

---

# **Der Einfluss von Aufmerksamkeit und Interferenzkontrolle auf die Verarbeitung visueller Stimuli**

---

Inaugural Dissertation  
Zur Erlangung der Doktorwürde der  
Philosophischen Fakultät II  
der  
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Vorgelegt von

Theresa Schreppel  
aus Theilheim  
Würzburg 2008

Erstgutachter: Prof. Dr. Paul Pauli

Zweitgutachter: Prof. Dr. Andreas Mühlberger

Tag des Kolloquiums: 11. Dezember 2008

### Mein herzlichster Dank geht an ...

- **Prof. Dr. Paul Pauli** für die Betreuung dieser Arbeit und **Prof. Dr. Andreas Mühlberger**, der sich freundlicherweise als Zweitgutachter dieser Arbeit zur Verfügung stellte.
- **Dr. Martin Herrmann** für die die kontinuierliche, kompetente Betreuung, die zahlreichen interessanten und hilfreichen Anregungen und das schnelle und umfassende Korrekturlesen dieser Arbeit.
- **Johanna Egetemeir, Doreen Baumann** und **Bettina Mader** für die zuverlässige Unterstützung beim Programmieren, Proband/innen-Rekrutieren und Datensammeln.
- alle Teilnehmer an den Experimenten für ihr geduldiges Mitmachen.
- Isabelle Jasper für das Korrekturlesen dieser Arbeit in Rekordzeit.
- **meinen Mann Marco** und **meine Eltern** für ihre bedingungslose Unterstützung und Rückendeckung über all die Jahre. Danke!

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	10
<b>ABSTRACT</b> .....	13
<b>I THEORETISCHE EINFÜHRUNG</b> .....	14
<b>1 Einleitung</b> .....	14
<b>2 Aufmerksamkeit</b> .....	17
2.1 Ein Modell der Aufmerksamkeit .....	17
2.2 Alertness als Grundlage der fokussierten Aufmerksamkeit .....	18
2.3 Klassische Aufmerksamkeitstheorien .....	20
2.4 Theorie des „perceptual load“ .....	21
2.5 Objektbasierte Aufmerksamkeit .....	22
2.6 Neurokognitive Mechanismen .....	24
<b>3 Arbeitsgedächtnis</b> .....	26
3.1 Traditionelle Modelle des Arbeitsgedächtnisses .....	26
3.2 Die „emergent property view“ des Arbeitsgedächtnisses .....	27
3.3 Wechselwirkungen zwischen Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit .....	29
3.4 Gemeinsame neuronale Korrelate von Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit .....	33
<b>4 Aufmerksamkeitsbasierte Selektion</b> .....	35
<b>5 Anliegen der eigenen Arbeit</b> .....	39
<b>II EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN</b> .....	40
<b>1 Experiment 1: Neuronale Korrelate grundlegender Aufmerksamkeits-         prozesse</b> .....	40
1.1 Herleitung der Fragestellung .....	40
1.2 Hypothesen .....	40
1.3 Methoden .....	41
1.3.1 Versuchspersonen .....	41
1.3.2 Untersuchungsdesign .....	41
1.3.3 Datenaufzeichnung und Auswertung .....	42
1.4 Ergebnisse .....	46
1.4.1 Verhaltensdaten .....	46
1.4.2 NIRS Ergebnisse .....	47
1.5 Diskussion .....	50

---

<b>2</b>	<b>Neuronale Korrelate komplexer Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit unter niedriger Auslastung des Arbeitsgedächtnisses</b> .....	51
2.1	Experiment 2: Der Einfluss von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle auf die neuronale Verarbeitung visueller Stimuli: Eine EEG Studie .....	51
2.1.1	Herleitung der Fragestellung .....	51
2.1.2	Hypothesen .....	52
2.1.3	Methode .....	52
2.1.3.1	Versuchspersonen .....	52
2.1.3.2	Untersuchungsdesign .....	52
2.1.3.3	Stimulusmaterial .....	55
2.1.3.4	EEG Aufzeichnung und Auswertung .....	55
2.1.4	Ergebnisse .....	57
2.1.4.1	Verhaltensdaten .....	57
2.1.4.2	EEG Ergebnisse über okzipitalen Elektroden .....	57
2.1.4.3	EEG Ergebnisse über frontalen Elektroden .....	59
2.1.5	Diskussion .....	60
2.2	Experiment 3: Fronto-parietale Korrelate von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle: Eine NIRS Studie .....	64
2.2.1	Herleitung der Fragestellung .....	64
2.2.2	Hypothesen .....	64
2.2.3	Methode .....	64
2.2.3.1	Versuchspersonen .....	64
2.2.3.2	Untersuchungsdesign .....	64
2.2.3.3	Stimulusmaterial .....	66
2.2.3.4	Datenaufzeichnung und Auswertung .....	67
2.2.4	Ergebnisse .....	68
2.2.4.1	Verhaltensdaten .....	68
2.2.4.2	NIRS Ergebnisse .....	68
2.2.5	Diskussion .....	71
<b>3</b>	<b>Neuronale Korrelate komplexer Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses</b> .....	74
3.1	Herleitung der Fragestellung .....	74
3.2	Experiment 4a: Fronto-parietale Korrelate von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle: Eine kombinierte EEG und NIRS Studie .....	75

3.2.1	Hypothesen.....	75
3.2.2	Methode.....	75
3.2.2.1	Versuchspersonen.....	75
3.2.2.2	Untersuchungsdesign .....	76
3.2.2.3	Stimulusmaterial.....	77
3.2.2.4	Datenaufzeichnung und Auswertung .....	78
3.2.3	Ergebnisse .....	81
3.2.3.1	Verhaltensdaten .....	81
3.2.3.2	EEG Ergebnisse.....	82
3.2.3.3	NIRS Ergebnisse .....	82
3.2.4	Diskussion .....	87
3.3	Experiment 4b: Der Einfluss von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle auf die neuronale Verarbeitung visueller Stimuli: Eine NIRS Studie.....	89
3.3.1	Hypothesen.....	89
3.3.2	Methode.....	89
3.3.2.1	Versuchspersonen.....	89
3.3.2.2	Untersuchungsdesign .....	89
3.3.2.3	Stimulusmaterial.....	90
3.3.2.4	Datenaufzeichnung und Auswertung .....	90
3.3.3	Ergebnisse .....	93
3.3.3.1	Verhaltensdaten .....	93
3.3.3.2	NIRS Ergebnisse .....	93
3.3.4	Diskussion .....	95
<b>III ABSCHLIEßENDE DISKUSSION UND AUSBLICK .....</b>		<b>97</b>
<b>IV LITERATURVERZEICHNIS .....</b>		<b>106</b>
<b>V ANHANG.....</b>		<b>117</b>

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1:</i> Modell der Aufmerksamkeit nach Van Zomeren und Brouwer.....	18
<i>Abb. 2:</i> Schematische Darstellung der Anordnung der 52 NIRS Kanäle. ....	45
<i>Abb. 3:</i> Schematische Darstellung der Anordnung der NIRS Kanäle auf einem Standardhirn. ....	46
<i>Abb. 4:</i> Statistische Abbildung ( <i>t</i> -Werte) der durchschnittlichen [O <sub>2</sub> Hb] differenziert nach Experimental- und Kontrollbedingung. ....	49
<i>Abb. 5:</i> Zeitverlauf der Aktivierung differenziert nach Experimental- und Kontroll- bedingungen für [O <sub>2</sub> Hb] und [HHb]. ....	51
<i>Abb. 6:</i> Schaubild des experimentellen Designs. ....	55
<i>Abb. 7:</i> Darstellung der Elektrodenpositionen. ....	57
<i>Abb. 8:</i> Grand Mean EKP-Kurven der Gesichtsverarbeitung über dem temporalen und okzipitalen Kortex. ....	60
<i>Abb. 9:</i> Grand Mean EKP-Kurven über frontalen Elektrodenpositionen. ....	61
<i>Abb. 10:</i> Schaubild des experimentellen Designs. ....	67
<i>Abb. 11:</i> Statistische Abbildungen ( <i>t</i> -Werte) der [O <sub>2</sub> Hb] differenziert nach Experimentalbedingungen. ....	71
<i>Abb. 12:</i> Statistische Abbildungen ( <i>t</i> -Werte) der [HHb] differenziert nach Experimentalbedingungen. ....	72
<i>Abb. 13:</i> Schaubild des experimentellen Designs. ....	78
<i>Abb. 14:</i> Darstellung der Elektrodenpositionen. ....	80
<i>Abb. 15:</i> Grand Mean EKP-Kurven für Experimental- und Kontrollbedingungen. ....	84
<i>Abb. 16:</i> Statistische Abbildungen ( <i>t</i> -Werte) der relevanten Kontraste für [O <sub>2</sub> Hb]. ....	85
<i>Abb. 17:</i> Statistische Abbildungen ( <i>t</i> -Werte) der relevanten Kontraste für [HHb]. ....	87
<i>Abb. 18:</i> Lokation der NIRS Kanäle über dem okzipitalen Kortex. ....	92
<i>Abb. 19:</i> Schematische Darstellung der Anordnung der 52 NIRS Kanäle. ....	94
<i>Abb. 20:</i> Statistische Abbildung ( <i>t</i> -Werte) der visuellen Stimulation für [O <sub>2</sub> Hb] und [HHb]. ....	95
<i>Abb. 21:</i> Zeitverlauf der Aktivierung differenziert nach Experimental- und Kontrollbe- dingungen für [O <sub>2</sub> Hb] und [HHb] beispielhaft für den Kanal 35. ....	96

**Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 1:</i> Ergebnisse der post hoc <i>t</i> -Tests zur Auflösung der Wechselwirkung Relevanz der Stimuli x Elektrodenposition für die Amplitude der N170. ....	60
<i>Tabelle 2:</i> Ergebnisse der post hoc <i>t</i> -Tests für den Haupteffekts Relevanz der Stimuli über frontalen Arealen. ....	62
<i>Tabelle 3:</i> Mittlere räumliche Korrelation zwischen den 52 NIRS Kanälen für die relevanten Kontraste. ....	70
<i>Tabelle 4:</i> Mittlere räumliche Korrelation zwischen den 52 NIRS Kanälen für die relevanten Kontraste. ....	83
<i>Tabelle 5:</i> Mittlere räumliche Korrelation zwischen den 52 NIRS Kanälen für die relevanten Kontraste. ....	95

**Abkürzungsverzeichnis**

Abb.	Abbildung
ANOVA	Analyses of Variance
BA	Brodman Area
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
DL-PFK	dorso-lateraler präfrontaler Kortex
EEG	Elektroenzephalogramm
EKP	ereigniskorreliertes Potential
FFA	fusiform face area (fusiformes Gesichterareal)
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
HHb	deoxygeniertes Hämoglobin
[HHb]	Konzentration des deoxygenierten Hämoglobins
HRF	hemodynamic response function (hämodynamische Modellfunktion)
Hz	Hertz
ISI	Interstimulusintervall
k $\Omega$	Kiloohm
M	Mittelwert
MNI	Montreal Neurological Institute
ms	Millisekunde
NIRS	Nah-Infrarot Spektroskopie
O <sub>2</sub> Hb	oxygeniertes Hämoglobin
[O <sub>2</sub> Hb]	Konzentration des oxygenierten Hämoglobins
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PFK	Präfrontaler Kortex
PPA	parahippocampal place area (parahippokampales Platzareal)
ROI	region of interest (Region des Interesses)
s	Sekunde
SD	Standardabweichung
VL-PFK	ventro-lateraler präfrontaler Kortex
vs.	versus
z.B.	zum Beispiel
$\mu$ V	Mikrovolt



## Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war die Frage, inwieweit die neuronale Verarbeitung visueller Stimuli durch Prozesse der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses moduliert werden kann. Darüber hinaus wurde untersucht, welche „top down“ Prozesse diese Modulation steuern. Dabei wurden zwei konkurrierende Ansichten als mögliche Erklärungsmodelle zugrunde gelegt und überprüft. Zum einen wäre es möglich, dass selektive Aufmerksamkeit zwei qualitativ unterschiedliche Mechanismen beinhaltet. Demnach würde neben dem Fokussieren auf relevante Informationen auch ein aktiver Prozess der Inhibition der Verarbeitung irrelevanter Stimuli existieren. Zum anderen ist es aber auch denkbar, dass aufgrund begrenzter Verarbeitungsressourcen das Fokussieren auf relevante Reize automatisch mit dem Nichtbeachten irrelevanter Stimuli einhergeht und nur ein Mechanismus existiert.

In einem ersten Experiment wurde vorab die Alertness als ein grundlegender Prozess der Aufmerksamkeit mit der Nah-Infrarot Spektroskopie (NIRS) untersucht. Mittels eines zweigestuften Studiendesigns wurden in einem ersten Schritt für die Alertness relevante Regionen über fronto-temporalen Hirnarealen definiert. Als relevant erwiesen sich Areale des mittleren und superioren temporalen Kortex der rechten Hemisphäre und der ventrale Teil des inferioren frontalen Kortex der linken Hemisphäre. In einer zweiten Datenerhebung konnte für diese Regionen eine signifikant höhere Aktivierung während der Alertnessbedingung im Vergleich zu einer visuellen und motorischen Kontrollbedingung gefunden werden.

Mit dem zweiten Experiment sollten bestehende, mit dem Elektroenzephalogramm (EEG) erhobene, Befunde zur Modulation der neuronalen Verarbeitung visueller Stimuli repliziert werden. Dies geschah mithilfe eines neu entwickelten Untersuchungsparadigmas, einer modifizierten n-back Aufgabe. Wie erwartet fand sich eine erhöhte Verarbeitung aufgabenrelevanter Reize im Vergleich zu einer perzeptuellen Kontrollbedingung. Die Verarbeitung irrelevanter Reize wurde allerdings nicht unterdrückt. Explorativ fand sich ein entsprechendes Korrelat der Aufmerksamkeitslenkung über frontalen Elektroden.

