKEIT (leicht, schwer), ZIELREIZANZAHL (kein, ein, zwei) und EOG (vertikal, horizontal) mit Messwiederholung auf den letzten beiden Faktoren ausgewertet.

Für jede abhängige EKP- und EOG-Variable wird eine eigene Varianzanalyse gerechnet. Dabei werden bei allen Analysen, die messwiederholte Faktoren beinhalten, die Freiheitsgrade nach Huynh-Feldt korrigiert, um Verletzungen der Zirkularität zu berücksichtigen. Der α -Fehler ist auf 0.05 festgelegt. Bei jedem signifikanten Ergebnis wird als zusätzliche Statistik das Effektgrößenmaß ω^2 berechnet (Cohen, 1988). Dieses Maß variiert zwischen 0 und 1. Es schätzt den Anteil der Varianz der abhängigen Variablen, der durch eine unabhängige Variable (Haupteffekt) oder Kombination von unabhängigen Variablen (Interaktion) erklärt wird. Es werden nur die signifikanten Effekte bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt, deren Effektgrößen mehr als 2% systematischer Varianz erklären. Dieses Vorgehen erscheint berechtigt, weil kleinere Effekte nur mit einem kaum vertretbaren Aufwand zuverlässig replizierbar sind.

Schwierigkeitseinschätzung

Für die Schwierigkeitseinschätzungen wird eine zweifaktorielle Varianzanalyse SCHWIERIGKEIT (leicht, schwer) x AUGENBEWEGUNG (wenig, viel) gerechnet. Auch hier ist der α -Fehler auf 0.05 festgelegt.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Manipulationsüberprüfung

Augenbewegung

Die Ergebnisse der ANOVA AUGENBEWEGUNG (wenig, viel), SCHWIERIGKEIT (leicht, schwer), ZIELREIZANZAHL (kein, ein, zwei) und EOG (vertikal, horizontal) für die Varianz ist für die fünf 500 ms Zeitfenster in **Tabelle 3** dargestellt.

Quelle	df	Varianz (1010-1500 ms)		Varianz (1510-2000 ms)		Varianz (2010-2500 ms)		Varianz (2510-3000 ms)		Varianz (3010-3500 ms)	
		F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2
Augenbewegung (A)	1,56	1.19		0.17		0.06		3.41		4.86	.06
Schwierigkeit (S)	1,56	5.07	.06	12.22	.15	2.41		4.04	.04	2.99	
AS	1,56	0.14		0.00		1.43		0.01		0.73	
Eog (E)	1,56	7.37	.05	18.98	.13	18.49	.12	41.87	.25	26.71	.17
EA	1,56	0.03		0.60		0.07		2.93		2.84	
ES	1,56	20.76	.14	13.65	.09	8.16	.05	14.25	.09	12.48	.08
EAS	1,56	0.86		0.51		1.10		0.05		0.6	
Zielreizanzahl (Z)	2,112	2.56		1.77		1.88		0.39		0.81	
ZA	2,112	1.56		0.70		3.73	.02	0.80		1.25	
ZS	2,112	1.39		0.95		0.19		2.11		1.26	
ZAS	2,112	0.19		0.13		1.10		6.16	.05	1.67	
EZ	2,112	3.87	.01	0.90		0.39		0.17		0.22	
EZA	2,112	0.29		0.40		0.47		0.93		0.95	
EZS	2,112	1.65		0.27		1.39		2.93		0.11	
EZAS	2,112	2.29		0.28		1.61		4.28	.01	1.31	

Tabelle 3: Ergebnisse der ANOVA AUGENBEWEGUNG (2), SCHWIERIGKEIT (2), ZIELREIZANZAHL (3) und EOG (2) für die Varianz in verschiedenen Zeitfenstern zwischen 1000 - 3500 ms nach Matrix-Darbietung. df = Freiheitsgrade; F_{emp} = empirischer F-Wert, fett gedruckt, wenn signifikant (p < .05); ω^2 = empirisches Effektgrößenmaß (nur für signifikante Ergebnisse berechnet).

Es gibt signifikante Haupteffekte von EOG in allen fünf Zeitfenstern (alle ω^2 zwischen .05 und .25; siehe **Tabelle 3**). Die Struktur dieser Haupteffekte ist für alle fünf Zeitfenster gleich, mit größerer Varianz auf dem vertikalen verglichen mit dem horizontalen EOG-Kanal (siehe **Abbildung 5**, Teil A). Daneben gibt es signifikante Haupteffekte von SCHWIERIGKEIT in drei Zeitfenstern (alle ω^2 zwischen .04 und .15; siehe **Tabelle 3**). Diese Haupteffekte sind durch größere Varianz in der leichten Bedingung im Vergleich zur schweren Bedingung gekennzeichnet (siehe **Abbildung 5**, Teil B). Die Variation von AUGENBEWEGUNG führt zu einem Haupteffekt im Zeitfenster von 3010 bis 3500 ms (F(1,56) = 4.86; ω^2 = .06). Die Struktur dieses Haupteffekts ist entgegen den

Erwartungen mit größerer Varianz in der Bedingung mit wenig Augenbewegung verglichen mit der Bedingung mit viel Augenbewegung (siehe **Abbildung 5**, Teil C).

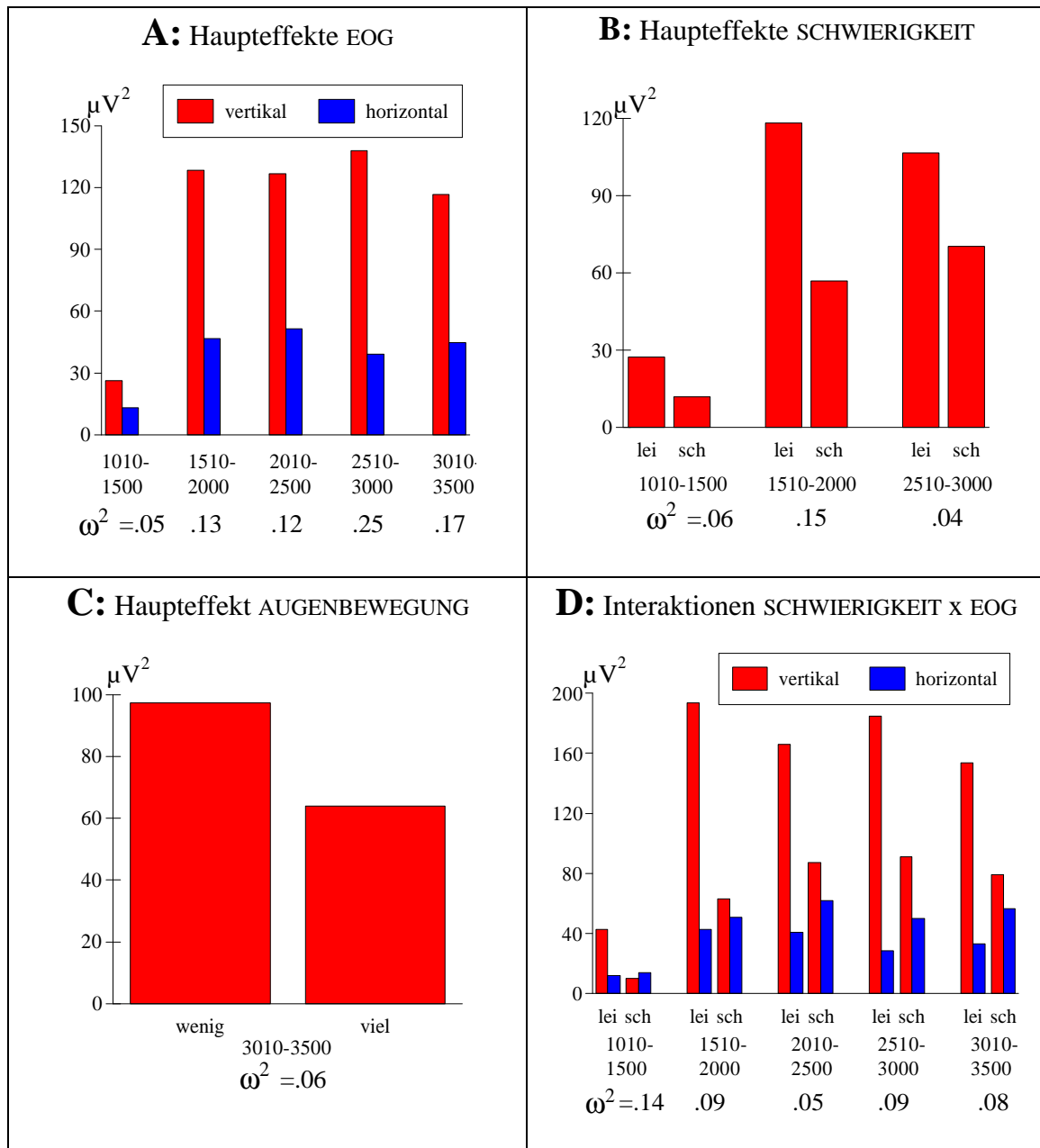


Abbildung 5: Haupteffekte EOG (Teil A), Haupteffekte SCHWIERIGKEIT (Teil B), Haupteffekt AUGENBEWEGUNG (Teil C) und Interaktionen SCHWIERIGKEIT x EOG (Teil D) der Varianzen der EOG-Kanäle. Die Zeitfenster und die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben (lei = leicht, sch = schwer).

Es gibt signifikante Interaktionen zwischen EOG und SCHWIERIGKEIT in allen fünf Zeitfenstern (alle ω^2 zwischen .05 und .14; siehe **Tabelle 3**). Die Struktur dieser Interaktionen ist über die fünf Zeitfenster gleichbleibend, mit größerer Varianz auf dem vertikalen Kanal in der leichten Bedingung verglichen mit der schweren Bedingung und

etwas größerer Varianz auf dem horizontalen Kanal für die schwierige Bedingung verglichen mit der leichten Bedingung (siehe **Abbildung 5**, Teil D).

Es gibt eine dreifache Interaktion zwischen ZIELREIZANZAHL und SCHWIERIGKEIT und AUGENBEWEGUNG ($F(2,112) = 6.16$; $\omega^2 = .05$). Diese Interaktion hat eine ähnliche Struktur hat wie der Haupteffekt SCHWIERIGKEIT mit größerer Varianz in der leichten Bedingung, wobei dieser Effekt leicht durch AUGENBEWEGUNG und ZIELREIZANZAHL modifiziert wird. Da diese dreifache Interaktion nur in einem der Zeitfenster signifikant ist, wird sie hier nicht weiter betrachtet.

Zusammenfassend zeigt sich, die erwarteten Haupteffekte von AUGENBEWEGUNG wurden nur in einem Zeitfenster signifikant. Zudem entspricht die Struktur mit größerer Varianz in der Bedingung mit wenig Augenbewegung im Vergleich zur Bedingung mit viel Augenbewegung nicht den Hypothesen. Auch die erwarteten Interaktionen zwischen EOG und AUGENBEWEGUNG erreichen in keinem der fünf Zeitfenster signifikante Werte. In nur einem Zeitfenster zeigt sich eine weitere dreifache Interaktion an der AUGENBEWEGUNG beteiligt ist, aber die Struktur dieses Effekts entspricht ebenfalls nicht den Erwartungen.

Schwierigkeitseinschätzung

Die Varianzanalyse SCHWIERIGKEIT (leicht, schwer) x AUGENBEWEGUNG (wenig, viel) zeigte einen signifikanten Haupteffekt von SCHWIERIGKEIT auf mit $F(1,56) = 17.51$ und $p = .000$. Weder der Haupteffekt von AUGENBEWEGUNG ($F(1,56) = .26$, $p = .612$) noch die Interaktion zwischen SCHWIERIGKEIT und AUGENBEWEGUNG ($F(1,56) = 03.01$, $p = .088$) wurden signifikant. **Tabelle 4** gibt eine Übersicht über die Mittelwerte pro Gruppe.

	<i>leicht</i>	<i>schwer</i>
<i>wenig</i>	1.47 (.83)	2.27 (1.49)
<i>viel</i>	1.07 (.26)	3.00 (1.85)

Tabelle 4: Mittelwerte (Standardabweichungen) der Schwierigkeitseinschätzungen pro Gruppe.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die visuelle Suchaufgabe von allen Gruppen als eher leicht eingeschätzt wurde, denn die Skala erlaubte Werte von 0 bis 9. Trotzdem unterscheiden sich die Gruppen mit leichter Schwierigkeit von den Gruppen mit schwerer

Schwierigkeit hinsichtlich der subjektiven Schwierigkeitseinschätzungen bei einem $\omega^2 = .22$. Insgesamt zeigt sich die Schwierigkeitsvariation als gelungen.

4.4.2 Ereigniskorrelierte Potentiale auf die Matrizen

Grand Means: **Abbildung 6a** und **b** zeigen die Grand Mean EKP, die durch die Hintergrundmatrizen mit jeweils keinem, einem oder zwei Zielreiz(en) für die vier untersuchten Gruppen ausgelöst wurden. Die Betrachtung dieser Grand Means verdeutlicht, dass die Verwendung von Matrizen als visuelle Reize eine völlig andere Struktur und einen völlig anderen Verlauf der EKPs bewirkt als die Verwendung von Bildern des IAPS. Besonders der Verlauf an den frontalen Elektrodenpositionen ist deutlich unterschieden (vergleiche **Abbildung 2** in Abschnitt 4.1). **Abbildung 6a** und **b** präsentiert zusätzlich den vertikalen und horizontalen EOG-Kanal für die vier Gruppen.

Beim Einsatz der IAPS-Bilder bildete sich in den EKPs ungefähr 700 ms nach Reizeinsatz eine positive langsame Welle aus und führte zu einem frontalen Maximum von 1000 ms nach Reizeinsatz bis zum Ende der Aufzeichnungsepoche. In diesem Experiment zeigt keine der vier untersuchten Gruppen einen vergleichbaren Verlauf an den frontalen Elektrodenpositionen der EKPs im Zeitbereich zwischen 700 ms bis zum Ende der Aufzeichnungsepoche.

Die experimentelle Variation von Augenbewegung und von Schwierigkeit beeinflussen den Verlauf der EKPs an den frontalen Elektrodenpositionen ab ca. 700 ms nach Reizdarbietung in unterschiedlichem Ausmaß. Die beiden Gruppen 1 und 2 mit leichter Schwierigkeitsbedingung weisen ab ca. 700 ms nach Reizdarbietung an den frontalen Elektrodenpositionen eher negative Verläufe auf, während die Gruppen 3 und 4 mit schwerer Schwierigkeitsbedingung ab ca. 700 ms nach Reizdarbietung eher positive Amplituden an den frontalen Elektrodenpositionen aufweisen.

Der Vergleich zwischen den Gruppen 1 und 3 mit wenig Augenbewegung mit den Gruppen 2 und 4 mit viel Augenbewegung zeigt deutlich, dass der Verlauf an den frontalen Elektrodenpositionen ab ca. 700 ms nach Reizdarbietung auch bei gleicher Variation von Augenbewegung völlig unterschiedliche Verläufe bedingt und entweder positive oder negative Amplituden hervorruft. Somit scheint die Variation von Schwierigkeit einen wesentlich größeren Einfluss auf die EKP-Verläufe an den frontalen Elektrodenpositionen zu haben. Die statistischen Analysen bestätigen diese Beobachtungen.

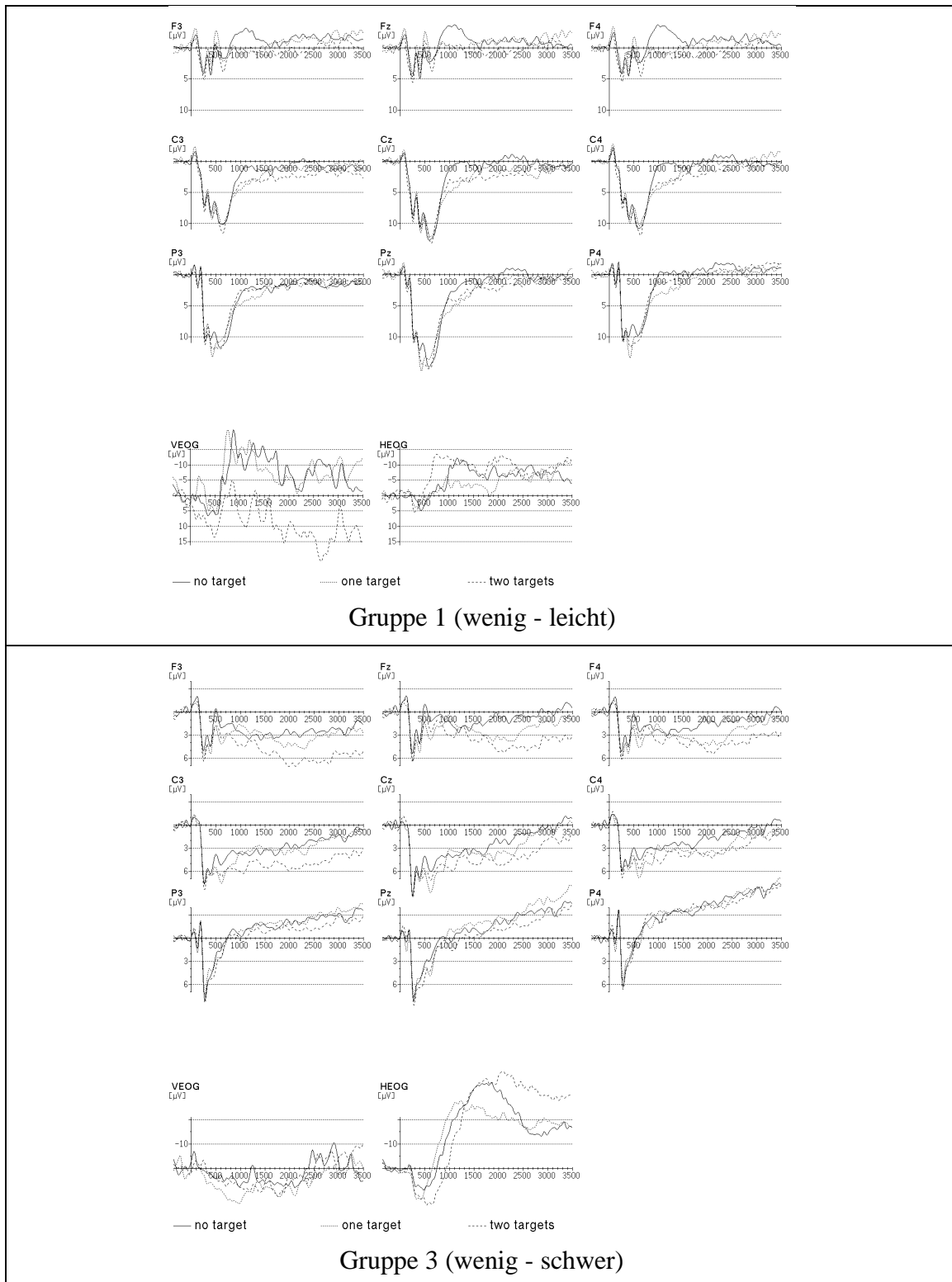


Abbildung 6a: Grand Means der Gruppen 1 und 3 auf die Hintergrundmatrizen, die keinen, einen und zwei Zielreize enthalten. Zusätzlich sind die EOG-Kanäle abgebildet (vertikal = VEOG, horizontal = HEOG). Negative Amplituden sind nach oben abgetragen. Zeitachse von 460 ms vor bis 3500 ms nach Beginn der Matrix-Darbietung.

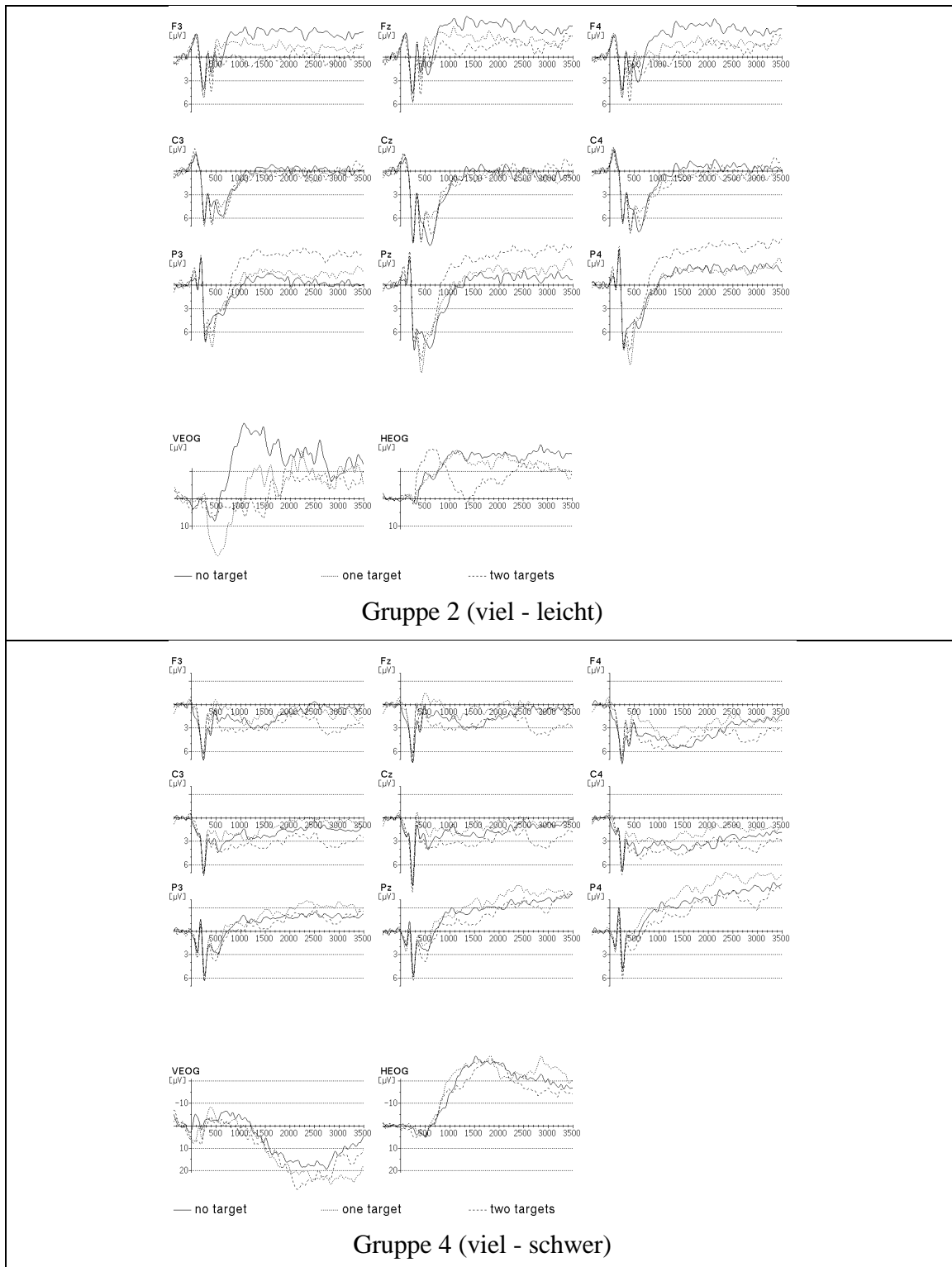


Abbildung 6b: Grand Means der Gruppen 2 und 4 auf die Hintergrundmatrizen, die keinen, einen und zwei Zielreize enthalten. Zusätzlich sind die EOG-Kanäle abgebildet (vertikal = VEOG, horizontal = HEOG). Negative Amplituden sind nach oben abgetragen. Zeitachse von 500 ms vor bis 3500 ms nach Beginn der Matrix-Darbietung.

EKP-Daten:

Gemittelte Amplituden im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizeinsatz:

Quelle	df	Gemittelte Amplitude (1010-1500 ms)		gemittelte Amplitude (1510-2000 ms)		gemittelte Amplitude (2010-2500 ms)		gemittelte Amplitude (2510-3000 ms)		gemittelte Amplitude (3010-3500 ms)	
		F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2
Augenbewegung (A)	1,56	1.26		1.61		1.56		0.48		0.34	
Schwierigkeit (S)	1,56	1.01		1.32		1.04		0.36		0.15	
AS	1,56	0.56		0.18		0.00		0.11		0.33	
Hemisphäre (H)	2,112	0.47		1.33		2.50		3.59	.02	5.45	.04
HA	2,112	2.14		1.31		1.26		0.92		0.71	
HS	2,112	0.15		0.19		0.19		0.27		0.62	
HAS	2,112	0.57		0.69		0.70		0.52		0.39	
Frontalität (F)	2,112	13.75	.12	19.17	.16	20.40	.17	19.83	.17	21.70	.18
FA	2,112	0.91		0.22		0.16		0.28		0.40	
FS	2,112	13.56	.12	14.32	.12	15.56	.13	15.92	.14	16.76	.14
FAS	2,112	0.62		0.69		0.67		0.69		0.63	
Zielreizanzahl (Z)	2,112	2.84		2.56		1.90		1.90		0.92	
ZA	2,112	1.26		0.86		2.96		0.39		0.87	
ZS	2,112	2.31		0.50		0.95		2.60		2.00	
ZAS	2,112	0.51		0.69		0.94		0.06		0.15	
HF	4,224	13.15	.08	9.14	.05	6.76	.04	5.88	.03	6.01	.03
HFA	4,224	0.12		0.24		0.19		0.23		0.28	
HFS	4,224	1.29		1.69		1.59		1.17		1.05	
HFAS	4,224	1.77		2.59	.01	2.08		1.45		1.46	
HAZ	4,224	0.91		1.25		0.59		0.68		0.95	
HZA	4,224	1.06		1.25		1.43		0.85		0.66	
HZS	4,224	1.33		1.04		0.48		0.63		0.34	
HZAS	4,224	1.19		0.91		2.02		1.20		1.47	
FZ	4,224	7.42	.04	6.89	.04	6.98	.04	8.66	.05	6.77	.04
FZA	4,224	1.36		0.15		0.79		1.18		1.10	
FZS	4,224	8.13	.05	2.99	.01	1.56		0.86		0.44	
FZAS	4,224	2.94	.01	5.49	.03	4.07	.02	2.43		2.38	
HFZ	8,448	2.25	.00	2.42	.00	2.60	.00	2.51	.00	2.05	
HFZA	8,448	1.03		0.74		0.42		0.93		1.35	
HFZS	8,448	1.32		0.74		0.74		1.27		1.43	
HFZAS	8,448	1.19		0.82		1.14		1.32		1.10	

Tabelle 5: Ergebnisse der ANOVA AUGENBEWEGUNG (2), SCHWIERIGKEIT (2), HEMISPHERE (3), FRONTALITÄT (3) und ZIELREIZANZAHL (3) für gemittelte Amplituden in verschiedenen Zeitfenstern zwischen 1000 - 3500 ms nach Matrix-Darbietung; df = Freiheitsgrade; F_{emp} = empirischer F-Wert, fett gedruckt, wenn signifikant (p < .05); ω^2 = empirisches Effektgrößenmaß (nur für signifikante Ergebnisse berechnet).

Die Ergebnisse der ANOVA AUGENBEWEGUNG (wenig, viel), SCHWIERIGKEIT (leicht, schwer), HEMISPHERE (links, Mitte, rechts), FRONTALITÄT (frontal, zentral, parietal) und ZIELREIZANZAHL (kein, ein, zwei) ist für die fünf gemittelten Amplituden in **Tabelle 5** dargestellt.

Die wesentliche Hypothese wird bestätigt: Im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizdarbietung finden sich keine signifikanten Interaktionen zwischen FRONTALITÄT und AUGENBEWEGUNG (siehe *Tabelle 5*).

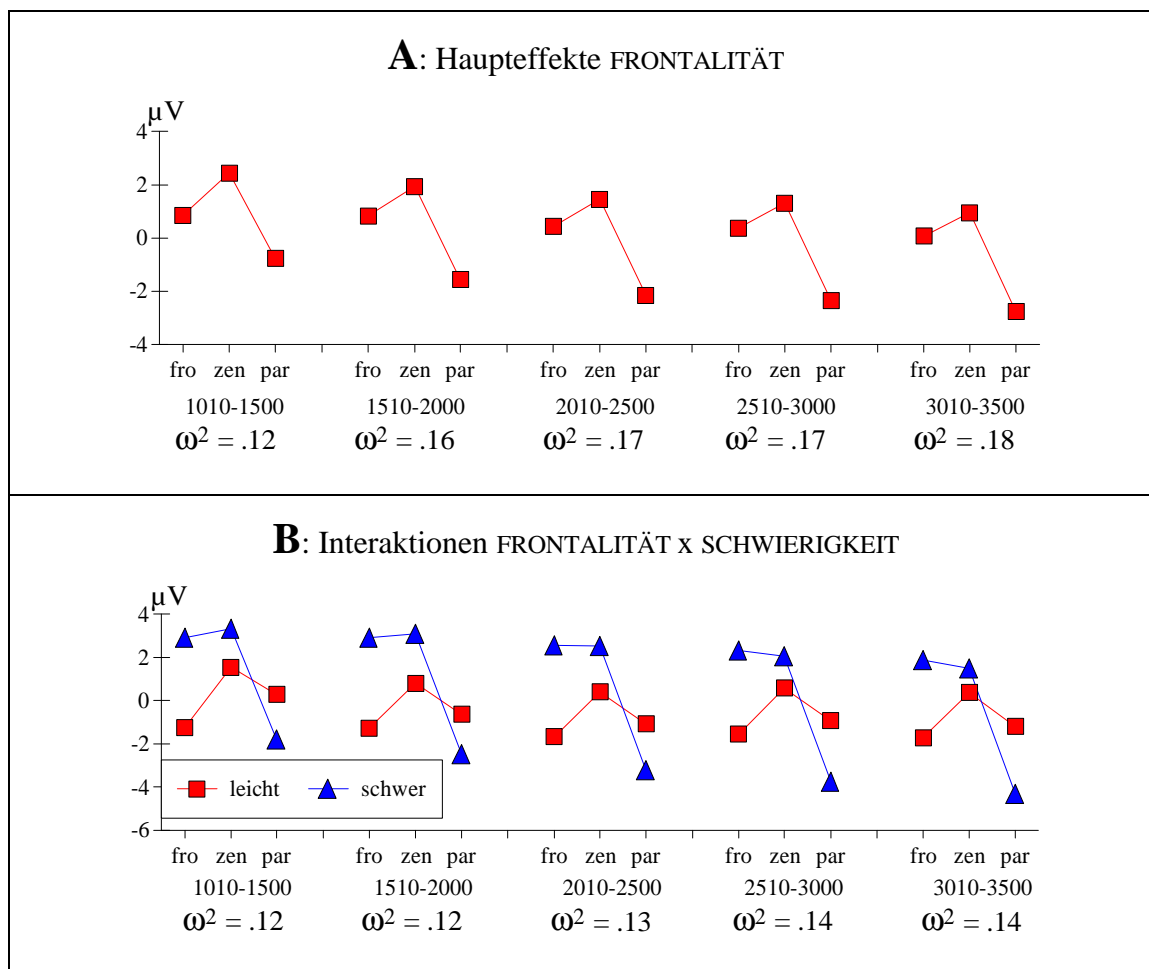


Abbildung 7: Haupteffekte FRONTALITÄT (Teil A) und Interaktionen FRONTALITÄT x SCHWIERIGKEIT (Teil B) der über 500 ms gemittelten Amplituden für fünf Zeitfenster. Die Zeitfenster und die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben (fro = frontal, zen = zentral und par = parietal).

Es gibt signifikante Haupteffekte von FRONTALITÄT zwischen 1000 und 3500 ms (alle $\omega^2 \geq .12$; siehe *Tabelle 5*). Die Struktur dieser Haupteffekte ist gleich für die verschiedenen über 500 ms gemittelten Amplituden mit positiveren Amplituden an den zentralen Elektrodenpositionen verglichen mit den frontalen Elektrodenpositionen, die wiederum positivere Amplituden aufweisen als die parietalen Elektrodenpositionen (siehe *Abbildung 7*, Teil A).

Diese Haupteffekte von FRONTALITÄT werden weiter qualifiziert durch Interaktionen mit SCHWIERIGKEIT, HEMISPHÄRE und ZIELREIZANZAHL. Aber nur die signifikanten Interaktionen zwischen FRONTALITÄT und SCHWIERIGKEIT weisen $\omega^2 \geq .12$ für die über

500 ms gemittelten Amplituden in dem Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizdarbietung auf (siehe **Tabelle 5**). Bei schwerer Schwierigkeit finden sich positivere Amplituden an frontalen und zentralen Elektrodenpositionen und negativere Amplituden an parietalen Elektrodenpositionen verglichen mit der leichten Schwierigkeit (siehe **Abbildung 7**, Teil B).