In einem dritten Experiment wurde das modifizierte n-back Paradigma an die Anforderungen einer NIRS Messung angepasst, um frontale Effekte der Aufmerksamkeitslenkung direkter erfassen zu können als mit dem EEG. Wie erwartet fand sich bezüglich des Beachtens wie auch des Ignorierens von Stimuli eine Beteiligung frontaler Strukturen. Auf beachtete Stimuli

folgte eine bilaterale Aktivierung des dorsolateralen präfrontalen Kortex (DL-PFK) und eine Aktivierung des linken inferioren frontalen Kortex bis hin zum prä- und postzentralen Kortex. Das Ignorieren visueller Stimuli führte zu einer weitläufigen Aktivierung des rechten präfrontalen Kortex (PFK). Eine Beteiligung des linken inferioren frontalen Gyrus an der Interferenzkontrolle konnte nicht wie erwartet nachgewiesen werden. Der Vergleich der beiden Aktivierungsmuster ergab keine signifikanten Unterschiede. Die zugrunde liegenden Prozesse des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzkontrolle führten also zu einer Aktivierung stark überlappender Hirnregionen.

Nachdem die Ergebnisse der Experimente 2 und 3 keinerlei Hinweise auf einen aktiven Prozess der Interferenzinhibition nachweisen konnten, wurde im Experiment 4 die bisher genutzte 1-back Aufgabe durch eine schwierigere 2-back Aufgabe ersetzt. Aufgrund der erhöhten Auslastung des Arbeitsgedächtnisses sollte eine stärkere Anstrengung und damit eine verstärkte frontale Aktivierung bei der Interferenzinhibition auftreten. Diese Hypothese wurde mit einer frontalen NIRS Messung überprüft (Experiment 4a). Wie erwartet führte die erhöhte Auslastung des Arbeitsgedächtnisses zu einer verstärkten Aktivierung des PFK bezüglich beachteter Reize. Hinsichtlich ignorierte Reize fand sich allerdings keine frontale Beteiligung. Parallel erhobene EEG Daten zeigten keinen Unterschied zwischen der Verarbeitung beachteter und ignorierte Gesichter. Die Verarbeitung passiv betrachteter Gesichter war im Gegensatz zu beachteten und ignorierten Gesichtern vermindert. Im zweiten Teil der Studie (Experiment 4b) wurden erstmals die okzipitalen Effekte der Aufmerksamkeitslenkung mit der NIRS erfasst. Im Einklang mit den Ergebnissen der ersten EEG Studie (Experiment 2) fand sich zwar eine verstärkte Verarbeitung beachteter, aber keine verminderte Verarbeitung ignorierte Reize.

Zusammengenommen sprechen die fehlende aktive Inhibition von Distraktorreizen im okzipitalen Kortex und die vergleichbaren neuronalen Korrelate von Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzinhibition im frontalen Kortex für die Hypothese einer Aufteilung von begrenzten Verarbeitungsressourcen zugunsten beachteter Reize.

---

## Abstract

The aim of the present work was to investigate, to what extent the neural processing of visual stimuli could be modulated by processes of attention and working memory and which top down processes control this modulation. Two competing explanatory models were proved in the present work. On the one hand it is possible that selective attention comprise two qualitatively different mechanisms, the focussing on relevant information and the active inhibition of irrelevant stimuli. On the other hand it is possible that the limited processing capacities lead to an automatic disregard of irrelevant stimuli when focussing on relevant information. According to this, there would be only one mechanism.

In a first experiment alertness was investigated with near-infrared spectroscopy (NIRS) as a basic process of attention. In a two step design relevant areas for alertness over the fronto-temporal cortex were defined first. Alertness related activity was found in the middle and superior temporal cortex of the right hemisphere and in the ventral part of the inferior frontal cortex of the left hemisphere. The analyses of a second measurement for these specific regions revealed a significantly increased activation for alertness in contrast to a visual and a motor control condition.

The aim of a second experiment was to replicate existing electroencephalographic (EEG) results of the modulation of the neural processing of visual stimuli with a new developed paradigm, a modified version of the n-back task. As expected there was a higher processing of relevant stimuli in comparison to a perceptual control condition. The processing of irrelevant stimuli was not suppressed. Explorative, there was an analogue result of the modulation of attention over frontal electrodes.

In a third experiment the modified n-back paradigm was adjusted to the standards of NIRS measurements to capture frontal effects of attentional modulation more immediate than with EEG. As expected both attended and ignored stimuli were associated with activation of frontal structures. Relevant stimuli were linked with a bilateral activation of the dorsolateral prefrontal cortex (DL-PFC) and activation from the left inferior frontal cortex to the pre- and postcentral cortex. Irrelevant stimuli were linked with a distributed activation of the right PFC. An involvement of the left frontal gyrus could not be verified. The comparison of the two activation patterns revealed no significant difference, the basic processes of working memory and interference control led to an activation of highly overlapping brain regions.

The results of the experiments 2 and 3 revealed no evidence of an active process of interference control. Therefore, the 1-back task was replaced by a more difficult 2-back task in experiment 4. Due to the higher working memory load, there should be a stronger effort and therefore a stronger frontal activation during interference inhibition. This hypothesis was proved with a frontal NIRS measurement (experiment 4a). As expected, the higher working memory load led to a stronger activation of the PFC in respect of the relevant stimuli. Concerning irrelevant stimuli, there was no frontal activation. EEG data that were collected simultaneously showed no difference between the processing of attended and ignored faces. In comparison to that the processing of passively viewed faces was decreased. The second part of this study examined occipital effects of attentional modulation with NIRS for the first time. In line with the results of the first EEG study (experiment 2) there was an enhanced processing of relevant, but no decreased processing of ignored stimuli.

In sum, the absent active inhibition of distractors in the occipital cortex and the similar neural correlates of processes of working memory and interference inhibition in the frontal cortex argue for the hypothesis of one uniform mechanism of focussing attention without an active and independent mechanism of interference inhibition.

## I Theoretische Einführung

### 1 Einleitung

“the true art of memory is the art of attention”

(Samuel Johnson, 1825, S.80)

Das Arbeitsgedächtnis ermöglicht es uns, Informationen über eine kurze Zeitspanne hinweg zu erinnern und zu manipulieren. So gelingt es uns z.B. nicht nur, eine eben herausgesuchte Telefonnummer während der Suche nach dem Telefon im Kopf zu behalten, sondern bei einer entsprechend kurzen Nummer wäre es uns auch möglich, diese rückwärts wiederzugeben. Das Arbeitsgedächtnis hilft uns, Handlungen zielgerichtet auszuwählen und zu reflektieren anstatt nur reflexartig auf verfügbare Informationen aus der Umwelt zu reagieren. Damit stellt es eine wichtige Verbindung zwischen Wahrnehmung und kontrollierter Handlung dar.

Da wir tagtäglich mit einer großen Menge perzeptueller und sensorischer Information konfrontiert werden, ist die selektive Aufmerksamkeit für Prozesse des Arbeitsgedächtnisses von essentieller Bedeutung. Selektive Aufmerksamkeit ist die Fähigkeit, relevante Informationen aus der gegebenen Umwelt oder aus dem Langzeitgedächtnis auszuwählen und aktiv aufrechtzuerhalten. Nur durch die Auswahl relevanter und das Ausfiltern irrelevanter Informationen ist eine effiziente Informationsverarbeitung möglich. Wenn z.B. während der Suche nach dem Telefon eine Radiosprecherin die aktuellen Lottozahlen verkündet, ist es wesentlich schwerer, die korrekte Zahlenabfolge der Telefonnummer aufrecht zu halten. Es kann nur gelingen, wenn die Stimme aus dem Radio als irrelevant erkannt und ausgeblendet werden kann.

Der englische Poet Samuel Johnson erörterte die Beziehung zwischen Gedächtnis und Aufmerksamkeit, als er die wahre Kunst des Erinnerns als eine Kunst der Aufmerksamkeit beschrieb („the true art of memory is the art of attention“ (Johnson, 1825)). Damit brachte er zum Ausdruck, dass die Bereitstellung von Aufmerksamkeit eine unabdingbare Voraussetzung für das Enkodieren von Erlebtem in das Arbeitsgedächtnis darstellt. Obwohl ein solcher Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis schon so lange bekannt ist und intuitiv einleuchtet, wurden beide Konzepte über Jahrzehnte hinweg isoliert untersucht. Die Erforschung möglicher Interaktionen rückte erst in den letzten Jahren in den

Mittelpunkt der Aufmerksamkeit (Awh, Vogel, & Oh, 2006; Berti & Schroger, 2003a; Bunge, Ochsner, Desmond, Glover, & Gabrieli, 2001; de Fockert, Rees, Frith, & Lavie, 2001; Egner & Hirsch, 2005; Gazzaley, Cooney, McEvoy, Knight, & D'Esposito, 2005; Jha, Fabian, & Aguirre, 2004; Kane & Engle, 2003; Lepsien, Griffin, Devlin, & Nobre, 2005; Mayer et al., 2007; Postle, 2006; Soto, Heinke, Humphreys, & Blanco, 2005; Spinks, Zhang, Fox, Gao, & Hai Tan, 2004).

Eine zentrale Schnittstelle zwischen beiden Konzepten ist die Funktion der Aufmerksamkeit, aktuelle mentale Prozesse gegen Interferenzen (Störprozesse, die durch irrelevante Gedanken oder Handlungen ausgelöst werden und zu einem Abfall der Leistung führen (Berti & Schroger, 2003b)) zu schützen. Die Notwendigkeit dafür leitet sich aus dem Modell der ineffizienten Hemmung ab (Bjorklund & Harnishfeger, 1990), nach dem die Gedächtniskapazität eines Organismus begrenzt ist. Werden aufgaben-irrelevante Informationen im Arbeitsgedächtnis präsent gehalten, benötigen sie einen Anteil der begrenzten Ressourcen und können so kognitive Leistungen durch störende Interferenzprozesse beeinträchtigen. Es wäre allerdings ebenfalls denkbar, dass ein solcher aktiver Schutzmechanismus nicht nötig ist und die Aufrechterhaltung relevanter Informationen im Arbeitsgedächtnis ausreicht. Dies wäre möglich unter der Annahme, dass das Fokussieren auf relevante Aspekte automatisch mit dem Abzug der Aufmerksamkeit von allen anderen Aspekten einhergeht.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung dieser Schnittstelle zwischen Prozessen der selektiven Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses. Dazu wurden die neuronalen Korrelate der visuellen Verarbeitung von Gesichtsstimuli im okzipitalen Kortex analysiert. Führt das Beachten von Stimuli zu einer verstärkten und das Ignorieren zu einer verminderten Verarbeitung, spricht das eher für unabhängige Mechanismen des Fokussierens und Inhibierens von Informationen. Darüber hinaus wurden neuronale Korrelate steuernder Kontrollprozesse untersucht. Handelt es sich um zwei unabhängige Mechanismen, sollten auch unterschiedliche Kontrollprozesse und damit unterschiedliche Hirnareale an der Steuerung beteiligt sein. Existiert lediglich ein einheitlicher Mechanismus, sollte das Beachten und Ignorieren von Stimuli auch mit überlappenden Kontrollregionen im Gehirn assoziiert sein.

Die theoretischen Grundlagen zu den Konzepten Aufmerksamkeit und Arbeitgedächtnis werden in einem ersten Abschnitt dieser Arbeit erörtert. Dabei wird zunächst auf das Konzept der Aufmerksamkeit eingegangen. Vorgestellt wird ein allgemeines Modell der Aufmerksamkeit, welches zwischen Aspekten der Intensität und der Selektivität

unterscheidet. Das Konzept der Alertness als eine Komponente des Intensitätsaspekts wird wegen seiner grundlegenden Bedeutung für Aspekte der Selektivität kurz umrissen. Es folgt eine Übersicht über verschiedene Theorien der selektiven Aufmerksamkeit. Die Vorstellung verschiedener zugrundeliegender neuronaler Mechanismen rundet den Abschnitt zur Aufmerksamkeit ab.

In einem zweiten Teil der theoretischen Einführung wird die Bedeutung des Arbeitsgedächtnisses erläutert. Hier werden zunächst das kognitive Multi-Komponenten Modell nach Baddeley und der neurowissenschaftliche Ansatz nach Golman-Rakic vorgestellt. Es folgt eine kritische Einordnung der Befunde traditioneller Modelle und die Darstellung eines aus dieser Kritik heraus entstandenen neuen Modells des Arbeitsgedächtnisses als eine „emergent property“ nach Postle. Anschließend werden Zusammenhänge zwischen den Konstrukten Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis postuliert und anhand verschiedener empirischer Befunde veranschaulicht. Gemeinsame neuronale Korrelate werden vorgestellt.

Der dritte Teil der theoretischen Einführung beschäftigt sich mit der Frage, wie Aufmerksamkeit Prozesse des Arbeitsgedächtnisses vor interferierenden Informationen schützt. Es werden zwei konkurrierende Ansichten vorgestellt, deren Testung ein zentrales Anliegen der vorliegenden Arbeit ist.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden vier empirische Studien vorgestellt: Die erste Studie umfasst zwei Experimente, welche die neuronalen Korrelate der Alertness als grundlegende Aufmerksamkeitsfunktion und Basis der selektiven Aufmerksamkeit mit der NIRS untersuchten. Die folgenden zwei Studien erforschten neuronale Korrelate komplexer Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit unter niedriger Auslastung des Arbeitsgedächtnisses mit dem EEG und der NIRS. Die vierte Studie umfasst zwei Experimente, welche neuronale Korrelate komplexer Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses untersuchten. Verwendet wurden ebenfalls die Methoden EEG und NIRS. Jedes Experiment wird mit einer kurzen theoretischen Herleitung eingeführt, auf die die Vorstellung der Methoden folgt. Die dargestellten Ergebnisse werden spezifisch für jede Studie diskutiert. Abschließend folgen eine gemeinsame Diskussion aller durchgeführten Experimente und eine zusammenfassende Einordnung der Befunde in die bestehende Literatur.

## 2 Aufmerksamkeit

### 2.1 Ein Modell der Aufmerksamkeit

Aufmerksamkeit stellt die Fokussierung der Wahrnehmung auf bestimmte Aspekte der Umwelt dar und kann somit als Prozess der Ressourcenzuweisung definiert werden. Dieser Prozess begründet sich in der beschränkten Verarbeitungskapazität des Gehirns, aufgrund derer die Auswahl von relevanten Umweltreizen für zielgerichtetes Denken und Handeln von immenser Bedeutung ist. Möglicherweise beschäftigten sich deshalb viele Theorien der Aufmerksamkeit traditionell ausschließlich mit der selektiven Aufmerksamkeit. Neuere Modelle legen jedoch nahe, dass Aufmerksamkeit keinen einheitlichen und einzelnen Prozess darstellt, sondern verschiedene Subkomponenten unterschieden werden können. **Van Zomeren und Brouwer** (1994) schlagen vor, zwischen Intensitäts- und Selektivitätsaspekten der Aufmerksamkeit zu unterscheiden, welche jeweils in spezifischere Komponenten differenziert werden können (siehe Abb. 1).

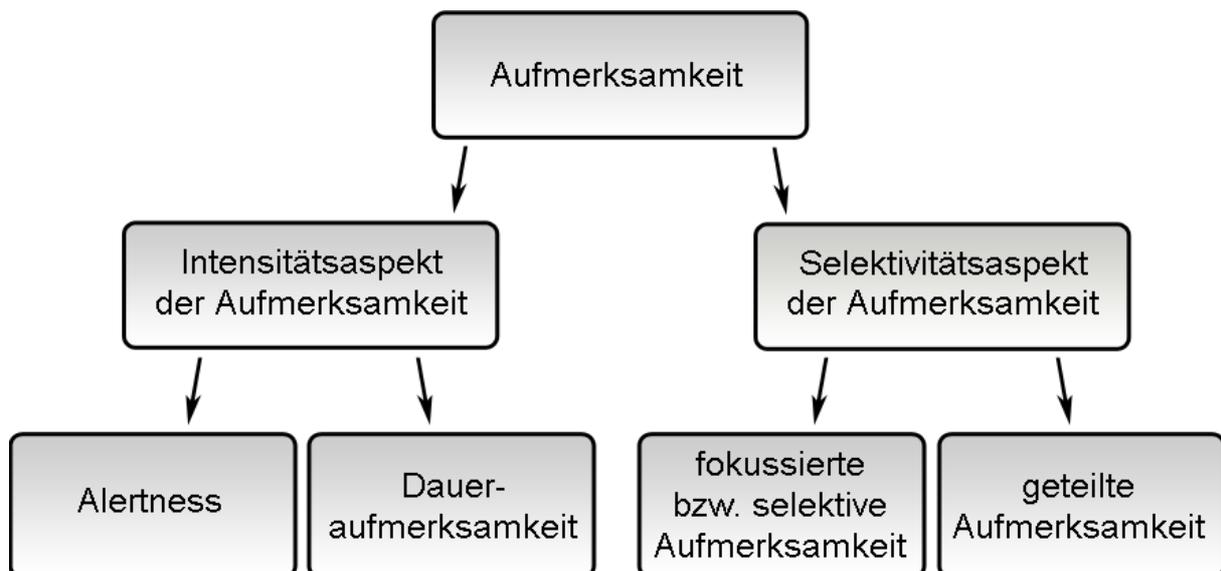


Abb. 1: Modell der Aufmerksamkeit nach Van Zomeren und Brouwer.

Der Aspekt der Selektivität umfasst zum einen die Komponente der fokussierten bzw. selektiven Aufmerksamkeit, zum anderen die der geteilten Aufmerksamkeit. Mit selektiver Aufmerksamkeit wird die Fähigkeit beschrieben, die Informationsverarbeitung auf eine relevante Auswahl an Reizen und Reaktionen zu beschränken; geteilte Aufmerksamkeit meint

die Fähigkeit, Aufmerksamkeit auf mehrere Reize zu richten oder mehrere Tätigkeiten zur gleichen Zeit durchzuführen.

Der Intensitätsaspekt umfasst die grundlegenden Funktionen Alertness und Daueraufmerksamkeit bzw. Vigilanz. Innerhalb der Komponente der Alertness kann man zwischen tonischer und phasischer Alertness unterscheiden. Tonische Alertness ist der Zustand allgemeiner Wachheit, der z.B. zirkadianen Rhythmen im Tagesverlauf unterliegt. Phasische Alertness ist definiert als die Fähigkeit, auf einen Warnreiz hin rasch das Aktivierungsniveau für eine nachfolgende Reaktion zu steigern. Wird Aufmerksamkeit über längere Zeit und unter mentaler Anstrengung bei hoher Reizdichte aufrechterhalten, spricht man von Daueraufmerksamkeit, wird sie bei niedriger Reizdichte aufrechterhalten von Vigilanz (Sturm, 2004).

## **2.2 Alertness als Grundlage der fokussierten Aufmerksamkeit**

Alertness moduliert das Aktivierungsniveau des Aufmerksamkeitssystems und stellt notwendige Ressourcen für komplexere Aspekte der Aufmerksamkeit zur Verfügung. Damit gilt Alertness nicht nur als grundlegende Funktion der Aufmerksamkeitsintensität, sondern wird auch als notwendige Basis für die selektive Aufmerksamkeit angenommen (Sturm et al., 1999). Da Aspekte der Selektivität, und hier insbesondere die fokussierte bzw. selektive Aufmerksamkeit, im Zentrum dieser Arbeit stehen, liegt es nahe, für ein tieferes Verständnis dieser auch die zugrundeliegenden Prozesse der Alertness näher zu betrachten.

Nach Sturm (1999) sollten Aufgaben zur Alertness sehr einfach strukturiert sein ohne Selektivitätsaspekte der Aufmerksamkeit zu beinhalten. Außerdem sollten sie eine möglichst rasche Reaktion erfordern. Dies operationalisierte er in einem Aufgabendesign, in dem die Probanden möglichst schnell mit dem Daumen der rechten Hand auf einen weißen Lichtpunkt reagieren sollten, welcher in unregelmäßigen Abständen von drei bis fünf Sekunden im Zentrum eines Bildschirms aufleuchtete. Die mit einer solchen Aufgabe gefundenen neuronalen Korrelate der tonischen Alertness lagen fast ausschließlich in der rechten Hemisphäre, und zwar im anterioren Cingulum (Brodmann Area BA 32), im mittleren frontalen Gyrus (BA 9, 10), im Hirnstamm, im inferioren parietalen Kortex (BA 40), im mittleren und superioren temporalen Gyrus (BA 20, 22) und im Thalamus. In der linken Hemisphäre zeigte sich lediglich im inferior frontalen Gyrus (BA 44, 45) eine Aktivierung (Sturm et al., 1999; Sturm & Willmes, 2001).

Um an Stelle von tonischer phasische Alertness zu erfassen wurde in einer Studie (Weis et al., 2000) ein 400 ms dauernder Hinweisreiz 100-1000 ms vor dem eigentlichen Zielreiz präsentiert. Das führte nicht nur zu einer Verkürzung der Reaktionszeiten auf den Zielreiz, sondern auch zu einem weitläufigeren Aktivierungsmuster. Zusätzlich zu der Aktivierung die während tonischer Alertnessaufgaben zu beobachten war, fand sich eine linkshemisphärische Aktivierung des Thalamus und des superioren und ventrolateralen frontalen Gyrus.

Möglicherweise kam diese linkshemisphärische Aktivierung durch den externen Hinweisreiz zustande (Sturm & Willmes, 2001). Demzufolge ist die für die tonische Alertness spezifische Aktivierung eines rechtshemisphärischen Netzwerks zwar auch Grundlage der phasischen Alertness, darüber hinaus sind allerdings noch weitere neuronale Areale beteiligt.

Bisher gab es keine Studie, die neuronale Korrelate der Alertness mit der NIRS untersuchte, was daran liegen könnte, dass einige der relevanten Regionen, wie das anteriore Cingulum, der Thalamus und der Hirnstamm, mit dieser Methode nicht erfasst werden können. Allerdings besteht die Möglichkeit, mit der NIRS die relevanten kortikalen Regionen im frontalen, parietalen und temporalen Kortex zu erfassen.

Das Nutzen die Autoren einer NIRS Studie (Toichi et al., 2004). Sie präsentierten eine „continuous performance“ Aufgabe als leichte Aufmerksamkeitsaufgabe während einer präfrontalen NIRS Ableitung. Bei dieser mussten die Probanden auf bestimmte Buchstaben reagieren, auf andere nicht, was nicht nur Gedächtnisprozesse beinhaltet sondern auch Entscheidungsprozesse. Dementsprechend lag auch die gefundene mittlere Reaktionszeit von 355 ms über der üblicherweise in Alertness Aufgaben gefunden (192 ms bei (Sturm et al., 1999)). Die dargebotene motorische Kontrollaufgabe, bei der die Probanden auf jeden der präsentierten Reize reagieren sollten, wäre ein besseres Mittel zur Erfassung der Alertness gewesen, wurde aber nicht eigenständig ausgewertet.

Nach dem Modell der Aufmerksamkeit nach Van Zomeren und Brouwer (1994) ist die Intensitätsdimension der Aufmerksamkeit, und hier insbesondere die Alertness, die Grundlage für komplexere Prozesse der fokussierten und selektiven Aufmerksamkeit. Für ein umfassendes Verständnis solcher komplexer kognitiver Prozesse und deren neuronaler Korrelate ist ein Verständnis der grundlegenden Alertness wichtig und wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

### 2.3 Klassische Aufmerksamkeitstheorien

Wie schon erwähnt ist ein wesentlicher Bestandteil der Aufmerksamkeit die Auswahl an Informationen aus der Umwelt oder dem Langzeitgedächtnis. Klassische Modelle der Aufmerksamkeit gingen deshalb von verschiedenen Filtersystemen der Wahrnehmung aus, die an unterschiedlichen Stellen der perzeptuellen Wahrnehmung eingreifen und relevante Information selektieren.

Eine solche **Filtertheorie der Aufmerksamkeit** entwickelte **Broadbent** (Broadbent, 1958) auf der Grundlage von Studien zum dichotischen Hören. Bei diesen Experimenten werden Probanden über Kopfhörer auf beiden Ohren verschiedene Texte dargeboten. Informationen, die auf dem zu beachtendem Ohr präsentiert werden, können wiedergegeben werden, Angaben über den unbeachteten Kanal sind kaum möglich. Studien zeigten (Cherry, 1953), dass lediglich das Geschlecht der sprechenden Person bewusst wahrgenommen wurde oder ob eine menschliche Stimme oder Geräusche dargeboten wurden. Basierend auf diesen Erkenntnissen postulierte Broadbent (1958), dass die Kapazität der menschlichen Informationsverarbeitung begrenzt sei und deshalb irrelevante Informationen ausgefiltert werden müssen. Nach Broadbent ist Aufmerksamkeit auf einer frühen Verarbeitungsstufe tätig, bevor es zu einer vollständigen Identifikation und Analyse der Stimuli kommt, um einfache sensorische Prozesse vor Überlastung zu schützen. Werden eine Vielzahl von Reizen innerhalb eines Sinnesorgans dargeboten, kommt es zu einer frühen Selektion aufgrund physikalischer Reizeigenschaften. Die Suche nach relevanten Reizen in der Umwelt verläuft seriell.

Weitere Forschung zeigte allerdings, dass sehr auffällige Reize, wie der eigene Name, auch auf dem unbeachteten Ohr wahrgenommen werden (Cocktail-Party Effekt). Auch Informationen des unbeachteten Kanals werden also soweit verarbeitet, dass auffällige Inhalte semantisch extrahiert werden. Aus dieser Erkenntnis heraus entwickelte **Treisman** (Treisman, 1960) eine Modifikation des Broadbent Ansatzes, die **Dämpfungstheorie der Aufmerksamkeit**. Danach wird die Verarbeitung unbeachteter Informationen nicht vollständig ausgeschaltet sondern lediglich gedämpft. Die Wahrnehmung unbeachteter Reize ist somit schwerer zugänglich als die beachteter, kann aber bewusst werden.

**Deutsch und Deutsch** (Deutsch & Deutsch, 1963) vertreten eine Theorie der **späten Selektion**, nach der alle Umweltinformationen parallel hinsichtlich ihrer physikalischen und bedeutungshaltigen Merkmale verarbeitet werden. Aufmerksamkeit wird tätig, nachdem die

Wahrnehmung beendet ist, um höhere Prozesse wie z.B. das Arbeitsgedächtnis vor Überlastung zu schützen.

Die etwas jüngere **Merkmal-Integrationstheorie** (Treisman & Gelade, 1980) versucht die unterschiedlichen Forschungsergebnisse zu integrieren und nimmt eine zweistufige Informationsverarbeitung an. Zu Beginn steht die parallele Verarbeitung aller dargebotenen Merkmale des visuellen Feldes, anschließend kommt es zu einer seriellen Aufmerksamkeitszuwendung um die wahrgenommenen Merkmale zu integrieren. Treisman zeigte, dass es für eine kohärente Objektwahrnehmung notwendig ist, mittels Aufmerksamkeitsprozessen einzelne Objektmerkmale wie Farbe, Form und Größe zusammenzuführen.

## **2.4 Theorie des „perceptual load“**

Alle der drei eben beschriebenen Aufmerksamkeitstheorien sind sich einig darin, dass die Verarbeitung beachteter Stimuli verstärkt wird. Uneinigkeit herrscht darüber, was mit den dargebotenen Distraktoren geschieht. Die unterschiedlichen Untersuchungsparadigmen kommen dabei zu unterschiedlichen Ergebnissen und es bleibt die Frage, ob Wahrnehmung abhängig ist von Aufmerksamkeit (frühe Selektion, keine Verarbeitung irrelevanter Reize (Broadbent, 1958)) oder nicht (späte Selektion, auch irrelevante Reize werden verarbeitet (Deutsch & Deutsch, 1963)).