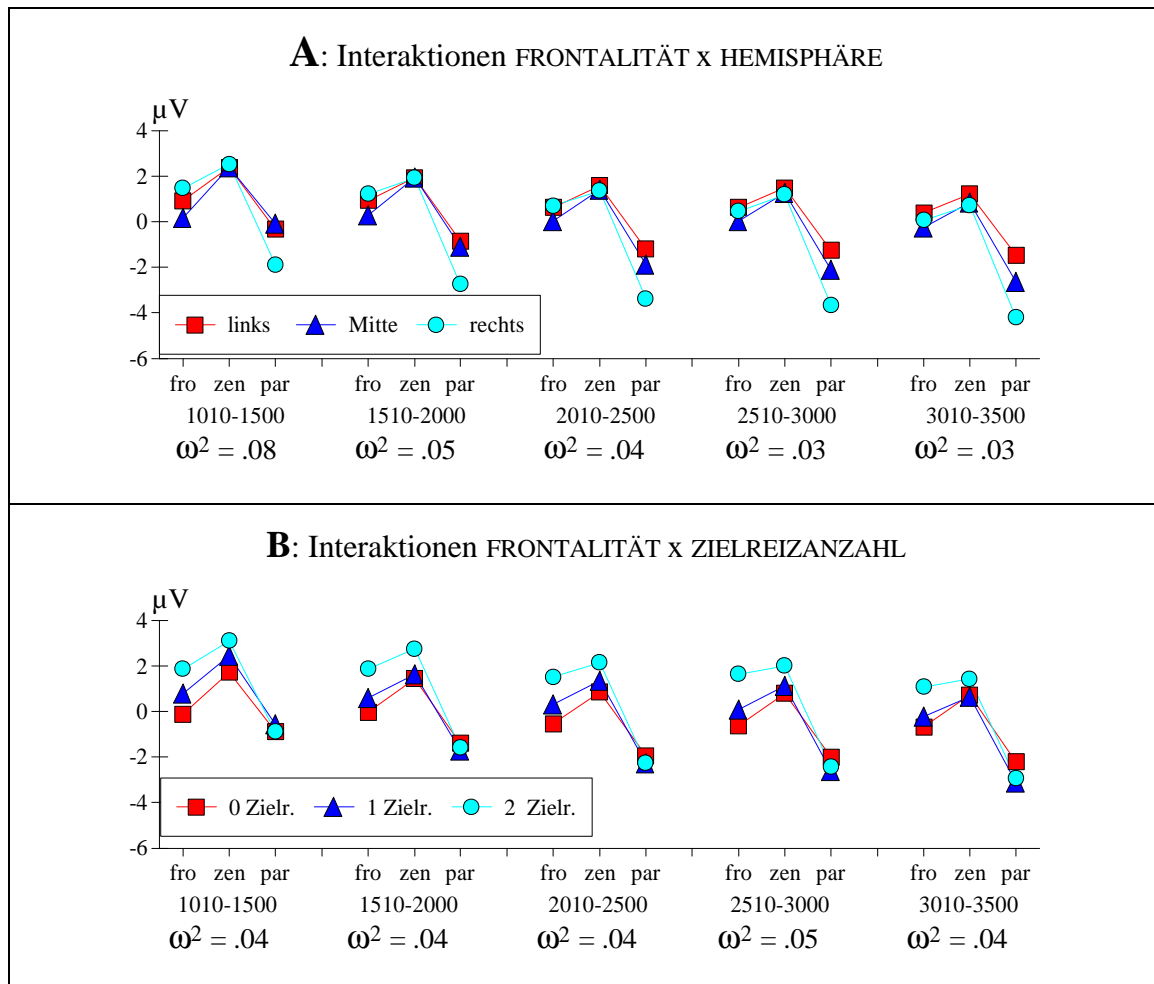


Abbildung 8: Interaktionen FRONTALITÄT x HEMISPHERE (Teil A) und FRONTALITÄT x ZIELREIZANZAHL (Teil B) der über 500 ms gemittelten Amplituden für fünf Zeitfenster. Die Zeitfenster und die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben (fro = frontal, zen = zentral und par = parietal).

Die Interaktion zwischen FRONTALITÄT und HEMISPHERE (alle ω^2 zwischen .03 und .08, siehe **Tabelle 5**) ist in **Abbildung 8** (Teil A) und die Interaktion zwischen FRONTALITÄT und ZIELREIZANZAHL (alle ω^2 zwischen .04 und .05, siehe **Tabelle 5**) ist in **Abbildung 8** (Teil B) dargestellt. Die Abbildungen verdeutlichen, dass beide Interaktionen nicht die Struktur des Haupteffekts FRONTALITÄT mit zentral > frontal > parietal verändern, dass allerdings verschiedene Regionen unterschiedlich beeinflusst werden: Bei HEMISPHERE treten leichte Unterschiede an den parietalen Elektrodenpositionen mit rechts > Mitte >

links auf verglichen mit den frontalen und zentralen Elektrodenpositionen mit rechts = Mitte = links. Bei ZIELREIZANZAHL hingegen finden sich leichte Unterschiede an den frontalen Elektrodenpositionen mit 2 Zielreize > 1 Zielreiz = 0 Zielreize verglichen mit den zentralen und parietalen Elektrodenpositionen.

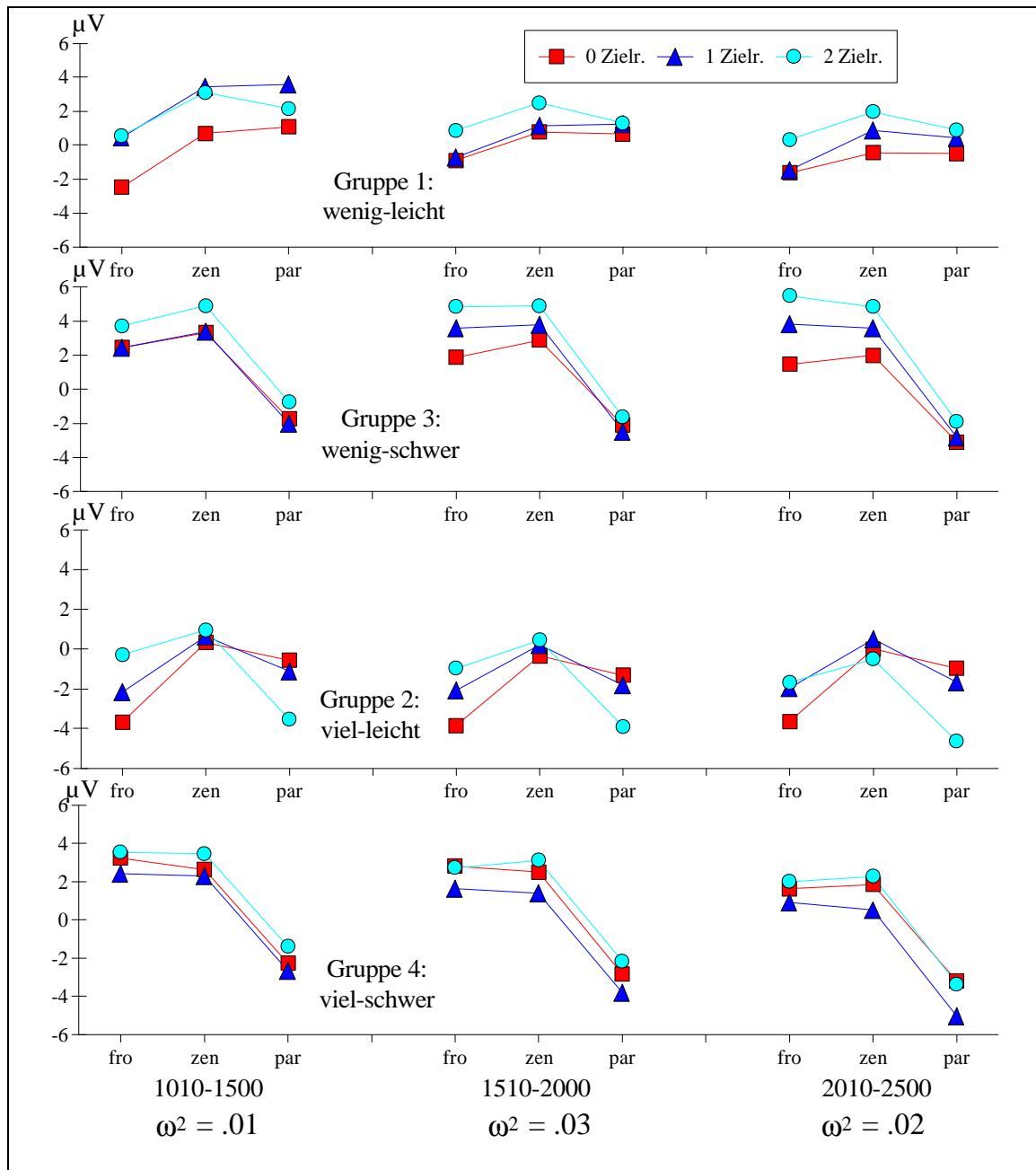


Abbildung 9: Interaktionen zwischen FRONTALITÄT, ZIELREIZANZAHL, AUGENBEWEGUNG und SCHWIERIGKEIT der über 500 ms gemittelten Amplituden für drei Zeitfenster. Die Zeitfenster und die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben (fro = frontal, zen = zentral und par = parietal).

Signifikante Interaktionen höherer Ordnung, an denen AUGENBEWEGUNG beteiligt ist, finden sich für drei über 500 ms gemittelte Amplituden. Obwohl die empirischen

Effektgrößen dieser Interaktionen zwischen FRONTALITÄT, ZIELREIZANZAHL, AUGENBEWEGUNG und SCHWIERIGKEIT mit ω^2 zwischen .01 und .03 (siehe *Tabelle 5*) sehr klein sind, zeigt *Abbildung 9* die Struktur dieser Interaktionen. Auch in dieser Abbildung zeigt sich deutlich, dass die topographischen Verläufe stärker durch die Schwierigkeitsvariation beeinflusst werden. So weisen die Gruppen 1 und 2 mit der leichten Schwierigkeitsbedingung einen ähnlichen Verlauf auf und die Gruppen 3 und 4 mit der schweren Schwierigkeitsbedingung. Diese Effekte werden nur leicht durch die Variation von Augenbewegung, jedoch etwas deutlicher durch die Variation der Zielreizanzahl modifiziert.

P3- und P4-Peak-Amplituden:

Quelle	df	<i>P3-Peak</i>		<i>P3-Latenz</i>		<i>P4-Peak</i>		<i>P4-Latenz</i>	
		F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2
Augenbewegung (A)	1,56	3.55		0.29		4.96	.06	3.27	
Schwierigkeit (S)	1,56	3.99	.04	0.19		4.66	.05	1.81	
AS	1,56	0.08		0.57		1.54		1.81	
Hemisphäre (H)	2,112	4.87	.04	2.91	.02	7.20	.06	0.89	
HA	2,112	2.31		0.52		3.84	.03	0.82	
HS	2,112	2.33		0.19		3.35	.02	0.40	
HAS	2,112	0.55		0.63		0.43		0.06	
Frontalität (F)	2,112	12.81	.11	11.96	.10	20.82	.18	17.77	.15
FA	2,112	1.48		2.58		1.45		1.70	
FS	2,112	12.56	.11	1.84		13.69	.12	0.54	
FAS	2,112	0.28		0.29		1.17		11.41	.10
Zielreizanzahl (Z)	2,112	3.19	.02	6.12	.05	0.91		1.79	
ZA	2,112	0.17		0.43		2.18		0.18	
ZS	2,112	1.23		2.00		1.43		0.73	
ZAS	2,112	1.20		0.04		2.10		0.24	
HF	4,224	10.15	.06	2.04		24.17	.14	1.19	
HFA	4,224	0.10		1.36		0.39		0.17	
HFS	4,224	2.02		0.71		0.97		0.58	
HFAS	4,224	1.02		0.45		1.62		1.87	
HAZ	4,224	1.21		2.81	.01	1.35		2.29	
HZA	4,224	1.41		0.99		1.34		0.36	
HZS	4,224	1.25		0.44		2.30		1.30	
HZAS	4,224	0.21		0.36		0.10		0.26	
FZ	4,224	5.24	.03	2.14		0.76		3.83	.02
FZA	4,224	0.68		1.18		0.63		1.57	
FZS	4,224	6.92	.04	3.97	.02	0.82		0.65	
FZAS	4,224	2.24		0.68		0.31		0.70	
HFZ	8,448	1.33		0.96		1.00		0.77	
HFZA	8,448	0.86		0.37		1.57		0.64	
HFZS	8,448	2.44	.00	1.17		0.65		0.89	
HFZAS	8,448	0.36		0.98		1.38		0.94	

Tabelle 6: Ergebnisse der ANOVA AUGENBEWEGUNG (2), SCHWIERIGKEIT (2), HEMISPHERE (3), FRONTALITÄT (3) und ZIELREIZANZAHL (3) für die zwei Peak-Amplituden sowie deren Latenz. df = Freiheitsgrade; F_{emp} = empirischer F-Wert, fett gedruckt, wenn signifikant ($p < .05$); ω^2 = empirisches Effektgrößenmaß (nur für signifikante Ergebnisse berechnet).

Die Ergebnisse der ANOVA AUGENBEWEGUNG (wenig, viel), SCHWIERIGKEIT (leicht, schwer), HEMISPHERE (links, Mitte, rechts), FRONTALITÄT (frontal, zentral, parietal) und ZIELREIZANZAHL (kein, ein, zwei) ist für die zwei Peak-Amplituden sowie deren Latenz in **Tabelle 6** dargestellt. Da bezüglich der Peak-Daten keine Hypothesen bestanden, werden nur die signifikanten Effekte mit einer Effektgröße größer .02 betrachtet.

Für den P3-Peak gibt es zunächst einen Haupteffekt von HEMISPHERE ($F(2,112) = 4.87$; $\omega^2 = .04$) und FRONTALITÄT ($F(2,112) = 12.81$; $\omega^2 = .11$) sowie eine Interaktion von FRONTALITÄT x HEMISPHERE ($F(4,224) = 10.15$; $\omega^2 = .06$). Diese Effekte sind in

Abbildung 10 dargestellt und entsprechen der üblichen Topographie der P3 mit einem parieto-zentralen Maximum und Mitte größer als rechts und links.

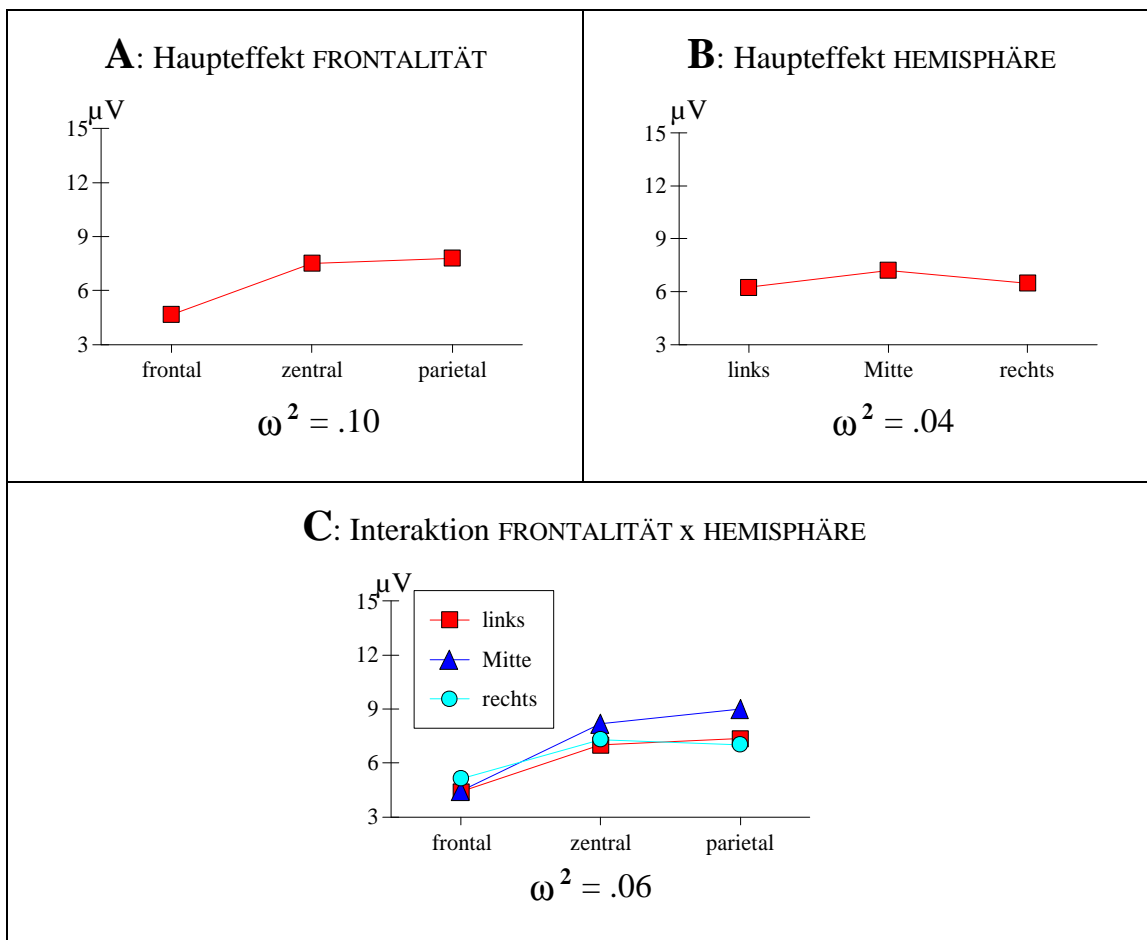


Abbildung 10: Haupteffekt FRONTALITÄT (Teil A), Haupteffekt HEMISPHERE (Teil B) und Interaktion FRONTALITÄT x HEMISPHERE (Teil C) des P3-Peaks. Die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben.

Zusätzlich gibt es einen Haupteffekt von SCHWIERIGKEIT ($F(1,56) = 3.99$; $\omega^2 = .04$) und eine Interaktion zwischen FRONTALITÄT x SCHWIERIGKEIT ($F(2,112) = 12.56$; $\omega^2 = .11$). Es zeigt sich eine größere P3-Amplitude für die leichte im Vergleich zur schwierigen Bedingung. Die Interaktion mit FRONTALITÄT verdeutlicht, dass der Effekt nicht frontal auftritt, sondern nur zentral und parietal, wobei er parietal am deutlichsten ausgeprägt ist (siehe **Abbildung 11**, Teil A und B). Außerdem gibt es eine Interaktion zwischen FRONTALITÄT und ZIELREIZANZAHL ($F(4,224) = 5.24$; $\omega^2 = .03$). Dieser Effekt ist in **Abbildung 11** (Teil C) dargestellt. Bei einem und zwei Zielreizen zeigen sich parietal etwas erhöhte P3-Amplituden im Vergleich zu den frontalen und zentralen Elektrodenpositionen.

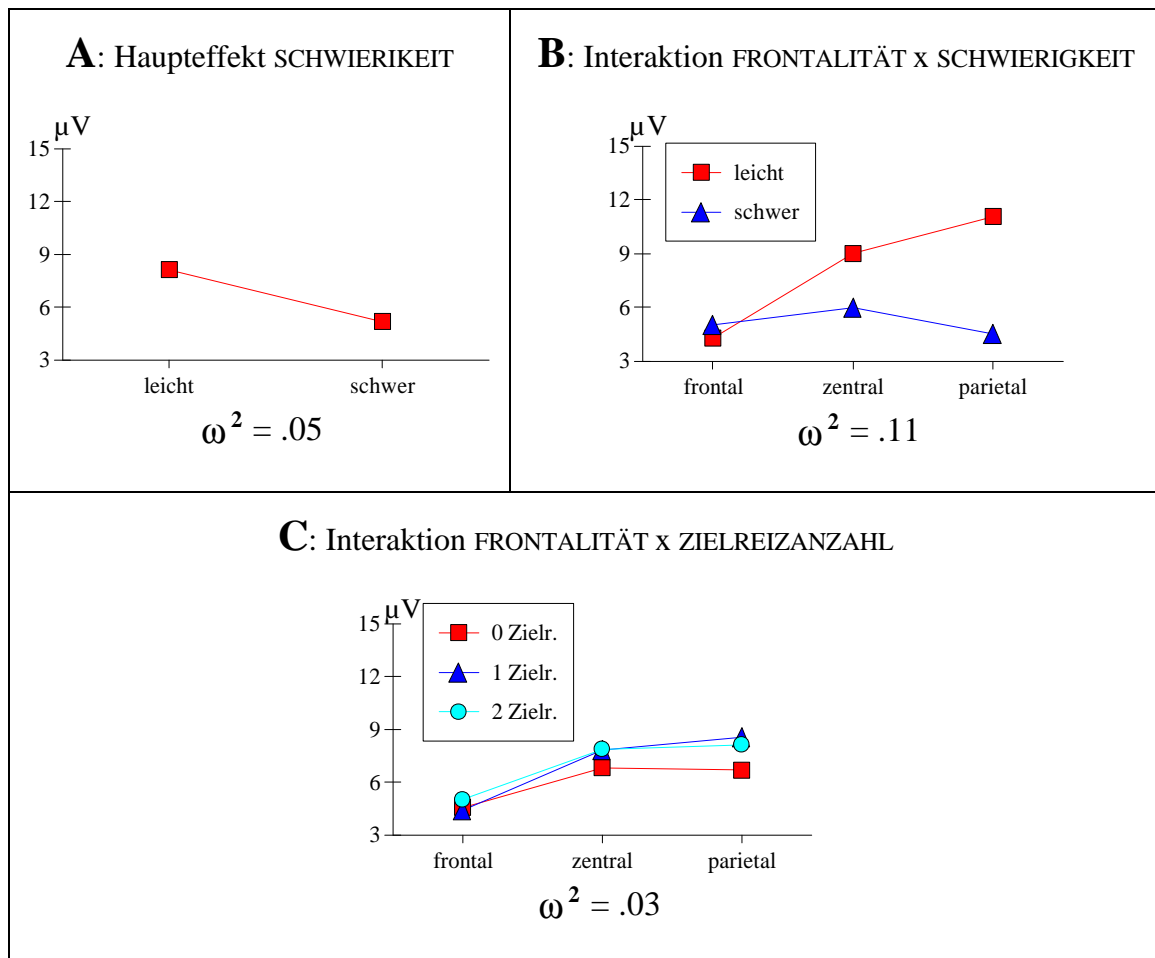


Abbildung 11: Haupteffekt SCHWIERIGKEIT (Teil A) und Interaktion FRONTALITÄT x SCHWIERIGKEIT (Teil B), Interaktion FRONTALITÄT x ZIELREIZANZAHL (Teil D) des P3-Peaks. Die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben.

Zudem findet sich eine dreifache Interaktion zwischen FRONTALITÄT x SCHWIERIGKEIT x ZIELREIZANZAHL ($F(4,224) = 6.92$; $\omega^2 = .04$), die in **Abbildung 12** dargestellt ist.

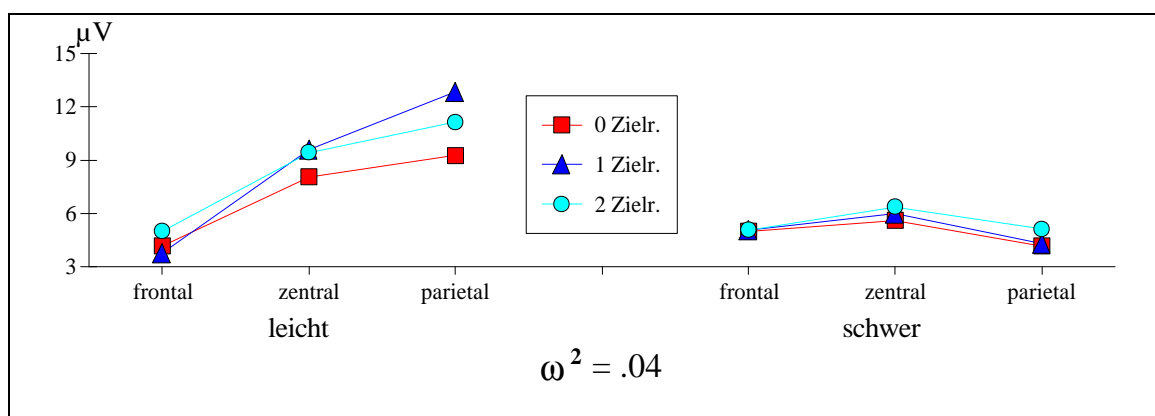


Abbildung 12: Interaktion FRONTALITÄT x SCHWIERIGKEIT x ZIELREIZANZAHL des P3-Peaks. Die Effektgröße ω^2 ist angegeben.

Dabei zeigt sich, dass die P3-Amplituden in der leichten Bedingung parietal durch die Zielreizanzahl etwas modifiziert werden mit 1 Zielreiz > 2 Zielreize > 0 Zielreize. In der

schweren Bedingung tritt eine eher unübliche P3-Topographie mit zentral größerer P3-Amplitude als parietal und frontal auf.

P3-Latenz: Für die P3-Latenz findet sich ein Haupteffekt FRONTALITÄT ($F(2,112) = 11.96$; $\omega^2 = .10$) mit folgenden Latenzwerten frontal 407.31 ms, zentral 416.46 ms und parietal 418.91 ms. Zudem gibt es ein Haupteffekt ZIELREIZANZAHL ($F(2,112) = 6.12$; $\omega^2 = .05$) mit den folgenden Latenzwerten 0 Zielreize 408.28 ms, 1 Zielreiz 417.87 ms und 2 Zielreize 416.55 ms.

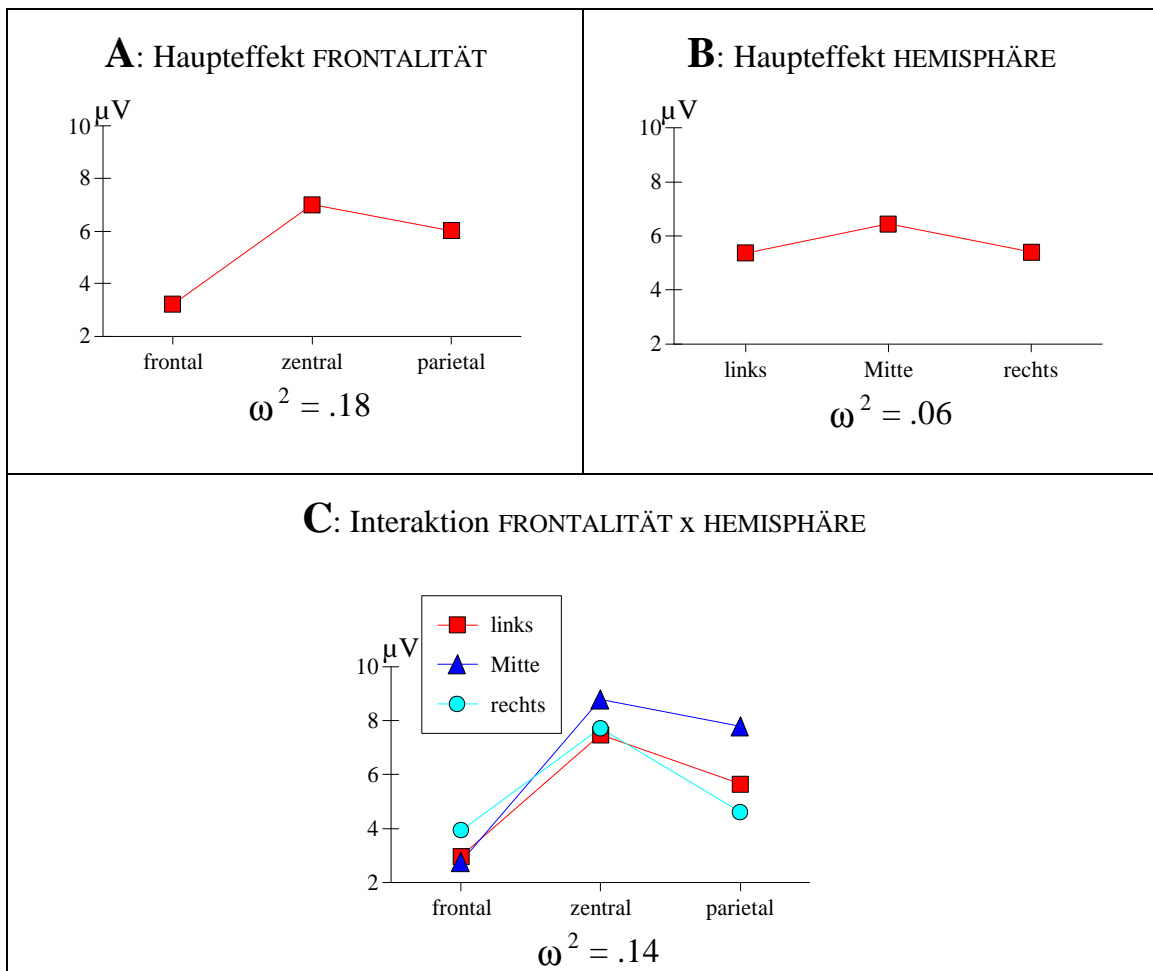


Abbildung 13: Haupteffekt FRONTALITÄT (Teil A), Haupteffekt HEMISPHERE (Teil B) und Interaktion FRONTALITÄT x HEMISPHERE (Teil C) des P4-Peaks. Die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben.

Für den P4-Peak findet sich ein Haupteffekt von HEMISPHERE ($F(2,112) = 7.20$; $\omega^2 = .06$) und FRONTALITÄT ($F(2,112) = 20.82$; $\omega^2 = .18$), sowie eine Interaktion von FRONTALITÄT x HEMISPHERE ($F(4,224) = 24.17$; $\omega^2 = .14$). Diese Effekte sind in **Abbildung 13** (Teil A, B und C) dargestellt.

Der Struktur des Haupteffekts HEMISPHERE weist in der Mitte größere P4-Amplituden auf als auf der rechten und linken Seite. Beim Haupteffekt FRONTALITÄT sind an den zentralen Elektrodenpositionen größere P4-Amplituden als parietal zu finden und parietal wiederum größere als frontal. Die Interaktion zwischen FRONTALITÄT und HEMISPHERE zeigt die gleiche Struktur wie der Haupteffekt FRONTALITÄT mit zentral > parietal > frontal, jedoch leicht modifiziert durch HEMISPHERE.

Zudem gibt es einen Haupteffekt von SCHWIERIGKEIT ($F(1,56) = 4.66$; $\omega^2 = .05$) und eine Interaktion zwischen FRONTALITÄT x SCHWIERIGKEIT ($F(2,112) = 13.69$; $\omega^2 = .12$). Der Haupteffekt SCHWIERIGKEIT ergibt sich durch höhere P4-Amplituden in der leichten verglichen mit der schweren Bedingung (siehe *Abbildung 14*, Teil A).

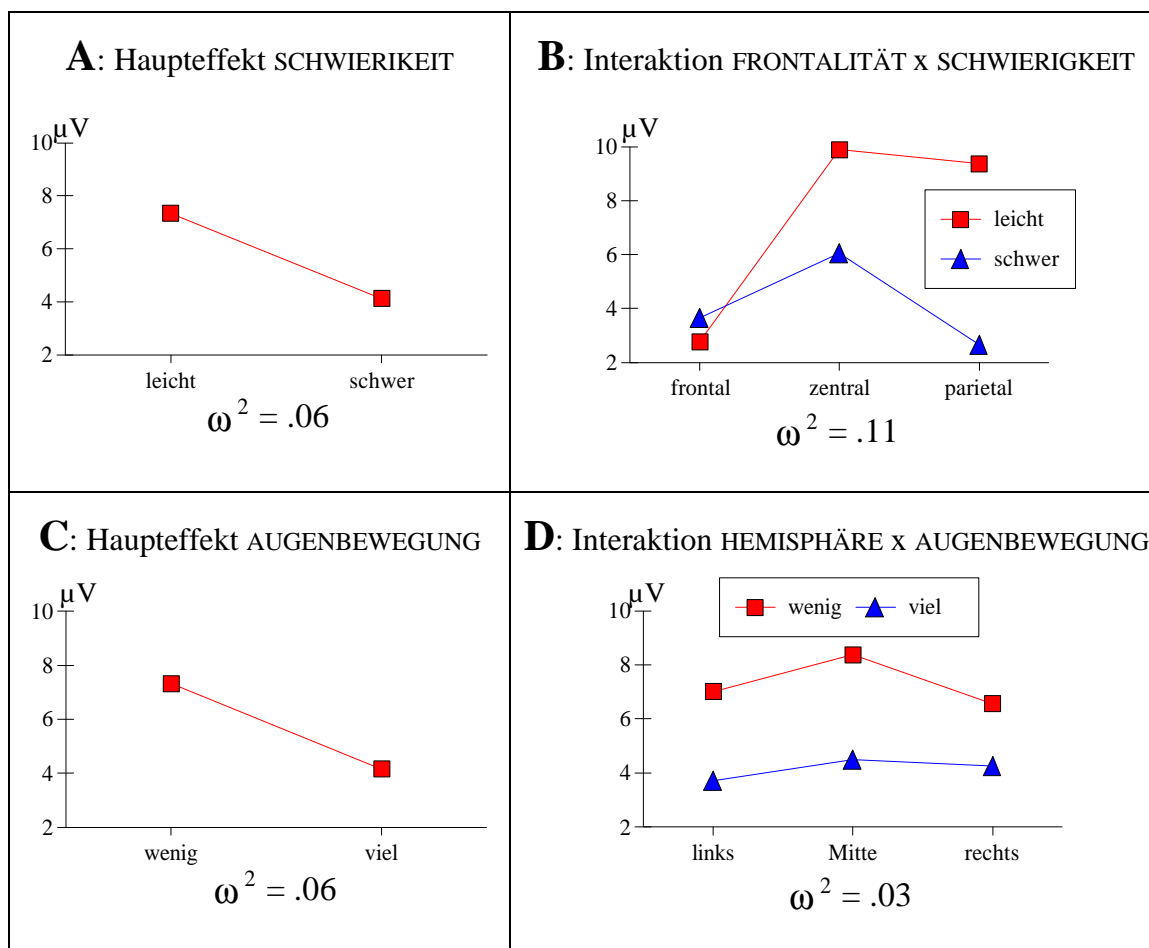


Abbildung 14: Haupteffekt SCHWIERIGKEIT (Teil A) und Interaktion FRONTALITÄT x SCHWIERIGKEIT (Teil B), Haupteffekt AUGENBEWEGUNG (Teil C) und Interaktion HEMISPHERE x AUGENBEWEGUNG (Teil D) des P4-Peaks. Die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben.

Wie *Abbildung 14* (Teil B) zeigt, resultiert die Interaktion von SCHWIERIGKEIT und FRONTALITÄT durch erhöhte P4-Amplituden an den parietalen und zentralen

Elektrodenpositionen nicht aber an den frontalen in der leichten im Vergleich zur schweren Bedingung.