Um diesen vermeintlichen Widerspruch aufzulösen stellte **Lavie** (Lavie, 1995) die **Theorie des „perceptual load“** auf, welche auf der Annahme basiert, dass der Ort der Aufmerksamkeitsselektion flexibel und abhängig von spezifischen Aufgabenfaktoren ist. Lavie geht davon aus, dass die Wahrnehmungskapazität zwar begrenzt ist, dass es aber innerhalb dieser Grenzen zu einer automatischen Wahrnehmung kommt. Danach werden bei frei verfügbaren Wahrnehmungskapazitäten alle vorhandenen Informationen verarbeitet und es kommt zu einer späten Selektion. Nur wenn das Wahrnehmungssystem überlastet ist, kommt es zu einer frühen Selektion, was ein Ausblenden von Distraktoren ermöglicht.

Zwei Mechanismen liegen der Theorie nach Lavie zugrunde. Zum einen ein Mechanismus der perzeptuellen Selektion, der eine Distraktorverarbeitung bei hoher Auslastung perzeptueller Verarbeitungskapazitäten (hohes „perceptual load“) verhindert, zum anderen ein Mechanismus der kognitiven Kontrolle, der die Distraktorverarbeitung bei niedriger Auslastung kontrolliert.

Der Mechanismus einer perzeptuellen Selektion konnte in verschiedenen Experimenten nachgewiesen werden (Lavie, 1995; Rees & Frith, 1999), in denen die Auslastung der Wahrnehmungskapazität manipuliert wurde. Eine Interferenz aufgrund von Distraktoren konnte nur unter niedriger Auslastung gefunden werden, unter hoher Auslastung fand sich keine Distraktorverarbeitung. Studien zum Mechanismus der kognitiven Kontrolle werden unter dem Punkt 3.3 der theoretischen Einführung vorgestellt. Zusammenfassend stellt sich heute nicht mehr die Frage, ob Aufmerksamkeit zu einer frühen oder späten Selektion von Informationen führt; es hat sich gezeigt, dass Aufmerksamkeit in beiden Stadien wirken kann. Unklar bleibt, unter welchen Umständen es zu einer frühen bzw. späten Selektion kommt und welche Konsequenzen daraus folgen. Um diese Fragen beantworten zu können ist es notwendig, eine Konfundierung von „perceptual“ und „memory load“ zu vermeiden. Da ein Ziel der vorliegenden Arbeit die Untersuchung des kognitiven Kontrollmechanismus und dessen Auswirkungen auf die Distraktorverarbeitung war, wurde die perzeptuelle Auslastung konstant gering gehalten.

Die klassischen Theorien der Aufmerksamkeit beschäftigten sich mit der Problematik, aus einer großen Menge an Informationen bestimmte Inhalte zu selektieren. Dies hatte zur Folge, dass beachtete Zielreize und nichtbeachtete Distraktoren gleichzeitig präsentiert wurden und deren Verarbeitung konfundiert war. Wurden bei einem solchen Aufgabendesign Aufmerksamkeitseffekte gefunden, blieb unklar, welcher Anteil des Effekts auf eine Erhöhung der neuronalen Antwort auf beachtete Stimuli zurückzuführen war und welcher auf eine Verminderung der Antwort auf nichtbeachtete Stimuli. Eine Reihe aktueller Publikationen hat sich deshalb der Frage gewidmet, wie Aufmerksamkeit die Verarbeitung von einzeln und zentral dargebotenen Stimuli beeinflussen kann, eine theoretische Einordnung der Befunde existiert jedoch nicht. Einen Schritt in diese Richtung liefert die Erkenntnis, dass Mechanismen der Aufmerksamkeit weniger ortsbasiert als vielmehr objektbasiert wirken.

## **2.5 Objektbasierte Aufmerksamkeit**

Die klassischen Theorien der Aufmerksamkeit basieren auf der Annahme einer ortsbezogenen Aufmerksamkeit. Räumliche Aufmerksamkeit kann man mit der Funktion eines Scheinwerfers vergleichen, der sein Licht auf bestimmte Punkte im visuellen Feld richtet, an

welchen die Informationsverarbeitung infolge dessen erhöht ist („Spotlight“-Metapher der Aufmerksamkeit (Posner, 1980)).

Neuere Theorien postulieren allerdings, dass die entscheidende Begrenzung der Aufmerksamkeit weniger in der Beachtung einzelner Lokationen liegt als vielmehr in der Tatsache, dass die Aufmerksamkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt lediglich auf ein Objekt gerichtet werden kann (J. Duncan, 1984). Danach wird eine visuelle Szene z.B. in diskrete Objekte eingeteilt und die Aufmerksamkeit unabhängig von deren Position auf eines der Objekte gerichtet. Ein Beleg für die **objektbasierte Theorie** der Aufmerksamkeit fand sich in einer Studie (O'Craven, Downing, & Kanwisher, 1999), bei der den Probanden pro Zeitpunkt zwei transparente übereinandergelagerte Stimuli (ein Haus und ein Gesicht) präsentiert wurden. Aufgabe der Probanden war das selektive Beachten einer der beiden Reizkategorien. Obwohl beide Objekte am selben Ort erschienen, erhöhte das Beachten eines Objekts die neuronale Repräsentation dieses Objekts in spezifischen Verarbeitungsarealen des visuellen Assoziationskortex (Fusiformes Gesichterareal (FFA) bzw. Parahippokampales Platzareal (PPA)). Somit konnten die Autoren nachweisen, dass es tatsächlich möglich ist, die Aufmerksamkeit selektiv auf nur eines der beiden überlagerten Objekte zu richten, was innerhalb der Theorie der ortsbasierten Aufmerksamkeit nicht erklärbar ist.

In dieser Studie wurden, wie in klassischen Untersuchungsparadigmen der selektiven Aufmerksamkeit üblich, Zielreiz und Distraktor parallel dargeboten, was zu einer konfundierten Verarbeitung beachteter und nichtbeachteter Reize führte. Allerdings werden Gesichter und Häuser in unterschiedlichen spezifischen Arealen des visuellen Assoziationskortex verarbeitet (FFA und PPA). Deshalb war es, mit Hilfe der mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) erhobenen Daten, möglich, die spezifischen Effekte des Beachtens und des Nichtbeachtens in genau diesen Arealen getrennt zu analysieren. Eine Analyse von möglichen Aufmerksamkeitseffekten in anderen unspezifischen Arealen des visuellen Kortex war wegen der gleichzeitigen Darbietung und damit parallelen Verarbeitung beider Stimuli nicht möglich. Da in dieser Studie keine Kontrollbedingung dargeboten wurde, ist auch keine Aussage darüber möglich, ob die Aufmerksamkeitseffekte aufgrund einer erhöhten Verarbeitung beachteter Reize oder auf einer verminderten Verarbeitung nicht beachteter zustande kamen. In der vorliegenden Arbeit werden Zielreize und Distraktoren deshalb sequentiell dargeboten. Unter Verwendung eines ereignisbezogenen Designs ermöglicht das die spezifische Analyse beider Stimuluskategorien. Zusätzlich wird eine Kontrollbedingung dargeboten, um die experimentellen Manipulationen mit einer perzeptuellen Grundaktivierung vergleichen zu können.

## 2.6 Neurokognitive Mechanismen

Eine Vielzahl an Verhaltensexperimenten konnte zeigen, dass die Verarbeitung beachteter Reize durch Aufmerksamkeit verbessert und die Verarbeitung unbeachteter abgeschwächt wird. Die bisher aufgeführten Theorien versuchen diese Effekte zu erklären, machen allerdings keine Aussagen darüber, wie Aufmerksamkeit die Verarbeitung von Stimuli auf neuronaler Ebene modulieren kann. Es stellt sich die Frage, wie sich die neuronalen Antworten auf beachtete und nicht beachtete Stimuli unterscheiden.

Nach dem „**biased competition**“ Modell der Aufmerksamkeit (Desimone & Duncan, 1995) kämpfen die verschiedenen Objekte einer visuellen Szene aufgrund einer begrenzten Wahrnehmungskapazität um repräsentationale Ressourcen. Der Wettbewerb findet in genau den Hirnarealen statt, in denen die jeweiligen visuellen Stimuli repräsentiert sind. Alle Objekte werden parallel verarbeitet, aber nur das zuerst Verarbeitete wird bewusst wahrgenommen. Die verstärkte neuronale Antwort auf das ausgewählte Objekt geht einher mit einer unterdrückten Verarbeitung der restlichen Stimuli. Aufmerksamkeit kann diesen Wettbewerb um Verarbeitungsressourcen selektiv beeinflussen. Die Verarbeitung auffälliger Elemente wird durch „bottom up“ Prozesse begünstigt. So wird wahrscheinlich ein roter Stimulus unter mehreren schwarzen Stimuli bevorzugt verarbeitet. „Top down“ Prozesse wie Aufgabenanforderungen oder Erwartungshaltungen können die Grundaktivierung von Neuronen (Baseline Feuerrate) erhöhen und relevanten Stimuli dadurch einen Wettbewerbsvorteil verschaffen (Kanwisher & Wojciulik, 2000). Das Modell des „biased competition“ beschreibt somit eine vom tatsächlichen Stimulus unabhängige „top down“ modulierte Erhöhung der Grundaktivierung von Neuronenpopulationen.

Im Gegensatz dazu steht das Modell der „**sensory gain control**“, welches eine reizspezifische Modulation der neuronalen Verarbeitung visueller Stimuli beschreibt (Corbetta, Miezin, Dohmeyer, Shulman, & Petersen, 1991; Posner & Dehaene, 1994). Der Mechanismus wirkt in einem frühen Stadium der visuellen Verarbeitung in extrastriären kortikalen Arealen über eine verstärkte und spezifischere neuronale Antwort mit einem verbesserten Signal-Rausch Verhältnis. Beachtete Informationen lösen so eine höhere neuronale Aktivierung sensorischer Verarbeitungsareale aus. Aufmerksamkeit setzt nach dieser Theorie sehr früh in der Reizverarbeitung an (Hillyard, Vogel, & Luck, 1999). Unklar bleibt, ob der Mechanismus der „sensory gain control“ tatsächlich zu einer Erhöhung der Verarbeitung beachteter Stimuli oder vielmehr zu einer verminderten Verarbeitung nicht beachteter Stimuli führt, oder ob beide Prozesse einen Einfluss haben.

Der Mechanismus des „sensory gain control“ wirkt kurzfristig über eine multiplikative Verstärkung während der reizevozierten neuronalen Antwort. Moduliert wird lediglich die Höhe der stimulusbezogenen neuronalen Aktivierung, der zeitliche Ablauf der Verarbeitung bleibt unverändert. Im Unterschied zu diesen kurzfristigen Verstärkungseffekten stehen die oben beschriebenen lang anhaltenden additiven Veränderungen der tonischen neuronalen Aktivierung, ausgelöst durch den Mechanismus der „biased competition“ (Kanwisher & Wojciulik, 2000).

Die Entscheidung, welcher der beiden Mechanismen für auftretende Aufmerksamkeitseffekte in einem bestimmten Untersuchungsparadigma verantwortlich ist, ist aufgrund häufiger Konfundierung beider Mechanismen meist schwer zu treffen. Die oben beschriebene Studie zur objektbasierten Aufmerksamkeit (O'Craven et al., 1999) liefert ein Beispiel. Die Probanden sollten entweder auf ein bestimmtes Objekt, z.B. auf Gesichter achten, oder nicht. Der Unterschied zwischen beiden Bedingungen wurde als Maß des Aufmerksamkeitseffekts ausgewertet. Es bleibt unklar, ob der Effekt auf einer Modulation der reizevozierten Aktivität basiert oder auf einer allgemeinen Erhöhung der tonischen Aktivierung in der FFA (Rees & Frith, 1999). Trotz der Schwierigkeit einer solchen Differenzierung soll in der vorliegenden Studie der Versuch unternommen werden, zwischen beiden Mechanismen zu unterscheiden.

### 3 Arbeitsgedächtnis

#### 3.1 Traditionelle Modelle des Arbeitsgedächtnisses

Das Arbeitsgedächtnis ermöglicht es einem Organismus, Informationen zeitlich begrenzt präsent zu halten und zu manipulieren, auch wenn diese Informationen nicht mehr in der Umwelt präsent sind, bzw. wenn sie aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen wurden. Mit seiner Hilfe gelingt es, die eigenen Handlungen zu reflektieren und auszuwählen anstatt nur reflexartig auf verfügbare Informationen aus der Umwelt zu reagieren. Damit stellt es eine wichtige Verbindung zwischen Wahrnehmung und kontrollierter Handlung dar.

Baddeley postuliert ein Multi-Komponenten Modell des Arbeitsgedächtnisses (Baddeley, 2003). Zum einen geht er von einer zentralen Exekutiven als einem Kontrollsystem der Aufmerksamkeit aus, welche selbst keine Informationen speichert, sondern zielgerichtet verarbeitet. Dieses Kontrollsystem ist modalitätsunabhängig und bestimmt, welche Stimuli beachtet und nach welchen Regeln sie verarbeitet werden. Zum anderen werden verschiedene, der zentralen Exekutive untergeordnete unabhängige Systeme der Informationsspeicherung angenommen: ein visuell-räumlicher Speicher, ein episodischer Puffer und eine phonologische Schleife. Die phonologische Schleife besteht aus einem zeitlichen Speicher, in welchem akustische oder sprach-basierte Informationen für wenige Sekunden aufrechterhalten werden können bevor sie verloren gehen. Zusätzlich existiert ein System der wiederholten Aussprache („articulatory rehearsal“) ähnlich einer inneren Stimme mit deren Hilfe Gedächtnisrepräsentationen durch subvokale Artikulation aufgefrischt und längere Zeit aufrechterhalten werden können. Zusätzlich zur phonologischen Schleife besteht ein visuell-räumlicher Speicher, in welchem visuelle, bildhafte und nonverbale Informationen gespeichert und manipuliert werden. Der episodische Puffer stellt eine Erweiterung des ursprünglichen Drei-Komponenten-Modells des Arbeitsgedächtnisses (Baddeley, 1996) dar. Seine Aufgabe ist die Integration von Informationen aus den Subsystemen und dem Langzeitgedächtnis.