Zudem findet sich ein Haupteffekt von AUGENBEWEGUNG ($F(1,56) = 4.96$; $\omega^2 = .06$) und eine Interaktion von HEMISPHERE x AUGENBEWEGUNG ($F(2,112) = 3.84$; $\omega^2 = .03$). Diese Effekte zeigt **Abbildung 14** (Teil C und D). Die P4-Amplitude weist in der Bedingung mit wenig Augenbewegung positivere Werte auf als in der Bedingung mit viel Augenbewegung. Die Interaktion mit HEMISPHERE zeigt, dass dieser Effekt auf der rechten Seite leicht reduziert ist.

P4-Latenz: Für die P4-Latenz findet sich ein Haupteffekt (FRONTALITÄT ($F(2,112) = 17.77$; $\omega^2 = .15$)) mit folgenden Latenzwerten: Frontal 617.69 ms, zentral 613.50 ms und parietal 607.37 ms. Außerdem findet sich eine dreifache Interaktion zwischen FRONTALITÄT und AUGENBEWEGUNG und SCHWIERIGKEIT ($F(2,112) = 11.41$; $\omega^2 = .10$).

Tabelle 7 listet die Latenzwerte auf.

	wenig		viel	
	leicht	schwer	leicht	schwer
frontal	631.78 ms	624.22 ms	614.52 ms	600.22 ms
zentral	620.00 ms	622.59 ms	619.41 ms	592.00 ms
parietal	612.22 ms	617.19 ms	617.04 ms	583.04 ms

Tabelle 7: Interaktion FRONTALITÄT x AUGENBEWEGUNG x SCHWIERIGKEIT der P4-Latenz in ms.

4.5 Diskussion

Die Ergebnisse werden hinsichtlich der in Abschnitt 4.2 formulierten Hypothesen diskutiert. Dabei werden zunächst die Ergebnisse für die experimentellen Variationen betrachtet, bezüglich der intendierten Variation von Augenbewegung und von Schwierigkeit. Erst dann werden die Ergebnisse für die EKPs auf die Matrizen besprochen. Am Ende des Kapitels werden die Befunde abschließend diskutiert und das neue Paradigma hinsichtlich seiner Tauglichkeit, die vorliegende Fragestellung adäquat zu beantworten, bewertet.

4.5.1 Variation von Augenbewegung

Abschnitt 4.2 legte dar, dass es zur Klärung der Frage, ob Augenbewegung einen Einfluss auf die Auslösung einer frontal positiven langsamen Welle im Zusammenhang mit der Darbietung visueller Reize habe, zunächst notwendig sei, die intendierte Variation von Augenbewegung in dem neu entwickelten Paradigma anhand der EOG-Daten zu überprüfen. Nur wenn diese Variation von Augenbewegung gelungen sei, könne die eigentliche Fragestellung beantwortet werden.

Für die neu entwickelte visuelle Suchaufgabe wurde angenommen, dass die Variation von Augenbewegung auf den zwei Stufen viel und wenig zu systematischen Einflüssen auf dem vertikalen und horizontalen EOG-Kanal führe. Dabei sollte die Umsetzung der Variation von viel Augenbewegung ab 1000 ms bis 3500 ms nach Reizeinsatz zu höheren Varianzwerten auf beiden EOG-Kanälen führen im Vergleich zur Umsetzung der Variation von wenig Augenbewegung. Auf statistischem Niveau wurde ein Haupteffekt von Augenbewegung bzw. eine Interaktion zwischen Augenbewegung und EOG im entsprechenden Zeitbereich erwartet.

Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.4.1 zeigen sehr deutlich, dass diese Hypothese nicht bestätigt wird. In den Ergebnissen der Varianzanalyse findet sich weder eine Interaktion zwischen Augenbewegung und EOG, noch Haupteffekte von Augenbewegung im Zeitbereich zwischen 1000 und 3000 ms. Nur im Zeitbereich 3000 bis 3500 ms zeigt sich ein Haupteffekt von Augenbewegung, der jedoch durch höhere Varianz bei wenig Augenbewegung im Vergleich zu viel Augenbewegung entsteht. Dieser Haupteffekt weist somit eine umgekehrte Struktur als erwartet auf.

Die Frage, ob das Paradigma die intendierte Variation der Augenbewegung hervorrief, kann somit eindeutig verneint werden. Bevor besprochen wird, ob das Paradigma dennoch geeignet ist, die ursprüngliche Fragestellung zu beantworten, sollen mögliche Gründe diskutiert werden, warum die intendierte Variation von Augenbewegung nicht gelungen ist.

- (1) Die Variation von Augenbewegung hervorgerufen durch die Anordnung der zu suchenden Zielreizmatrizen in den Hintergrundmatrizen war nicht stark genug. In der Bedingung mit wenig Augenbewegung wurden die Zielreizmatrizen nur in den beiden horizontalen Reihen 3 und 4 dargeboten, in der Bedingung mit viel Augenbewegung in allen Reihen 1 bis 6. Diese Vermutung kann jedoch nur durch eine Veränderung der Anordnung der Zielreize innerhalb der Matrix oder durch die Erhöhung der Anzahl von Zeilen und Spalten verändert und überprüft werden.
- (2) Die Variation von Augenbewegung ist zwar in den frühen Zeitbereichen bis 1000 ms gelungen, jedoch nicht nach 1000 ms. Diese Annahme ist für die hier zu beantwortende Fragestellung nicht relevant, da es um den Zeitraum nach 1000 ms geht, in dem die frontal positive langsame Welle auf die Bilder gemessen wurde. Daher wurde auch auf die Auswertung der frühen Zeitbereiche, außer für die P3- und P4-Amplitude verzichtet.
- (3) Möglicherweise führte die Variation von wenig und viel Augenbewegung dazu, dass die Aufgabe, die Zielreize in den Hintergrundmatrizen aufzufinden, in sehr unterschiedlichen Zeiträumen bewältigt werden konnte. Das hieße, dass sich bei wenig Augenbewegung die Aufgabe schneller als bei viel Augenbewegung lösen lässt. Da die Aufgabe so angelegt war, dass eine verzögerte Antwort gegeben wurde, kann dies nicht anhand der vorliegenden Daten überprüft werden. Es könnte jedoch ein entsprechendes Verhaltensexperiment durchgeführt werden, in dem die Reaktionszeiten aufgezeichnet werden, zu welchem Zeitpunkt in den verschiedenen Bedingungen die Aufgabe gelöst wurde. Treten tatsächlich unterschiedliche Lösungszeiten für die zwei Bedingungen auf, könnte in den Aufgaben mit wenig Augenbewegung nach der Aufgabenlösung vermehrt Augenbewegungen aufgetreten sein, da sich die Probanden bemühten, weiterhin auf die Hintergrundmatrizen zu schauen oder nach der Aufgabenlösung umherblickten.

Beides kann zu höherer Aktivität auf den EOG-Kanälen geführt haben.

- (4) Möglicherweise ist die Bestimmung des vertikalen und horizontalen EOGs ein zu grobes Maß, um die tatsächliche Augenbewegung abzubilden. Eventuell wäre es günstiger, zunächst aus dem vertikalen EOG die Lidschläge zu entfernen, um danach ein Maß des 'reinen' vertikalen EOG zu erhalten. Da es jedoch dafür keine Methoden gibt, hätten diese zunächst entwickelt und validiert werden müssen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass sich mit den vorliegenden Daten die möglichen Ursachen, die zum Scheitern der Variation der Augenbewegung geführt haben, nicht überprüfen lassen. Somit empfiehlt sich für zukünftige Experimente, die eine Variation von Augenbewegung intendieren, ein Paradigma zunächst anhand von Verhaltensdaten und EOG-Daten zu validieren. Für das hier verwendete visuelle Suchparadigma hieße das, zunächst über die Reaktionszeiten zu überprüfen, ob die intendierte Variation von viel und wenig Augenbewegungen zu gleichen Reaktionszeiten für die Aufgabenbewältigung führt, da bei unterschiedlicher Aufgabenlösungsdauer unsystematische Augenbewegungen auftreten können, die die Ergebnisse verfälschen. Danach hätte das Experiment anhand von vertikalen und horizontalen EOG-Aufzeichnungen validiert werden können.

Ein geeigneteres Maß zur Abbildung der durchschnittlichen Augenbewegungsaktivität als die Varianz auf den EOG-Kanälen ist nicht bekannt. Möglicherweise ist es vorteilhaft, einen dritten EOG-Kanal aufzuzeichnen, um die tatsächlich aufgetretenen Augenbewegungen differenzierter zu bestimmen. Zudem könnte man eine Methode entwickeln, die zunächst die Lidschläge aus dem vertikalen EOG herausrechnet, um anschließend die 'reinen' vertikalen Augenbewegungen zu erhalten.

Hier schließt sich die Frage an, ob das Paradigma trotz der fehlgeschlagenen Variation von Augenbewegung geeignet ist, die ursprüngliche Fragestellung des Einflusses des EOG auf eine frontal positive langsame Welle im EKP zu beantworten. Dazu sollen zunächst noch einmal kurz die tatsächlichen Ergebnisse der EOG-Varianzen im Zeitbereich zwischen 1000 ms und 3500 ms dargestellt werden.

Zunächst zeigte sich im interessierenden Zeitbereich ein Haupteffekt von EOG, der durch höhere Varianzen auf dem vertikalen EOG-Kanal als auf dem horizontalen EOG-Kanal

bedingt wurde. Dieser Haupteffekt ist nicht überraschend, da auf dem vertikalen EOG-Kanal Lidschläge und vertikale Augenbewegungen aufgezeichnet werden. Die Lidschläge sind in der Regel durch höhere Amplituden gekennzeichnet als die vertikalen Augenbewegungen (siehe Abschnitt 3.5).

Es findet sich außerdem ein Haupteffekt von Schwierigkeit zwischen 1000 und 2000 ms sowie zwischen 2500 und 3000 ms, der durch höhere Varianz in der leichten im Vergleich zur schweren Bedingung gekennzeichnet ist. Im gesamten Zeitbereich zwischen 1000 bis 3500 ms tritt zudem eine Interaktion zwischen Schwierigkeit und EOG auf, die durch deutlich höhere Varianz auf dem vertikalen EOG-Kanal in der leichten Aufgabe als in der schweren Aufgabe zustande kommt und leicht erhöhter Varianz auf dem horizontalen Kanal in der schweren als in der leichten Aufgabe.

Somit können mit gewissen Einschränkungen dennoch zwei Bedingungen bestimmt werden, die sich hinsichtlich der Augenbewegung gemessen über die durchschnittliche Menge an EOG-Varianz im entsprechenden Zeitbereich unterscheiden: In der Bedingung mit der leichten Aufgabe findet sich eine höhere vertikale EOG-Varianz als in der Bedingung mit der schweren Aufgabe. Dieser Effekt ist für den horizontalen EOG-Kanal umgekehrt und weniger stark ausgeprägt. Daher kann das Paradigma trotz der fehlgeschlagenen Variation von Augenbewegung eingeschränkt beantworten, ob Augenbewegung einen Einfluss auf die Auslösung einer frontal positiven langsamen Welle hat. Anstelle der Gruppen mit viel und wenig Augenbewegung müssen die Gruppen mit leichter und schwerer Aufgaben verglichen werden. Die Gruppe mit der leichten Aufgabenschwierigkeit kann als die Gruppe mit mehr Augenbewegung betrachtet werden, da sie auf dem vertikalen EOG-Kanal die deutlich höheren Varianzwerte aufweist. Wie Abschnitt 3.5 darlegt, sollen gerade die Lidschläge und vertikalen Augenbewegungen zu massiven Einflüssen an den frontalen Elektrodenpositionen führen. Die Gruppe mit der schweren Aufgabe kann entsprechend als die Gruppe mit wenig Augenbewegung angesehen werden.

4.5.2 Variation von Schwierigkeit

Im Gegensatz zur Variation von Augenbewegung lässt sich die Variation von Schwierigkeit als gelungen ansehen. Obschon auf rein deskriptiver Ebene die leichte und die schwere Bedingung als 'einfach' eingestuft wurden, da die Einschätzskala Werte von

1 - 9 zuließ und der größte Mittelwert bei 3.0 lag, unterscheiden sich die Gruppen mit leichter Schwierigkeit von den Gruppen mit schwerer Schwierigkeit signifikant voneinander hinsichtlich der subjektiven nach dem Experiment erhobenen Schwierigkeitseinschätzung. Die Hypothese bezüglich der Schwierigkeitsvariation ist somit bestätigt.

4.5.3 EKPs auf die Hintergrundmatrizen

Gemittelte Amplituden im Zeitbereich von 1000 bis 3500 ms nach Reizeinsatz

In den EKPs auf die Matrizen sollten sich - nach Korrektur der okularen Artefakte - keine systematischen Einflüsse der Variation von Augenbewegung an den frontalen Elektrodenpositionen zeigen. Auf statistischem Niveau wurde keine Interaktion zwischen Augenbewegung und Frontalität erwartet. Als Voraussetzung für die Überprüfung dieser Hypothese galt, dass der Faktor Augenbewegung im EOG-Maß in die intendierte Richtung variierte: Viel Augenbewegung führt zu hoher Varianz auf den EOG-Kanälen und wenig Augenbewegung führt zu wenig Varianz auf den EOG-Kanälen. Abschnitt 4.5.1 verdeutlichte, dass die EOG-Kanäle für beide Bedingungen von Augenbewegung die gleichen Varianzwerte aufweisen. In den EKP-Daten im entsprechenden Zeitbereich von 1000 bis 3500 ms gibt es weder einen Haupteffekt für Augenbewegung noch eine Interaktion zwischen Augenbewegung und Frontalität. Da jedoch als Voraussetzung eine gelungene Variation in den Varianzen auf den EOG-Kanälen genannt wurde und diese mit dem Faktor Augenbewegung nicht gelungen ist, ist das Nicht-Auffinden des Haupteffekts und der Interaktion in den EKP-Daten bedeutungslos.

Wie in Abschnitt 4.5.1 dargelegt, gibt es dennoch zwei Bedingungen, die sich hinsichtlich ihres Ausmaßes an Augenbewegung unterscheiden. Die leichte Bedingung weist höhere Varianzwerte als die schwere Bedingung auf. In den zeitlich entsprechenden EKP-Daten findet sich kein Haupteffekt für Schwierigkeit, jedoch ein Haupteffekt von Frontalität und eine Interaktion von Schwierigkeit und Frontalität. Der Haupteffekt von Frontalität wurde durch positivere mittlere Amplituden im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms für die zentralen Elektrodenpositionen im Vergleich zu den frontalen bedingt. Die frontalen Elektrodenpositionen waren ihrerseits wiederum positiver als die parietalen. Die Interaktion zwischen Frontalität und Schwierigkeit zeigte, dass in der leichten Aufgabe zentral positivere Amplituden als parietal auftraten. Die parietalen Amplituden

waren ihrerseits wiederum größer als die frontalen. In der schweren Aufgabe traten frontal ebenso große Amplituden wie zentral auf, die beide positiver als parietal waren. Die schon in den Grand Means deutlich positiven Amplituden an den frontalen Elektrodenpositionen treten also in diesem Experiment, in dem als visuelle Reize Matrizen gewählt wurden, in der schweren Bedingung mit der geringeren Varianz auf dem vertikalen EOG-Kanal auf. Die Gruppen mit höherer Varianz auf dem vertikalen EOG-Kanal in der leichten Bedingung sind die Gruppen mit frontal eher negativen Amplituden. Somit erscheint es sehr unwahrscheinlich, dass die frontal positive langsame Welle auf die Bilder des IAPS durch vermehrte Augenbewegung hervorgerufen wird.

Die Hypothesen hinsichtlich des Einflusses von Schwierigkeit auf die EKPs haben sich bestätigt: In der schweren Bedingung finden sich positivere Amplituden an frontalen und zentralen Elektrodenpositionen und negativere Amplituden an den parietalen Elektrodenpositionen als in der einfachen Bedingung. Dieser Effekt bestätigt andere Ergebnisse, wonach die Amplitudenhöhe der langsamen Wellen durch Aufgabenschwierigkeit erhöht wird (vergleiche Abschnitt 3.4.2.1).

P3- und P4-Amplituden und deren Latenz

Schon in den Grand Means (siehe **Abbildung 6a** und **b**) zeigte sich, dass der P3-Komplex nach der P2 durch mindestens zwei deutlich unterscheidbare Peak-Amplituden gekennzeichnet ist. Da dieses visuelle Suchparadigma das erste Mal durchgeführt wurde, wurden bezüglich der Peak Daten keine Hypothesen formuliert. Beide Peak-Amplituden (P3 und P4) wurden bestimmt und ausgewertet.

Die P3, deren Latenz durchschnittlich bei ca. 414 ms lag, weist die typische P3-Topographie auf (vergleiche Abschnitt 3.4.2) mit einem zentro-parietalen Maximum und mit positiveren Amplituden in der Mitte als rechts und links. In diesem Suchparadigma variiert die P3 mit Schwierigkeit, wobei die leichte Aufgabe eine höhere P3-Amplitude bedingte als die schwere Aufgabe. Dieser Effekt modifizierte sich durch Frontalität, indem sich dieser Unterschied nur für die parietalen und zentralen Elektrodenpositionen zeigte, nicht aber für die frontalen. Außerdem weist die schwere Bedingung kein parietales, sondern ein frontales Maximum auf. Dabei erreichen die P3-Amplituden für frontal und parietal gleiche Höhen. Dieser Effekt wird durch die Zielreizanzahl weiter modifiziert. In der leichten Bedingung bedingt die Zielreizanzahl parietal unterschiedliche

Amplitudenhöhen, wobei die Amplitude bei einem Zielreiz größer ist als bei zwei Zielreizen und bei zwei Zielreizen größer ist als bei keinem Zielreiz. In der schweren Bedingung weisen alle drei Zielreizbedingungen die gleiche topographische Verteilung auf. Somit kann festgehalten werden, dass eigentlich nur in der leichten Bedingung der visuellen Suchaufgabe eine klassische P3-Komponente auftritt, während in der schwerer Bedingung eine P3-Komponente mit einer ungewöhnlichen Topographie auftritt. Auf die P3-Latenz hat die Zielreizanzahl einen Einfluss mit späteren Latenzen für einen und zwei Zielreize im Vergleich zu keinem Zielreiz.

Möglicherweise erklärt sich die unübliche P3-Topographie in der schweren Bedingung dadurch, dass für die schwere Bedingung eine deutlich längere Lösungszeit erforderlich war und hier die Anzahl von Zielreizen im Gegensatz zur leichten Bedingung zu einem viel späteren Zeitpunkt entdeckt wurde. Da jedoch keine Reaktionszeiten für die verschiedenen Bedingungen gemessen wurden (das Paradigma erforderte eine verzögerte Antwortreaktion), könnte nur ein Verhaltensexperiment klären, ob sich die Bedingungen hinsichtlich der zur Lösung notwendigen Zeit unterscheiden.

Die P4-Amplitude hatte eine durchschnittliche Latenz von ungefähr 612 ms und weist zentral positivere Amplituden auf als parietal, die jedoch positiver als frontal sind. Somit weist die P4-Amplitude eine andere Topographie auf als die P3-Amplitude. Außerdem ist an den parietalen und zentralen Elektrodenpositionen die Mitte größer als rechts und links, jedoch ist die P4-Amplitude frontal auf der rechten Seite größer im Vergleich zur Mitte und zur linken Seite.

Interessanterweise findet sich trotz der unterschiedlichen Topographie der P4-Amplitude im Vergleich zur P3-Amplitude der gleiche Effekt für Schwierigkeit und für die Interaktion von Schwierigkeit und Frontalität. Im Gegensatz zur P3-Amplitude variiert die P4-Amplitude jedoch mit Augenbewegung. Es zeigt sich eine positivere P4-Amplitude für die Bedingung mit wenig Augenbewegung im Vergleich zur Bedingung mit viel Augenbewegung. Dieser Effekt ist stärker über den Elektrodenpositionen auf der linken Seite und über der Mitte ausgeprägter als auf der rechten Seite. Die P4-Latenz wird durch Augenbewegung, durch Schwierigkeit und durch den Frontalitätsfaktor modifiziert. In der schweren Bedingung ist die P4-Latenz parietal kürzer als zentral und zentral kürzer als frontal, wobei sich zusätzlich für die Bedingung mit wenig Augenbewegung ca. 30 ms spätere Latenzen ergaben. Völlig anders zeigt sich die P4-

Latenz für die leichte Bedingung: Dort treten zentral und parietal annähernd gleiche Latenzen für wenig und viel Augenbewegung auf. Nur frontal findet sich eine ca. 20 ms spätere P4-Latenz in der Bedingung mit wenig Augenbewegung.

Zusammengefasst zeigen sich für die beiden Peak-Amplituden im P3-Bereich trotz topographischer Unterschiede auch gemeinsame Einflüsse von experimentellen Faktoren, z.B. von Schwierigkeit. Die P3 weist dabei in der leichten Bedingung eine klassische P3-Topographie auf und variiert dort mit der Anzahl der Zielreize. Die P4 hingegen variiert mit Augenbewegung und entspricht hinsichtlich der Topographie nicht einer klassischen P3-Komponente.

4.5.4 Abschließende Diskussion von Experiment 1

Abschließend lässt sich festhalten, dass die in diesem Experiment intendierte Variation von Augenbewegung nicht gelungen ist. Abschnitt 4.5.1 nennt mögliche Gründe für das Scheitern dieser Manipulation, die jedoch alle eine Veränderung des Paradigmas und somit eine erneute Datenerhebung erfordert hätten, was im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden kann.

Dennoch lässt sich das Experiment mit Einschränkungen dazu verwenden, die ursprüngliche Frage, ob Augenbewegungen bei visuell dargebotenen Reizen zu einer frontal positiven langsamen Welle in EKP führen, zu beantworten. Bei der Auswertung der EOG-Daten zeigten sich zwei Bedingungen, die sich hinsichtlich ihres Ausmaßes an Augenbewegung unterschieden. Während die Gruppe mit schwerer Aufgabenbedingung ein geringeres Ausmaß an Augenbewegung auf dem vertikalen EOG-Kanal aufwies, war dies in der leichten Aufgabenbedingung genau umgekehrt. Die ursprüngliche Frage konnte somit dennoch beantwortet werden: Die Gruppe mit der größeren Aktivität auf dem vertikalen EOG-Kanal weist frontal eher negative Amplituden im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms auf, während die Gruppe mit geringerer Aktivität auf dem vertikalen EOG-Kanal frontal eher positive Amplituden im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms aufweist.

Die Hypothesen bezüglich der langsamen Welle formulierten höhere Amplituden für die schwierige Bedingung im Vergleich zur leichten Bedingung. Abschnitt 3.4.2.1 nannte einige Befunde dafür, dass Schwierigkeit die Amplituden der langsamen Welle erhöht

(unter anderem Lang et al., 1986). Dieses Ergebnis bestätigt also vollständig die vorliegenden Ergebnisse aus anderen Studien zu langsamen Wellen.

Der allgemeine EKP-Verlauf auf die Matrizen unterscheidet sich deutlich von dem EKP-Verlauf auf die Bilder des IAPS. Die EKPs auf die Matrizen sind in der schweren Bedingung durch eine parietal negative langsame Welle gekennzeichnet, während sich an den frontalen Elektrodenpositionen positive Amplituden finden. In der leichten Bedingung finden sich frontal und parietal langsame Wellen, die zwischen leicht negativ und null variieren, aber zentral positive Amplitudenwerte aufweisen. Wie in Abschnitt 3.4.2.2 aufgezeigt, werden Negativitäten im EKP mit Aktivierungsprozessen der entsprechenden Kortexareale in Verbindung gebracht, während Positivitäten im EKP mit Hemmungsprozessen oder einer verminderten Aktivität der entsprechenden Kortexareale einhergehen sollen (unter anderem Rösler et al., 1990; Rösler et al., 1997; Elbert, 1993). Die parietal negativen langsamen Wellen in der schweren Bedingung könnten die zur Aufgabenlösung notwendigen Aktivierungen widerspiegeln, während in der leichten Bedingung entsprechend deutliche Aktivierungen nicht notwendig sind. Entsprechend könnten die frontal positiven langsamen Wellen in der schweren Bedingung Hemmungsprozesse darstellen, die eventuell auch zur besseren Funktion der parietalen Kortexareale beitragen.

5 Experiment 2

Das erste Experiment zeigte, dass die frontal positive langsame Welle nicht durch vermehrte Augenbewegungsaktivität auf dem vertikalen EOG-Kanal während der Darbietung der visuellen Reize bedingt ist. Das zweite Experiment überprüft eine Hypothese zur funktionalen Bedeutung der frontal langsamen Welle im EKP auf Bilder des IAPS. Wie schon in Abschnitt 4.1 dargelegt, konnte in einer Serie von Experimenten bei der Verwendung der Bilder des International Affective Picture Systems (Lang et al., 1997) eine frontal positive langsame Welle im EKP ausgelöst werden. Die funktionale Bedeutung dieser langsamen Welle ist bislang unklar. Ein Experiment (Maier et al., 1996) zeigte, dass weder der emotionale Gehalt der Reize noch eine emotionsfokussierte Verarbeitung notwendige Voraussetzungen zu ihrer Auslösung sind. Das zweite Experiment soll klären, ob sich die frontal positive langsame Welle durch eine Variation der Menge der erforderlichen inhaltlichen Informationsverarbeitungsprozesse differentiell beeinflussen lässt. Das Experiment führt ein Oddball-Paradigma mit Bildern des IAPS durch. Auf der Verarbeitungsseite variiert der Aufwand inhaltlicher Informationsverarbeitungsprozesse durch die Anzahl unterschiedlicher Bilder, die in der Oddball-Aufgabe kategorisiert werden müssen. Die wesentliche Hypothese lautet, dass die frontal positive langsame Welle nur dann ausgelöst wird, wenn unterschiedliche Bilder inhaltlichen Informationsverarbeitungsprozessen unterzogen werden, nicht aber wenn wiederholt dargebotene Bilder anhand von strukturellen Merkmalen klassifiziert werden können.

5.1 Einleitung

Wie Abschnitt 4.1 darlegte, konnte in einer Serie von Experimenten (Diedrich, 1996; Diedrich et al., 1997; Naumann et al., 1997; Maier et al., 1996), in denen emotionale Bilder des International Affective Picture Systems (IAPS; Lang et al., 1997) dargeboten wurden, eine frontal positive langsame Welle im EKP im Zeitbereich zwischen 700 bis 800 ms bis zu einer Dauer von 6 Sekunden nach Reizdarbietung ausgelöst werden (vergleiche auch Abschnitt 3.4.2.2). Die Untersuchung von Maier et al. (1996) zeigte, dass die frontal positive langsame Welle unabhängig von der Art der Verarbeitung, kognitiv oder emotionsfokussiert, und unabhängig von der emotionalen Valenz der Bilder, neutral oder negativ, auftrat. Somit schließt sich aus, dass verschiedene Arten von

Informationsverarbeitung beziehungsweise der emotionale Gehalt der Bilder diese langsame Welle auslösen.

Die funktionale Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle ist weiterhin unklar, jedoch scheint eine notwendige Voraussetzung für ihre Auslösung zu sein, dass unterschiedliche Bilder inhaltlichen Informationsverarbeitungsprozessen unterzogen werden. In mehreren der oben genannten Experimenten mit Bildern des IAPS der Trierer Arbeitsgruppe wurde vor dem eigentlichen Experiment eine einfache Oddball-Aufgabe mit zwei Bildern durchgeführt. Es zeigte sich, dass in diesem einfachen Oddball-Paradigma mit zwei unterschiedlichen Bildern keine langsame frontal positive Welle ausgelöst wird. Für die Oddball-Aufgabe zeigte sich eine P3-Komponente mit parieto-zentralem Maximum. Die Aktivität an den frontalen Elektrodenpositionen schwingt nach der P3 zurück zum Nullpunkt. Diese Beobachtung ist um so bemerkenswerter, da die Darbietungsbedingungen der Bilder (Größe des visuellen Winkels, Betrachtungsabstand der Probanden etc.) während der Oddball-Aufgabe und während der Untersuchungen mit den Bildern des IAPS gleich waren.

Dieses Experiment realisiert eine Variation der Menge inhaltlicher Informationsverarbeitungsprozesse. Dazu wird ein Oddball-Paradigma mit Bildern des IAPS durchgeführt. Die Aufgabe der Probanden ist es, dargebotene Bilder im Hinblick auf die emotionale Valenz als positiv oder neutral zu klassifizieren und entweder die positiven oder die neutralen Bilder still zu zählen. Die emotionale Valenz der Bilder wurde als inhaltliche Kategorisierungsaufgabe ausgewählt, da eindeutige Reizklassen für diese Aufgabe notwendig sind. Die Bilder des IAPS sind bislang hinsichtlich der Valenz, des Arousal und der Dominanz eingeschätzt worden. Die Verwendung einer dieser Reizklassen für eine Oddball-Aufgabe ist geeigneter als die post-hoc-Konstruktion anderer Reizklassen.

In den erwähnten Studien mit Bildern des IAPS (Diedrich, 1996; Diedrich et al., 1997; Naumann et al., 1997; Maier et al., 1996) wurde häufig eine abschließende subjektive Einschätzung der Bilder hinsichtlich der emotionalen Valenz, negativ, neutral oder positiv, von den Probanden gefordert. Dabei zeigte sich eine sehr große Übereinstimmung mit den veröffentlichten Normen. Es steht somit ein großer Pool von Bildern zur Verfügung, die sich eindeutig als positiv und neutral klassifizieren lassen. Für dieses Experiment werden nur die Bilder ausgewählt, bei denen eine falsche Zuordnung

der emotionalen Valenz sehr unwahrscheinlich ist. Die Beurteilung der emotionalen Valenz erfordert zudem eine gründliche inhaltliche Analyse der Bildreize. Damit ist gemeint, dass jedes Bild betrachtet werden muss, um zu erkennen, was auf dem Bild dargestellt ist. Erst danach erfolgt die emotionale Klassifizierung. Auf der Verarbeitungsseite wird die Menge inhaltlicher Informationsverarbeitungsprozesse über eine unterschiedliche Anzahl von Bildern operationalisiert, die kategorisiert werden müssen.

Die Hypothese lautete, dass in einem Oddball mit nur zwei unterschiedlichen Bildern, die jeweils 30 mal dargeboten werden, keine frontal positive langsame Welle auftritt. Denn nachdem der Proband gelernt hat, welches Bild Zielreiz und welches Bild Nicht-Zielreiz ist, reicht ein Wiedererkennen der Bilder auf rein perzeptueller Ebene aus, um die Aufgabe zu bewältigen. Die wiederholt dargebotenen Bilder müssen nicht jedesmal neu inhaltlich analysiert werden, um die Kategorisierung in der Oddball-Aufgabe zu erfüllen. In einem Oddball mit 60 unterschiedlichen Bildern tritt eine frontal positive langsame Welle auf, weil jedes Bild neu inhaltlich analysiert werden muss, um seine Bedeutung zu erkennen und um den emotionalen Gehalt einschätzen zu können. Eine rein perzeptuelle Bildanalyse ist in diesem Fall nicht ausreichend. Diese Extremvariation mit 2 und 60 Bildern wird um eine Mittelkategorie mit 10 unterschiedlichen Bildern, die jeweils 6-mal dargeboten werden, ergänzt. In dieser Mittelkategorie sollten beide Prozesse stattfinden, bei Bildern, die das erste Mal dargeboten werden, eine inhaltliche Analyse und bei Bildern, die wiederholt dargeboten werden, das Wiedererkennen auf perzeptuellem Niveau. Diese Bedingung kann Aufschluss darüber geben, ob es zur Auslösung der frontal positiven langsamen Welle notwendig ist, dass sich alle Bilder unterscheiden, oder ob es ausreicht, wenige Bilder wiederholt darzubieten. Da das Ziel der Oddball-Aufgabe nicht die Auslösung einer parietal maximalen P3-Komponente ist, wird die Wahrscheinlichkeit für Ziel- und Nicht-Zielreiz auf $p = .50$ festgelegt.

Es existiert eine Vielzahl von Studien zu visuellen Oddball-Experimenten. Die meisten dieser Studien verwendeten jedoch nur einfache visuelle Stimuli wie Lichtblitze oder Buchstaben. Nur sehr selten wurden visuell komplexere Reize wie die Bilder des IAPS eingesetzt. Dass sich unterschiedliche Bildreize für eine Oddball-Aufgabe sinnvoll einsetzen lassen, geht aus der Studie von Martin, Siddle, Gourley, Taylor und Dick (1992) hervor. Diese Studie nutzte eine Oddball-Aufgabe, bei der die Probanden

Fotografien sahen, die entweder normale Verkehrsszenen oder Unfallszenen darstellten. Es ging dabei darum, den Einfluss von Temazepam auf die P3-Komponente zu überprüfen. Die Probanden hatten die Aufgabe, die normalen Verkehrsszenen oder die Unfallszenen zu zählen. In einem Vorversuch variierte auch die Wahrscheinlichkeit der Unfallbilder ($p = .20$ und $p = .50$). Es zeigte sich, dass die Variation der Wahrscheinlichkeit lediglich den bekannten Einfluss auf die Höhe der P3-Komponente hat: Bei einer Wahrscheinlichkeit von $p = .20$ ist die Amplitude der P3-Komponente erhöht. Im eigentlichen Experiment ließ sich der Einfluss von Temazepam auf die P3 auf die Unfallbilder nachweisen: Die P3-Amplitude ist reduziert und die P3-Latenz erhöht. Leider wurde in dieser Studie nicht von den frontalen Elektrodenpositionen abgeleitet, so dass sich keine Hinweise bezüglich unserer Hypothesen ergeben.