Das eben beschriebene Modell des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley entspricht einem rein kognitiven Ansatz. Ein neurowissenschaftliches Modell wurde von Goldman-Rakic entwickelt. Als ein wissenschaftlicher Pionier fand sie spezialisierte Zellen innerhalb des PFK, welche während Arbeitsgedächtnisaufgaben eine anhaltend hohe Feuerrate aufwiesen (Funahashi, Bruce, & Goldman-Rakic, 1989). Studien an Affen zeigten, dass das Erinnern von Lokationen im Raum während einer Verzögerung (delay) von bis zu mehreren Sekunden

zu einer selektiven Aktivierung von Neuronen im PFK führte. Diese Neuronen zeigten eine ortsspezifische Aktivierung, was im Sinne von domänenspezifischen Modulen des PFK interpretiert wurde. Die Autoren vermuteten, dass diese Module mit ebenfalls domänenspezifischen posterioren Regionen interagieren, um internale Repräsentationen von zu merkenden Informationen im Arbeitsgedächtnis aufrecht zu halten (Chafee & Goldman-Rakic, 1998). Goldman-Rakic brachte diese neurowissenschaftlichen Erkenntnisse in Einklang mit dem kognitiven Modell von Baddeley und postulierte, dass der PFK das neuronale Korrelat der von Baddeley konzipierten Speicher (phonologische Schleife und visuell-räumlicher Speicher) ist. Die neuronale Aktivierung innerhalb des PFK wurde damit als die internale Repräsentation der Information, die im Arbeitsgedächtnis „on-line“ gehalten wird, interpretiert (Goldman-Rakic, 1995).

### **3.2 Die „emergent property view“ des Arbeitsgedächtnisses**

Nachdem über Jahre hinweg Befunde verschiedenster Studien zum Arbeitsgedächtnis im Einklang mit dem neurowissenschaftlichen Modell nach Goldman-Rakic interpretiert wurden, ist das Modell in jüngerer Zeit mehr und mehr in Kritik geraten. Im Vordergrund der Kritik stehen sowohl das theoretische Konzept der spezialisierten Speichersysteme (phonologische Schleife, visuell-räumlicher Speicher, episodischer Speicher) als auch das neurowissenschaftliche Konzept, nach welchem der PFK das entscheidende neuronale Substrat dieser Speichersysteme des Arbeitsgedächtnisses darstellt. Nach den gerade beschriebenen Modellen des Arbeitsgedächtnisses existieren innerhalb des PFK domänenspezifische Module, welche für die Speicherung und/ oder Aufrechterhaltung von Repräsentationen unterschiedlicher Domänen innerhalb des Arbeitsgedächtnisses zuständig sind. Anhänger dieses Modells unterscheiden einige wenige Speicher (verbal, visuell, räumlich), in letzter Zeit mehren sich allerdings die Hinweise darauf, dass eine wesentlich differenziertere Unterteilung wahrscheinlich ist. Nach Postle (2006) können hunderte oder sogar tausende Subsysteme, die von der zentralen Exekutive kontrolliert werden, unterschieden werden. Eine solch hohe Anzahl unabhängiger Speicher würde eine Unterteilung des PFK in zahlreiche topographisch eigenständige Einheiten erfordern, von denen jede für die Verarbeitung von Informationen einer speziellen Domäne im Arbeitsgedächtnis verantwortlich wäre. Ein alternativer Erklärungsansatz nimmt an, dass solche, für das Arbeitsgedächtnis spezifische, distinkte Speicherplätze im Hirn nicht

existieren. Vielmehr wird postuliert, dass die Aufrechterhaltung von Informationen im Arbeitsgedächtnis mit einer fortwährenden Aktivität in eben den Hirnregionen assoziiert ist, die für die Repräsentation dieser spezifischen Information in Situationen ohne Beteiligung des Arbeitsgedächtnisses zuständig sind. Das Arbeitsgedächtnis für Gesichtsstimuli wäre demnach mit einer fortwährenden Aktivierung der FFA assoziiert, welche für die Verarbeitung von Gesichtern in nicht gedächtnis-bezogener Wahrnehmung zuständig ist.

Das konnte in einer fMRT Studie nachgewiesen werden, welche die funktionale Relevanz der Aktivierung verschiedener Hirnareale während der Speicherung von Informationen im Arbeitsgedächtnis untersuchte (Postle, Druzgal, & D'Esposito, 2003). Die Autoren nutzten eine Aufgabe („delayed recognition task“), bei welcher zwischen der Präsentation des Ziel- und Testgesichts (also im „delay“) zwei weitere Distraktorgesichter eingeblendet wurden. Während des Intervalls zwischen dem zu merkenden Zielreiz und dem ersten Distraktor fand sich unter anderem eine Aktivierung im PFK, in der posterioren FFA und im posterioren parietalen Kortex. Die Aktivierung in all diesen Arealen korrelierte zwar mit der Speicherung des Zielreizes, eine Aussage über die tatsächliche Notwendigkeit kann jedoch mit einer solchen Auswertung nicht getroffen werden. Deshalb prüften die Autoren, welche der gefundenen Areale ihre Aktivität im Intervall zwischen den beiden Distraktoren und auch im Intervall zwischen dem zweiten Distraktor und dem Testreiz aufrecht hielten. Hinter diesem Vorgehen stand die Annahme, dass nur diejenigen Areale, die für die Speicherung der Gesichtsinformation notwendig sind, auch während des gesamten „delays“ eine erhöhte Aktivierung zeigen und nicht durch die interferierenden Distraktoren gestört werden. Tatsächlich zeigte sich lediglich in der FFA eine durchgehende Aktivierung. Das spricht dafür, dass Prozesse des Arbeitsgedächtnisses für Objekte mit einer anhaltenden Aktivierung in genau den Arealen assoziiert sind, die für die visuelle Wahrnehmung dieser Stimuli verantwortlich sind. Innerhalb des PFK fand sich kein Korrelat der Speicherung aufrechterhaltener Repräsentationen.

Neuere Modelle definieren das Arbeitsgedächtnis deshalb als eine „emergent property“, also eine immer wieder neu auftauchende Eigenschaft des Nervensystems (D'Esposito, 2007; Postle, 2006), die immer dann auftritt, wenn die Aufmerksamkeit auf sensorische, repräsentationale oder handlungsbezogene Systeme gelenkt wird. Demnach ist die kurzzeitige Aufrechterhaltung von Informationen unabhängig von spezialisierten Gedächtnissystemen wie z.B. dem visuell-räumlichen Speicher oder spezifischen Regionen des PFK. Die für die Wahrnehmung und Repräsentation der jeweiligen Information zuständigen Hirnregionen

sowie frei verfügbare Aufmerksamkeitsressourcen sind ausreichend zur Erklärung von Arbeitsgedächtnisprozessen.

Als Konsequenz daraus entfällt die Notwendigkeit, den PFK als Substrat der Speicherung von Informationen im Arbeitsgedächtnis anzunehmen. Das belegen auch neuere Studien, die zeigen konnten, dass der PFK weniger ein Speicherort für Repräsentationen von Gedächtnisinhalten ist, als vielmehr ein Kontrollinstrument, welches die aktive Aufrechterhaltung von Informationen durch die Lenkung der Aufmerksamkeit auf interne Repräsentationen der sensorischen Stimuli oder motorischen Handlungspläne bewirkt, die in posterioren Arealen gespeichert sind (de Fockert et al., 2001; Jha et al., 2004; Yoon, Curtis, & D'Esposito, 2006). Als Aufgabe des PFK wird die flexible Zuwendung von Aufmerksamkeitsressourcen beschrieben (Postle, 2006), die Integration von Informationen aus verschiedenen Domänen, die Stimulusauswahl und das Monitoring der verschiedenen Informationen innerhalb des Arbeitsgedächtnisses (Müller & Knight, 2006). Diese Kontrollprozesse könnten das eigentliche kognitive Korrelat der so oft gefundenen und als Speicherprozesse interpretierten, präfrontalen Aktivierung in der Zeit zwischen Gedächtnisreiz und Testreiz („delay“) sein.

In der vorliegenden Arbeit wird unter anderem nach möglichen neuronalen Korrelaten von Speicherprozessen in temporo-okzipitalen Hirnregionen gesucht. Die Existenz solcher Korrelate würde einen weiteren Hinweis darauf liefern, dass nicht der PFK für Speicherprozesse innerhalb des Arbeitsgedächtnisses zuständig ist, sondern, im Falle des visuellen Arbeitsgedächtnisses, die spezifischen visuellen Verarbeitungszentren.

Nach Postle (2006) kommt es zu Prozessen des Arbeitsgedächtnisses, wenn die Aufmerksamkeit auf sensorische, repräsentationale oder handlungsbezogene Systeme fokussiert wird. Daraus kann man schlussfolgern, dass die beiden Konstrukte Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis in engem Zusammenhang stehen. Hinweise darauf ergaben sich in verschiedenen empirischen Studien. Nachdem bisher beide Konstrukte getrennt dargestellt wurden, werden im Folgenden Wechselwirkungen aufgezeigt.

### **3.3 Wechselwirkungen zwischen Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit**

Der zentrale Punkt innerhalb von Modellen des Arbeitsgedächtnisses ist die zeitliche Aufrechterhaltung und Manipulation von Informationen in einem System mit limitierter Kapazität. Im Gegensatz dazu betonen Modelle der selektiven Aufmerksamkeit die effiziente

Enkodierung relevanter Zielreize bei ebenfalls limitierter Kapazität (Awh et al., 2006). Diese beiden unterschiedlichen Konstrukte führten dazu, dass Prozesse des Arbeitsgedächtnisses und der Aufmerksamkeit über Jahre hinweg unabhängig voneinander erforscht wurden. Dies wird der Realität aber nicht gerecht, da beide Prozesse nicht nur die Funktion haben, die Verfügbarkeit relevanter Informationen zu erhöhen, sondern auch eine wechselseitige Beeinflussung zwischen den Prozessen der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses besteht. Auf der einen Seite könnte man Aufmerksamkeit als ein Tor zum Gedächtnis sehen, denn Aufmerksamkeit spielt eine wichtige Rolle bei der visuellen Erkundung der Umwelt. So kann z.B. die Verarbeitung aufgaben relevanter Objekte oder Objektmerkmale selektiv verstärkt werden. Es kann auch mitbestimmt werden, welcher Aspekt einer visuellen Szene als nächstes betrachtet wird. Damit beeinflusst die Aufmerksamkeit, was im Langzeitgedächtnis gespeichert wird, denn ignorierte Stimuli werden für gewöhnlich kaum erinnert. Auf der anderen Seite beeinflussen aber auch Lern- und Gedächtnisprozesse, welche Reize einer komplexen Umwelt Beachtung finden und welche nicht. Neue oder verhaltensrelevante Stimuli geraten z.B. eher in den Fokus der Aufmerksamkeit, und für die Klassifikation der Stimuli als neu oder verhaltensrelevant sind wiederum Gedächtnisprozesse notwendig. So kann Wissen aufgrund früherer Erfahrungen helfen, vorherzusagen, welche Aspekte der Umwelt wahrscheinlich relevant sind und damit die Aufmerksamkeit selektiv auf diese Aspekte lenken.

Korrelative Studien konnten zeigen, dass die Spanne des Arbeitsgedächtnisses mit der Fähigkeit zur Interferenzinhibition assoziiert ist. Die Inhibition von Interferenzen kann man mit einer Stroop Aufgabe erfassen. Bei einer solchen Aufgabe werden zwei Arten von Informationen dargeboten, z.B. ein Farbwort, das in der gleichen oder einer anderen Farbe geschrieben ist. Die Aufgabe der Probanden ist die Benennung der Farbe, in der das Wort geschrieben ist. Widerspricht der Wortinhalt der Schriftfarbe, muss diese Interferenz für eine erfolgreiche Bewältigung der Aufgabe inhibiert werden. Personen mit hoher Arbeitsgedächtnisspanne gelang diese Inhibition besser als Personen mit niedriger Spanne (Kane & Engle, 2003). Erklärt wird das damit, dass in wissenschaftlichen Untersuchungsparadigmen die Aufmerksamkeit „top down“ über eine Instruktion auf bestimmte Orte, Objekte oder Objektmerkmale gelenkt werden kann. Eine erfolgreiche Aufgabenleistung ist damit von der Durchführung und Aufrechterhaltung einer Instruktion und damit vom Arbeitsgedächtnis abhängig. Nach der Theorie des „perceptual loads“ (Lavie, 1995) verhindert die perzeptuelle Selektion eine Distraktorverarbeitung, wenn die

Wahrnehmungskapazität einer Person ausgelastet ist. Stehen freie Kapazitäten zur Verfügung, hängt es von der kognitiven Kontrolle ab, inwieweit Distraktoren interferieren. Ist die selektive Aufmerksamkeit abhängig vom Arbeitsgedächtnis, sollte die kognitive Kontrolle der Aufmerksamkeit beeinträchtigt sein, wenn die Arbeitsgedächtniskapazität ausgelastet ist. Dies konnte in einer aktuellen Studie nachgewiesen werden (de Fockert et al., 2001), in der zwei unabhängige Aufgaben, eine zur visuellen selektiven Aufmerksamkeit und eine zum Arbeitsgedächtnis, kombiniert wurden. Die Aufgabe zur selektiven Aufmerksamkeit war eine Stroop Aufgabe und bestand darin, geschriebene Namen berühmter Persönlichkeiten als Politiker oder Popstars zu klassifizieren und parallel präsentierte interferierende Gesichter berühmter Politiker oder Popstars auszublenden. Währenddessen sollten Zahlenreihen (einfache vs. schwierige) im Gedächtnis aufrecht erhalten werden. Wie vermutet fand sich eine erhöhte Verarbeitung der störenden Gesichtsstimuli im visuellen Assoziationskortex (FFA) bei hoher Gedächtnisauslastung im Vergleich zu geringer Auslastung. Die Autoren interpretierten dieses Ergebnis dahingehend, dass dasselbe exekutive System, welches die Zahlenreihen im Arbeitsgedächtnis aufrecht hielt, auch für die verstärkte Beachtung bestimmter visueller Reize verantwortlich war. Unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses aufgrund der Zahlenreihen blieben keine Ressourcen zur Aufrechterhaltung der Stimulusprioritäten in der Aufgabe zur selektiven Aufmerksamkeit, was zu einem verstärkten Eindringen irrelevanter Informationen führte. Damit wurden die irrelevanten Gesichtsstimuli verstärkt verarbeitet. Mithilfe dieser Studie konnten de Fockert und Kollegen (2001) einen starken Zusammenhang zwischen Arbeitsgedächtnis und selektiver Aufmerksamkeit nachweisen.

Anlehnend an diese Studie wurde mit einem ganz anderen Studiendesign versucht, eben diesen Zusammenhang zu bestätigen (Spinks et al., 2004). Die Autoren manipulierten allerdings nicht die phonologische Schleife des Arbeitsgedächtnisses (einfache vs. schwierige Zahlenreihe), sondern konzentrierten sich auf die zentrale Exekutive und erkundeten, welche Auswirkungen eine Manipulation dieser auf die selektive Aufmerksamkeit hat. Dazu wurden zwei unterschiedlich schwere Subtraktionsaufgaben verwendet, welche die Versuchspersonen mental berechnen sollten. In der leichten Version sollte die Zahl 3 von einer dreistelligen Zahl abgezogen werden, in der schwierigen Bedingung die Zahl 13 von einer vierstelligen Zahl. Die Auslastung der phonologischen Schleife war in beiden Aufgaben ähnlich, die Anforderungen an die zentrale Exekutive des Arbeitsgedächtnisses waren in der schwierigeren Aufgabe höher. Parallel dazu wurde zu jeder Rechenaufgabe ein Distraktor

präsentiert. Distraktoren waren für die chinesischen Probanden bekannte chinesische Schriftzeichen und unbekannte koreanische Schriftzeichen. Den Ergebnissen der oben beschriebenen Studie zufolge (de Fockert et al., 2001) müssten Distraktoren, und hier insbesondere die unbekannteren koreanischen Schriftzeichen, während der schwierigeren Rechenaufgabe stärker verarbeitet werden als während der leichteren. Die erhobenen fMRT Daten zeigten allerdings ein gegensätzliches Bild, die Inhibition der Distraktorverarbeitung gelang besser unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses. Es ist unklar, wodurch die widersprüchlichen Ergebnisse zustande kamen. Möglicherweise spielen die unterschiedlichen Aufgabendesigns eine Rolle (zwei Aufgaben bei de Fockert, eine Aufgabe bei Spinks). Wahrscheinlich spielte auch die Manipulation der Auslastung des Arbeitsgedächtnisses eine Rolle (phonologische Schleife bei de Fockert, zentrale Exekutive bei Spinks).

Der Versuch einer Erklärung für solch widersprüchliche Befunde wurde in einer aktuellen Studie gegeben (Chen & Chan, 2007). In dieser wurde postuliert, dass nicht die Auslastung des Arbeitsgedächtnisses die Ursache für das Ausmaß der Distraktorverarbeitung ist, sondern der unterschiedliche Fokus der Aufmerksamkeit. Häufig ist die Manipulation des Arbeitsgedächtnisses mit einer unterschiedlichen Anzahl an zu merkenden Reizen gekoppelt. Werden diese Reize parallel präsentiert führt das dazu, dass in der Bedingung mit geringer Auslastung des Arbeitsgedächtnisses ein enger Fokus besteht und in der Bedingung mit hoher Auslastung ein weiter Fokus. Chen und Chan konnten in einer Reihe von Experimenten zeigen, dass die Interferenz durch die Distraktoren trotz Manipulation der Auslastung des Arbeitsgedächtnisses konstant blieb, wenn der Fokus der Aufmerksamkeit konstant gehalten wurde. Das nahmen die Autoren als Beleg dafür, dass die Verarbeitung von Distraktoren unabhängig vom Arbeitsgedächtnis sein kann und stattdessen der Fokus der Aufmerksamkeit einen entscheidenden Einfluss hat.

Der Erklärungsversuch von Chen und Chan (2007) blieb allerdings unzureichend, da in den beiden oben beschriebenen Studien (de Fockert et al., 2001; Spinks et al., 2004) die Anzahl an zeitgleich dargebotenen, zu memorierenden Stimuli über die verschiedenen Auslastungen des Arbeitsgedächtnisses hinweg gleich oder zumindest sehr ähnlich gehalten wurde. Damit müsste auch der Fokus der Aufmerksamkeit konstant geblieben sein und kommt nicht als Ursache der Aufmerksamkeitseffekte in Frage.

Aufgrund der vielfältigen und widersprüchlichen Befunde lässt sich schlussfolgern, dass die Beziehung zwischen Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit bisher nur unzureichend erforscht ist. Möglicherweise ist der Zusammenhang abhängig von einer spezifischen

Arbeitsgedächtnisressource oder der speziellen Art einer Aufgabe zur selektiven Aufmerksamkeit. Um einen weiteren Beitrag zur Klärung dieser Fragestellung zu leisten ist es für die Planung zukünftiger Studien entscheidend, die genauen Bedingungen der Anforderungen an Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit in einem Studiendesign zu spezifizieren.

Nach der Theorie des „perceptual load“ (Lavie, 1995) ist die Auslastung der kognitiven Kapazität vor allem dann von entscheidender Bedeutung, wenn die perzeptuelle Verarbeitungskapazität gering ist. Deshalb wurden in den experimentellen Studien der vorliegenden Arbeit sequentiell präsentierte Reize untersucht. In einem solchen Studiendesign wird immer nur ein Stimulus pro Zeitpunkt präsentiert, was nicht nur mit einer geringen perzeptuellen Auslastung einhergeht, sondern auch mit einem konstanten Fokus der Aufmerksamkeit. Damit sollte die Verarbeitung von Distraktoren ausschließlich vom Ausmaß der kognitiven Kontrolle anhängig sein.

Trotz widersprüchlicher Befunde verdeutlichen die Ergebnisse der eben beschriebenen Studien (Chen & Chan, 2007; de Fockert et al., 2001; Spinks et al., 2004) doch eindrücklich, dass es einen engen Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis gibt. Im Folgenden werden Studien vorgestellt, die Hinweise darauf liefern, dass eine Ursache dieses Zusammenhangs in überlappenden neuronalen Korrelaten liegen könnte.

### **3.4 Gemeinsame neuronale Korrelate von Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit**

Neuere Modelle gehen davon aus, dass man bei der Bestimmung der neuronalen Korrelate des visuellen Arbeitsgedächtnisses zwischen Quelle (PFK) und Ort (z.B. FFA) der Arbeitsgedächtnisprozesse unterscheiden kann (siehe Punkt 3.2 des Abschnitts „theoretische Einführung“). Diese Unterscheidung kann auch für Prozesse der Aufmerksamkeit getroffen werden (Giesbrecht, Kingstone, Handy, Hopfinger, & Mangun, 2006). Auch hier werden als Quelle neuronale Strukturen im fronto-parietalen Kortex angenommen, welche „top down“ Kontrollprozesse vermitteln (Kanwisher & Wojciulik, 2000). Als Ort der Aufmerksamkeits-effekte gelten visuo-kortikale Areale, die primär an der Stimulusverarbeitung beteiligt sind (de Fockert et al., 2001; Jha et al., 2004; Yoon et al., 2006).

Gerade die Bedeutung des inferioren temporalen Kortex für Prozesse des Arbeitsgedächtnisses und der Aufmerksamkeit konnte wiederholt gezeigt werden. Er verarbeitet und repräsentiert Informationen über komplexe visuelle Objekte und stellt somit

das Endstadium des ventralen visuellen Verarbeitungspfades dar (Ranganath, 2006). Strukturen des inferioren temporalen Kortex wie FFA und PPA wurden aufgrund ihrer spezifischen Bevorzugung bestimmter Stimuluskategorien häufig zur Untersuchung von Effekten der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses herangezogen. Verschiedene Studien konnten eine entscheidende Beteiligung an der Aufrechterhaltung und Speicherung visueller Objektinformation im Arbeitsgedächtnis zeigen (de Fockert et al., 2001; Gazzaley et al., 2005; Jha et al., 2004; Yoon et al., 2006).

Mit der Frage nach der Quelle von Effekten der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses beschäftigte sich eine große Anzahl an neurowissenschaftlichen Studien. Diese fanden eine zentrale Rolle des PFK in Kooperation mit anderen kortikalen Arealen (Belger et al., 1998; Braver et al., 2001; D'Esposito, Aguirre et al., 1998; D'Esposito, Ballard, Aguirre, & Zarahn, 1998; Garavan, Ross, Li, & Stein, 2000; Klingberg, O'Sullivan, & Roland, 1997; Postle, 2005; Postle et al., 2003; Postle, Stern, Rosen, & Corkin, 2000; Ranganath, DeGutis, & D'Esposito, 2004; Rissman, Gazzaley, & D'Esposito, 2004; Rowe, Toni, Josephs, Frackowiak, & Passingham, 2000; Sakai, Rowe, & Passingham, 2002; Stern, Sherman, Kirchhoff, & Hasselmo, 2001; Yoon et al., 2006).

In einer aktuellen fMRT Studie (Mayer et al., 2007) präsentierten die Autoren den Probanden eine kombinierte Aufgabe aus visueller Suche und „delayed recognition task“ und manipulierten unabhängig voneinander die Anforderungen an die selektive Aufmerksamkeit und die Enkodierung von Informationen im Arbeitsgedächtnis. Mit diesem Design gelang es den Autoren, Hirnregionen zu identifizieren, die an beiden Prozessen beteiligt waren. Eine überlappende Aktivierung fand sich in einem weit verbreiteten fronto-parietalem Netzwerk verschiedener Hirnareale (im lateralen und medialen parietalen Kortex (intraparietaler Sulcus und Precuneus), entlang des präzentralen Sulcus, im medialen PFK und im rechten mittleren und inferioren frontalen Gyrus). Weiterhin fand sich eine überlappende Aktivierung im okzipito-temporalen Kortex.

Die enge Verzahnung von Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit hat zur Folge, dass die Auslastung der Kapazität eines der beiden Prozesse zu Einschränkungen im jeweils anderen Prozess führt. Deshalb ist die Fähigkeit aktuell verhaltensrelevante Informationen zu bestimmen und die Aufmerksamkeit auf diese zu richten von immenser Bedeutung für das Arbeitsgedächtnis. Die Frage, wie diese Aufmerksamkeitslenkung umgesetzt wird ist ein zentrales Anliegen der vorliegenden Arbeit. Mögliche Hypothesen werden im folgenden Abschnitt erläutert.

#### 4 Aufmerksamkeitsbasierte Selektion

Aufgrund der limitierten Kapazität kognitiver Prozesse ist die Unterteilung der zur Verfügung stehenden Information in relevante und irrelevante Anteile von großer Wichtigkeit. Damit kommt dem Kontrollprozess der Selektion eine entscheidende Rolle zu (Zhang, Feng, Fox, Gao, & Tan, 2004). Selektionsprozesse sollten die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf Zielreize hin und weg von Distraktoren lenken. Unklar ist bis heute, ob Selektionsprozesse entweder zu einer verstärkten Aufrechterhaltung relevanter Reize führen, oder zu einer aktiven Inhibition der Verarbeitung irrelevanter Reize oder zu einem passiven Nichtbeachten der Distraktoren. Zum Schicksal nichtbeachteter Stimuli existieren zwei konkurrierende Ansichten. Zum einen wäre es möglich, dass zwei unabhängige Prozesse existieren und selektive Aufmerksamkeit neben der Fokussierung auf relevante Reize auch zu einer aktiven Inhibition irrelevanter Reize führt. Zum anderen könnte allerdings aufgrund begrenzter Verarbeitungsressourcen das Fokussieren der Aufmerksamkeit auf bestimmte Orte oder Objekte auch automatisch mit dem Nichtbeachten aller anderen irrelevanten Informationen einhergehen.

Einen Hinweis auf einen aktiven Inhibitionsprozess könnte man ableiten, wenn selektive Aufmerksamkeit nicht nur zu einer Erhöhung der neuronalen Verarbeitung beachteter Reize führen würde, sondern auch zu einer verminderten Verarbeitung nicht beachteter. Eine aktuelle Studie (Gazzaley et al., 2005) versuchte eine solche Modulation mit einem eleganten Studiendesign nachzuweisen. Die Autoren präsentierten den Probanden in verschiedenen Bedingungen identische „bottom up“ Informationen, jeweils zwei Gesichts- und zwei Landschaftsstimuli. Die Aufmerksamkeit der Probanden wurde mittels einer Instruktion „top down“ in den verschiedenen Bedingungen auf eine der beiden Stimuluskategorien gelenkt, die jeweils andere Kategorie sollte ignoriert werden. Um den Reizen der zu beachtenden Kategorie eine Relevanz zu geben, sollten sich diese Stimuli gemerkt werden und nach einer gewissen Verzögerungszeit mit neuen Reizen derselben Kategorie verglichen werden. Eine dritte Bedingung diente als perzeptuelle Baseline. Die Probanden sahen ebenfalls zwei Gesichts- und zwei Landschaftsstimuli, sollten diese aber passiv betrachten und keinen der Stimuli im Gedächtnis halten oder ignorieren. Gazzaley und Kollegen (2005) untersuchten also Aufmerksamkeitsprozesse innerhalb einer Aufgabe zum Arbeitsgedächtnis. Mittels EEG und fMRT Daten konnte überprüft werden, welche Auswirkungen die Modulation der Aufmerksamkeit auf die neuronale Verarbeitung der Stimuli hatte. Lautete die Aufgabe, sich die Gesichtsstimuli zu merken, fand sich eine erhöhte Aktivierung der FFA im Vergleich zur

perzeptuellen Baseline, sollten die Gesichter ignoriert werden, fand sich eine verminderte Aktivierung. Hinsichtlich der Landschaftsstimuli fand sich ein entsprechender Befund für die PPA. Diese Befunde zeigten eindrücklich, dass die Modulation der Verarbeitung visueller Reize aufgrund der Aufmerksamkeit nicht nur auf eine erhöhte Verarbeitung beachteter Reize zurückzuführen ist sondern auch auf eine Suppression der Distraktorverarbeitung. Man könnte vermuten, dass die Fähigkeit, irrelevante Stimuli zu ignorieren, auf einer aktiven Unterdrückung der Distraktoren basiert. Im Sinne des zweiten Ansatzes zum Schicksal nicht beachteter Reize wäre es allerdings auch möglich, dass aufgrund des Fokussierens der Aufmerksamkeit auf relevante Stimuli keinerlei Verarbeitungsressourcen für irrelevante Stimuli zur Verfügung standen und die neuronale Aktivität auf diese deshalb vermindert war im Vergleich zur Kontrollbedingung mit ausreichenden Kapazitäten. Um zwischen diesen beiden Alternativerklärungen entscheiden zu können, müsste man die neuronalen Korrelate betrachten, welche „top down“ die Modulation der neuronalen Aktivierung aufgrund der Verarbeitung von Gesichts- bzw. Landschaftsstimuli in der FFA bzw. der PPA steuerten. Leider mussten die Autoren die Auswertung trotz der sequentiellen Präsentation der Reize aufgrund einer Konfundierung beachteter und nichtbeachteter Reize auf die spezifischen Verarbeitungsareale FFA und PPA beschränken. Da die Präsentation nur kurz andauerte und die einzelnen Stimuli zeitlich eng aufeinanderfolgten, war eine getrennte Auswertung und damit die Untersuchung spezifischer Korrelate der Aufmerksamkeitsprozesse im PFK nicht möglich. Eine Aussage über die Lokalisation der Quelle, von der aus die „top down“ Signale gesendet wurden, war somit nicht möglich.