Bislang sind außer den erwähnten Arbeiten der Trierer Arbeitsgruppe nur wenig EKP-Studien durchgeführt worden, die Bilder des IAPS verwenden. Von diesen Untersuchungen dienten einige ausschließlich der Untersuchung des Schreckreflexs (z.B. Cuthbert, Schupp, Bradley, McManis & Lang, 1998; Schupp, Cuthbert, Bradley, Birbaumer & Lang, 1997). Eine Studie von Mini, Palomba, Angrilli und Bravi (1996) maß die EKPs nur 1000 ms lang. Eine Reihe von EKP-Untersuchungen verwendeten auch andere Farbfotografien, unter anderem Johnston, Miller und Burselen (1986), Johnston und Wang (1991) und Wang und Johnston (1993), die EKPs in bestimmten Phasen des Menstruationszyklus untersuchten und Bilder von Babys, dermatologischen Fällen, gewöhnlichen Leuten und Models verwendeten. Eine Studie von Sommer, Schweinberger und Matt (1991) verwendete Gesichtsfotos aus einem Jahrbuch. Die Studie von McPherson und Holcomb (1999) und Partarelli (1994) nutzte selbst aufgenommene Bilder realer Objekte. Die meisten dieser Studien, die zumindest vergleichbare visuelle Reize einsetzten, verwendeten in der Regel kurze Aufzeichnungsepochen bis 1500 ms, so dass sich im Hinblick auf unsere Fragestellung, die eine Komponente ab 1000 bis 3500 ms nach Reizdarbietung im Blickfeld hat, kaum Hinweise ergeben.

Im Experiment werden die Bilder hinsichtlich ihrer emotionalen Valenz variiert. Es werden nur emotional neutrale und emotional positive Bilder verwendet. Der Arousal-Wert bei den positiven Bildern ist gegenüber dem Arousalwert bei den neutralen Bildern deutlich erhöht (siehe Abschnitt 5.3.2). Obwohl positive Bilder und neutrale Bilder mit

ähnlichen Arousal-Werten existieren, konnten diese Bilder nicht ausgewählt werden, da die Valenz-Kategorisierung weniger eindeutig gewesen wäre. Die positiven Bilder mit gleichen Arousal-Werten wie die neutralen Bilder weisen in der Regel auch kleinere Valenz-Werte auf. Daher konnte nur der Unterschied von Arousal zwischen den positiven und den neutralen Bildern über die Variation der unterschiedlichen Anzahl von Bildern, die dargeboten werden, konstant gehalten werden.

Die Frage, wie sich die emotionale Valenz der Reize auf die EKPs auswirkt, soll hier nur marginal betrachtet werden. Einen Überblick über Studien, die EKPs auf emotionale Reize messen, findet sich unter anderem bei Diedrich (1996) und Naumann, Maier, Diedrich, Becker und Bartussek (1997). Bislang ergaben sich in den Experimenten der Trierer Arbeitsgruppe unterschiedliche Ergebnisse im Hinblick auf den Einfluss der emotionalen Valenz der Bilder. In der Studie von Diedrich et al. (1997) zeigte sich im Zeitbereich von 400 bis 700 ms nach Bilddarbietung ein Haupteffekt der emotionalen Valenz mit positiveren Amplituden für positive im Vergleich zu neutralen Bildern. Neutrale Bilder erzeugten wiederum positivere Amplituden als die negativen Bilder. Zudem fanden sich Interaktionen mit den Verarbeitungsbedingungen und mit dem Topographiefaktor Frontalität. In Experiment 1 aus Diedrich (1996) trat zwischen 600 und 1000 ms nach Bilddarbietung ein Haupteffekt Emotionalität mit positiveren Amplituden für die positiven Bilder im Vergleich zu den negativen Bildern auf. Die negativen Bilder weisen ihrerseits positivere Amplituden auf als die neutralen Bilder. Diese Unterschiede waren jedoch nur zwischen den emotionalen und neutralen Bildern signifikant. Im zweiten Experiment aus Diedrich (1996) zeigte sich ein Haupteffekt Emotionalität zwischen 300 und 1400 ms nach Bilddarbietung mit größeren Amplituden für die negativen im Vergleich zu den positiven Bildern, die ihrerseits größere Amplituden als die neutralen Bildern bedingten. Auch diese Unterschiede waren nur signifikant zwischen den neutralen und emotionalen Bildern. Hier trat keine Interaktion zwischen Emotionalität und Frontalität auf. Naumann et al. (1997) fanden eine Interaktion zwischen Emotionalität und Frontalität, wobei die Struktur dieser Interaktion teilweise deutliche Unterschiede an den verschiedenen Elektrodenpositionen aufwies. In der letzten Untersuchung von Maier et al. (1996) fand sich weder ein Haupteffekt für Emotionalität noch eine Interaktion zwischen Emotionalität und Frontalität. Insgesamt scheinen positivere Amplituden im Latenzbereich der P3 auf Bilder, der bei ca. 500 ms

liegt, mit positiver oder negativer Valenz ein relativ durchgängiger Befund zu sein. Im späteren Zeitbereich der frontal positiven langsamen Welle führen eher Einflüsse eines erhöhten Arousals zu positiveren Amplituden im EKP auf die Bilder.

Im Wesentlichen untersucht dieses Experiment den Einfluss der notwendigen Menge von Informationsverarbeitung auf die Auslösung einer frontalen positiven langsamen Welle im Zusammenhang mit visuell dargebotenen Bildern des IAPS. Die einzelnen Hypothesen werden im folgenden Abschnitt dargelegt.

5.2 Hypothesen

EKP-Maße

Anzahl unterschiedlicher Bilder

Die Variation der Menge an Informationsverarbeitung operationalisiert über die unterschiedliche Anzahl von Bildern, die in einer visuellen Oddball-Aufgabe kategorisiert werden müssen, führt zu einem systematischen Einfluss an den frontalen Elektrodenpositionen. Dabei wird in der Bedingung mit 2 unterschiedlichen Bildern keine frontal positive langsame Welle im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms erwartet, während in der Bedingung mit 60 unterschiedlichen Bildern eine frontal positive langsame Welle im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms auftreten soll. Die Bedingung mit 10 unterschiedlichen Bildern sollte hinsichtlich der langsamen Welle zwischen der Bedingung mit 2 Bildern und der Bedingung mit 60 Bildern liegen. Auf statistischem Niveau wird eine Interaktion zwischen Frontalität und Anzahl unterschiedlicher Bilder für den Zeitbereich zwischen 1000 bis 3500 ms nach Reizeinsatz erwartet.

Emotionalität

Aufgrund der Befunde früherer Experimente mit den IAPS-Bildern (vergleiche Abschnitt 5.1) wird für Emotionalität im Bereich der P3-Amplitude ein Haupteffekt Emotionalität mit positiveren Amplituden für die positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern postuliert. In Bereich der frontal positiven langsamen Welle zwischen 1000 und 3500 ms wird ebenfalls ein Haupteffekt von Emotionalität mit positiveren Amplituden für die positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern erwartet. Beide Effekte

können jedoch sowohl durch die emotionale Valenz als auch durch das emotionale Arousal bedingt sein.

5.3 Methode

5.3.1 Probanden

104 Studenten aus verschiedenen Fachbereichen der Universität Trier nahmen an dem Experiment teil, wovon 90 Probanden in die Auswertung gingen³. Die Probanden wurden über Aushänge angeworben und erhielten für die Teilnahme 20,- DM. Das Alter der Probanden lag zwischen 19 und 34 Jahren, mit einem Mittelwert von 22.91 Jahren. Die untersuchte Stichprobe setzte sich aus 30 Männern und 60 Frauen zusammen. Die Probanden verfügten über normale oder korrigierte Sehkraft (Brille). Sie wurden schriftlich über die Ziele der Studie informiert. Ihnen wurde zugesichert, dass sie die Untersuchung jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen können, wovon niemand Gebrauch machte.

Die Anzahl von Probanden wurde durch eine vorherige Berechnung des Stichprobenumfangs mit dem Programm GPOWER bestimmt (Erdfelder, Faul & Buchner, 1996). Die berechnete Stichprobe mit $N = 90$ erlaubt es, die relevante Interaktion Anzahl unterschiedlicher Bilder x Frontalität mit einer Wahrscheinlichkeit von .90 zu entdecken. Ein ausführliches Anwendungsbeispiel für eine Stichprobenumfangsplanung mittel einer Power-Analyse (Cohen, 1988; Cohen, 1992) findet sich im Anhang von Naumann, Bartussek, Diedrich und Laufer (1992).

5.3.2 Reizmaterial

60 Bilder des International Affective Picture Systems (Lang et al., 1997) wurden ausgewählt. Davon waren jeweils 30 entweder emotional neutral oder positiv. Im Anhang 2 (siehe Abschnitt 8) findet sich eine Liste der ausgewählten Bilder des IAPS, in der auch angegeben ist, welche Bilder für welche Gruppe verwendet wurden. Die Menge an Informationsverarbeitung wurde in drei experimentellen Bedingungen durch die Anzahl unterschiedlicher Bilder variiert: Für die Bedingung geringe Menge an Informationsverarbeitung wurden 2 Bilder, ein neutrales und ein positives, aus den 60

³14 Probanden wurden aufgrund messtechnischer Probleme, die während der EEG-Messung auftraten, von der Auswertung ausgeschlossen.

Bildern ausgewählt. Für die Bedingung mittlere Menge an Informationsverarbeitung wurden 10 Bilder, fünf neutrale und fünf positive, aus den 60 Bildern ausgewählt. Für die Bedingung große Menge an Informationsverarbeitung wurden alle 60 Bilder, also je 30 positive und 30 neutrale, ausgewählt (vergleiche auch 5.3.3).

Die Bilder wurden anhand von zwei Kriterien ausgewählt. Erstens deutlich unterschiedliche Werte in der Valenz für die neutralen und positiven Bilder, um sicherzustellen, dass die Beurteilung der emotionalen Valenz der neutralen und positiven Bilder in der Oddball-Aufgabe problemlos erfolgen kann. Zweitens gleiche Unterschiede für die Arousal-Werte der neutralen und positiven Bilder für die unterschiedlichen Mengen an Informationsverarbeitung (siehe *Tabelle 8*).

Gruppe (Bilderanzahl gleicher Valenz)	neutrale Bilder		positive Bilder	
	Valenz	Arousal	Valenz	Arousal
1: geringe Menge an Informationsverarbeitung (1)	5.50	2.92	7.77	4.68
2: mittlere Menge an Informationsverarbeitung (5)	M= 5.06 SD = 0.31 Bereich: 4.69 - 5.50	M= 2.92 SD = 0.07 Bereich: 2.83 - 3.01	M= 7.29 SD = 0.40 Bereich: 6.71 - 7.77	M= 4.72 SD = 0.12 Bereich: 4.54 - 4.85
3: große Menge an Informationsverarbeitung (30)	M= 5.13 SD = 0.61 Bereich: 4.96 - 5.50	M= 2.95 SD = 0.63 Bereich: 1.76 - 5.29	M= 7.34 SD = 0.55 Bereich: 6.28 - 8.34	M= 5.13 SD = 0.61 Bereich: 2.90 - 6.68

Tabelle 8: Mittelwerte (M), Standardabweichung (SD) und Bereich der Valenz- und Arousal-Werte der Bilder der drei experimentellen Gruppen 1, 2 und 3.

Die Bilder des IAPS wurden von einem JPG-Format in ein PCX-Format konvertiert, um eine Bildschirmdarstellung zu ermöglichen. Die Bilder wurden für 5500 ms bis 7500 ms auf dem Monitor eines Computers (PC, 486-DX 33; Grafikkarte: Matrox Millineum 2 MB) dargeboten. Der Monitor (EIZO T662, 20") wurde innerhalb der EEG-Kabine platziert. Die Bilder des IAPS liegen im Hochformat (Bildschirmbreite 24 cm x Bildschirmhöhe 28 cm) oder in einem Normalformat (Bildschirmbreite 38.8 cm x Bildschirmhöhe 28 cm) vor. Der horizontale und vertikale visuelle Winkel der Bilder im Hochformat betrug 4.57° und 5.33° bei einem Betrachtungsabstand von 150 cm. Der horizontale und vertikale visuelle Winkel der Bilder im Normalformat betrug 7.38° und 5.33° bei einem Betrachtungsabstand von 150 cm.

Die Bilder der drei Gruppen wurden in einer pseudo-zufälligen Reihenfolge unter der Bedingung dargeboten, dass nie mehr als drei Bilder der gleichen emotionalen Valenz-Kategorie in Folge erschienen.

5.3.3 Unabhängige Variablen

Drei unabhängige Variablen wurden verwendet. Die erste Variable operationalisierte die Menge an Informationsverarbeitung über die *Anzahl unterschiedlicher Bilder* (2, 10, 60) die ausgewählt wurden. Für die Gruppe 1 wurden 2 unterschiedliche Bilder des IAPS für die Oddball-Aufgabe ausgesucht. Für die Gruppe 2 wurden 10 unterschiedliche Bilder des IAPS für die Oddball-Aufgabe ausgewählt und für die Gruppe 3 wurden 60 unterschiedliche Bilder des IAPS ausgewählt (siehe Abschnitt 5.3.2).

Die zweite Variable *Emotionalität* (*neutral, positiv*) ergab sich, da von den 60, 10 und 2 ausgewählten Bildern je die Hälfte emotional positiv und die andere Hälfte emotional neutral waren.

<i>Anzahl unterschiedlicher Bilder</i>	<i>Zielreiz</i>			
	neutrale Bilder		positive Bilder	
	<i>Emotionalität</i>		<i>Emotionalität</i>	
	neutral	positiv	neutral	positiv
2	Gruppe 1n		Gruppe 1p	
10	Gruppe 2n		Gruppe 2p	
60	Gruppe 3n		Gruppe 3p	

Tabelle 9: Experimentelle Gruppen.

Die dritte Variable *Zielreiz* (*neutral, positiv*) ergab sich durch die Oddball-Aufgabe. Die Probanden hatten die Aufgabe, die positiven oder die neutralen Bilder still zu zählen, wodurch sich die drei Gruppen in jeweils zwei Untergruppen aufteilten: Gruppe 1 in die Untergruppen 1n (mit 2 Bildern und der Aufgabe, die neutralen still zu zählen) und 1p (mit 2 Bildern und der Aufgabe, die positiven still zu zählen), Gruppe 2 in die Untergruppen 2n (mit 10 Bildern und der Aufgabe, die neutralen still zu zählen) und 2p (mit 10 Bildern und der Aufgabe, die positiven still zu zählen) und Gruppe 3 in die

Untergruppen 3n (mit 60 Bildern und der Aufgabe, die neutralen still zu zählen) und 3p (mit 60 Bildern und der Aufgabe, die positiven still zu zählen).

Durch die Kombination der drei experimentellen Variablen ergaben sich sechs experimentelle Gruppen (siehe *Tabelle 9*), in denen jeweils $n = 15$ Probanden untersucht wurden.

Jede der sechs Gruppen erhielt 60 Bilddarbietungen, wovon jeweils die Hälfte positiv und neutral war. Die Probanden mussten je nach Gruppe entweder die neutralen oder die positiven Bilder zählen. Die Steuerung der Bilddarbietung erfolgte über einen PC (486 DX2 66), der den Darbietungs-PC (486-DX 33; Grafikkarte: Matrox Millineum 2 MB) triggerte.

5.3.4 Erfassung der physiologischen Maße

Messung und Digitalisierung des EEG und EOG

Das EEG wurde in einer elektrisch abgeschirmten Kabine aufgezeichnet. Abgeleitet wurde mittels einer Elektrodenkappe (Elektrocap der Firma ECI) mit eingearbeiteten Zinnelektroden (Blom & Anneveldt, 1982) von neun Elektrodenpositionen (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) gegen die verbundenen Mastoiden als Referenz. Die Übergangswiderstände lagen unter 3 kOhm. Ein Nihon-Kohden-Verstärker zeichnete das analoge EEG-Signal auf und digitalisierte es durch eine Analog-Digital-Wandlung über Dasy-Lab (Datenerfassungssoftware; Version 3.0 für Windows 3.1). Die Abspeicherung der digitalisierten Messdaten erfolgte ebenfalls durch Dasy-Lab. Die Signal-Abtastrate betrug 100 Hz. Das Signal wurde mit einer Zeitkonstante von 10 Sekunden (entsprechend einem Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 0.016 Hz) und einem Tiefpassfilter von 35 Hz verstärkt. Die Referenzelektroden und die EOG-Elektroden waren Silber/Silberchlorid-Elektroden.

Das vertikale und horizontale EOG wurde mit jeweils zwei Elektroden über und unter dem rechten Auge bzw. neben den äußeren Augenwinkeln erfasst. Während des gesamten Experiments wurden EEG und EOG auf einem Analogschreiber zur visuellen Kontrolle auf Artefakte ausgegeben.

Die neun EEG- und die zwei EOG-Kanäle wurden auf die Bilder von 480 ms vor bis 4520 ms nach Reizeinsatz zeitlich begrenzt. Die Reizgabe steuerte der unter 5.3.3 genannte PC.

5.3.5 Experimentelle Prozedur

Ablauf des Experiments

Nach der Ankunft im Labor unterzeichneten die Probanden eine Erklärung, in der sie darauf hingewiesen wurden, dass sie das Experiment jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen können. Danach nahmen die Probanden in einem bequemen Sessel Platz, der sich in einer elektrisch abgeschirmten, schall- und lichtisolierten Kabine befand. Die Elektrodenkappe, die EOG-Elektroden und die Referenzelektroden wurden angelegt. Die Probanden wurden zufällig den sechs experimentellen Gruppen zugewiesen.

Mittels schriftlicher Instruktionen wurden die Probanden darüber informiert, dass verschiedene Bilder auf einem Monitor dargeboten würden und ihre Aufgabe darin bestehe, diese Bilder zu betrachten und zu entscheiden, ob sie emotional positiv oder neutral sind und dann entsprechend der jeweiligen Aufgabe, entweder die positiven oder die neutralen Bilder still zu zählen (Oddball-Aufgabe). Nach den 60 Bilddarbietungen wurden die Probanden aufgefordert, ihr Zählergebnis mündlich zu nennen. Die Antwort wurde außerhalb der Kabine vom Versuchsleiter mittels einer Tastatur eingegeben.

Nach einer kleinen Pause führten die Probanden die gesamte experimentelle Prozedur ein weiteres Mal (Retest) durch. Am Ende dieses zweiten Durchgangs wurde allen Probanden alle 60 Bilder dargeboten und der emotionale Gehalt der Bilder musste auf einer Einschätzskala von negativ (- 4) bis positiv (+ 4) eingeschätzt werden. Die Einschätzskala wurde nach der Bilddarbietung auf dem Bildschirm eingeblendet und die Probanden antworteten mündlich. Nachdem die Probanden ihre Einschätzung abgegeben hatten, wurde das nächste Bild dargeboten. Die Ergebnisse des zweiten experimentellen Durchgangs und auch der Einschätzung werden hier nicht berichtet.

Ablauf der Bilddarbietung

Ein einzelner experimenteller Durchgang mit Bilddarbietung (siehe **Abbildung 16**) hatte den folgenden Ablauf: Ein kleines Kreuz wurde für 1500 ms in der Mitte des Bildschirms dargeboten. Die Probanden wurden aufgefordert das Kreuz zu fixieren. Nach einem

Zufallsintervall zwischen 500 bis 1000 ms wurde das Bild für 5500 bis 7500 ms dargeboten. Nach einem weiteren Intervall von 2000 ms wurde das nächste Bild dargeboten. Erst nach 60 Bilddarbietungen wurden die Probanden aufgefordert, mündlich die Antwort ihres Zählergebnisses zu nennen.

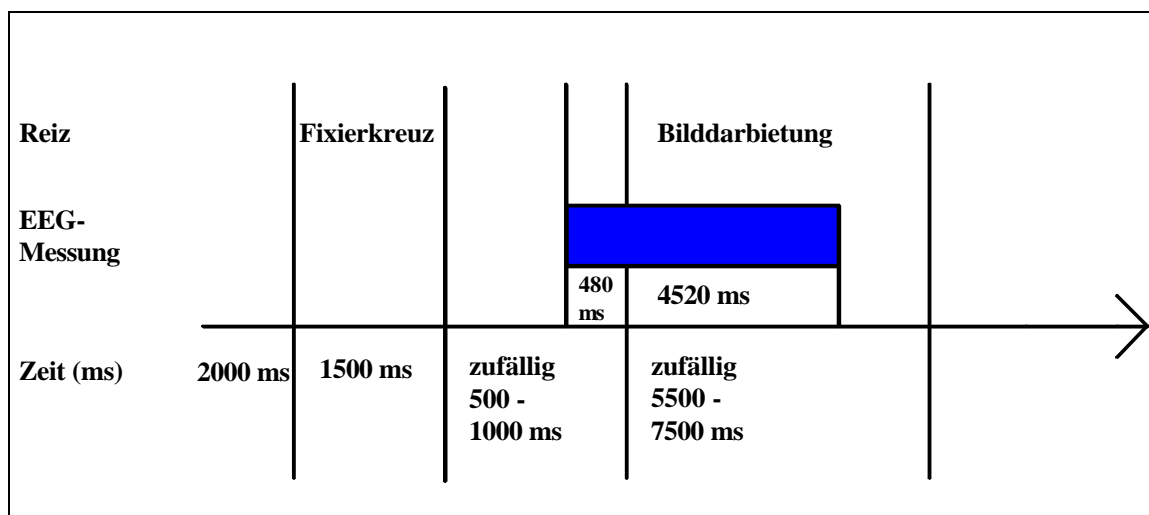


Abbildung 16: Der zeitliche Verlauf eines einzelnen Durchgangs der experimentellen Bilddarbietung. Zusätzlich ist die EEG-Messung eingetragen.

5.3.6 Auswertung der physiologischen Maße

Ereigniskorrelierte Potentiale auf die Bilder

Die EEG- und EOG-Aufzeichnungen nach der Bilddarbietung wurden auf der Grundlage der objektiven Valenzwerte der IAPS-Bilder gemittelt. Das heißt, es wurden die EEG- und EOG-Strecken der jeweils 30 neutralen und 30 positiven Bilddarbietungen für jeden Probanden gemittelt. Die einzelnen EEG-Messungen werden vor dem Mitteln auf Gleichspannungsverstärkung umgerechnet. Hierbei wurde die Methode von Elbert und Rockstroh (1980) und der dort beschriebene Algorithmus verwendet. Zusätzlich werden Augenartefakte nach dem Ansatz von Gratton et al. (1983) in der Erweiterung von Miller et al. (1988) entfernt.

Aus den EKPs auf positive und neutrale Bilder wurden in einem ersten Schritt an jeder der neun abgeleiteten Elektrodenpositionen sieben abhängige Variablen extrahiert: Fünf mittlere Amplituden über jeweils 500 ms ab dem Zeitfenster 1010 bis 3500 ms (1010 bis 1500 ms, 1510 bis 2000 ms, ..., 3010 bis 3500 ms). Die Wahl der Zeitfenster für diese mittleren Amplituden begründet sich dadurch, dass der Verlauf der experimentellen Effekte über die Zeit besser beschrieben wird. Die mittleren Amplituden werden als

Differenzmaße zur Baseline, definiert als mittlere Amplitude 300 ms vor Reizdarbietung, bestimmt. Vor Berechnung der Baseline und der mittleren Amplituden werden die Daten tiefpassgefiltert (6 Hz Grenzfrequenz). In einem zweiten Schritt wird eine P3-Peak-Amplitude und deren Latenz bestimmt. Die P3 wurde definiert als die positivste Amplitude zwischen 350 und 700 ms. Die P3-Amplitude wird als Differenz zur empirischen Baseline berechnet. Die Daten wurden tiefpassgefiltert (6 Hz Grenzfrequenz). Die Parametrisierung der Peak-Amplitude wird mit einem interaktiven Programm durchgeführt, bei dem die Peak-Amplitude bei jedem Probanden individuell bestimmt werden kann.

Für die statistische Analyse werden die neun Elektrodenpositionen in zwei Faktoren Frontalität (frontal, zentral und parietal, was den Elektrodenpositionen F, C, und P entspricht) und Hemisphäre (links, Mitte und rechts, was den Elektrodenpositionen 3, z und 4 entspricht) orthogonalisiert. Die EKP-Daten werden mittels einer fünffaktoriellen Varianzanalyse mit den Faktoren ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (2, 10, 60), ZIELREIZ (neutral, positiv), EMOTIONALITÄT (neutral, positiv), FRONTALITÄT (frontal, zentral, parietal) und HEMISPHERE (links, Mitte, rechts) mit Messwiederholung auf den letzten drei Faktoren ausgewertet.

Die EOGs werden entsprechend den EKPs gemittelt und abgebildet, jedoch wird aufgrund der Ergebnisse von Experiment 1 auf eine weitere Auswertung im Rahmen dieses Experiments verzichtet.

Für jede abhängige EKP-Variable wird eine eigene Varianzanalyse gerechnet. Dabei werden bei allen Analysen, die messwiederholte Faktoren beinhalten, die Freiheitsgrade nach Huynh-Feldt korrigiert, um Verletzungen der Zirkularität zu berücksichtigen. Der α -Fehler wird auf 0.05 festgelegt. Bei jedem signifikanten Ergebnis wird als zusätzliche Statistik das Effektgrößenmaß ω^2 berechnet (Cohen, 1988). Dieses Maß variiert zwischen 0 und 1 und schätzt den Anteil der Varianz der abhängigen Variablen, der durch eine unabhängige Variable (Haupteffekt) oder Kombination von unabhängigen Variablen (Interaktion) erklärt wird. Nur die signifikanten Effekte werden bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt, deren Effektgrößen mehr als 2% systematischer Varianz erklären. Dieses Vorgehen erscheint berechtigt, weil kleinere Effekte nur mit einem kaum vertretbaren Aufwand zuverlässig replizierbar sind.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Ereigniskorrelierte Potentiale auf die Bilder

Grand Means: Abbildung 17a, b und c zeigen die Grand Mean EKPs auf die neutralen und positiven Bilder. In den Abbildungen sind zusätzlich die zwei EOG-Kanäle für die sechs Gruppen eingetragen. Die Betrachtung dieser Grand Means verdeutlicht, dass die Bilder des IAPS auch bei einer Oddball-Aufgabe eine ähnliche Struktur und einen ähnlichen Verlauf zeigen wie die Grand Means in den bisherigen Bilder-Experimenten der Trierer Arbeitsgruppe (vergleiche *Abbildung 2* in Abschnitt 4.1). Jedoch unterscheiden sich diese EKPs deutlich von den EKPs auf die Matrizen (vergleiche *Abbildung 6a* und *b* in Abschnitt 4.4.2).

Im Unterschied zu den bisherigen Bilderstudien fällt auf, dass die Bildreize mit positiver Valenz in allen Gruppen positivere Amplituden bewirken. Dieser Effekt erstreckt sich über die gesamte Messstrecke. Derart deutliche Valenzunterschiede konnten in den bisherigen Studien nicht beobachtet werden. Auffallend ist zudem, dass dieser Effekt nicht einmal in den Gruppen vermindert wird, in denen die neutralen Bild-Reize als Zielreize definiert waren und gezählt werden mussten.

Die Gruppen 3n und 3p sind den bisherigen Bilder-Untersuchungen am ähnlichsten, da in diesen Gruppen ausschließlich unterschiedliche Bilder dargeboten wurden. Diese Gruppen weisen frontal positive Amplituden in Zeitbereich der langsamen Welle zwischen 1000 und 3500 ms auf, jedoch ebenfalls positive Amplituden an den zentralen und parietalen Elektrodenpositionen.

Insgesamt haben sich die Erwartungen bestätigt. Die Gruppen 1n, 1p, 2n und 2p zeigen im Vergleich zu den Gruppen 3n und 3p eine reduzierte frontal positive langsame Welle. Die statistischen Analysen bestätigen diese Beobachtungen.

Die EKPs auf die Bilder der sechs Gruppen sind im frühen Zeitbereich durch eine parietal maximale P3-Komponente gekennzeichnet. Die P3-Amplitude ist für die positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern deutlich erhöht, wenn diese zugleich Zielreize waren. Wenn die neutralen Bilder Zielreiz waren, weisen die P3-Amplituden der neutralen und positiven Bilder annähernd gleiche Höhen auf. Auch dieser Effekt wird durch die statistischen Analysen bestätigt.

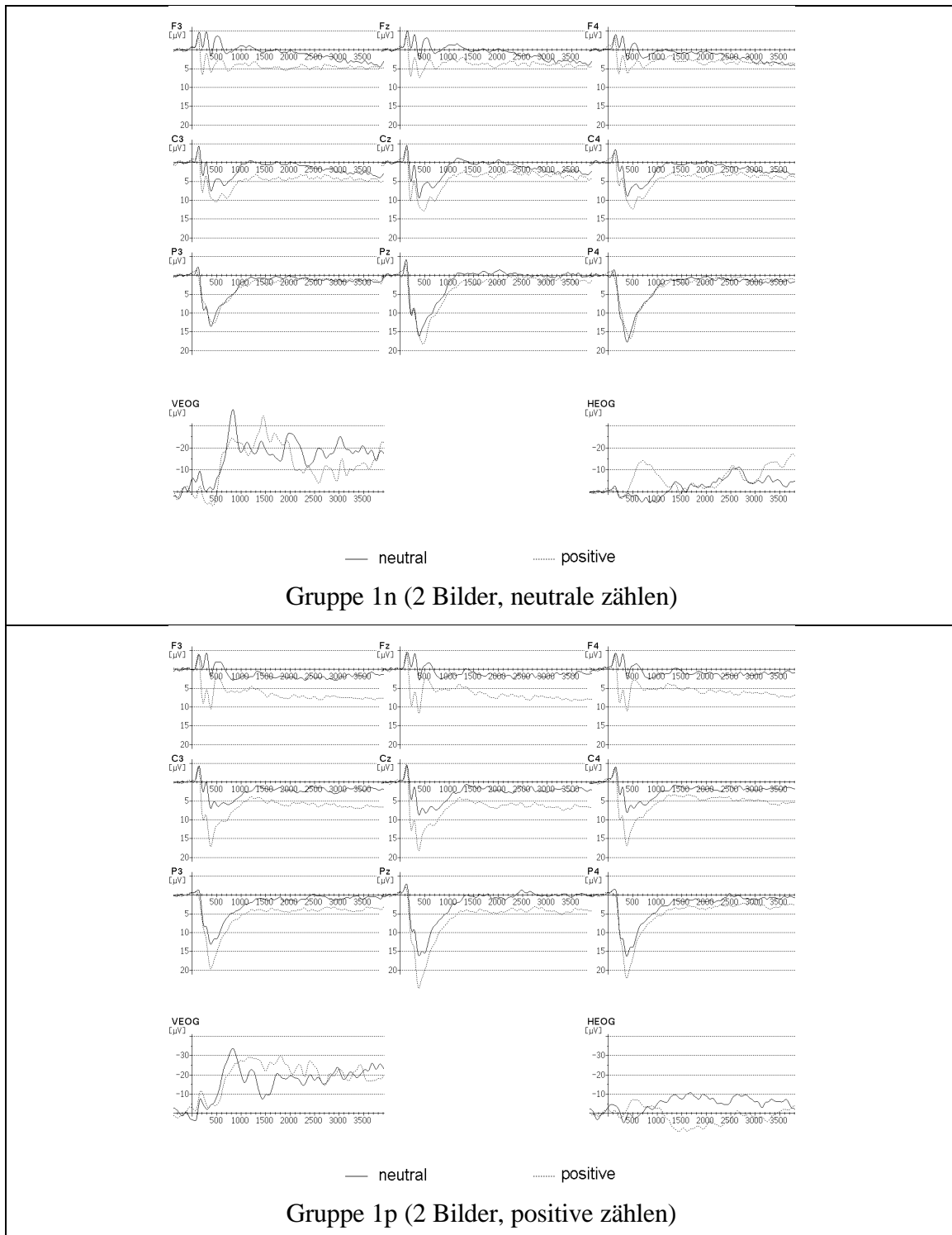


Abbildung 17a: Grand Means der Gruppen 1n und 1p auf die neutralen und positiven Bilder. Zusätzlich sind die EOG-Kanäle abgebildet (vertikal = VEOG, horizontal = HEOG). Negative Amplituden sind nach oben abgetragen. Zeitachse von 480 ms vor bis 3820 ms nach Beginn der Bildarbietung.

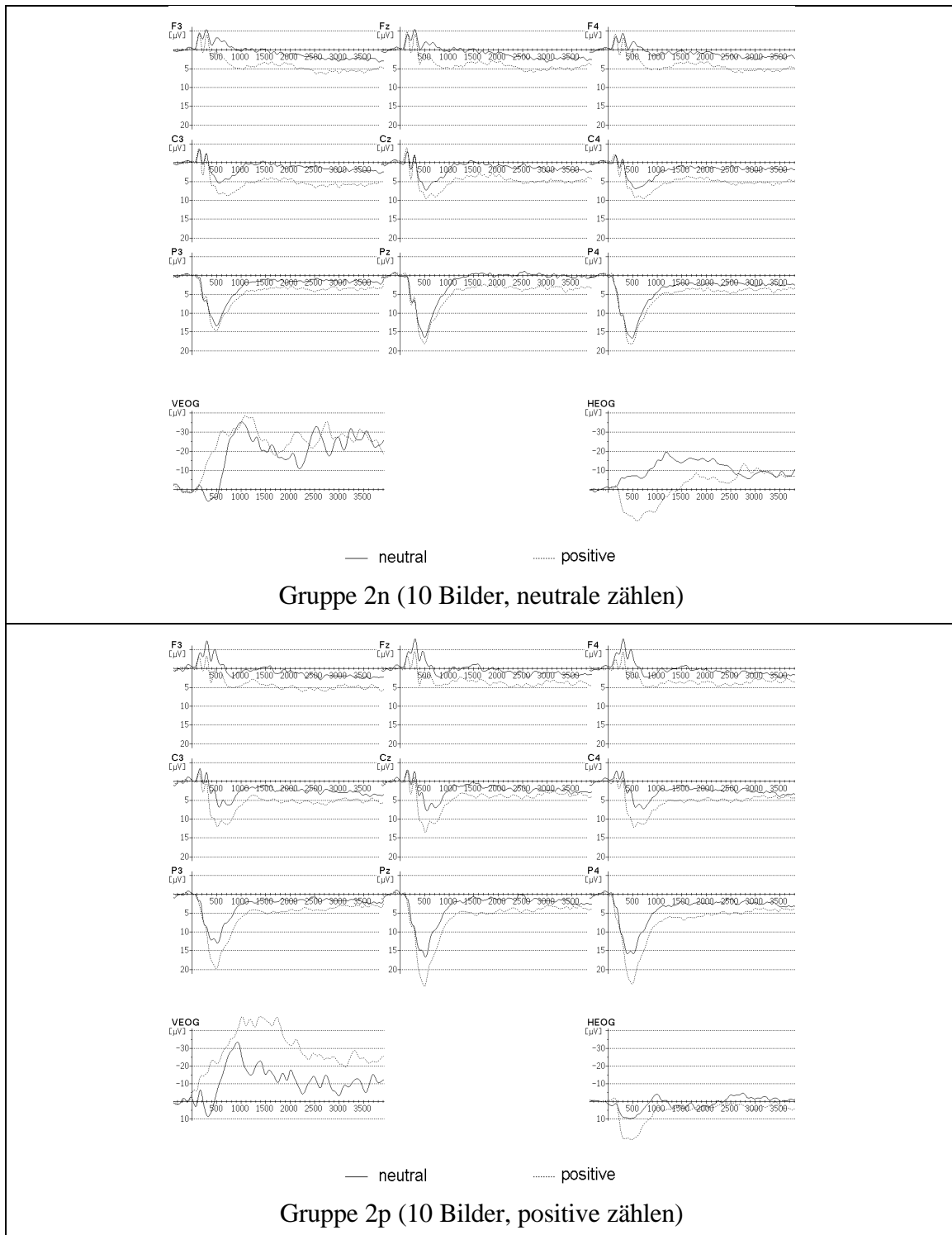


Abbildung 17b: Grand Means der Gruppen 2n und 2p auf die neutralen und positiven Bilder. Zusätzlich sind die EOG-Kanäle abgebildet (vertikal = VEOG, horizontal = HEOG). Negative Amplituden sind nach oben abgetragen. Zeitachse von 480 ms vor bis 3820 ms nach Beginn der Bildarbietung.

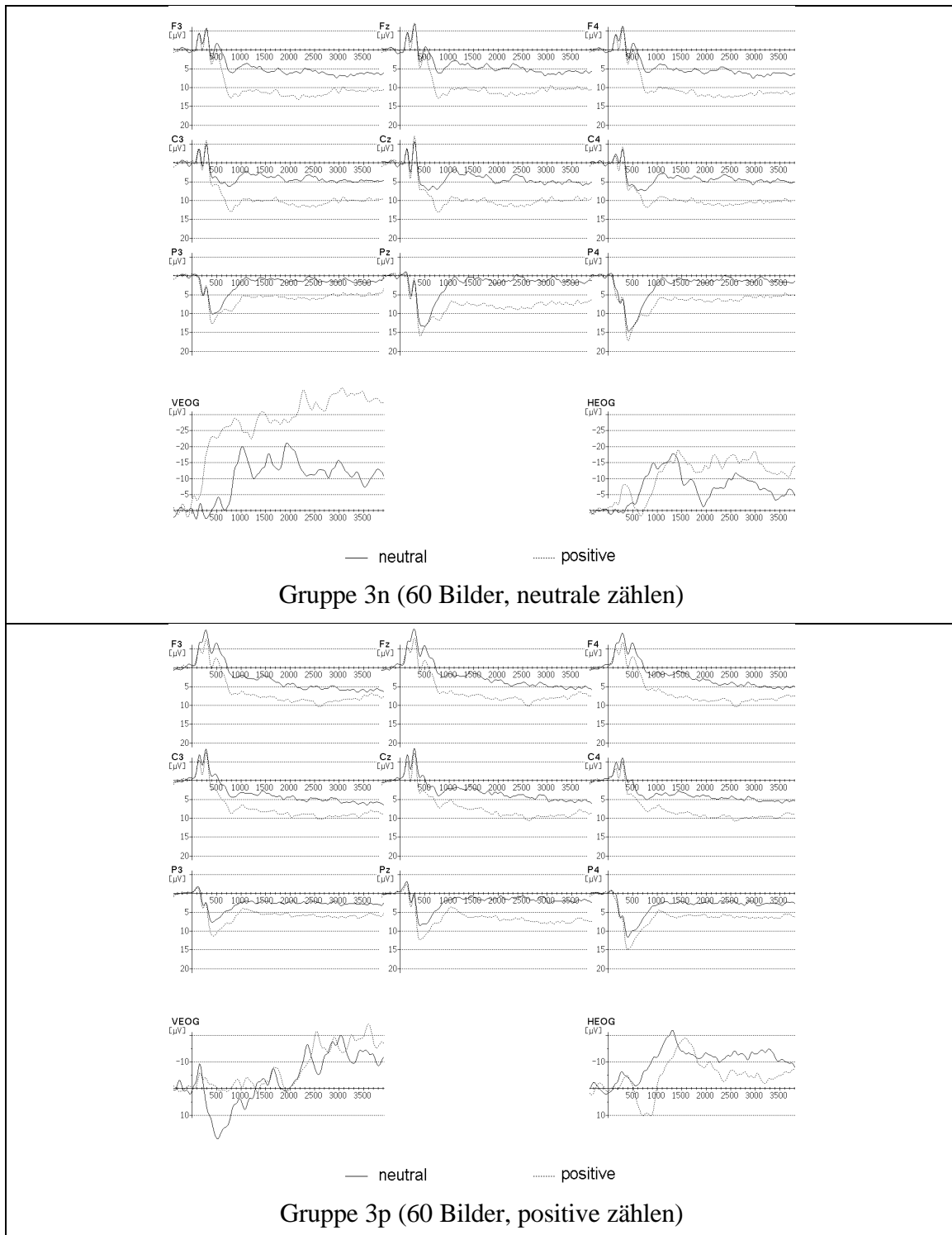


Abbildung 17c: Grand Means der Gruppen 3n und 3p auf die neutralen und positiven Bilder. Zusätzlich sind die EOG-Kanäle abgebildet (vertikal = VEOG, horizontal = HEOG). Negative Amplituden sind nach oben abgetragen. Zeitachse von 480 ms vor bis 3820 ms nach Beginn der Bilddarbietung.

EKP-Daten

Gemittelte Amplituden im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizeinsatz

Quelle	df	gemittelte Amplitude (1010-1500 ms)		gemittelte Amplitude (1510-2000 ms)		gemittelte Amplitude (2010-2500 ms)		gemittelte Amplitude (2510-3000 ms)		gemittelte Amplitude (3010-3500 ms)	
		F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2	F _{emp}	ω^2
aNzahl	2,84	5.21	.08	9.71	.16	10.26	.17	10.49	.17	9.29	.15
unterschiedlicher bilder											
Zielreiz	1,84	0.07		0.22		0.26		0.04		0.00	
NZ	2,84	1.26		1.45		1.16		0.76		0.39	
Hemisphäre	2,168	8.33	.05	4.99	.02	4.82	.02	4.08	.02	2.52	
HN	4,168	2.50	.02	2.74	.02	1.82		1.98		1.78	
HZ	2,168	0.10		0.41		0.36		0.82		0.87	
HNZ	4,168	1.25		1.02		1.35		0.65		0.72	
Frontalität	2,168	2.50		10.57	.06	24.68	.14	36.86	.20	37.61	.21
FN	4,168	7.21	.08	7.36	.08	6.49	.07	4.78	.05	5.26	.05
FZ	2,168	2.67		2.52		1.23		1.79		3.66	.01
FNZ	4,168	0.80		1.17		0.59		0.92		0.68	
Emotionalität	1,84	99.94	.35	88.29	.32	86.83	.32	72.29	.28	47.78	.20
EN	2,84	3.68	.02	2.93		5.62	.04	3.74	.02	1.97	
EZ	1,84	0.51		0.08		0.08		0.62		0.52	
ENZ	2,84	0.95		0.98		2.57		2.84		4.71	.03
HF	4,336	7.80	.03	7.41	.03	5.49	.02	3.10	.01	3.19	.01
HFN	8,336	1.38		3.46	.02	4.18	.03	4.08	.02	3.85	.02
HFZ	4,336	1.08		0.62		0.55		0.87		0.99	
HFNZ	8,336	2.43	.01	2.31	.01	1.92		1.39		1.13	
HE	2,168	10.22	.03	8.78	.02	7.26	.02	5.25	.01	4.01	.01
HEN	4,168	3.56	.01	5.45	.03	5.97	.03	3.89	.02	4.11	.02
HEZ	2,168	7.45	.02	0.48		0.17		0.15		0.48	
HENZ	4,168	0.26		0.95		0.95		1.23		0.49	
FE	2,168	11.11	.03	7.79	.02	8.72	.02	6.43	.01	2.09	
FEN	4,168	0.37		1.31		2.36		1.90		3.22	.01
FEZ	2,168	2.76		2.06		3.78	.01	1.78		1.89	
FENZ	4,168	0.88		0.46		1.02		0.47		1.13	
HFE	4,336	14.12	.03	20.84	.04	22.41	.05	21.55	.04	17.74	.03
HFEN	8,336	0.75		0.98		1.28		1.48		0.99	
HFEZ	4,336	3.67	.00	2.94	.00	2.64	.00	1.26		2.02	
HFENZ	8,336	1.69		3.72	.01	2.24	.00	2.15	.00	1.77	

Tabelle 10: Ergebnisse der ANOVA ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (3), ZIELREIZ (2), EMOTIONALITÄT (2), HEMISPHERE (3) und FRONTALITÄT (3) für gemittelte Amplituden in verschiedenen Zeitfenstern zwischen 1000 - 3500 ms nach Bilddarbietung. df = Freiheitsgrade; F_{emp} = empirischer F-Wert, fett gedruckt, wenn signifikant (p < .05); ω^2 = empirisches Effektgrößenmaß (nur für signifikante Ergebnisse berechnet).

Die Ergebnisse der ANOVA ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (2, 10, 60), ZIELREIZ (neutral, positiv), EMOTIONALITÄT (neutral, positiv), HEMISPHERE (rechts, Mitte, links) und FRONTALITÄT (frontal, zentral, parietal) ist für die fünf gemittelten Amplituden in **Tabelle 10** dargestellt.

Zunächst werden die topographischen Effekte betrachtet. Es finden sich signifikante Haupteffekte von FRONTALITÄT zwischen 1500 und 3500 ms (alle $\omega^2 \geq .06$; siehe **Tabelle 10**). Die Struktur dieser Haupteffekte ist gleich für die verschiedenen über 500 ms gemittelten Amplituden. Es zeigen sich positivere Amplituden an den frontalen und zentralen Elektrodenpositionen verglichen mit den parietalen Elektrodenpositionen (siehe **Abbildung 18**, Teil A).

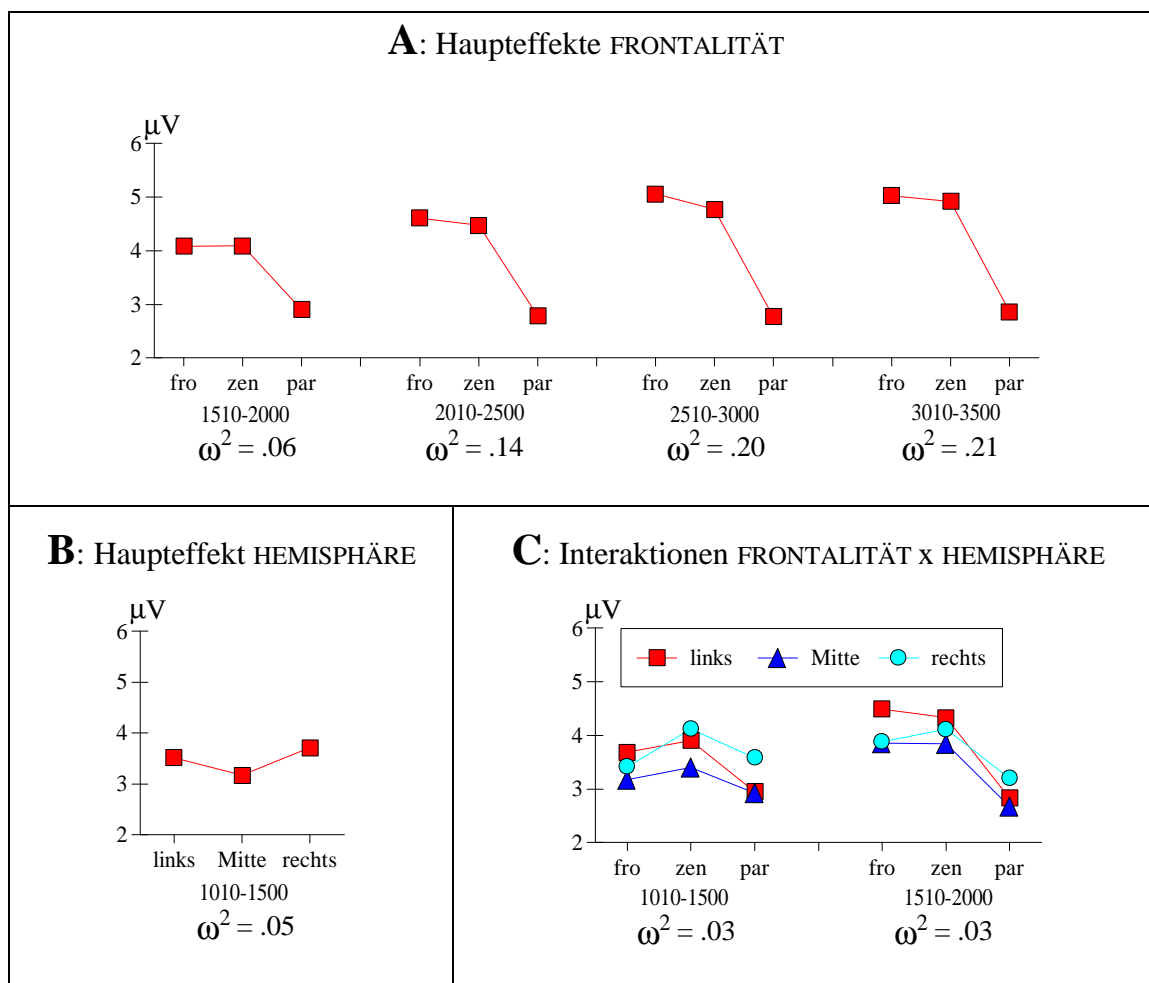


Abbildung 18: Haupteffekte FRONTALITÄT (Teil A) und HEMISPHÄRE (Teil B) sowie die Interaktionen FRONTALITÄT x HEMISPHÄRE (Teil C) der über 500 ms gemittelten Amplituden für entsprechende Zeitfenster. Die Zeitfenster und die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben (fro = frontal, zen = zentral und par = parietal).

Es gibt einen signifikanten Haupteffekt für Hemisphäre im Zeitbereich zwischen 1000 bis 1500 ms ($F(2,168) = 8.33$; $\omega^2 = .05$). Die Struktur dieses Haupteffekts ist durch größere Amplituden auf der rechten und linken Seite verglichen mit der Mitte gekennzeichnet (siehe **Abbildung 18**, Teil B). Ebenfalls finden sich signifikante Interaktionen zwischen FRONTALITÄT und HEMISPHÄRE (alle $\omega^2 = .03$; siehe **Tabelle 10**) für zwei Zeitfenster zwischen 1000 und 2000 ms, die in **Abbildung 18** (Teil C) dargestellt sind.

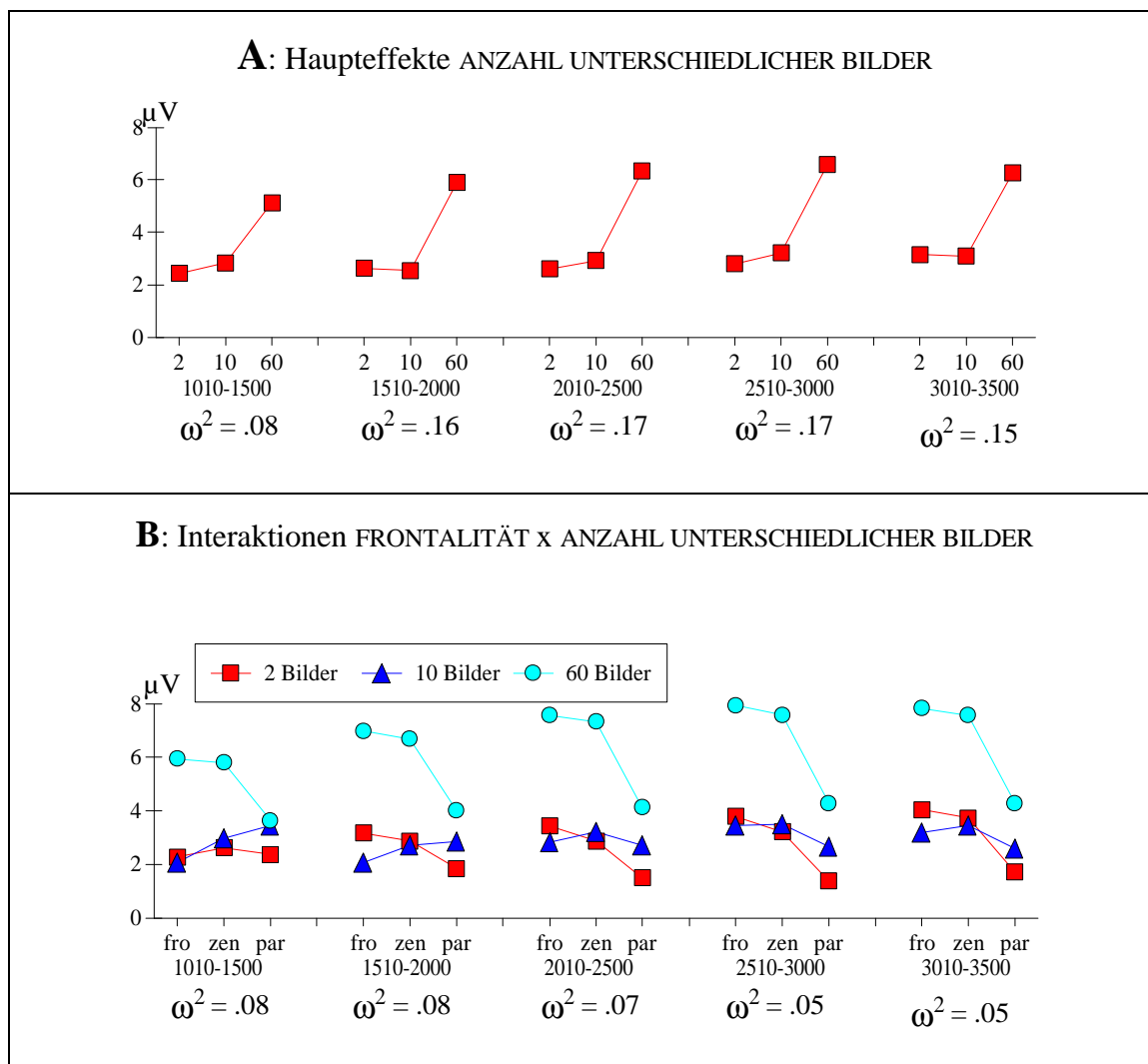


Abbildung 19: Haupteffekte ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (Teil A) und Interaktionen zwischen FRONTALITÄT x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (Teil B) der über 500 ms gemittelten Amplituden für fünf Zeitfenster. Die Zeitfenster und die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben (fro = frontal, zen = zentral und par = parietal).

Die wesentliche Hypothese wird bestätigt: Im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizdarbietung finden sich signifikante Interaktionen zwischen FRONTALITÄT und ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (siehe **Tabelle 10**). Außerdem finden sich Haupteffekte für ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER in allen über 500 ms gemittelten Amplituden zwischen 1000 und 3500 ms (alle ω^2 zwischen .08 und .17; siehe **Tabelle 10**). Die Struktur dieser Haupteffekte ist durch positivere Amplituden für 60 Bilder im Vergleich zu 2 und 10 Bildern, die ein ähnliches Amplitudenniveau aufweisen, gekennzeichnet (siehe **Abbildung 19**, Teil A). Die Interaktionen zwischen FRONTALITÄT und ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ist erwartungsgemäß über die fünf gemittelten Amplituden signifikant (alle ω^2 zwischen .05 und .08; siehe **Tabelle 10**). Die Struktur dieser Interaktionen entspricht den Erwartungen mit deutlich positiveren Amplituden an

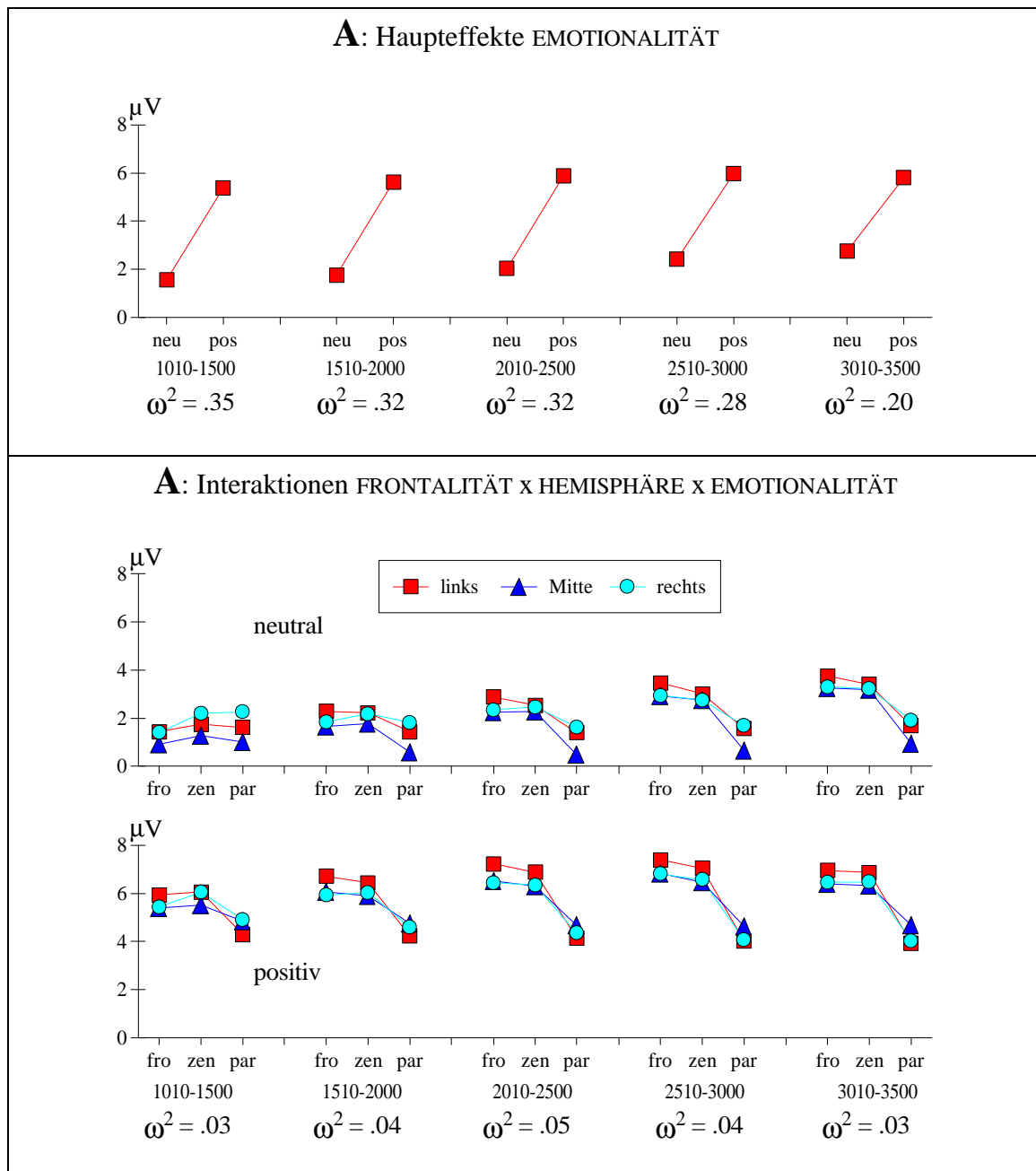


Abbildung 20: Haupteffekte EMOTIONALITÄT und Interaktionen zwischen FRONTALITÄT x HEMISPHÄRE x EMOTIONALITÄT der über 500 ms gemittelten Amplituden für fünf Zeitfenster. Die Zeitfenster und die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben (fro = frontal, zen = zentral und par = parietal).

den frontalen und zentralen Elektrodenpositionen im Vergleich zu den parietalen Elektrodenpositionen für 60 Bilder, während die Bedingung mit 10 und 2 Bildern ähnliche und niedrigere Amplitudenhöhen aufweisen. Zudem treten in den Bedingungen mit 2 und 10 Bildern weniger deutliche und weniger einheitliche Unterschiede zwischen den Elektrodenpositionen auf im Vergleich zur Bedingung mit 60 Bildern (siehe **Abbildung 19**, Teil B).

Für EMOTIONALITÄT finden sich die erwarteten Haupteffekte im Zeitbereich der fünf gemittelten Amplituden (alle ω^2 zwischen .20 und .35; siehe *Tabelle 10*) und signifikante Interaktionen zwischen EMOTIONALITÄT x FRONTALITÄT x HEMISPHERE über alle fünf gemittelten Amplituden (alle $\omega^2 \geq .03$; siehe *Tabelle 10*). Die Struktur der Haupteffekte ist in *Abbildung 20* (Teil A) dargestellt. Es zeigt sich, dass die positiven Bilder deutlich positivere Amplituden bedingen als die neutralen Bilder. Die Interaktion EMOTIONALITÄT x FRONTALITÄT x HEMISPHERE ist in *Abbildung 20* (Teil B) verdeutlicht: Die Interaktion entspricht im Wesentlichen dem Haupteffekt EMOTIONALITÄT mit positiveren Amplituden für positive Bilder im Vergleich zu neutralen Bildern. Zudem weisen die Amplituden auf die neutralen Bilder erst ab 1500 ms ein fronto-zentrales Maximum auf, während dies bei den positiven Bildern schon ab 1000 ms der Fall ist.

Obschon noch eine Reihe weiterer Interaktionen signifikant wurden (vergleiche *Tabelle 10*), sollen diese hier nicht weiter aufgeführt werden, da die Effektgrößen meist relativ klein sind beziehungsweise sich nicht über mehrere Zeitfenster erstrecken.

P3-Peak-Amplitude:

Die Ergebnisse der ANOVA ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (2, 10, 60), ZIELREIZ (neutral, positiv), EMOTIONALITÄT (neutral, positiv), HEMISPHERE (rechts, Mitte, links) und FRONTALITÄT (frontal, zentral, parietal) ist für die P3-Peak-Amplitude sowie deren Latenz in *Tabelle 11* dargestellt.

Quelle	df	<i>P3-Peak</i>		<i>P3-Latenz</i>	
		F_{emp}	ω^2	F_{emp}	ω^2
aNzahl unterschiedlicher bilder	2,84	6.29	.10	9.82	.16
Zielreiz	1,84	0.09		0.01	
NZ	2,84	3.23	.04	0.93	
Hemisphäre	2,168	55.61	.28	6.81	.04
HN	4,168	1.57		1.18	
HZ	2,168	0.98		0.39	
HNZ	4,168	0.94		0.92	
Frontalität	2,168	314.75	.69	14.67	.09
FN	4,168	6.71	.07	5.69	.06
FZ	2,168	1.65		2.03	
FNZ	4,168	0.15		1.61	
Emotionalität	1,84	122.06	.40	1.00	
EN	2,84	3.42	.02	0.03	
EZ	1,84	19.37	.09	7.41	.03
ENZ	2,84	2.24		5.86	.05
HF	4,336	53.92	.20	5.39	.02
HFN	8,336	3.98	.02	1.94	
HFZ	4,336	0.71		0.23	
HFNZ	8,336	1.58		0.42	
HE	2,168	10.55	.03	0.17	
HEN	4,168	1.48		2.91	.01
HEZ	2,168	0.58		2.05	
HENZ	4,168	1.02		0.23	
FE	2,168	3.82	.01	0.28	
FEN	4,168	6.59	.03	0.14	
FEZ	2,168	1.25		0.07	
FENZ	4,168	0.71		0.90	
HFE	4,336	8.21	.01	2.15	
HFEN	8,336	4.04	.01	0.61	
HFEZ	4,336	0.55		0.25	
HFENZ	8,336	1.41		1.94	

Tabelle 11: Ergebnisse der ANOVA ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (3), ZIELREIZ (2), EMOTIONALITÄT (2), HEMISPHERE (3) und FRONTALITÄT (3) für die P3-Peak-Amplitude und deren Latenz. df = Freiheitsgrade. F_{emp} = empirischer F-Wert, fett gedruckt, wenn signifikant ($p < .05$); ω^2 = empirisches Effektgrößenmaß (nur für signifikante Ergebnisse berechnet).

Für den P3-Peak gibt es zunächst einen Haupteffekt von HEMISPHERE ($F(2,168) = 55.61$; $\omega^2 = .28$) und FRONTALITÄT ($F(2,168) = 314.75$; $\omega^2 = .69$) sowie eine Interaktion von FRONTALITÄT x HEMISPHERE ($F(4,336) = 53.92$; $\omega^2 = .20$). Der Haupteffekt

FRONTALITÄT ist in **Abbildung 21** (Teil A) dargestellt und entspricht der üblichen Topographie der P3 mit parietal > zentral > frontal. Der Haupteffekt HEMISPHÄRE (siehe **Abbildung 21**, Teil B) entspricht ebenfalls der üblichen P3-Topographie mit Mitte > rechts = links. Bei der Interaktion zwischen FRONTALITÄT und HEMISPHÄRE (vergleiche **Abbildung 21**, Teil C) ist die P3-Amplitude an den parietalen Elektrodenpositionen in der Mitte und rechts im Vergleich zu links leicht erhöht.

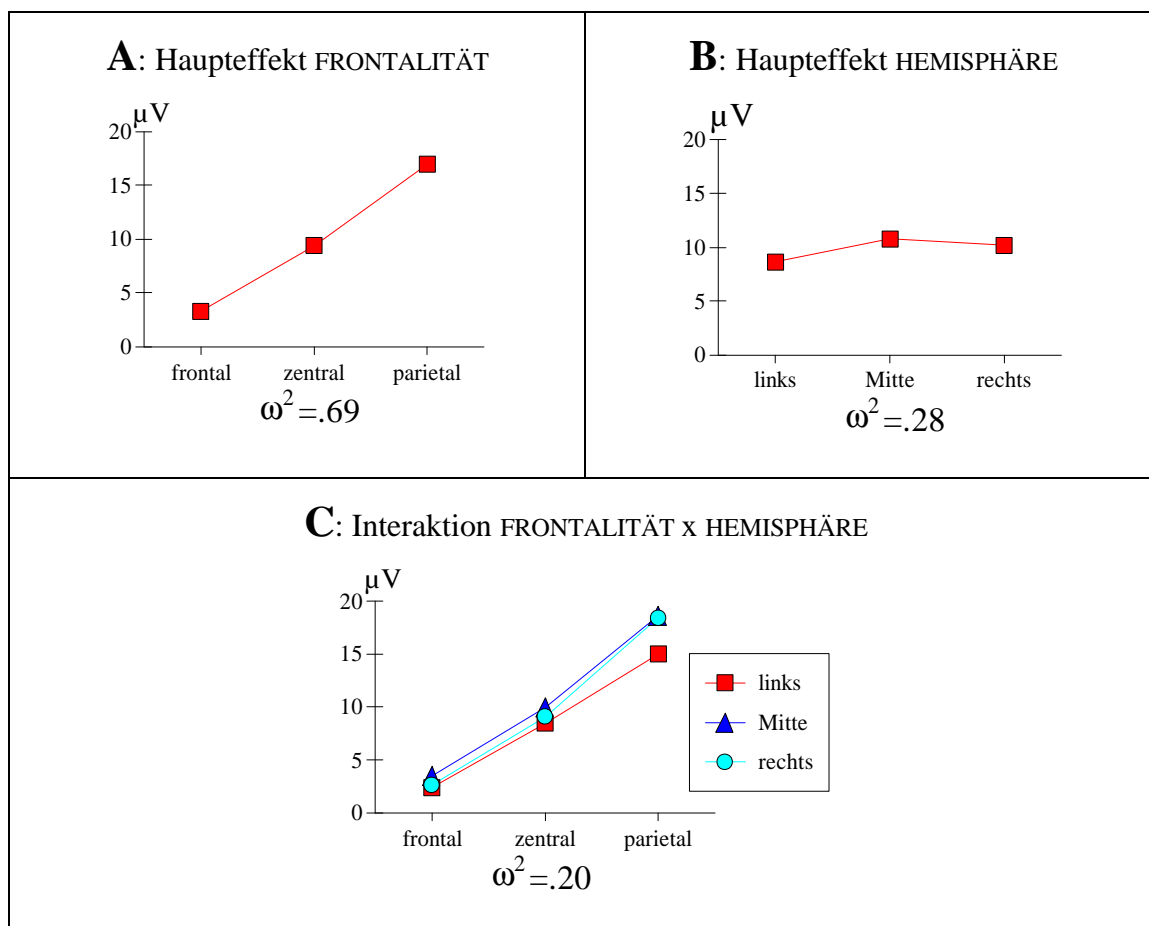


Abbildung 21: Haupteffekt FRONTALITÄT (Teil A), Haupteffekt HEMISPHÄRE (Teil B) und Interaktion FRONTALITÄT x HEMISPHÄRE (Teil C) des P3-Peaks. Die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben.