Die Untersuchung von Prozessen der Selektion innerhalb des Arbeitsgedächtnisses stand auch im Zentrum einer weiteren fMRT Studie (Jha et al., 2004), bei welcher Prozesse der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses ebenfalls kombiniert erforscht wurden. Die Autoren verwendeten eine „delayed recognition“ Aufgabe, bei welcher die Probanden sich jeweils zwei relevante Reize einprägen (Gesichter oder Schuhe). Nach einer gewissen Verzögerung sollte entschieden werden, ob ein nun dargebotener Testreiz mit einem der beiden zuvor präsentierten Reize übereinstimmte. Während des Intervalls zwischen Gedächtnis- und Teststimulus („delay“) wurden mehrere aufgaben-irrelevante Distraktoren eingeblendet, entweder ausschließlich Gesichter oder ausschließlich Schuhe. Die Distraktoren gehörten also entweder zur selben Kategorie wie die relevanten Reize (kongruente Distraktoren) oder zu der jeweils anderen (inkongruente Distraktoren). Die Autoren postulierten, dass an der Unterscheidung zwischen der Aufrechterhaltung von Zielreizen und

der Interferenzkontrolle von Distraktoren Selektionsprozesse beteiligt sind. Bei ähnlichem Ziel- und Störreiz (also bei kongruenten Distraktoren) sind solche Selektionsprozesse verstärkt notwendig, da die Unterscheidung schwieriger ist. Die gefundene erhöhte Aktivierung im ventrolateralen PFK (VL-PFK) und in der FFA bestätigte diese Hypothese. Dieses Ergebnis wird von den Autoren nicht im Sinne zweier unabhängiger aktiver Prozesse der Aufrechterhaltung relevanter und der Inhibition irrelevanter Reize interpretiert, sondern als ein einheitlicher Prozess der Selektion, welcher mithilfe einer Aufmerksamkeitsverschiebung die potentiell zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen auf relevante Zielreize hin fokussiert. Allerdings wäre es ebenso möglich, die gefundene Aktivierung des VL-PFK als Korrelat eines aktiven Inhibitionsprozesses zu interpretieren. Auch diese Studie lässt also keine endgültige Entscheidung zwischen den beiden widersprüchlichen Erklärungsansätzen zu.

Der Frage, welcher der beiden Ansätze zutrifft, gingen auch Bunge und Kollegen (2001) nach. Sie stellten die Hypothese auf, dass, wenn es sich bei der Interferenzinhibition um eine aktive Unterdrückung irrelevanter Reize handelt, ein eigenständiges neuronales Korrelat zu finden sein müsste. Wenn es sich bei der Kontrolle von Arbeitsgedächtnis und Interferenzinhibition allerdings um voneinander abhängige Prozesse handelt, sollten die gleichen Hirnstrukturen beteiligt sein. Diesen Fragen widmeten sich die Autoren in einer fMRT Studie (Bunge et al., 2001), in der sie untersuchten, ob Prozesse des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzkontrolle durch gemeinsame oder verschiedene präfrontale Strukturen gesteuert werden. Um dies zu überprüfen nutzten sie eine „Sternberg item recognition“ Aufgabe, bei der die Versuchspersonen entweder ein, vier oder sechs Buchstaben auf einem Computermonitor sahen. Diese sollten erinnert werden und nach einer gewissen Verzögerung mit einem Testbuchstaben verglichen werden. Aufgabe der Probanden war, zu bestimmen, ob der Testbuchstabe im zuvor präsentierten Buchstabenset vorgekommen war, oder nicht. Die Auslastung des Arbeitsgedächtnisses wurde durch die Anzahl der zu merkenden Buchstaben (eins, vier, sechs) manipuliert, das nötige Ausmaß an Interferenzkontrolle durch den Testbuchstaben. War der aktuelle Testbuchstabe in keinem der beiden zuvor präsentierten Buchstabensets vorhanden, sollte weniger Interferenzkontrolle nötig sein um die Aufgabe zu lösen als wenn der aktuelle Testbuchstabe zwar nicht im letzten, dafür aber im vorletzten Buchstabenset vorkam. Damit handelte es sich um proaktive Interferenzen, also um vergangene relevante Reize, deren mentale Repräsentation in der aktuell zu lösenden Aufgabe störend wirkte. Mit diesem Design war es den Autoren möglich,

Prozesse des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzkontrolle unabhängig voneinander zu manipulieren und so deren neuronale Korrelate zu analysieren. Sie fanden für beide Prozesse eine Aktivierung in stark überlappenden Hirnregionen, im DL-PFK, im VL-PFK, in der anterioren Insula, im anterioren Cingulum und im parietalen Kortex.

Aus der Tatsache, dass beide Mechanismen, Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle, durch dieselben präfrontalen Regionen vermittelt wurden, schlussfolgerten die Autoren, dass beide Prozesse voneinander abhängig sind. Diese Ansicht wird unterstützt durch Forschung, welche zeigen konnte, dass die Fähigkeit, Distraktoren zu unterdrücken, nicht unbedingt die aktive Suppression von irrelevanten Informationen durch frontale Regionen beinhaltet (Egner & Hirsch, 2005). Die Autoren dieser Studie fanden, dass der PFK Aufmerksamkeitskontrolle alleine durch die erleichterte Verarbeitung aufgaben-relevanter Information zustande bringen kann und die aktive Inhibition von störenden Stimuli dazu nicht nötig ist.

Einen Nachteil der Studie von Bunge und Kollegen (2001) war, dass die Manipulation der Arbeitsgedächtnissauslastung und der Interferenzkontrolle den Versuchsteilnehmern unterschiedlich stark bewusst wurde, was einen Einfluss auf die Ergebnisse haben könnte. Alle Probanden erkannten die Manipulation der Kapazität aber nur wenige die der Interferenz.

Auch wenn Bunge und Kollegen (2001) keine Hirnregionen fanden, die ausschließlich durch die Manipulation von Prozessen des Arbeitsgedächtnisses bzw. der Interferenzkontrolle aktiviert wurden, so zeigten sich doch prozessspezifische Korrelationen zwischen Hirnaktivierung und Verhalten. Die Aktivierung im rechten mittleren und im linken inferioren frontalen Gyrus korrelierte ausschließlich mit der Interferenzmanipulation, die Aktivität des anterioren Cingulums mit der Manipulation der Auslastung des Arbeitsgedächtnisses. Hinweise auf eine zentrale Rolle des linken inferioren PFK als neuronales Korrelat der Vermittlung von Interferenzen fanden sich auch in weiteren Studien (Postle, Brush, & Nick, 2004; Zhang et al., 2004).

## 5 Anliegen der eigenen Arbeit

Der Erkenntnisgewinn bezüglich selektiver Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis ist ein zentrales Anliegen der neurowissenschaftlichen Forschung der letzten Jahrzehnte. Erst in jüngerer Zeit begann sich die Ansicht durchzusetzen, dass beide Funktionen in engem Zusammenhang stehen und es für ein umfassendes Verständnis notwendig ist, diese Zusammenhänge zu untersuchen. Die oben dargestellten Befunde zeigen erste Fortschritte, machen aber auch deutlich, dass Interaktionen zwischen beiden Konzepten bis heute nur unzureichend erforscht wurden. Deshalb ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Untersuchung gemeinsamer und unabhängiger neuronaler Korrelate von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis in unterschiedlichen Hirnregionen und deren funktionaler Bedeutung, erfasst durch neurophysiologische (EEG) und bildgebende (NIRS) Methoden.

Aufgrund der Tatsache, dass selektive Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis beschränkt sind in der Menge der Informationen, die verarbeitet werden können, ist das Ausmaß, mit dem die Verarbeitung von Distraktoren verhindert werden kann, ein zentrales Thema aktueller Forschung. Hinsichtlich der Frage nach dem Schicksal nichtbeachteter Stimuli existieren zwei konkurrierende Ansichten. Gazzaley und Kollegen (2005) konnten nachweisen, dass Effekte der Aufmerksamkeitsmodulation nicht allein durch eine Erhöhung der Repräsentation beachteter Reize zustande kommen sondern auch durch eine Verminderung nicht beachteter. Dieses Ergebnis kann man als Hinweis darauf interpretieren, dass zwei qualitativ unterschiedliche Mechanismen existieren, das Fokussieren auf Stimuli und das aktive Inhibieren von Stimuli.

Die oben vorgestellten Befunde zu gemeinsamen präfrontalen Korrelaten von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis (Bunge et al., 2001) sprechen allerdings eher dafür, dass es lediglich einen einzelnen Mechanismus gibt und selektive Aufmerksamkeit als Kontinuum zu sehen ist. Aufgrund begrenzter Verarbeitungsressourcen geht demnach das Fokussieren auf bestimmte Stimuli automatisch mit dem Nichtbeachten aller anderen Stimuli einher. Die Frage, ob selektive Aufmerksamkeit eine aktive Inhibition der Verarbeitung irrelevanter Stimuli beinhaltet oder eher die Aufteilung begrenzter Verarbeitungsressourcen zugunsten beachteter Reize darstellt, ist ein zentrales Anliegen dieser Arbeit. Um in diesem Konflikt Klarheit zu schaffen sollen die Fragen beantwortet werden, inwiefern die neuronale Verarbeitung visueller Stimuli durch Aufmerksamkeit modulierbar ist und welche „top down“ Prozesse diese Modulation bewirken.

## II Experimentelle Untersuchungen

### 1 Experiment 1: Neuronale Korrelate grundlegender Aufmerksamkeitsprozesse

#### 1.1 Herleitung der Fragestellung

Unter Punkt 4.1 der theoretischen Einführung wurde erläutert, dass neuere Modelle der Aufmerksamkeit diese nicht als einheitliche Funktion ansehen, sondern verschiedene Komponenten unterscheiden. Das dort beschriebene Modell der Aufmerksamkeit (Van Zomeren & Brouwer, 1994) unterscheidet zwischen Aspekten der Intensität und der Selektivität, wobei „die Regelung der Aufmerksamkeitsintensität [als] Voraussetzung für eine energetische Versorgung komplexerer Aufmerksamkeitsleistungen wie Selektivität, räumliche Ausrichtung der Aufmerksamkeit und die Fähigkeit zur Aufmerksamkeitssteilung“ angesehen wird (Sturm, 2004 S. 107). Demzufolge ist für ein Verständnis komplexer Aufmerksamkeitsleistungen die Untersuchung basaler Aufmerksamkeitsaspekte notwendig, weshalb diese erste Studie sich mit der Alertness als grundlegende Funktion des Intensitätsaspekts beschäftigte. Dazu wurde ein zweistufiges Studiendesign gewählt. Mit Hilfe einer ersten Datenerhebung sollten für die Alertness relevante Areale, sogenannte „regions of interests“ (ROI), innerhalb des fronto-temporalen Kortex definiert werden. Eine zweite Datenerhebung diente der Testung von Effekte der Alertness in diesen spezifischen Regionen.

#### 1.2 Hypothesen

- Alertness geht mit einer Erhöhung der Aktivierung des rechten fronto-temporalen und linken VL-PFK einher.
- Diese Aktivierung ist nicht auf die Verarbeitung der visuellen Information oder die motorische Reaktion auf den Stimulus zurückzuführen.

## 1.3 Methoden

### 1.3.1 Versuchspersonen

An einer ersten Datenerhebung nahmen 13 gesunde Probanden (10 Frauen) im Alter von 20 bis 54 Jahren teil, an einer zweiten 22 (17 Frauen) im Alter von 19 bis 56 Jahren. Das durchschnittliche Alter betrug in der ersten Studie 27.3 ( $SD = 10.9$ ) Jahre, in der zweiten 35.0 ( $SD = 8.2$ ) Jahre. Alle Probanden waren Rechtshänder, besaßen ein normales oder korrigiertes Sehvermögen und wurden mündlich aus dem Bekanntenkreis der Versuchsleiterin geworben. Bei keinem war eine neurologische oder psychiatrische Störung bekannt. Alle Probanden erhielten eine Aufklärung zum Ablauf des Experimentes und der NIRS bevor sie schriftlich ihre Zustimmung zur Teilnahme gaben.