Zusätzlich gibt es einen Haupteffekt von ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ($F(2,84) = 6.29$; $\omega^2 = .10$), eine Interaktion zwischen FRONTALITÄT x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ($F(4,168) = 6.71$; $\omega^2 = .07$) und eine Interaktion zwischen ZIELREIZ x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ($F(2,84) = 3.23$; $\omega^2 = .04$). Der Haupteffekt ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ist in **Abbildung 22** (Teil A) dargestellt. Es zeigt sich, dass die P3-Amplitude für 2 Bilder positiver als für 10 Bilder ist und die P3-Amplitude für 10 Bilder positiver als für 60 Bilder ist. Die Interaktion von

ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER und FRONTALITÄT weist nur zentral die Struktur 2 Bilder > 10 Bilder > 60 Bilder auf. An den parietalen Elektrodenpositionen ist die P3-Amplitude für 2 Bilder = 10 Bilder > 60 Bilder und an den frontalen Elektrodenpositionen ist die P3-Amplitude für 2 Bilder > 10 Bilder = 60 Bilder (siehe **Abbildung 22**, Teil B). Die Interaktion zwischen ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER und ZIELREIZ ist in **Abbildung 22** (Teil C) dargestellt.

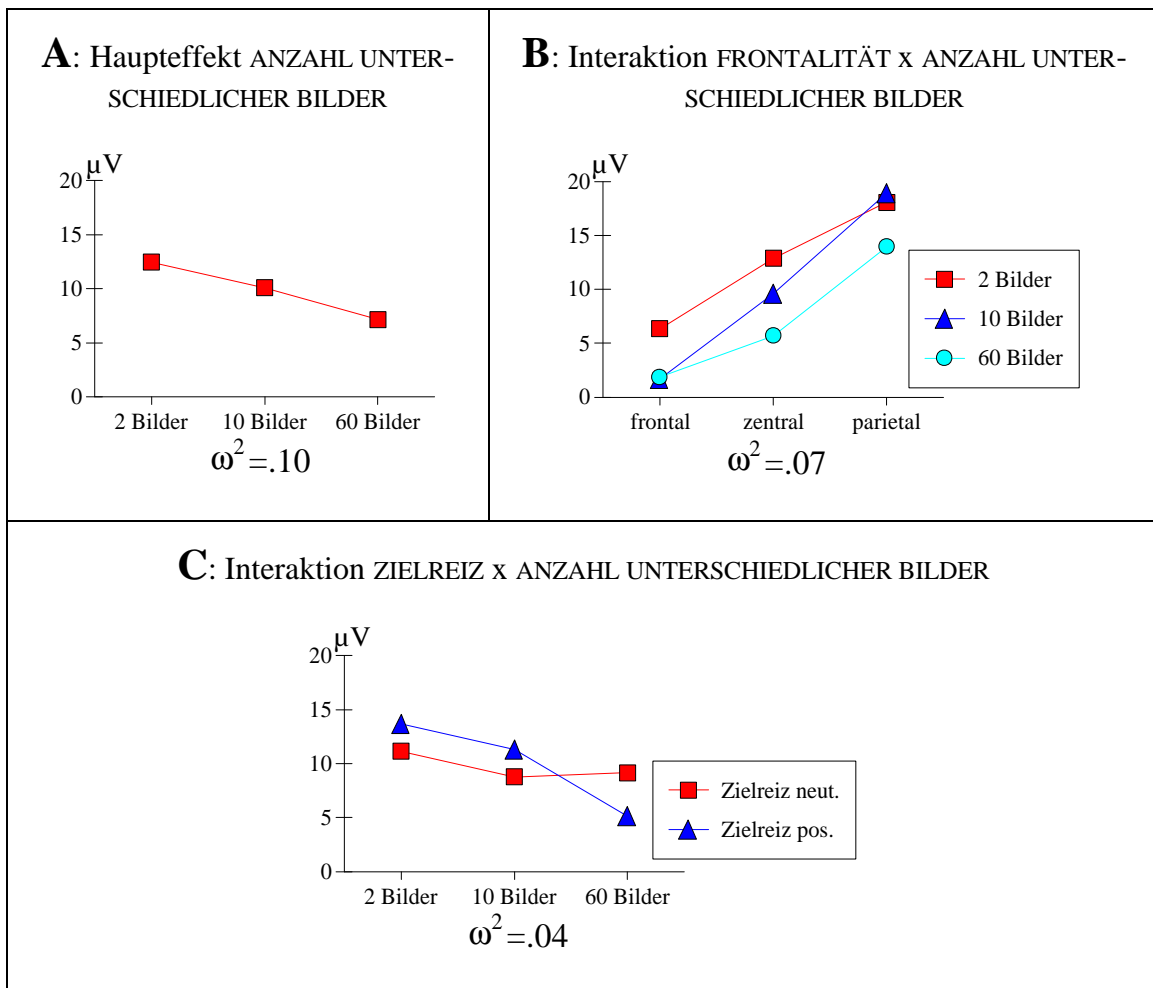


Abbildung 22: Haupteffekt ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (Teil A) und Interaktion FRONTALITÄT x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (Teil B), Interaktion ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER x ZIELREIZ (Teil C) des P3-Peaks. Die Effektgrößen ω^2 sind jeweils angegeben.

Der Haupteffekt von ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER stimmt mit der Struktur 2 Bilder größere P3-Amplitude als 10 Bilder und 10 Bilder größere P3-Amplitude als 60 Bilder nur für die positive Zielreize überein. Bei den neutralen Zielreizen ist die P3-Amplitude für 2 Bilder größer als für 10 Bilder und 60 Bilder, die annähernd gleiche Amplitudenhöhen aufweisen.

Für die P3-Amplitude findet sich ein Haupteffekt von EMOTIONALITÄT ($F(1,84) = 122.0$; $\omega^2 = .40$). Auf positive Bilder wird die P3-Amplitude positiver als auf neutrale Bilder (siehe **Abbildung 23**, Teil A). Es finden sich weitere Interaktionen mit EMOTIONALITÄT. Zunächst gibt es eine Interaktion zwischen EMOTIONALITÄT und ZIELREIZ ($F(1,84) = 19.37$; $\omega^2 = .09$) mit deutlich erhöhter P3-Amplitude für positive Bilder im Vergleich zu neutralen Bildern, wenn die positiven Bilder zugleich Zielreiz waren. Waren die neutralen Bilder Zielreiz, weist die P3-Amplitude auf neutrale und positive Bilder annähernd gleiche Höhen auf (siehe **Abbildung 23**, Teil B).

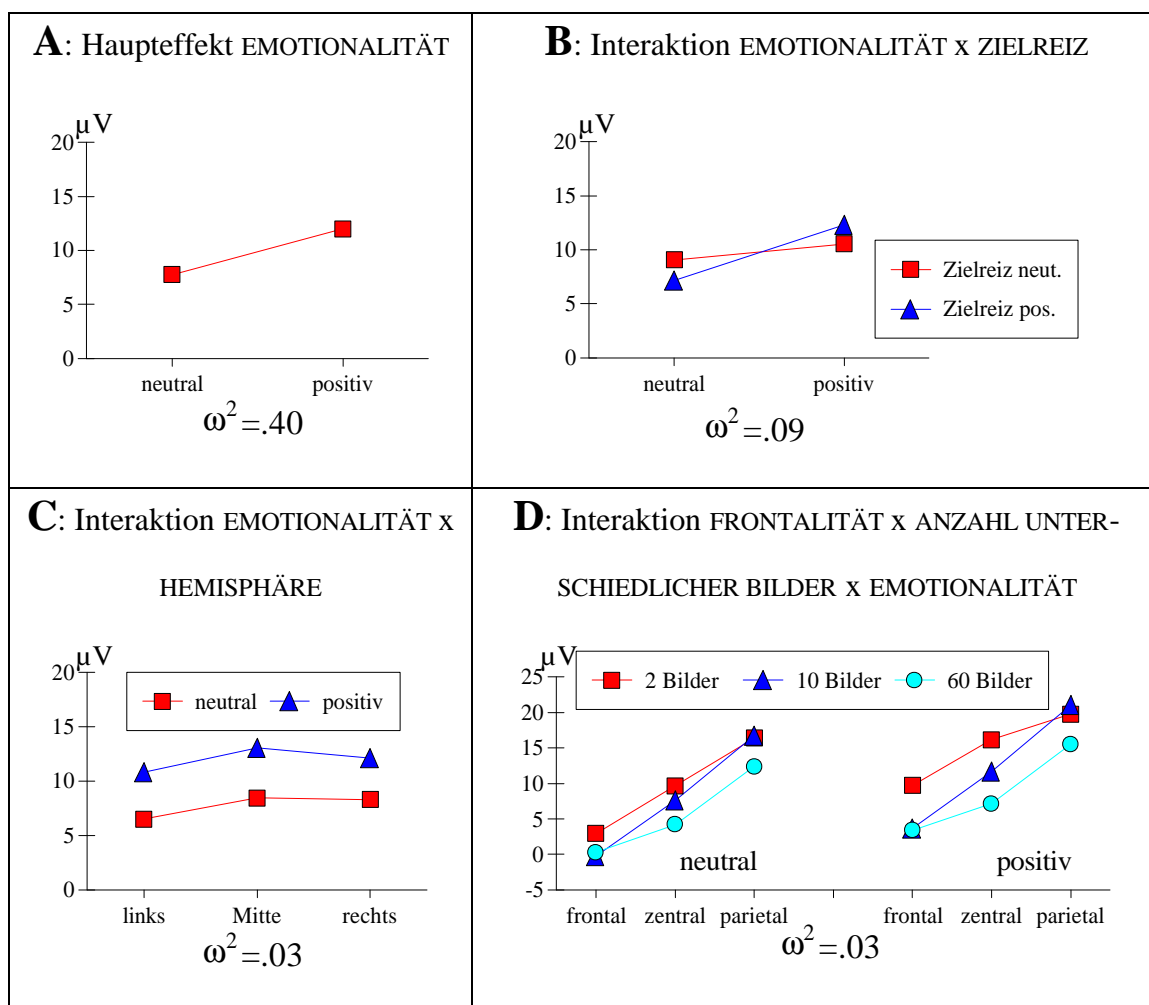


Abbildung 23: Haupteffekt EMOTIONALITÄT (Teil A), Interaktion EMOTIONALITÄT x ZIELREIZ (Teil B), Interaktion EMOTIONALITÄT x HEMISPHÄRE (Teil C) und Interaktion FRONTALITÄT x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER x EMOTIONALITÄT (Teil D) des P3-Peaks. Die Effektgrößen ω^2 sind angegeben.

Es findet sich auch eine Interaktion zwischen EMOTIONALITÄT und HEMISPHÄRE ($F(2,168) = 10.55$; $\omega^2 = .03$), die im Wesentlichen durch den Haupteffekt von EMOTIONALITÄT bestimmt wird, mit positiveren P3-Amplituden auf positive im Vergleich zu neutralen

Bildern (siehe **Abbildung 23**, Teil C). Außerdem tritt eine dreifache Interaktion zwischen EMOTIONALITÄT x FRONTALITÄT x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ($F(4,168) = 6.59$; $\omega^2 = .03$) auf. In **Abbildung 23** (Teil D) ist zu erkennen, dass sich diese Interaktion grundsätzlich ebenfalls dadurch auszeichnet, dass positive Bilder positivere P3-Amplituden als neutrale Bilder hervorrufen und ansonsten der Struktur der Interaktion zwischen FRONTALITÄT und ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER (vergleiche **Abbildung 22**, Teil B) entsprechen.

P3-Latenz: Für die P3-Latenz findet sich ein Haupteffekt FRONTALITÄT ($F(2,168) = 14.67$; $\omega^2 = .09$) mit folgenden Latenzwerten frontal 457.35 ms, zentral 458.48 ms und parietal 450.44 ms und ein Haupteffekt HEMISPHERE ($F(2,168) = 6.81$; $\omega^2 = .04$) mit folgenden Latenzwerten links 456.11 ms, Mitte 456.26 ms und rechts 453.91 ms. Zudem findet sich ein Haupteffekt ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ($F(2,84) = 9.82$; $\omega^2 = .16$) mit den folgenden Latenzwerten 2 Bilder 438.48 ms, 10 Bilder 489.93 ms und 60 Bilder 437.87 ms. Die P3 gipfelt also bei 2 und 60 Bildern früher als bei 10 Bildern.

Zudem findet sich eine Interaktion zwischen FRONTALITÄT und ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER ($F(4,168) = 5.69$; $\omega^2 = .06$), wobei sich die in **Tabelle 12** aufgelisteten Latenzwerte ergaben. Diese Interaktion wird wesentlich durch den Haupteffekt Bilder bestimmt. So zeigen sich für 2 und 60 Bilder annähernd die gleichen Latenzwerte, während für 10 Bilder spätere Latenzwerte auftreten.

	2 Bilder	10 Bilder	60 Bilder
frontal	438.56	496.56	436.94
zentral	440.67	494.17	440.61
parietal	436.22	479.96	436.06

Tabelle 12: P3-Latenzwerte für die Interaktion zwischen FRONTALITÄT und ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER.

Eine weitere Interaktion ergab sich für EMOTIONALITÄT x ZIELREIZ ($F(1,84) = 7.41$; $\omega^2 = .03$) mit den folgenden Latenzwerten neutrale Bilder - Zielreiz neutral 459.32 ms und Zielreiz positiv 462.63 ms, positive Bilder - Zielreiz neutral 460.02 ms und Zielreiz positiv 451.97 ms. Diese Interaktion wird weiter qualifiziert durch eine dreifache Interaktion zwischen EMOTIONALITÄT x ZIELREIZ x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER

($F(2,84) = 5.86$; $\omega^2 = .05$). Die Latenzwerte für diese Interaktion sind in **Tabelle 13** aufgeführt.

		2 Bilder	10 Bilder	60 Bilder
neutral	neutraler Zielr.	437.88	484.74	455.33
	positiver Zielr.	448.30	482.30	457.28
positiv	neutraler Zielr.	463.80	478.12	438.12
	positiver Zielr.	423.38	476.49	456.02

Tabelle 13: P3-Latenzwerte für die Interaktion zwischen EMOTIONLITÄT x ZIELREIZ x ANZAHL UNTERSCHIEDLICHER BILDER.

5.5 Diskussion

Die Ergebnisse werden gemäß der in Abschnitt 5.2 formulierten Hypothesen diskutiert. Zunächst wird dabei auf die Ergebnisse zur langsamen Welle zwischen 1000 und 3500 ms fokussiert, wobei es erstens um den Einfluss der Menge an Informationsverarbeitung und zweitens um den Einfluss der Emotionalität auf die langsame Welle geht. Die Ergebnisse, die sich im Zusammenhang mit experimentellen Variationen auf die P3 ergaben, werden erst anschließend besprochen.

5.5.1 Gemittelte Amplituden im Zeitbereich von 1000 bis 3500 ms

Durch die Variation der Menge an Informationsverarbeitung, die über die unterschiedliche Anzahl von Bildern operationalisiert wurde, welche in einer visuellen Oddball-Aufgabe kategorisiert werden mussten, sollten systematische Einflüsse an den frontalen Elektrodenpositionen bedingt werden. Dabei sollte die Bedingung mit 2 unterschiedlichen Bildern keine frontal positive langsame Welle im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms hervorrufen. Denn bei 2 unterschiedlichen Bildern reicht ein Wiedererkennen auf rein perzeptueller Ebene aus, um die Kategorisierungsaufgabe im Oddball zu erfüllen. Die Bedingung mit 60 unterschiedlichen Bildern sollte eine frontal positive Welle im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms hervorrufen, denn bei 60 unterschiedlichen Bildern muss jedes Bild inhaltlich neu analysiert werden, um die in der Oddball-Aufgabe geforderte Kategorisierung zu leisten. Die langsame Welle im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms für 10 unterschiedliche Bilder sollte zwischen den Bedingungen mit 60 und mit 2 unterschiedlichen Bildern liegen, da hier sowohl perzeptuelle Wiedererkennensprozesse als auch inhaltliche Analyseprozesse wirken.

Die Ergebnisse bestätigen diese Annahmen relativ deutlich (vergleiche auch **Abbildung 17a, b** und **c**). Für die Bedingung mit 60 unterschiedlichen Bildern findet sich ab 1000 ms bis 3500 ms ein fronto-zentrales Amplitudenmaximum. Die Bedingung mit nur 2 unterschiedlichen Bildern weist zwar ab 1500 ms bis 3500 ms ebenfalls ein fronto-zentrales Maximum auf, dieses ist jedoch mit durchschnittlich 3 bis 4 μV kleineren Amplituden wesentlich weniger positiv als der Verlauf des EKPs bei 60 unterschiedlichen Bildern. Die Bedingung mit 10 unterschiedlichen Bildern weist von den absoluten Amplitudenwerten ähnliche Größen auf wie die Bedingung mit 2 unterschiedlichen Bildern, jedoch werden die Amplituden erst ab 2500 ms bis 3500 ms frontal positiver als

zentral und parietal. Alle weiteren Interaktionen höherer Ordnung, an denen die Anzahl unterschiedlicher Bilder beteiligt waren, wiesen entweder sehr kleine Effektgrößen auf oder erstreckten sich nur über ein Zeitfenster. Sie werden daher hier nicht weiter diskutiert.

Insgesamt gesehen entsprechen also die Verläufe der gemittelten Amplituden im Zeitbereich zwischen 1000 ms und 3500 ms nach Darbietung der 60 Bilder des IAPS und nach Darbietung der 2 Bilder des IAPS völlig den Erwartungen. Für den Verlauf des EKPs nach Darbietung der 10 Bilder des IAPS wurde angenommen, dass er zwischen denen der 60 und der 2 Bilder liegen müsste. Denn in dieser Bedingung sollten sowohl inhaltliche Analyseprozesse stattfinden, wie es bei den 60 unterschiedlichen Bildern der Fall ist, als auch perzeptuelle Wiedererkennensprozesse eine Rolle spielen, wie in der Bedingung mit 2 unterschiedlichen, aber wiederholt dargebotenen Bildern. Die Bedingung mit 10 Bildern, die 6-mal dargeboten wurden, entspricht vom Verlauf und der absoluten Amplitudenhöhe wesentlich eher der Bedingung mit nur 2 Bildern als der Bedingung mit 60 Bildern. Daher lässt sich behaupten, dass selbst bei der Darbietung von 10 Bildern, die jeweils 6-mal dargeboten werden, die perzeptuellen Wiedererkennensprozesse im Vergleich zu den inhaltlichen Analyseprozessen so überwiegen, dass weniger positive Amplituden an zentralen und frontalen Elektrodenpositionen entstehen.

Bezüglich der allgemeinen Topographie zeigt diese Studie, dass die langsame Welle im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms kein deutliches frontales Maximum aufweist, sondern an frontalen und zentralen Elektrodenpositionen ähnliche hohe Amplituden auftreten. Daher wird im Folgenden von einer fronto-zentralen positiven langsamen Welle gesprochen. Abschließend lässt sich festhalten, dass sich durch die Darbietung von unterschiedlichen Bildern des IAPS im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms eine fronto-zentrale positive langsame Welle ausbildet. Die wiederholte Darbietung von Bildern kann diese Komponente nicht hervorrufen. Somit sprechen die Ergebnisse dieses Experiments dafür, dass die Menge an Informationsverarbeitung bei der Darbietung von visuellen Reizen, hier Bildern, eine entscheidende Variable für die Auslösung der Komponente ist. Nur wenn unterschiedliche Bilder inhaltlich analysiert werden müssen, tritt diese Komponente auf. Wiederholt dargebotene Bilder, die auf rein perzeptuellem Niveau diskriminiert werden können, lösen keine entsprechende Komponente aus.

Die Variation von emotionaler Valenz der Bilder stand in diesem Experiment nicht im Zentrum des Interesses, da sie ursprünglich nur dazu diente, eine eindeutige Kategorisierung der Bilder in der Oddball Aufgabe zu ermöglichen. Da die Variation der emotionalen Valenz in diesem Experiment zu sehr großen Effekten führte, sollen diese hier ebenfalls diskutiert werden.

Im Bereich der langsamen Welle zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizdarbietung wurden aufgrund früherer Befunde ein Haupteffekt Emotionalität mit größeren Amplituden für die positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern erwartet. Dieser Haupteffekt kann sowohl durch die höheren Arousal-Werte der positiven im Vergleich zu den neutralen Bildern bedingt sein als auch durch die emotionale Valenz. Diese Hypothese bestätigte sich (siehe *Abbildung 17a, b* und *c*). Im gesamten Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms nach Reizdarbietung weisen die gemittelten Amplituden auf die positiven Bilder des IAPS deutlich positivere Amplituden auf als auf die neutralen Bilder des IAPS. Diese Haupteffekte haben zudem die größten Effektgrößen der gesamten Varianzanalyse. Wie schon in der Hypothese dargelegt, kann dieser Effekt entweder durch die erhöhte Valenz oder durch das erhöhte Arousal der Bilder bedingt sein. Die bisherigen Ergebnisse, die Abschnitt 5.1 erörterte, legen jedoch den Schluss nahe, dass die fronto-zentral positive langsame Welle eher durch Variationen des Arousals beeinflusst wird, zumal in einigen der Studien mit Bildern des IAPS überhaupt keine Variationen der Valenz auf die frontal positive langsame Welle nachweisbar waren (z.B. Maier et al., 1996). Ein kritischer Aspekt ist allerdings, dass in diesen Studien in der Regel das Arousal der Bilder nicht kontrolliert wurde.

Eine endgültige Entscheidung darüber, ob die Einflüsse auf die langsame Welle eher durch das Arousal oder die Valenz der Bilder bedingt werden, setzt eine orthogonale Variation der beiden Faktoren innerhalb eines Experiments voraus. Das IAPS wird als eine Sammlung von Bildern beschrieben, in der die Bilder aufgrund ihrer Valenz- und Arousal-Werte in einem zweidimensionalen Raum angeordnet sind (unter anderem Greenwald, Cook & Lang, 1989). Dies legt nahe, dass eine Bilderauswahl möglich ist, die eine orthogonale Variation von Valenz und Arousal erlaubt. Diese Selektion von unterschiedlichen Bildern des IAPS, die den Anforderungen entsprochen hätte, ist bislang nicht gelungen. Es zeigt sich, dass keine hoch erregenden Bilder vorliegen, die zugleich eine neutrale Valenz aufweisen und ebenfalls keine niedrig erregenden Bilder mit

zugleich positiver und/oder negativer Valenz. Werden für ein Experiment verschiedene Bilder benötigt, kann eine orthogonale Variation von Valenz und Arousal nicht gelingen.

Einige Hinweise legen den Schluss nahe, dass die Arousaldimension bei den Bildern des IAPS möglicherweise kortikal einflussreicher ist als die Valenzdimension: In einer Studie von Bradley, Greenwald, Petry und Lang (1992) zeigten die Daten sowohl eines unmittelbaren als auch eines verzögerten Reproduktionsverfahrens (Free recall) ein Jahr später, dass die Gedächtnisleistungen für Bilder, die als hoch erregend eingestuft wurde, besser sind im Vergleich zu Bildern, die als niedrig erregend eingestuft wurden. Dieser Effekt trat unabhängig von der emotionalen Valenz auf. Möglicherweise können ältere Befunde (z.B. Christianson, 1986) und auch der 'common sense', dass negative und positive Ereignisse sich besser in das Gedächtnis einprägen, durch den höheren Arousalgehalt dieser Ereignisse zustande gekommen sein. Dieser wurde in der Regel gleichzeitig nicht kontrolliert.

Die Befunde, nach denen Bilder mit hohem Arousalgehalt ebenfalls größere Hautleitfähigkeitsreaktionen, angemessene elektromuskuläre Reaktionen der Gesichtsmuskulatur, ansteigende kardiovaskuläre Aktivität hervorrufen und als interessanter eingeschätzt werden im Vergleich zu den als ruhig eingeschätzten Bildern (Greenwald et al., 1989; Bradley, Cuthbert & Lang, 1990) sprechen ebenfalls dafür, dass es physiologisch sinnvoll ist, dass auch die kortikalen Reaktionen auf die erregenden Bilder höher ausfallen.

5.5.2 P3-Amplitude

Die Topographie der P3-Amplitude entspricht im Wesentlichen den Erwartungen bei einer Oddball-Aufgabe mit einer Zielreizwahrscheinlichkeit von $p = .50$. Für Ziel- und Nicht-Zielreize zeigen sich größere P3-Amplituden an den parietalen als an den zentralen, die wiederum größer als an den frontalen Elektrodenpositionen sind. Ebenfalls ist die P3 in der Mitte etwas höher im Vergleich zur rechten und linken Seite.

Für die P3-Amplitude wurde ein Haupteffekt Emotionalität mit positiveren Amplituden für die positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern erwartet. Diese Annahme wurde deutlich bestätigt. Die positiven Bilder rufen eine deutlich positivere P3-Amplitude hervor als die neutralen Bilder. Dieser Effekt wird leicht modifiziert durch eine Interaktion mit Hemisphäre. Dabei sind die Unterschiede zwischen neutralen und

positiven Bildern auf der rechten Seite etwas geringer als auf der linken Seite und in der Mitte. Zudem zeigte sich eine Interaktion zwischen Zielreiz und Emotionalität, in der Form, dass die positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern deutlich erhöhte P3-Amplituden aufweisen, wenn die positiven Bilder zugleich Zielreiz waren. Waren die neutralen Bilder Zielreiz, ist die P3-Amplitude auf die neutralen und die positiven Bilder annähernd gleich hoch.

Wie auch in anderen Studien (z.B. Johnston et al., 1986; Johnston & Wang, 1991) zeigen sich also an den parietalen Elektrodenpositionen im P3-Bereich größere positive Reaktionen. Diese Daten entsprechen den Befunden, dass eine parietal ausgeprägte P3 mit einer PeakLatenz von über 300 ms, die auch als P3b bezeichnet wird (vergleiche Abschnitt 3.4.2), als Reaktion auf Reize gesehen wird, denen Probanden aufmerksam gegenüber sind (Squires, Squires & Hillyard, 1975b). Diese Ansicht wird durch Daten gestützt, wonach der hintere parietale Kortex visuelle Aufmerksamkeit als ein Teil eines Netzwerks, das das Pulvinar und den Colliculi superiores einschließt, vermittelt (z.B. Posner, 1993).

Ein Effekt der Emotionalität der Bilder wurde für die P3-Amplitude gefunden, die in diesem Experiment eine durchschnittliche Latenz von 455 ms aufwies. Dieser Effekt kann aber wie schon bei der langsamen Welle sowohl durch die Valenz als auch das Arousal der Bilder hervorgerufen werden. Auch für den P3-Bereich gibt es Befunde, dass die erhöhte P3 durch die höheren Arousal-Werte bedingt ist (unter anderem Mini et al., 1996). Die P3 wurde auch mit der Speicherung und dem 'updating' relevanter Reize assoziiert (Donchin & Coles, 1988a). Es konnte außerdem gezeigt werden, dass kortikale Positivität kortikale Disfaszilitation reflektiert (siehe Birbaumer et al., 1990). Rockstroh, Müller, Cohen und Elbert (1992) schlugen vor, dass während der Gedächtnisspeicherung, Aktivität in die beteiligten cerebralen Kreisen zurückstrahlt oder widerhallt, während die Mehrheit der Zellen, die nicht für diesen 'updating' Prozess relevant sind, kortikale Positivität produzieren. Anders ausgedrückt, während die Anzahl von unverbundenen deaktivierten Netzwerken ansteigt, einem Prozess also, der mit höherer kortikaler Positivität assoziiert wird, könnte sich der gedächtnisabhängige 'updating' Prozess verbessern. Entsprechend haben eine Reihe von Studien gezeigt, dass die P3 oder andere spätere Komponenten mit nachfolgender Gedächtnisleistung variieren (unter anderem Paller et al., 1987). Zudem zeigte sich, dass EKPs auf nachfolgend

erinnerte oder wiedererkannte Reize positiver sind als die auf vergessene Reize. Somit könnte der Einfluss des emotionalen Arousal auf die P3-Komponente eine tiefere kognitive Verarbeitung der erregenden als der weniger erregenden Bilder bedeuten.

Für die Anzahl unterschiedlicher Bilder wurde im Hinblick auf die P3-Amplitude keine Hypothese aufgestellt. 2 unterschiedliche Bilder rufen jedoch positivere P3-Amplituden hervor als 10 unterschiedliche Bilder, die wiederum positivere P3-Amplituden bedingen als 60 unterschiedliche Bilder. Die Interaktion mit Frontalität verdeutlicht, dass dieser Effekt nur an den zentralen Elektrodenpositionen auftrat. An den parietalen Elektrodenpositionen ist die P3-Amplitude für 2 Bilder und 10 Bilder gleich groß und beide Amplituden sind größer als für 60 Bilder. An den frontalen Elektrodenpositionen ist die P3-Amplitude für 2 Bilder größer als für 10 Bilder und für 60 Bilder, die beide gleich groß sind. Insgesamt lässt sich dies mit Einschränkungen in die obige Interpretation integrieren. Denn 2 Bilder, die 30-mal dargeboten werden, werden sicher kognitiv tiefer oder besser verarbeitet, als 10 Bilder, die jeweils 6-mal dargeboten werden oder 60 Bilder, die jeweils nur einmal dargeboten werden. Dabei ist es überraschend, dass die P3-Latenz außer mit den Topographiefaktoren nur mit dem Faktor Anzahl unterschiedliche Bilder variierte. Die P3-Amplitude auf die 10 Bilder gipfelt 50 ms später als die P3 auf die 2 und die 60 Bilder. Da die Latenz der P3 als Messung der Reizbeurteilungszeit angesehen wird (siehe auch Abschnitt 3.4.2), hätte erwartet werden können, dass die P3 auf die 2 Bilder früher gipfelt als auf die 10 Bilder und die P3 auf die 10 Bilder wiederum früher als auf die 60 Bilder.

5.5.3 Abschließende Diskussion von Experiment 2

Für die Ergebnisse des zweiten Experiments lassen sich zwei wesentliche Aspekte herausstellen. Erstens die Einflüsse der Anzahl unterschiedlicher Bilder und zweitens die Einflüsse der Emotionalität der Bilder auf die EKPs.

Zunächst sollte gezeigt werden, dass eine frontal positive langsame Welle in EKP im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms nur dann entsteht, wenn unterschiedliche Bilder dargeboten werden, nicht aber, wenn dieselben Bilder wiederholt dargeboten werden. Diese Annahme konnte im Experiment deutlich bestätigt werden, wobei sich jedoch eine positive langsame Welle ausbildete, die über den frontalen und zentralen Elektrodenpositionen etwa gleich groß war. Diese fronto-zentral positive langsame Welle

scheint eine Folge der vermehrt notwendigen inhaltlichen Verarbeitungsprozesse zu sein, die zur Bearbeitung der Aufgabe notwendig sind, wenn unterschiedliche Bilder dargeboten werden, nicht aber wenn wenige Bilder wiederholt dargeboten werden. Dass diese späte Komponente nicht einfach eine Fortführung der Aktivität der P3 ist, zeigt sich daran, dass die Variation der unterschiedlichen Anzahl der Bilder auf die P3 und die späte langsame Welle zu umgekehrten Effekten führt. Die P3 ist für 2 Bilder positiver als für 10 Bilder und 60 Bilder und weist ein parietales Maximum auf, während die langsame Welle im Zeitbereich zwischen 1000 bis 3500 ms für 60 Bildern positiver als für 2 Bilder und für 10 Bilder ist und ein fronto-zentrales Maximum aufweist. Dieses Ergebnis passt zu den dargelegten Interpretationen (vergleiche Abschnitt 5.5.1 und 5.5.2), dass die P3 auf 2 Bilder positiver wird, da sie ein Index für die Tiefe der Verarbeitung ist, während die fronto-zentral positive langsame Welle bei 60 Bildern positiver ist, da sie die vermehrt notwendigen inhaltlichen Verarbeitungsprozesse reflektiert.

Die ursprüngliche Fragestellung des Experiments wäre ebenfalls mit einer anderen inhaltlichen Kategorisierungsaufgabe für den Oddball beantwortbar gewesen. Abschnitt 5.1 legte die Gründe dar, warum die emotionale Valenz als Kategorisierungsmerkmal ausgewählt wurde. Interessanterweise zeigten sich in diesem Experiment, in dem die Emotionalität der Bilder eigentlich nur eine untergeordnete Rolle spielt, in den EKPs auf die positiven Bilder des IAPS durchgehend positivere Amplituden als auf die neutralen Bilder. Dieser Effekt findet sich in der gleichen Art und Weise bei der P3-Amplitude und der fronto-zentral positiven langsamen Welle im Zeitbereich zwischen 1000 bis 3500 ms. Wie in den vorhergehenden Abschnitten 5.5.1 und 5.5.2 dargelegt, gibt es einige gute Gründe anzunehmen, dass dieser Effekt sowohl bei der P3-Amplitude als auch bei der fronto-zentral positiven langsamen Welle durch den höheren Arousalgehalt der positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern zustande kommt. Ein dringendes Anliegen zukünftiger Forschung ist die Klärung der Frage, ob die kortikalen Effekte der emotionalen Bilder durch die Arousaldimension oder die Valenzdimension bedingt werden. Wie schon dargelegt, setzt ein derartiges Experiment die orthogonale Variation der Bildreize voraus, was mit dem verfügbaren Bildmaterial nicht gelingen kann, wenn Bilder nicht wiederholt dargeboten werden sollen.

6 Zusammenfassung und Bewertung

Im Rahmen mehrere Experimente in Trier konnte im Zusammenhang mit der Darbietung von Bildern des IAPS eine frontal positive langsame Welle im EKP ca. 700 ms bis zu einer Dauer von 6 Sekunden nach Bilddarbietung ausgelöst werden. Es zeigte sich, dass weder der emotionale Gehalt der Bilder noch emotions-fokussierte Verarbeitung notwendige Voraussetzungen für die Auslösung dieser Komponente waren. Daher wurden theoretische Konzeptionen aufgegeben, die davon ausgingen, dass die frontal positive langsame Welle ein Index affektiver im Gegensatz zu kognitiver Informationsverarbeitung sei. Die funktionale Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle stand somit erneut zur Disposition.

Die berichteten Experimente zielten darauf ab, zwei Hypothesen zur frontal positiven langsamen Welle zu klären. Das erste Experiment sollte eine Störhypothese ausschließen, nach der die frontal positive langsame Welle ein Artefakt von Augenbewegungen bei der Betrachtung visueller Reize ist. Dazu wurde eine neues Paradigma entwickelt, das die systematische Variation von Augenbewegung bei der Betrachtung visueller Reize ermöglichen sollte. Es sollte überprüft werden, ob die EKPs nach der Anwendung einer Korrektur für Augenartefakte bei viel und wenig Augenbewegung Unterschiede aufwiesen, insbesondere sollte keine frontal positive langsame Welle als Ergebnis von viel Augenbewegung auftreten. Es zeigte sich, dass die intendierte Variation von Augenbewegung nicht gelungen ist. Veränderungen am Paradigma konnten jedoch nicht mehr vorgenommen werden. Dennoch fanden sich zwei experimentelle Gruppen, die sich hinsichtlich ihres Ausmaßes an Augenbewegung unterschieden, so dass die ursprüngliche Fragestellung mit Einschränkungen überprüft werden konnte. Dabei zeigten sich in der Gruppe mit mehr Augenbewegung auf dem vertikalen EOG-Kanal frontal weniger positive Amplituden als für die Gruppe mit weniger Augenbewegungen auf dem vertikalen EOG-Kanal. Somit lies sich ausschließen, dass die frontal positive langsame Welle ein Artefakt von Augenbewegung bei der Betrachtung visueller Reize ist. Da jedoch an dem hier verwendeten Korrekturverfahren für Augenartefakte kürzlich Kritik geübt wurde (Croft & Barry, 1998b; Croft & Barry, 1998a), sollten sich zukünftige Untersuchungen einem Vergleich der neuen und alten Verfahren zur Korrektur von Augenartefakten aus dem EKP zuwenden.

Im zweiten Experiment wurde eine Hypothese zur funktionalen Bedeutung der frontal positiven langsamen Welle überprüft, nach der inhaltliche Verarbeitungsprozesse unterschiedlicher Bilder als eine notwendige Voraussetzung für deren Entstehung angesehen werden. Die Menge an inhaltlichen Informationsverarbeitungsprozessen wurde über die unterschiedliche Anzahl unterschiedlicher Bilder operationalisiert, die in einem Oddball-Paradigma mit der Aufgabe dargeboten wurden, die dargebotenen Bilder hinsichtlich ihrer Valenz einzuschätzen und dann jeweils den positiven oder neutralen Bildreiz still zu zählen. Bei 2 Bildern, die wiederholt dargeboten werden, sollte keine frontal positive langsame Welle auftreten. Denn bei 2 Bildern kann die Aufgabe aufgrund von perzeptuellen Wiedererkennensprozessen bewältigt werden. Bei 60 Bildern, die jeweils nur 1-mal dargeboten werden, sollte sich die frontal positive langsame Welle ausbilden, da hier jedes Bild inhaltlich neu analysiert werden muss, um die Aufgabe zu bewältigen. Eine Bedingung mit 10 Bildern, die 6-mal dargeboten wurden, wurde hinzugefügt, um zu überprüfen, ob der EKP-Verlauf für diese Gruppe zwischen den Bedingungen mit 2 und 60 Bildern liegt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Annahmen bezüglich der frontal positiven langsamen Welle richtig waren, jedoch waren die EKPs auf die Bilder durch eine fronto-zentral positive langsame Welle gekennzeichnet. Bei 60 Bildern zeigten sich im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms frontal und zentral deutlich positivere Amplituden als für 10 und 2 Bilder, deren Amplituden ungefähr die gleiche Höhe aufwiesen. Dieser Effekt war im Bereich der P3-Amplitude umgekehrt, mit positiveren Amplituden für 2 Bilder als für 10 und 60 Bilder und einem parietalen Maximum. Daher wird die fronto-zentral positive langsame Welle auch als eine eigenständige Komponente aufgefasst und nicht nur als die Fortführung der Aktivität der P3.

Ein weiterer wichtiger Befund des zweiten Experiments ist, dass die EKPs auf die positiven Bilder des IAPS durchgehend positiver als auf die neutralen Bilder waren. Dies zeigte sich sowohl im Zeitbereich der P3 als auch im Zeitbereich der fronto-zentral positiven langsamen Welle. Dieser Befund wird auf den erhöhten Arousalgehalt der positiven Bilder im Vergleich zu den neutralen Bildern zurückgeführt. Jedoch kann nur ein weiteres Experiment diese Frage abschließend klären, wenn die Faktoren Arousal und Valenz bei den Bildern orthogonal variiert werden. Sollen dabei unterschiedliche Bilder

dargeboten werden, ist mit dem zum gegenwärtigen Zeitpunkt vorliegenden Bildmaterial keine entsprechende Untersuchung möglich.

Abschließend stellt sich eine weitere wichtige Frage zur funktionalen Bedeutung der fronto-zentral positiven langsamen Welle: Bislang wurden die Bilder des IAPS dargeboten und die Probanden mussten die Bilder nach verschiedenen Kriterien beurteilen. In der Regel sollten die Probanden erst antworten, wenn das Bild ausgeblendet war. Es lässt sich daher nicht ausschließen, dass die fronto-zentral positive langsame Welle im Zeitbereich zwischen 1000 und 3500 ms auch durch diese verzögerte Antwortbedingung mitverursacht wird, da zur Lösung der Aufgaben sicher nicht mehrere Sekunden notwendig waren. Das heißt, die fronto-zentral positive langsame Welle kann entweder zusätzliche Verarbeitung der Bilder, nachdem die Aufgabe gelöst war, anzeigen oder eine Folge der verzögerten Antwortbedingung sein, da die Bilder länger dargeboten wurden, als es zur Lösung der Aufgabe notwendig war. Diese Frage kann nur in einer weiteren experimentellen Untersuchung zur funktionalen Bedeutung einer fronto-zentralen positiven langsamen Welle im EKP geklärt werden.

7 Literaturverzeichnis

- Allison, T., Wood, C. C., & McCarthy, G. M. (1986). The central nervous system. In M. G. H. Coles, E. Donchin, & S. W. Porges (Eds.), *Psychophysiology: Systems, processes, and applications* (pp. 5-25). New York: Guilford.
- Bair, W., Koch, C., Newsome, W., & Britten, K. (1994). Power spectrum analysis of bursting cells in area MT of the behaving monkey. *Journal of Neuroscience*, *14*, 2870-2892.
- Baizer, J. S., Ungerleider, L. G., & Desimone, R. (1991). Organization of visual inputs to the inferior temporal and posterior parietal cortex in macaques. *Journal of Neuroscience*, *11*, 168-190.
- Baker, R., Berthoz, A., & Delgado-Garcia, J. (1977). Monosynaptic excitation of trochlear motoneurons following electrical stimulation. *Brain Research*, *121*, 157-161.
- Barlow, H. B. (1972). Single units and sensation: A neuron doctrine for perceptual psychology? *Perception*, *1*, 371-394.
- Barrett, S. E., & Rugg, M. D. (1990). Event-related potentials and the phonological matching of pictures. *Brain and Language*, *38*, 424-437.
- Baylis, G. C., Rolls, E. T., & Leonard, C. M. (1985). Selectivity between faces in the response of a population of neurons in the cortex in the superior temporal sulcus of the monkey. *Brain Research*, *342*, 91-102.
- Berg, P. (1989). Comments on EOG correction methods. *Psychophysiology*, *3*, 41-44.
- Berg, P., & Scherg, M. (1991). Dipole models of eye movements and blinks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *79*, 36-44.
- Berg, P., & Scherg, M. (1994). A multiple source approach to the correction of eye artifacts. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *90*, 229-241.
- Birbaumer, N., Elbert, T., Canavan, A. G. M., & Rockstroh, B. (1990). Slow potentials of the cerebral cortex and behavior. *Physiological Reviews*, *70*, 1-41.
- Birbaumer, N., & Schmidt, R. F. (1990). *Biologische Psychologie*. (2. Aufl). Berlin: Springer.
- Blasdel, G. G. (1992). Orientation selectivity, preference and continuity in monkey striate cortex. *Journal of Neuroscience*, *12*, 3139-3161.
- Blom, J. L., & Anneveldt, M. (1982). An electrode cap tested. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *54*, 591-594.
- Born, R. T., & Tootell, R. B. H. (1991). Spatial frequency tuning of single units in macaque supragranular striate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *88*, 7066-7070.
- Bradley, M. M., Cuthbert, B. N., & Lang, P. J. (1990). Startle reflex modification: Emotion or attention? *Psychophysiology*, *27*, 513-523.
- Bradley, M. M., Greenwald, M. K., Petry, M. C., & Lang, P. J. (1992). Remembering pictures: Pleasure and arousal in memory. *Journal of Experimental Psychology*, *18*, 379-390.
- Bressler, S. L., Coppola, R., & Nakamura, R. (1993). Episodic multiregional coherence at multiple frequencies during visual task performance. *Nature*, *366*, 153-156.
- Brodal, P. (1992). The brain stem and the cranial nerves, *The central nervous system* (pp. 285-341). Oxford: Oxford University Press.
- Bruce, V., Green, P. R., & Georgeson, M. A. (1995). Connectionist Models of Visual Perception, *Visual Perception* (pp. 233-251). East Sussex, UK: Psychology Press.
- Brunia, C. H. M. (1993). Waiting in readiness: Gating attention and motor preparation. *Psychophysiology*, *30*, 327-339.

- Brunia, C. H. M., Möcks, J., van den Berg-Lenssen, M. M. C., Coelho, M., Coles, M. G. H., Elbet, T., Gasser, T. H., Gratton, G., Ifeachor, E. C., Jervis, B. W., Lutzenberger, W., Sroka, L., van Blokland-Vogelsang, A. W., van Driel, G., Woestenburg, J. C., Berg, P., McCallum, W. T., Tuan, P. D., Pocock, P. V., & Roth, W. T. (1989). Correcting ocular artifacts in the EEG: A comparison of several methods. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 1-50.
- Buckner, R. L., & Tulving, E. (1995). Neuroimaging studies of memory: Theory and recent PET results. In F. Boller & J. Grafman (Eds.), *Handbook of Neuropsychology* (Vol. 10, pp. 439-466). Amsterdam: Elsevier.
- Büttner-Ennever, J. (1988). *Neuroanatomy of the oculomotor system*. Amsterdam: Elsevier.
- Büttner-Ennever, J., & Büttner, U. (1978). A cell group associated with vertical eye movements in the rostral mesencephalic reticular formation of the monkey. *Brain Research*, *151*, 31-47.
- Büttner-Ennever, J., Büttner, U., Cohen, B., & Baumgartner, G. (1982). Vertical gaze paralysis and the rostral interstitial nucleus of the medial longitudinal fasciculus. *Brain*, *105*, 125-149.
- Casagrande, V. A., & Norton, T. T. (1991). Lateral geniculate nucleus: A review of its physiology and function. In A. G. Leventhal (Ed.), *The neural basis of visual function* (Vol. 5, pp. 41-84). London: Macmillan.
- Christianson, S. A. (1986). Effects of positive emotional events on memory. *Scandinavian Journal of Psychology*, *27*, 287-299.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral science*. (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, *112*, 155-159.
- Coles, M. G. H. (1989). Modern mind-brain reading: Psychophysiology, physiology, and cognition. *Psychophysiology*, *26*, 251-269.
- Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: An introduction. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind. Event-related brain potentials and cognition* (pp. 1-26). Oxford: University Press.
- Compton, P., Grossenbacher, P., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1991). A cognitive anatomical approach to attention in lexical access. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *3*, 304-312.
- Corby, J., & Kopell, B. (1972). Differential contributions of blinks and vertical eye movements. *Psychophysiology*, *9*, 640-644.
- Creutzfeld, O. D. (1983). *Cortex Cerebri. Leistung, strukturelle und funktionelle Organisation der Hirnrinde*. Berlin: Springer.
- Croft, J. R., & Barry, R. J. (1998a). EOG correction: A new aligned-artefact average solution. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *107*, 395-401.
- Croft, R. J., & Barry, R. J. (1998b). EOG correction: A new perspective. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *107*, 387-394.
- Cuthbert, B. N., Schupp, H. T., Bradley, M., McManis, M., & Lang, P. J. (1998). Probing affective pictures: Attended startle and tone probes. *Psychophysiology*, *35*, 344-347.
- de Monasterio, F. M., & Schein, S. J. (1982). Spectral bandwidths of colour-opponent cells of geniculocortical pathway of macaque monkeys. *Journal of Neurophysiology*, *47*, 214-224.
- De Valois, R. L., Albrecht, D. G., & Thorell, L. G. (1982). Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*, *22*, 545-559.
- De Valois, R. L., & De Valois, K. K. (1990). *Spatial vision*. Oxford: Oxford University Press.
- Derrington, A. M., & Lennie, P. (1984). Spatial and temporal contrast sensitivities of neurones in lateral geniculate nucleus of macaque. *Journal of Physiology*, *357*, 219-240.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, *18*, 193-222.

- Desimone, R., & Schein, S. J. (1987). Visual properties of neurons in area V4 of the macaque: Sensitivity to stimulus form. *Journal of Neurophysiology*, *57*, 835-868.
- Deutsch, G., Bourbon, W. T., Papanicolaou, A. C., & Eisenberg, H. M. (1988). Visuospatial tasks compared via activation of regional cerebral blood flow. *Neuropsychologia*, *26*, 445-452.
- DeYoe, E. A., & van Essen, D. C. (1985). Segregation of efferent connections and receptive field properties in visual area V2 of the macaque. *Nature*, *317*, 58-61.
- DeYoe, E. A., & van Essen, D. C. (1988). Concurrent processing streams in monkey visual cortex. *Trends in Neurosciences*, *11*, 219-226.
- Diedrich, O. (1996). *Die kortikale Kontrolle emotionaler Reaktionen*. Lengerich: Pabst Science Publisher.
- Diedrich, O., Naumann, E., Maier, S., Becker, G., & Bartussek, D. (1997). A frontal positive Slow Wave in the ERP associated with emotional slides. *Journal of Psychophysiology*, *11*, 71-84.
- Dien, J. (1998). Issues in the application of the average reference: Review, critiques, and recommendations. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, *30*, 34-43.
- Donchin, E. (1979). Event-related brain potentials: A tool in the study of human information processing. In H. Begleiter (Ed.), *Evoked potentials and behavior* (pp. 13-75). New York: Plenum.
- Donchin, E. (1981). Surprise! . . . surprise? *Psychophysiology*, *18*, 493-513.
- Donchin, E., Callaway, E., Cooper, R., Desmedt, J. E., Goff, W. R., Hillyard, S. A., & Sutton, S. (1977). Publication criteria for studies of evoked potentials (EP) in man. In J. E. Desmedt (Ed.), *Attention, voluntary contradiction, and event-related potentials* (Vol. 1, pp. 1-11). Basel: Karger.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988a). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Science*, *11*, 355-372.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988b). On the conceptual foundation of cognitive psychophysiology. *Behavioral and Brain Science*, *11*, 406-417.
- Donchin, E., & Heffley, E. (1978). Multivariate analysis of event-related potential data: A tutorial review. In D. Otto (Ed.), *Multidisciplinary perspectives in event-related potential research* (pp. 555-572). Washington, DC: US Government Printing Office.
- Donchin, E., Ritter, W., & McCallum, C. (1978). Cognitive psychophysiology: The endogenous components of the ERP. In E. Callaway, P. Tueting, & S. H. Koslow (Eds.), *Event-related brain potential in man*. (pp. 349-412). New York: Academic Press.
- Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. In W. G. Koster (Ed.), *Attention and performance II*. Amsterdam: North Holland.
- Edwards, D. P., Purpura, K. P., & Kaplan, E. (1995). Contrast sensitivity and spatial frequency response of primate cortical neurons in and around the cytochrome oxidase blobs. *Vision Research*, *35*, 1501-1523.
- Elbert, T. (1993). Slow cortical potentials reflect the regulation of cortical excitability. In W. C. McCallum & S. H. Curry (Eds.), *Slow potential changes in the human brain*. New York: Plenum Press.
- Elbert, T., Lutzenberger, W., Rockstroh, B., & Birbaumer, N. (1985). Removal of ocular artifacts from the EEG - a biophysical approach to the EOG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *60*, 455-463.
- Elbert, T., & Rockstroh, B. (1980). Some remarks on the development of a standardized time constant. *Psychophysiology*, *17*, 504-505.
- Elbert, T., & Rockstroh, B. (1987). Threshold regulation - a key to the understanding of the combined dynamics of EEG and event-related potentials. *Journal of Psychophysiology*, *4*, 317-333.
- Erdfelder, E., Faul, F., & Buchner, A. (1996). GPower: A general power analysis program. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, *1*, 1-11.

- Felleman, D. J., & van Essen, D. C. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, *1*, 1-47.
- Field, D. J. (1987). Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells. *Journal of the Optical Society of America*, *A4*, 2379-2394.
- Fishman, M. C., & Michael, C. R. (1973). Intergration of auditory information in the cat's visual cortex. *Vision Research*, *13*, 1415-1419.
- Fortgens, C., & De Bruin, M. P. (1983). Removal of eye movement and EEG artifacts from the non-cephalic reference EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *60*, 45-463.
- Friedman, D., Brown, C., Vaughan, J. H. G., Cornblatt, B., & Erlenmeyer-Kimling, L. (1984). Cognitive brain potential components in adolescents. *Psychophysiology*, *21*, 83-96.
- Gaillard, A. W. (1984). The relation of negative potentials and cognitive processes. In J. Karrer, J. Cohen, & P. Tueting (Eds.), *Annals of the New York academy of sciences. Brain and information* (Vol. 425, pp. 24-38). New York: NY Academic Sciences.
- Gaillard, A. W., & Van Arkel, A. E. (1986). Learning effects on ERPs in a memory comparison task. In W. C. McCallum, R. Zappoli, & F. Denoth (Eds.), *Cerebral psychophysiology: Studies in event-related potentials* (pp. 115-117). Amsterdam: Elsevier.
- Gasser, T. H., Sroka, L., & Möcks, J. (1985). The transfer of EOG activity into the EEG for eyes open and closed. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *61*, 181-193.
- Gasser, T. H., Sroka, L., & Möcks, J. (1986). The correction of EOG artifacts by frequency dependent and frequency independent methods. *Psychophysiology*, *23*, 704-712.
- Gasser, T. H., Ziegler, P., & Gattaz, W. F. (1992). The deleterious effect of ocular artefacts on the quantitative EEG, and a remedy. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, *241*, 352-356.
- Gilbert, C. D., & Wiesel, T. N. (1990). The influence of contextual stimuli on the orientation selectivity of cells in the cat. *Vision Research*, *30*, 1689-1701.
- Gilbert, C. D., & Wiesel, T. N. (1992). Receptive field dynamics in adult primary visual cortex. *Nature*, *356*, 150-152.
- Girton, D. G., & Kamiya, J. (1973). Simple on-line technique for removing eye-movement artifacts from the EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *34*, 221-216.
- Glaser, E. M., & Ruchkin, D. S. (1976). *Principles of neurobiological signal analysis*. New York: Academic Press.
- Gratton, G. (1998). Dealing with artifacts: The EOG contamination of the event-related brain potential. *Behavior Research Methodes, Instruments, and Computers*, *30*, 44-53.
- Gratton, G., & Coles, M. G. H. (1989). Generalization and evaluation of eye-movement correction procedures. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 14-16.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *55*, 468-484.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1989). A procedure for using multi-electrode information in the analysis of components of the event-related potential: Vector filter. *Psychophysiology*, *26*, 222-232.
- Gray, C. M., König, P., Engel, A. K., & Singer, W. (1989). Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*, *338*, 334-337.
- Greenwald, M. K., Cook, E. W., & Lang, P. J. (1989). Affective judgement and psychophysiological response: Dimensional covariation in the evaluation of pictorial stimuli. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 51-64.

- Grinvald, A., Lieke, E. E., Frostig, R. D., & Hildesheim, R. (1994). Cortical point-spread function and long-range lateral interactions revealed by real-time optical imaging of macaque monkey primary visual cortex. *Journal of Neuroscience*, *14*, 2545-2568.
- Grosf, D. H., Shapley, R. M., & Hawken, M. J. (1993). Macaque V1 neurons can signal "illusory" contours. *Nature*, *365*, 550-552.
- Grüsser, O. J., & Grüsser-Cornehls, U. (1995). Gesichtssinn und Okulomotorik. In R. F. Schmidt & G. Thews (Eds.), *Physiologie des Menschen* (pp. 278-315). Berlin: Springer.
- Halgren, E., Squires, N. K., Wilson, C. L., Rohrbaugh, J. W., Babb, T. L., & Crandall, P. H. (1980). Endogenous potentials generated in the human hippocampal formation and amygdala by infrequent events. *Science*, *210*, 803-805.
- Haxby, J. V., Grady, C. L., Horwitz, B., Ungerleider, L. G., Mishkin, M., Carson, R. E., Herscovitch, P., Schapiro, M. B., & Rapoport, S. I. (1991). Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *88*, 1621-1625.
- Heil, M., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1996). Topographically distinct cortical activation in episodic long-term memory: The retrieval of spatial versus verbal information. *Memory and Cognition*, *24*, 777-795.
- Heywood, C. A., & Cowey, A. (1987). On the role of cortical area V4 in the discrimination of hue and pattern in macaque monkeys. *Journal of Neuroscience*, *7*, 2601-2617.
- Hillyard, S. A., & Calambos, R. (1972). Eye movement artifacts in the CNV. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *28*, 173-182.
- Hillyard, S. A., & Hansen, J. C. (1986). Attention: Electrophysiological approaches. In M. G. H. Coles, E. Donchin, & S. W. Porges (Eds.), *Psychophysiology: systems, processes, and applications* (pp. 227-243). New York: Guilford.
- Hillyard, S. A., Hink, R. F., Schwent, V. L., & Picton, T. W. (1973). Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science*, *182*, 177-180.
- Hinton, G. E., McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1986). Distributed representations. In D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, & T. P. R. Group (Eds.), *Parallel distributed processing: Vol. 1 Foundations* (pp. 77-109). Cambridge, MA: MIT Press.
- Horn, G., & Hill, R. M. (1969). Modification of receptive fields of cells in the visual cortex occurring spontaneously and associated with bodily tilt. *Nature*, *221*, 186-188.
- Horton, J. C., & Hubel, D. H. (1981). Regular patchy distribution of cytochrome oxidase staining in primary visual cortex of macaque monkey. *Nature*, *292*, 762-764.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. *Journal of Physiology*, *148*, 574-591.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*, *160*, 106-154.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology*, *195*, 215-243.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1974). Sequence regularity and geometry of orientation columns in the monkey striate cortex. *Journal of Comparative Neurology*, *158*, 267-294.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1977). Functional architecture of macaque monkey visual cortex. *Proceedings of the Royal Society of London*, *198*(B), 1-59.
- Humphrey, A. L., & Saul, A. B. (1994). The temporal transformation of retinal signals in the lateral geniculate nucleus of the cat: Implications for cortical function. In M. Minciacchi, M. Molinari, G. Macchi, & E. G. Jones (Eds.), *Thalamic networks for relay and modulation* (pp. 81-89). New York: Pergamon.

- Iacono, W. G., & Lykken, D. T. (1981). Two-year retest stability of eye tracking performance and a comparison of electro-oculogram and infrared recording techniques: Evidence of EEG in the electro-oculogram. *Psychophysiology*, *18*, 49-61.
- Ifeachor, E. C., Jervis, B. W., Morris, E. L., Allen, E. M., & Hudson, N. R. (1986). A new microcomputer-based online ocular artefact removal (OAR) system. *Proceedings of IEEE (pt. A, No. 5)*, 291-300.
- Jacobs, G. H. (1986). Cones and opponency. *Vision Research*, *26*, 1533-1541.
- Jaspers, H. (1958). The ten twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *10*, 371-375.
- Jervis, B. W., Ifeachor, E. C., & Coelho, M. (1989). The removal of ocular artifacts from the EEG. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 16-20.
- Jervis, B. W., Nichols, M. J., Allen, E. M., Hudson, N. R., & Johnson, T. E. (1985). The assessment of two methods for removing eye movement artefacts from the EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *61*, 444-452.
- Johnson, J., R. (1989). Developmental evidence for modality-dependent P300 generators: a normative study. *Psychophysiology*, *26*, 651-667.
- Johnson, J. R., & Donchin, E. (1985). Second thoughts: Multiple P300s elicited by a single stimulus. *Psychophysiology*, *22*, 182-194.
- Johnson, R., Jr. (1986). A triarchic model of P300 amplitude. *Psychophysiology*, *23*, 367-384.
- Johnson, R. J., Cox, C., & Fedio, P. (1987). Event-related potential evidence for individual differences in a mental rotation task. In R. J. Johnson, J. W. Rohrbaugh, & R. Parasuraman (Eds.), *Current trends in event-related potential research. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Supplement 40* (pp. 191-197).
- Johnson, R. J., & Donchin, E. (1978). On how the P300 amplitude varies with the utility of the eliciting stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *44*, 424-437.
- Johnson, R. J., & Donchin, E. (1982). Sequential expectancies and decision making in a changing environment: An electrophysiological approach. *Psychophysiology*, *19*, 183-200.
- Johnston, V. S., Miller, D. R., & Burleson, M. H. (1986). Multiple P3s to emotional stimuli and their theoretical significance. *Psychophysiology*, *23*, 684-694.
- Johnston, V. S., & Wang, X. T. (1991). The relationship between menstrual phase and the P3 component of ERPs. *Psychophysiology*, *28*, 400-409.
- Jones, J. P., & Palmer, L. A. (1987). An evaluation of the two-dimensional Gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex. *Journal of Neurophysiology*, *58*, 1233-1258.
- Jung, R. (1978). Einführung in die Sehphysiologie. In D. H. Gauer, K. Kramer, & R. Jung (Eds.), *Physiologie des Menschen*. München: Urban & Schwarzenberger.
- Kaplan, E., Mukherjee, P., & Shapley, R. (1993). Information filtering in the lateral geniculate nucleus. In R. Shapley & D. Man-Kit Lam (Eds.), *Contrast sensitivity* (Vol. 5,). Cambridge: MIT Press.
- Karis, D., Fabiani, M., & Donchin, E. (1984). "P300" and memory: Individual differences in the von Restorff effect. *Cognitive Psychology*, *16*, 177-216.
- Kayser, J., Tenke, C., Nordby, H., Hammerborg, D., Hugdahl, K., & Erdmann, G. (1997). Event-related potentials (ERP) asymmetries to emotional stimuli in a visual half-field paradigm. *Psychophysiology*, *34*, 414-426.
- King, V., Precht, W., & Dieringer, N. (1978). Connections of behaviorally identified cat omnipause neurons. *Experimental Brain Research*, *32*, 435-438.
- Knight, R. T. (1991). Evoked potential studies of attention capacity in human frontal lobe lesions. In H. S. Levin, H. M. Eisenberg, & A. L. Benton (Eds.), *Frontal lobe function and dysfunction* (pp. 139-153). New York: Oxford University Press.

- Knight, R. T., Scabini, D., Woods, D. L., & Clayworth, C. C. (1989). Contributions of temporal-parietal junction to the human auditory P3. *Brain Research*, *502*, 109-116.
- Kok, A., & DeJong, L. H. (1980). Components of the event-related potentials following degraded and undegraded stimuli. *Biological Psychology*, *11*, 117-133.
- Kornhuber, H. H., & Deeke, L. (1965). Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflugers Archiv*, 1-17.
- Kosslyn, S. M., Flynn, R. A., Amsterdam, J. B., & Wang, G. (1990). Components of high-level vision: A cognitive neuroscience analysis and accounts of neurological syndromes. *Cognition*, *34*, 203-277.
- Kramer, A., Schneider, W., Fisk, A., & Donchin, E. (1986). The effects of practice and task structure on components of the event-related potential. *Psychophysiology*, *23*, 33-47.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, *207*, 203-205.
- Lang, M., Lang, W., Uhl, F., & Kornhuber, A. (1987). Slow negative potential shifts in a verbal concept formation task. In R. J. Johnson, W. J. Rohrbaugh, & R. Parasuraman (Eds.), *Current Trends in Event-Related Potential Research* (pp. 335-340). Amsterdam: Elsevier.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). *International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings*. Gainesville: The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., Fitzsimmons, J. R., Cuthbert, B. N., Scott, J. D., Moulder, B., & Nangia, V. (1998). Emotional arousal and activation of the visual cortex: An fMRI analysis. *Psychophysiology*, *35*, 199-210.
- Lang, W., Lang, M., Kornhuber, A., & Kornhuber, H. H. (1986). Cerebral potentials during hand tracking with inverted feedback: Frontal lobe dominance in human visuo-motor learning. In W. C. McCallum, R. Zappoli, & F. Denoth (Eds.), *Cerebral Psychophysiology: Studies in Event-Related Potentials* (pp. 225-257). Amsterdam: Elsevier.
- Latto, R. (1986). The role of the inferior parietal cortex and the frontal eye-fields in visuospatial discriminations in the macaque monkey. *Behavioural Brain Research*, *22*, 41-52.
- Lehmann, D. (1987). Principles of spatial analysis. In A. S. Gevins & A. Remond (Eds.), *Handbook of electrophysiology and clinical neurophysiology: Vol. 1. Methods of analysis of brain electrical and magnetic signal* (pp. 309-354). Amsterdam: Elsevier.
- Lennie, P., Krauskopf, J., & Sclar, G. (1990). Chromatic mechanism in striate cortex of macaque. *Journal of Neuroscience*, *10*, 649-669.
- Leventhal, A. G., Rodieck, R. W., & Dreher, B. (1981). Retinal ganglion cell classes in the Old World monkey: Morphology and central projections. *Science*, *213*, 1139-1142.
- Lins, O. G., Picton, T. W., Berg, P., & Scherg, M. (1993). Ocular artifacts in EEG and event-related potentials: II. Source dipoles and source components. *Brain Topography*, *6*, 65-78.
- Lippman, R. P. (1987). An introduction to computing with neural nets. *Signal Processing Magazine*, *4*, 4-22.
- Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1983). Specificity of cortico-cortical connections in monkey visual system. *Nature*, *304*, 531-534.
- Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1984). Anatomy and physiology of a colour system in the primate visual cortex. *Journal of Neuroscience*, *4*, 309-356.
- Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1988). Segregation of form, colour, movement and depth: Anatomy, physiology and perception. *Science*, *240*, 740-749.
- Loveless, N. E., & Sanford, A. J. (1974). Effects of age on the contingent negative variation and preparatory set in a reaction-time task. *Journal of Gerontology*, *29*, 52-63.

- Loveless, N. E., Simpson, M., & Näätänen, R. (1987). Frontal negative and parietal positive components of the Slow Wave dissociated. *Psychophysiology*, *24*, 340-345.
- Lund, J. S. (1988). Anatomical organization of macaque monkey striate cortex. *Annual Review of Neuroscience*, *11*, 253-288.
- Lutzenberger, W., Elbert, T., Rockstroh, B., & Birbaumer, N. (1985a). Asymmetry of brain potentials related to sensorimotor tasks. *International Journal of Psychophysiology*, *2*, 281-291.
- Lutzenberger, W., Elbert, T., Rockstroh, B., & Birbaumer, N. (1985b). *Das EEG*. Heidelberg: Springer.
- Maier, S., Diedrich, O., Becker, G., Naumann, E., & Bartussek, D. (1996). Is a frontal positive slow wave in the ERP specific for emotion-focussed processing? *Psychophysiology*, *33* (Supplement), 58.
- Malach, R., Amir, Y., Harel, M., & Grinvald, A. (1993). Relationship between intrinsic connections and functional architecture revealed by optical imaging and in vivo targeted biocytin injections in primate striate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *90*, 10469-10473.
- Malonek, D., Tootell, R. B. H., & Grinvald, A. (1994). Optical imaging reveals the functional architecture of neurons processing shape and motion in owl monkey area MT. *Proceedings of the Royal Society of London*, *258*(B), 109-119.
- Malpeli, J. G., Schiller, P. H., & Colby, C. L. (1981). Response properties of single cells in monkey striate cortex during reversible inactivation of individual lateral geniculate laminae. *Journal of Neurophysiology*, *42*, 1102-1119.
- Martin, F., Siddle, D.A.T., Gourley, M., Taylor, J., & Dick, R. (1992). P300 and traffic scenes: The effect of Temazepam. *Biological Psychology*, *33*, 225-240.
- Matsuo, F., Peters, J. F., & Reilly, E. L. (1975). Electric phenomena associated with movements of the eyelid. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *34*, 212-216.
- Maunsell, J. H. R., Nealey, T. A., & DePrist, D. D. (1990). Magnocellular and parvocellular contributions to responses in the middle temporal visual area (MT) of the macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, *10*, 3323-3334.
- Maunsell, J. H. R., & Newsome, W. T. (1987). Visual processing in monkey extrastriate cortex. *Annual Review of Neuroscience*, *10*, 363-401.
- McCallum, W. C. (1987). Some recent developments in ERP research related to cognitive function. In C. Barber & T. Blum (Eds.), *Evoked potentials III*. (pp. 56-71). Stoneham: Butterworth.
- McCallum, W. C., Curry, S. H., Cooper, R., Pocock, P. V., & Papakostopoulos, D. (1983). Brian event-related potentials as indicators of early selective processes in auditory target localization. *Psychophysiology*, *20*, 1-17.
- McCarthy, G., & Wood, C. C. (1987). Intracranial recordings of endogenous ERPs in humans. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *39*, 331-337.
- McPherson, W. B., & Holcomb, P. J. (1999). An electrophysiological investigation of semantic priming with pictures of real objects. *Psychophysiology*, *36*, 53-65.
- Mecklinger, A., Kramer, A. F., & Strayer, D. L. (1992). Event-related potentials and EEG components in a semantic memory search task. *Psychophysiology*, *29*, 104-105.
- Mecklinger, A., & Müller, N. (1996). Dissociations in the processing of "what" and "Where" information in working memory: An event-related potential analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*, 453-473.
- Mecklinger, A., & Pfeifer, E. (1996). Event-related potentials reveal topographical and temporal distinct neuronal activation patterns for spatial and object working memory. *Cognitive Brain Research*, *4*, 211-224.
- Merigan, W. H., Byrne, C. E., & Maunsell, J. H. R. (1991). Does primate motion perception depend on the magnocellular pathways? *Journal of Neuroscience*, *11*, 3422-3429.

- Merigan, W. H., Katz, L. M., & Maunsell, J. H. R. (1991). The effects of parvocellular lateral geniculate lesions on the acuity and contrast sensitivity of macaque monkeys. *Journal of Neuroscience*, *11*, 994-1001.
- Merigan, W. H., & Maunsell, J. H. R. (1993). How parallel are the primate visual pathways? *Annual Review of Neuroscience*, *16*, 369-402.
- Michael, C. R. (1978). Color vision mechanisms in monkey striate cortex: Simple cells with dual opponent-color receptive fields. *Journal of Neurophysiology*, *41*, 1233-1249.
- Michael, C. R. (1981). Columnar organization of color cells in monkey's striate cortex. *Journal of Neurophysiology*, *46*, 587-604.
- Mignard, M., & Malpeli, J. G. (1991). Paths of information flow through visual cortex. *Science*, *251*, 1249-1251.
- Miller, E. K., Li, L., & Desimone, R. (1993). Activity of neurons in anterior inferotemporal cortex during a short-term memory task. *Journal of Neuroscience*, *13*, 1460-1478.
- Miller, G. A., Gratton, G., & Yee, C. M. (1988). Generalized implementation of an eye movement correction procedure. *Psychophysiology*, *25*, 241-243.
- Milne, A. A. (1987). *The house at Pooh corner*. London: Methuen Children's Book.
- Mini, A., Palomba, D., Angrilli, A., & Bravi, S. (1996). Emotional information processing and visual evoked potentials. *Perceptual and motor skills*, *83*, 143-152.
- Möcks, J., Gasser, T., & Sroka, L. (1989). Approaches to correcting EOG artifacts. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 21-26.
- Mollon, J. D. (1982). Colour vision and colour blindness. In H. B. Barlow & J. D. Mollon (Eds.), *The senses* (pp. 165-191). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Moran, J., & Desimone, R. (1985). Selective attention gates visual processing in the extrastriate cortex. *Science*, *229*, 782-784.
- Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, NY: Erlbaum.
- Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mantysalo, S. (1978). The N1 effect of selective attention reinterpreted. *Acta Psychologica*, *42*, 313-329.
- Näätänen, R., & Picton, T. W. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: A review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, *24*, 375-425.
- Naumann, E., Bartussek, D., Diedrich, O., & Laufer, M.E. (1992). Assessing cognitive and affective information processing functions of the brain by means of the late positive complex of the event-related potential. *Journal of Psychophysiology*, *6*, 285-298.
- Naumann, E., Becker, G., Maier, S., Diedrich, O., & Bartussek, D. (1997). Ereigniskorrelierte Potentiale auf emotionale Bilder: Einfluß der Darbietungszeit. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, *44*, 163-185.
- Naumann, E., Huber, C., Maier, S., Plihal, W., Wustmans, A., Diedrich, O., & Bartussek, D. (1992). The scalp topography of P300 in the visual and auditory modalities: A comparison of three normalization methods and the control of statistical type II error. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *83*, 254-264.
- Naumann, E., Maier, S., Diedrich, O., Becker, G., & Bartussek, D. (1997). Structural, semantic and emotion-focussed processing of neutral and negative nouns: Event-related potential correlates. *Journal of Psychophysiology*, *11*, 158-172.
- Neville, H. J., Kutas, M., Chesney, G., & Schmidt, A. L. (1986). Event-related brain potentials during initial encoding and recognition memory of congruous and incongruous words. *Journal of Memory and Language*, *25*, 75-92.
- Newsome, W. T., & Paré, E. B. (1988). A selective impairment of motion perception following lesions of the middle temporal visual area (MT). *Journal of Neurophysiology*, *8*, 2201-2211.

- Nieuwenhuys, R., Voogd, J., & van Huijzen, C. (1991). Funktionelle Systeme, *Das Zentralnervensystem des Menschen* (pp. 143-392). Berlin: Springer-Verlag.
- Nunez, P. L. (1981). *Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG*. London: Oxford University Press.
- Nunez, P. L. (1990). Physical principles and neurophysiological mechanisms underlying event-related potentials. In J. W. Rohrbaugh, R. Parasuramen, & R. Johnson (Eds.), *Event-related brain potentials* (pp. 19-36). New York: Oxford University Press.
- Obermayer, K., & Blasdel, G. G. (1993). Geometry of orientation and ocular dominance columns in monkey striate cortex. *Journal of Neuroscience*, *13*, 4114-4129.
- Okita, T., Wijers, A. A., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1985). Memory search and visual spatial attention: An event-related brain potential analysis. *Acta Psychologica*, *60*, 263-292.
- Oster, P. J., & Stern, J. A. (1980). Measurement of eye movement in electrooculography. In I. Martin & P. H. Venable (Eds.), *Techniques in psychophysiology* (pp. 275-309). Chichester, U.K.: Wiley.
- Overton, D. A., & Shagass, C. (1969). Distribution of eye movement and eyeblink potentials over the scalp. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *27*, 546.
- Paller, K. A., Kutas, M., & Mayes, A. (1987). Neural correlates of encoding in an incidental learning paradigm. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *67*, 360-371.
- Partarelli, M. E. (1994). Semantic processing of pictures and spoken words: Evidence from event-related brain potentials. *Brain and Cognition*, *24*, 137-157.
- Pauli, P., Lutzenberger, W., Birbaumer, N., Rickard, T. C., & Bourne, L. E. J. (1996). Neurophysiological correlates of mental arithmetic. *Psychophysiology*, *33*, 522-529.
- Pauli, P., Lutzenberger, W., Rau, H., Birbaumer, N., Rickard, T. C., Yaroush, R. A., & Bourne, L. E. J. (1994). Brain potentials during mental arithmetic: Effects of extensive practice and problem difficulty. *Cognitive Brain Research*, *2*, 21-29.
- Peronnet, F., & Farah, M. J. (1987). Mental rotation: An ERP study with a validated mental rotation task. In M. Kutas & B. Renault (Eds.), *Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Neuroscience* (pp. 49-52). Paris: Dourdan.
- Perrett, D. I., Mistlin, A. J., Potter, D. D., Smith, P. A. J., Head, A. S., Chitty, A. J., Broennimann, R., Milner, A. D., & Jeeves, M. A. (1986). Functional organisation of visual neurones processing face identity. In H. D. Ellis, M. A. Jeeves, F. Newcombe, & A. Young (Eds.), *Aspects of face processing*. Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Perrett, D. I., Rolls, E. T., & Caan, W. (1982). Visual neurons responsive to faces in the monkey temporal cortex. *Experimental Brain Research*, *47*, 329-342.
- Perrin, F., Pernier, J., Bertrand, O., & Echallier, J. F. (1989). Spherical spline for scalp potential and current density mapping. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *72*, 184-187.
- Picton, T. W., & Stuss, D. T. (1980). The component structure of the human event-related potentials. In H. H. Kornhuber & L. Deecke (Eds.), *Progress in brain research*. (Vol. 54, pp. 17-50). Amsterdam: Elsevier.
- Pietrowsky, R., Kuhmann, W., Krug, R., Mölle, M., Fehm, H. L., & Born, J. (1996). Event-related brain potentials during the identification of tachistoscopically presented pictures. *Brain and Cognition*, *32*, 416-428.
- Pietrowsky, R., Stoll, M., Mölle, M., Fehm, H. L., & Born, J. (1996). Event-related brain potentials following tachistoscopic presentation of words and nonwords. *Journal of Psychophysiology*, *10*, 140-149.
- Pineda, J. A., & Swick, D. (1992). Visual P3-like potentials in squirrel monkey: Effects of a noradrenergic agonist. *Brain Research Bulletin*, *28*, 485-491.

- Posner, M. I. (1993). Interaction of arousal and selection in the posterior attentional network. In A. Baddley & L. Weiskrantz (Eds.), *Attention: selection, awareness, and control* (pp. 390-405). Oxford: Clarendon Press.
- Quilter, P. M., McGillivray, B. B., & Wadbrook, D. G. (1977). The removal of eye movement artefact from the EEG signals using correlation techniques. *Random Signal Analysis, IEEE Conference Publication, 159*, 93-100.
- Robson, J. G. (1983). Frequency domain visual processing. In O. J. Braddick & A. C. Sleight (Eds.), *Physical and biological processing of images*. Berlin: Springer.
- Rockstroh, B., Elbert, T., Canavan, A., Lutzenberger, W., & Bierbaumer, N. (1989). *Slow cortical potentials and behaviour*. (2. ed.). München: Urban & Schwarzenberg.
- Rockstroh, B., Müller, M., Cohen, R., & Elbert, T. (1992). Probing the functional brain state during P300-evocation. *Journal of Psychophysiology, 6*, 175-184.
- Röder, B., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1997). Different cortical activation patterns in blind and sighted humans during encoding and transformation of haptic images. *Psychophysiology, 34*, 292-307.
- Röder, B., Rösler, F., Hennighausen, E., & Näcker, F. (1996). Event-related potentials during auditory and somatosensory discrimination in sighted and blind human subjects. *Cognitive Brain Research, 4*, 77-93.
- Röhler, R. (1979). Sensitivity variations in the visual system, contrast resolution and eye movements. *Biological Cybernetics, 32*, 101-106.
- Rohrbaugh, J. W., & Gaillard, A. (1983). Sensory and motor aspects of the contingent negative variation. In A. W. K. Gaillard & W. Ritter (Eds.), *Tutorials in event related potential research: Endogenous components* (pp. 269-310). Amsterdam: Elsevier.
- Rohrbaugh, J. W., Syndulko, K., & Lindsley, D. (1978). Cortical slow negative waves following non-paired stimuli: Effects of task factors. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 45*, 551-567.
- Rohrbaugh, W. J. D., Newlin, D., Varner, J., & Ellingson, R. (1984). Bilateral distribution of the O-Wave. In J. Karrer, J. Cohen, & P. Tueting (Eds.), *Annals of the New York academy of sciences. Brain and information* (Vol. 425, pp. 267-270). New York: NY Academic Science.
- Rösler, F. (1982). *Hirnelektrische Korrelate kognitiver Prozesse*. Berlin: Springer.
- Rösler, F., Clausen, G., & Sojka, B. (1986). The double-priming paradigm: A tool for analyzing the functional significance of endogenous event-related potentials. *Biological Psychology, 22*, 239-268.
- Rösler, F., & Heil, M. (1991). Toward a functional categorization of slow waves: Taking into account past or future events. *Psychophysiology, 28*, 344-358.
- Rösler, F., Heil, M., Bajric, J., Pauls, A. C., & Hennighausen, E. (1995). Patterns of cerebral activation while mental images are rotated and changed in size. *Psychophysiology, 32*, 135-149.
- Rösler, F., Heil, M., & Glowalla, U. (1993). Monitoring retrieval from long-term memory by slow event-related brain potentials. *Psychophysiology, 30*, 170-182.
- Rösler, F., Heil, M., & Hennighausen, E. (1995). Distinct cortical activation patterns during long-term memory retrieval of verbal, spatial and color information. *Journal of Cognitive Neuroscience, 7*, 51-65.
- Rösler, F., Heil, M., Pauls, A. C., Bajric, J., & Hennighausen, E. (1994). Individual differences in spatial: Evidence from slow event-related brain potentials. In D. Bartussek & M. Amelang (Eds.), *Fortschritte der Differentiellen Psychologie und Psychologischen Diagnostik. Festschrift zum 60. Geburtstag von Professor Dr. Kurt Pawlik*. (pp. 116-129). Göttingen: Hogrefe.
- Rösler, F., Heil, M., & Röder, B. (1997). Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology, 45*, 109-141.

- Rösler, F., Röder, B., Heil, M., & Hennighausen, E. (1993). Topographic differences of slow event-related brain potentials in blind and sighted adult human subjects during haptic mental rotation. *Cognitive Brain Research, 1*, 145-159.
- Rösler, F., Schumacher, G., & Sojka, B. (1990). What the brain reveals when it thinks: Event-related potentials during mental rotation and mental arithmetic. *The German Journal of Psychology, 14*, 185-203.
- Rösler, F., Sutton, S., Johnson, J. R., Mulder, B., Fabiani, M., Ploij-van Gorsel, E., & Roth, W. T. (1986). Endogenous ERP components and cognitive constructs. A review. In W. C. McCallum, R. Zappoli, & F. Denoth (Eds.), *Cerebral psychophysiology: Studies in event related potentials* (pp. 51-93). Amsterdam: Elsevier.
- Roth, W. T., Ford, J. M., & Kopell, B. S. (1978). Long latency evoked potentials and reaction time. *Psychophysiology, 15*, 17-23.
- Roth, W. T., Kopell, B. S., Tinklenberg, J. R., Darley, C. F., Sikord, R., & Vesecky, T. B. (1975). The contingent negative variation during a memory retrieval task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 38*, 171-174.
- Roth, W. T., Rothbart, R. M., & Kopell, B. S. (1978). The timing of the CNV resolution in a memory retrieval task. *Biological Psychology, 6*, 39-49.
- Ruchkin, D., Sutton, S., Kietzman, M. L., & Silver, K. (1980). Slow wave and P300 in signal detection. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 50*, 35-47.
- Ruchkin, D. S., Canoune, H. L., Johnson, R. J., & Ritter, W. (1995). Working memory and preparation elicit different pattern of slow wave event-related brain potentials. *Psychophysiology, 32*, 399-410.
- Ruchkin, D. S., Johnson, J. R., Mahaffey, D., & Sutton, S. (1988). Towards a functional categorization of slow waves. *Psychophysiology, 25*, 339-353.
- Ruchkin, D. S., & Johnson, R. J. (1991). Complexities related to cognitive slow wave experiments: A reply to Rösler and Heil. *Psychophysiology, 28*, 359-362.
- Ruchkin, D. S., Johnson, R. J., Canoune, H., & Ritter, W. (1991). Event-related potentials during arithmetic and mental rotation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 79*, 473-487.
- Rugg, M. D. (1992). Event-related potentials in clinical neuropsychology. In J. R. Crawford, W. A. McKinlay, & D. M. Parker (Eds.), *The handbook of neuropsychological assessment* (pp. 393-412). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Rugg, M. D. (1995). Cognitive event-related potentials: Intracerebral and lesion studies. In F. Boller & J. Grafman (Eds.), *Handbook of Neuropsychology* (Vol. 10, pp. 165-185). Amsterdam: Elsevier.
- Rugg, M. D., & Barrett, S. E. (1987). Event-related potentials and the interaction between orthographic and phonological information in a rhyme-judgment task. *Brain and Language, 32*, 336-361.
- Sadasivan, P. K., & Dutt, D. N. (1994). Minimization of EOG artifacts from corrupted EEG signals using a neural network approach. *Computers in Biology and Medicine, 24*, 441-449.
- Sadasivan, P. K., & Dutt, N. D. (1996). ANC schemes for the enhancement of EEG signals in the presence of EOG artifacts. *Computers and Biomedical Research, 29*, 27-40.
- Salzman, C. D., Murasugi, C. M., Britten, K. H., & Newsome, W. T. (1992). Microstimulation in visual area MT: Effects on direction discrimination performance. *Journal of Neuroscience, 12*, 2331-2355.
- Sanquist, T. F., Rohrbaugh, J. W., Syndulko, K., & Lindsley, D. D. (1980). Electrooculographic signs of levels of processing: Perceptual analysis and recognition memory. *Psychophysiology, 17*, 568-576.
- Schandry, R. (1998). Einleitung, *Lehrbuch der Psychophysiology* (pp. 1-2). Weinheim: Beltz, Psychologie-Verlag Union.
- Scherg, M. (1990). Fundamentals of dipole source potential analysis. In F. Grandori, M. Hoke, & G. L. Romani (Eds.), *Auditory evoked magnetic fields and electric potentials. Advances in audiology* (Vol. 6, pp. 40-69). Basel: Karger.

- Scherg, M., & Picton, T. W. (1991). Separation and identification of event-related potentials by brain electric source analysis. In C. H. Brunia, G. Mulder, & M. N. Verbaten (Eds.), *Event-related brain research* (pp. 24-37). Amsterdam: Elsevier.
- Scherg, M., & Von Cramon, D. (1984). Topographical analysis of auditory evoked potentials: Derivation of components. In R. H. Nodar & C. Barber (Eds.), *Evoked Potentials, II* (pp. 73-81). Woburn: Butterworth.
- Schiller, P. H., & Lee, K. (1991). The role of primate extrastriate area V4 in vision. *Science*, *251*, 1251-1253.
- Schiller, P. H., & Logothetis, N. K. (1990). The colour-opponent and broad-band channels of the primate visual system. *Trends in Neuroscience*, *13*, 392-398.
- Schiller, P. H., Logothetis, N. K., & Charles, E. R. (1990). Functions of the colour-opponent and broad-band channels of the visual system. *Nature*, *343*, 68-70.
- Schupp, H. T., Cuthbert, B. N., Bradley, M. M., Birbaumer, N., & Lang, P. J. (1997). Probe P3 and blinks: Two measure of affective startle modulation. *Psychophysiology*, *34*, 1-6.
- Semlitsch, H. V., Anderer, P., Schuster, P., & Presslich, O. (1986). A solution for reliable and valid reduction of ocular artifacts, applied to the P300 ERP. *Psychophysiology*, *23*, 695-703.
- Shapley, R., & Lennie, P. (1985). Spatial frequency analysis in the visual system. *Annual Review of Neuroscience*, *8*, 547-583.
- Sillito, A. M., Jones, H. E., Gerstein, G. L., & West, D. C. (1994). Feature-linked synchronization of thalamic relay cell firing induced by feedback from the visual cortex. *Nature*, *369*, 479-482.
- Silverman, M. S., Grosop, D. H., De Valois, R. L., & Elfar, S. D. (1989). Spatial frequency organization in primate striate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *86*, 711-715.
- Sommer, W., Schweinberger, S. R., & Matt, J. (1991). Human brain potential correlates of face encoding into memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *79*, 457-463.
- Speckman, E. J., Caspers, H., & Elger, C. (1984). Neuronal mechanisms underlying the generation of field potentials. In T. Elbert, B. Rockstroh, W. Lutzenberger, & N. Birbaumer (Eds.), *Self-regulation of the brain and behavior* (pp. 9-25). Heidelberg: Springer.
- Squires, K. C., & Donchin, E. (1976). Beyond averaging: The use of discriminant functions to recognize event-related potentials elicited by single auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *41*, 449-459.
- Squires, K. C., Squires, N. K., & Hillyard, S. A. (1975a). Vertex evoked potentials in a rating-scale detection task: Relation to signal probability. *Behavioral Biology*, *13*, 21-34.
- Squires, N. K., Squires, K. C., & Hillyard, S. A. (1975b). Two varieties of lang-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli im man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *38*, 387-401.
- Srinivasan, R., Tucker, D. M., & Murias, M. (1998). Estimating the spatial Nyquist of the human EEG. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, *30*, 8-19.
- Steiger, H., & Büttner-Ennever, J. (1979). Oculomotor nucleus afferents in the monkey demonstrated with horseradish peroxidase. *Brain Research*, *160*, 1-5.
- Stöhr, M., Dichgans, J., Diener, H. C., & Buettner, U. W. (1982). *Evozierte Potentiale*. Heidelberg: Springer.
- Stuss, D., Sarazin, F. F., Leech, E. E., & Picton, T. W. (1983). Event-related potentials during naming and mental rotation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *56*, 133-146.
- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, *150*, 1187-1188.
- Sutton, S., Tueting, P., Zubin, J., & John, E. R. (1967). Information delivery and the sensory evoked potentials. *Science*, *155*, 1436-1439.

- Tanaka, K. (1993). Neuronal mechanisms of object recognition. *Science*, *262*, 685-688.
- T'so, D. Y., & Gilbert, C. D. (1988). The organization of chromatic and spatial interactions in the primate striate cortex. *Journal of Neuroscience*, *8*, 1712-1727.
- Thorell, L. G., De Valois, R. L., & Albrecht, D. G. (1984). Spatial mapping of monkey V1 cells with pure colour and luminance stimuli. *Vision Research*, *21*, 337-345.
- Tononi, G., Sporns, O., & Edelman, G. M. (1992). Re-entry and the problem of intergrating multiple cortical areas: Simulation of dynamic intergration in the visual system. *Cerebral Cortex*, *2*, 310-355.
- Tootell, R. B. H., Silverman, M. S., Hamilton, S. L., Switkes, E., & De Valois, R. L. (1988). Functional anatomy of macaque striate cortex. V. Spatial frequency. *Journal of Neuroscience*, *8*, 1610-1624.
- Treisman, A., & Southern, J. (1985). Search asymmetry: A diagnostic for preattentive processing of seperable features. *Journal of Experimental Psychology: General*, *114*, 285-310.
- Tucker, D. (1993). Spatial sampling of head electrical fields: The geodesic electrode net. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *25*, 1-10.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behaviour* (pp. 549-586). Cambridge, MA: MIT Press.
- van Boxtel, G. J. M. (1998). Computational and statistical methods for analyzing event-related potential data. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, *30*, 87-102.
- van den Berg-Lenssen, M. M. C., & Brunia, C. H. M. (1989). Correction of ocular artifacts in EEG using an autoregressive model to describe the EEG. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 26-29.
- van den Berg-Lenssen, M. M. C., Brunia, C. H. M., & Blom, J. A. (1989). Correction of ocular artifacts in EEG using an autoregressive model to describe the EEG: A pilot study. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *73*, 72-83.
- van Driel, G., Woestenburg, J. C., & van Blokland-Vogelsang, A. W. (1989). Frequency-domain methods: A solution for the problems of EOG-EEG contamination in ERPs. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 29-34.
- van Essen, D. C. (1985). Functional organization of primate visual cortex. In A. Peters & E. G. Jones (Eds.), *Cerebral cortex. Vol.3: Visual cortex* (pp. 259-329). New York: Plenum.
- van Essen, D. C., Anderson, C. H., & Felleman, D. J. (1992). Information processing in the primate visual system: An integrated systems perspective. *Science*, *255*, 419-423.
- Vaughan, H. G., jun., Costa, L. D., & Ritter, W. (1968). Topography of the human motor potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *25*, 1-10.
- Verleger, R. (1988). Event-related potentials and cognition: A critique of the context updating hypothesis and an alternative interpretation of P3. *Behavior and Brain Science*, *11*, 343-356.
- Verleger, R. (1991). The instruction to refrain from blinking affects auditory P3 and N1 amplitudes. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *78*, 240-251.
- Verleger, R., Gasser, T., & Möcks, J. (1982). Correction of EOG artifacts in event-related potentials of the EEG: Aspects of reliability and validity. *Psychophysiology*, *19*, 472-480.
- von der Heydt, R., Peterhans, E., & Baumgartner, G. (1994). Illusory contours and cortical neuron responses. *Science*, *224*, 1260-1262.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: An electrical sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature*, *230*, 380-384.
- Wang, X., T., & Johnston, V. S. (1993). Changes in cognitive and emotional processing with reproductive status. *Brain, Behavior and Evolution*, *42*, 39-47.
- Weiskrantz, L. (1986). *Blindsight*. Oxford: Clarendon Press.

- Whitton, J. L., Lue, F., & Moldofsky, H. (1978). A spectral method for removing eye movement artifacts from the EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *44*, 735-741.
- Wijers, A. A., Mulder, G., Okita, T., Mulder, L. J. M., & Scheffers, M. K. (1989). Attention to color: An analysis of selection, controlled search, and motor activation, using event-related potentials. *Psychophysiology*, *26*, 89-109.
- Williamson, S. J., & Kaufman, L. (1990). Theory of neuroelectric and neuromagnetic fields. In F. Grandori, M. Hoke, & G. L. Romani (Eds.), *Auditory evoked magnetic fields and electric potentials*. Basel: Karger.
- Woestenburg, J. C., Verbaten, M. N., & Slagen, J. L. (1983). The removal of eye-movement artifact from the EEG by regression analysis in the frequency domain. *Biological Psychology*, *16*, 127-147.
- Woldorff, M. G., Hackley, S. A., & Hillyard, S. A. (1991). The effect of channel-selective attention on the mismatch negativity wave elicited by deviant tones. *Psychophysiology*, *28*, 30-42.
- Wong, P. S., Shevrin, H., & Williams, W. J. (1994). Conscious and nonconscious processes: An ERP index of an anticipatory response in a conditioning paradigm using visually masked stimuli. *Psychophysiology*, *31*, 87-101.
- Wood, C. C. (1987). Generators of event-related potentials. In A. M. Halliday, S. R. Butler, & R. Paul (Eds.), *A textbook of clinical neurophysiology* (pp. 535-567). New York: Wiley.
- Wood, C. C., & McCarthy, G. (1984). Principal component of event-related potentials: Simulation studies demonstrate misallocation of variance across components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *59*, 249-260.
- Woody, C. D. (1967). Characterization of an adaptive filter for the analysis of variable latency neuroelectric signals. *Medical and Biological Engineering*, *5*, 539-553.
- Wurtz, R. H., & Albano, J. E. (1980). Visual-motor function of the primate superior colliculus. *Annual Review of Neuroscience*, *3*, 189-226.
- Young, M. P. (1992). Objective analysis of the topological organization of the primate cortical visual system. *Nature*, *358*, 152-155.
- Young, M. P., Tanaka, K., & Yamane, S. (1992). On oscillating neuronal responses in the visual cortex of the monkey. *Journal of Neuroscience*, *67*, 1464-1474.
- Young, M. P., & Yamane, S. (1992). Sparse population coding of faces in the inferotemporal cortex. *Science*, *256*, 1327-1331.
- Zeki, S. (1980). The representation of colours in the cerebral cortex. *Science*, *284*, 412-418.
- Zeki, S. (1983). Colour coding in the cerebral cortex: The reaction of cells in monkey visual cortex to wavelength and colours. *Neuroscience*, *9*, 741-765.
- Zeki, S., Watson, J. D. C., Lueck, C. J., Friston, K. J., Kennard, C., & Frackowiak, R. S. J. (1991). A direct demonstration of functional specialisation in human visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, *11*, 641-649.
- Zeki, S. M. (1978). Uniformity and diversity of structure and function on rhesus monkey prestriate visual cortex. *Journal of Physiology*, *277*, 273-290.
- Zschocke, S. (1995). Entstehungsmechanismen des EEG, *Klinische Elektroenzephalographie* (pp. 1-48). Heidelberg: Springer.

8 Anhang

Anhang 1: Beispiele für die Hintergrundmatrizen aus Experiment 1

Es sind die vier experimentellen Bedingungen mit entweder keinem, einem oder zwei Zielreizmatrizen dargestellt. Zusätzlich ist die Zielreizmatrix dargestellt.

kein Zielreiz						ein Zielreiz						zwei Zielreize					
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	*	⊥	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	*	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
Bedingung 1 (wenig - einfach)																	
*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
⊥	*	*	⊥	*	*	*	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
*	*	⊥	*	⊥	⊥	*	*	*	⊥	*	⊥	*	*	⊥	⊥	*	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	*	⊥	*	⊥	⊥	*
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	*	⊥	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	*	⊥	*	⊥	*	*	⊥	⊥	⊥	⊥
Bedingung 3 (wenig - schwierig)																	
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥
Bedingung 2 (viel - einfach)																	
⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	*	*	*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	*	⊥
⊥	*	*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	⊥	*
*	⊥	⊥	*	⊥	⊥	*	⊥	*	*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥
*	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	*	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	*	⊥	*	⊥
⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	*	⊥	⊥	*	⊥	⊥	⊥	⊥
Bedingung 4 (viel - schwierig)																	

Zielreiz

*	⊥
⊥	*

Anhang 2: Liste der verwendeten IAPS-Bilder in Experiment 2

Name	Nr.	Valenz	Valenz	Arousal	Arousal	Dominanz	Dominanz
		M	SD	M	SD	M	SD
Bienen	1390	4.50	1.56	5.29	1.97	4.75	1.84
Wasservogel	1450	6.37	1.62	2.83	1.87	6.75	1.87
Kuh	1670	5.82	1.63	3.33	1.98	5.63	1.80
Neutface	2200	4.79	1.38	3.18	2.17	5.44	2.17
Pilze	5531	5.15	1.45	3.69	2.11	6.00	1.95
Wolken	5870	6.78	1.76	3.10	2.22	5.20	2.13
Steckdose	6150	5.08	1.17	3.22	2.02	5.54	1.69
Nudelholz	7000	5.00	0.84	2.42	1.79	6.14	2.14
Handtuch	7002	4.97	0.97	3.16	2.00	6.25	1.93
Schüssel	7006	4.88	0.99	2.33	1.67	6.18	1.96
Tasse	7009	4.93	1.00	3.01	1.97	6.33	1.93
Korb	7010	4.94	1.07	1.76	1.48	6.70	1.48
Hocker	7025	4.63	1.17	2.71	2.20	6.10	2.20
Bügeleisen	7030	4.69	1.04	2.99	2.09	5.73	2.00
Hammer	7034	4.95	0.87	3.06	1.95	6.48	1.86
Glas	7035	4.98	0.96	2.66	1.82	6.39	1.94
Kehrschaufel	7040	4.69	1.09	2.69	1.93	5.46	1.64
Föhn	7050	4.93	0.81	2.75	1.80	5.82	1.93
Mülleimer	7060	4.43	1.16	2.55	1.77	5.85	2.10
Gabel	7080	5.27	1.09	2.32	1.84	7.04	1.84
Buch	7090	5.19	1.46	2.61	2.03	6.65	2.03
Hydrant	7100	5.24	1.20	2.89	1.70	5.92	1.73
Schirm	7150	4.72	1.00	2.61	1.76	5.55	2.01
Aktenschrank	7224	4.45	1.36	2.81	1.94	6.26	2.23
Stuhl	7235	4.96	1.18	2.83	2.00	6.53	2.09
Gebäude	7500	5.33	1.44	3.26	2.18	5.17	2.05
Robbe	1440	8.19	1.53	4.61	2.54	6.05	2.38
Kätzchen	1463	7.45	1.76	4.79	2.19	6.43	1.92
Giraffe	1601	6.86	1.51	3.92	2.07	6.24	1.86
Puppies	1710	8.34	1.12	5.41	2.34	6.55	1.98
Affen	1811	7.62	1.59	5.12	2.25	6.07	1.96
Delphine	1920	7.90	1.48	4.27	2.53	6.50	2.18
Disney	1999	7.43	1.47	4.77	2.40	6.64	1.96
Grinskopf	2000	6.51	1.83	3.32	2.07	6.65	2.07
Strand-Frau	2030	6.71	1.73	4.54	2.37	5.60	1.67
Baby	2070	8.17	1.46	4.51	2.74	7.14	2.10
Mädchen	2091	7.68	1.43	4.51	2.28	6.79	2.04
Clowns	2092	6.28	1.90	4.32	2.29	5.75	2.38
Opa	2340	8.03	1.26	4.90	2.20	6.18	1.86
Interracial	2352	6.94	1.87	4.99	1.98	6.32	1.68
Familie	2360	7.70	1.76	3.66	2.32	6.92	2.08
Doppelherz	2530	7.80	1.55	3.99	2.11	5.99	1.90
Mother/baby	2540	7.63	1.51	3.97	2.33	5.96	2.22
Oldcouple	2550	7.77	1.43	4.68	2.43	6.22	1.94
Paar	4599	7.12	1.48	5.69	1.94	6.49	1.79
Wasserpaar	4641	7.20	1.59	5.43	2.10	6.01	1.88
Windsurfers	5623	7.19	1.44	5.67	2.32	6.45	1.72
Bergbesteigung	5628	6.51	1.95	5.46	2.09	6.28	2.33
Sonnenuntergang	5830	8.00	1.48	4.92	2.65	6.07	1.91
TennisPlayer	8120	7.09	1.36	4.85	2.13	6.23	1.61
Tennisplayer	8350	7.18	1.56	5.18	2.28	5.78	1.76
Olympics	8540	7.48	1.51	5.16	2.37	5.88	1.91
Trophäe	8330	6.65	1.39	4.06	2.28	5.56	1.59
Achterbahn	8490	7.20	2.35	6.68	1.97	5.37	2.46
Kirchenchor	2370	7.14	1.46	2.90	2.14	6.12	2.22
Eule	1740	6.91	1.38	4.27	2.03	5.85	1.79
Surferin	4220	6.60	1.72	5.18	2.33	5.90	1.63
Pilze	5510	5.15	1.43	2.82	2.18	6.68	2.18
Bus	7140	5.50	1.42	2.92	2.38	5.45	1.78
Kleiderständer	7217	4.82	0.99	2.43	1.64	6.25	1.86

Die in der Liste angeführten 60 Bilder wurden nur in Gruppe 3 verwendet, in Gruppe 2 wurden die Bilder mit Nr. 2550, 1999, 1463, 2030, 8120, 7030, 7140, 7100, 7235 und 7009 verwendet, in Gruppe 1 wurden die Bilder mit Nr. 2550 und 7030 verwendet.