### 1.3.2 Untersuchungsdesign

Während der Aufgabe zur Alertness wurden den Probanden weiße Kreuze präsentiert, auf die so schnell wie möglich mit dem Zeigefinger der rechten Hand reagiert werden sollte. Ankündigt wurde jedes Kreuz von einem kleinen, ebenfalls weißen Quadrat mit einer Seitenlänge von 4 mm, das für 200 ms dargeboten wurde. Die Kreuze selbst hatten eine Seitenlänge von 2 cm, erschienen zentral auf einem schwarzen Bildschirm und verschwanden sofort nach der Reaktion der Probanden. Erfolgte keine Reaktion, wurde das Kreuz nach 1800 ms ausgeblendet. Nach jedem Kreuz wurde ein variables Interstimulusintervall (ISI) dargeboten, währenddessen der Bildschirm schwarz blieb. Die Dauer des ISI war abhängig von der Reaktionszeit auf das Kreuz und betrug maximal 2800 ms. Im Anschluss daran gab es ein weiteres ISI zwischen 500 und 2300 ms (die Länge variierte in Schritten von 200 ms, die zehn verschiedenen Längen wurden randomisiert ausgewählt). Die Datenerhebung erfolgte im Blockdesign. Pro Block wurden insgesamt zehn Durchgänge (d.h. zehn Kreuze im Alertness Block) präsentiert, was zu einer Blocklänge von insgesamt 44 s führte.

In der ersten Datenerhebung wurde neben der Alertness auch eine visuelle Kontrollaufgabe dargeboten um auszuschließen, dass eine gefundene Aktivierung lediglich auf die Verarbeitung der weißen Kreuze zurückzuführen ist. Die visuelle Stimulation in der Kontrollaufgabe unterschied sich nicht von der der Alertness Aufgabe, allerdings war keine Reaktion erforderlich. Alle Kreuze sollten passiv betrachtet werden. Die Präsentation des Alertness- wie auch des Kontrollblocks wurde drei Mal wiederholt, wobei auf jeden Block

eine Ruheperiode von 15 s folgte. Die Datenerhebung erstreckte sich somit insgesamt auf circa sechs Minuten. Vor jedem Block wurde eine kurze schriftliche Instruktion für den nachfolgenden Block auf dem Computermonitor eingeblendet.

In der zweiten Datenerhebung wurde den Probanden zusätzlich zu den beiden eben beschriebenen Blöcken ein dritter Kontrollblock ohne jede visuelle Stimulation dargeboten. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, den schwarzen Bildschirm zu betrachten und circa jede Sekunde mit dem Zeigefinger der rechten Hand die Reaktionstaste zu drücken. Mit dieser dritten Bedingung konnte ausgeschlossen werden, dass eine gefundene funktionale Hirnaktivität lediglich ein Artefakt der motorischen Reaktion ist. Die Datenerhebung erstreckte sich hier auf circa neun Minuten.

Die Stimuli wurden auf einem Computermonitor präsentiert, der in einem Abstand von 60 cm vor den Probanden in einem abgedunkelten und ruhigen Raum stand. Beide Datenerhebungen, wie auch alle nachfolgenden, fanden im neurophysiologischen Labor der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Würzburg statt.

### **1.3.3 Datenaufzeichnung und Auswertung**

#### **Erhebung der NIRS Daten**

Die NIRS ist eine nicht-invasive bildgebende Technik, welche sich die Absorptions- und Reflexionseigenschaften des nahinfraroten Lichts zu nutze macht um Informationen über die Hirnaktivierung zu erhalten. Sie misst Veränderungen in der Konzentration des oxygenierten ( $[O_2Hb]$ ) und deoxygenierten Hämoglobins ( $[HHb]$ ) im Blut. Im Vergleich zu weit verbreiteten Verfahren der funktionalen Hirnmessung wie dem fMRT oder der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) ist die NIRS eine noch eher unbekannt, aber in jüngerer Zeit immer häufiger verwendete Methode. Die Anwendung der NIRS im Kontext experimenteller Studien wurde von der Ethik-Kommission der Universität Würzburg akzeptiert.

Typischerweise besteht das NIRS Signal einer neuronalen Aktivierung in einem Anstieg der  $[O_2Hb]$  und einem begleitendem Abfall der  $[HHb]$  (Strangman, Boas, & Sutton, 2002). Anders als beim BOLD Signal („blood-oxygen-level-dependent signal“) in fMRT Messungen bietet die NIRS also ein differenzierteres Bild der hämodynamischen Antwortreaktion. Nachteilig gegenüber anderen bildgebenden Verfahren wie fMRT oder PET sind allerdings die geringe räumliche Auflösung und die Tatsache, dass NIRS lediglich Prozesse im äußeren Kortextbereich erfassen kann. Die räumliche Auflösung ergibt sich durch die Anordnung der sendenden (Emitter) und empfangenden (Detektoren) Optoden, die in einem Abstand von 3

cm auf einer Haube befestigt sind. Dieser Abstand definiert das NIRS Signal und spiegelt die räumliche Auflösung der Messung wider. Hinsichtlich der Tiefe der Messung erfasst NIRS den Bereich, den das Licht auf seinem Weg vom Emitter zum Detektor durchdringt, was zu einer Abbildung von etwa 15-25 mm Fläche unterhalb der Schädeldecke führt (Okada & Deply, 2003). Tiefere Hirnstrukturen werden nicht erfasst. Auf der anderen Seite hat die NIRS allerdings einige Vorteile gegenüber den herkömmlichen bildgebenden Verfahren. Sie ist relativ kostengünstig, es gibt keine akustische Belastung und räumliche Einengung der Probanden wie in einem Scanner und aufgrund der Befestigung der Optoden am Kopf ist die Methode weniger empfindlich gegenüber Bewegungsartefakten.

In der vorliegenden Arbeit wurden die NIRS Daten mit einem „continuous wave system“ (ETG-4000, Hitachi Medical Co., Japan) erhoben. Benutzt wurde eine Haube mit 3 x 11 Optoden, bestehend aus 17 Lichtsendern und 16 Lichtempfängern, was zu insgesamt 52 abgeleiteten Kanälen führt (Abb. 2).

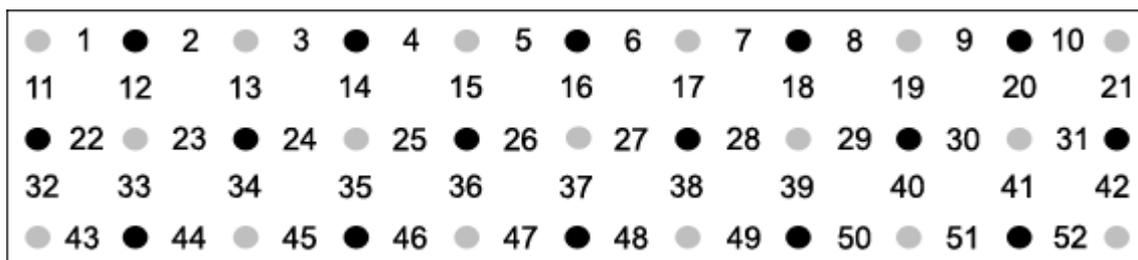
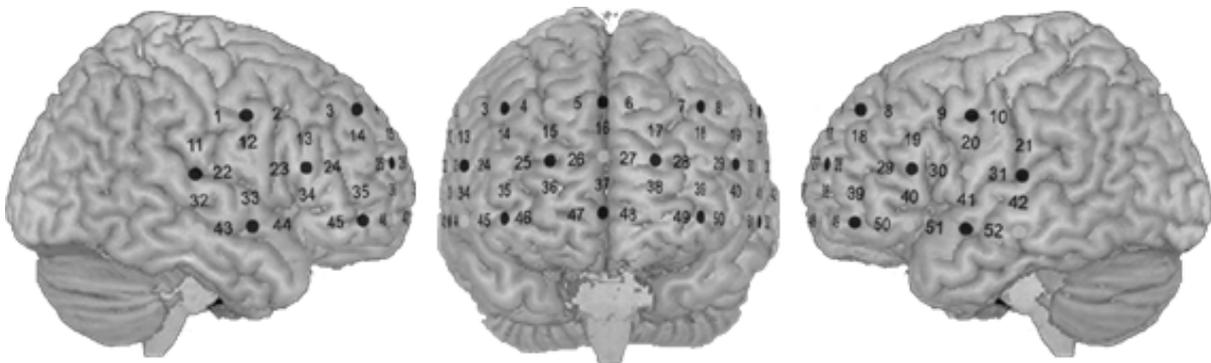


Abb. 2: Schematische Darstellung der Anordnung der 52 NIRS Kanäle. Die grauen Punkte stellen Lichtsender dar, die schwarzen Lichtempfänger.

Das System nutzt zwei unterschiedliche Wellenlängen ( $M = 695$ ,  $SD = 20$  nm und  $M = 830$ ,  $SD = 20$  nm), deren Frequenz sich pro Kanal unterscheidet um Signaleffekte zwischen nebeneinander liegenden Kanälen zu vermeiden. Dieses Licht wird in den Kortex gesendet und ein Teil des gesendeten Lichts wird nicht absorbiert, sondern reflektiert und verlässt das Gewebe wieder. Dieser Anteil wird durch die Lichtdetektoren, welche auf eine bestimmte Frequenz begrenzt sind, erfasst und verstärkt. Beide Wellenlängen werden genutzt, um die modifizierte Beer-Lanbert'sche Gleichung für stark streuende Medien zu lösen, welche eine Schätzung der Veränderung der Konzentration von  $[O_2Hb]$  und  $[HHb]$  auf Grund der Messung erlauben. Da es mit dem „continuous wave system“ nicht möglich ist, die optische Wellenlänge zu messen (Hoshi, 2003) und es keinen spezifischen Wert für diese Wellenlänge gibt, wird diese von bestehender Literatur übernommen (A. Duncan et al., 1996). Die Maßeinheit ist die molare Konzentration multipliziert mit dem unbekanntem Faktor

Wellenlänge (mmol x mm). Daraus folgt, dass eine absolute Quantifizierung mit diesem System nicht möglich ist.

Der Abstand zwischen zwei Optoden beträgt jeweils 30 mm, die erreichte Messtiefe unterhalb der Kopfhaut beträgt circa 15-25 mm (Hoshi, Shimada, Sato, & Iguchi, 2005; Okada & Depley, 2003). Die Abtastrate wurde auf 10 Hz festgelegt. Die NIRS Haube mit den 52 Kanälen wurde über frontalen und fronto-temporalen Hirnarealen angebracht (Abb. 3), so dass die mittlere Optode der untersten Reihe über FPz lag und sich die Haube symmetrisch hin zu T3 und T4 (Elektrodenpositionen nach dem internationalen 10-20 System (Jasper, 1958); siehe Abb. 7) erstreckte. Aufgrund des fixen Abstandes zwischen den Elektroden konnte die Lage der äußeren Optoden der Haube nicht exakt festgelegt werden (zur Schädel-Hirn Übereinstimmung siehe Okamoto et al., 2004).



*Abb. 3:* Schematische Darstellung der Anordnung der NIRS Kanäle auf einem Standardhirn. Die grauen Punkte sind Lichtsender, die schwarzen Lichtempfänger, die Ziffern zeigen die Lokation der Kanäle an. Der Empfänger zwischen den Kanalpositionen 47 und 48 liegt über der Elektrodenposition Fpz. Die Kanäle wurden näherungsweise auf ein durchschnittliches anatomisches Hirn gelegt.

### **Auswertung der NIRS Daten**

Um “baseline drifts” zu beseitigen wurde auf der Basis von fünf Sekunden vor jedem Block eine Baseline Korrektur durchgeführt. Anschließend wurde der lineare Trend zwischen der Baseline des aktuellen Blocks und der des nachfolgenden Blocks für jede der drei Wiederholungen der verschiedenen Blöcke berechnet. Die erfassten Rohdaten wurden hinsichtlich des daraus kalkulierten linearen Trends korrigiert.

Mit den so vorverarbeiteten Daten wurden Analysen auf individueller und auf Gruppenebene durchgeführt. Für die Auswertung der ersten Datenerhebung wurde unter Anwendung einer Boxcar-Funktion mit der Länge von 44 s ein allgemeines lineares Modell mit zwei verschiedenen Bedingungen für jede Versuchsperson berechnet (Friston et al., 1995; Plichta,

Herrmann, Bähne et al., 2006). Des Weiteren wurde der Kontrast der beiden Bedingungen Alertness vs. passives Betrachten auf individueller Ebene definiert um den spezifischen Effekt der Alertness zu erfassen. Die Analyse der individuellen Kontraste erfolgte nachfolgend mittels *t*-Tests für eine Stichprobe in randomisierten Gruppeneffektanalysen.

Für die Analyse der NIRS Daten wurden signifikante kortikale Aktivierungen durch positive *t*-Werte für [O<sub>2</sub>Hb] und negative *t*-Werte für [HHb] angezeigt. Wegen der multiplen Testung wurden alle statistischen Schlussfolgerungen bei der Auswertung der ersten Studie aufgrund eines adjustierten Alpha-Niveaus von 5% gemacht. Die Adjustierung wurde mit der Bonferroni Korrektur und der Berechnung von Dubey/Armitage–Parmar Alpha-Grenzen vorgenommen (Sankoh, Huque, & Dubey, 1997). In diesen ist die räumliche Korrelation zwischen den Kanälen für den Kontrast Alertness vs. passives Betrachten mit eingerechnet ([O<sub>2</sub>Hb]:  $r = 0.40$ ; [HHb]:  $r = 0.25$ ).

Aufgrund der Ergebnisse der ersten Datenerhebung in Kombination mit Befunden bestehender Literatur (Strangman et al., 2002) konnten ROIs definiert werden, innerhalb derer ein Anstieg der [O<sub>2</sub>Hb] und ein Abfall der [HHb] während der Alertness Aufgabe im Vergleich zu den Kontrollbedingungen erwartet wurde. Auf diese beschränkte sich die Auswertung der zweiten Datenerhebung, weshalb das Alpha-Niveau der nachfolgenden *t*-Tests lediglich für die Anzahl der analysierten Kanäle der entsprechenden ROI korrigiert werden mussten. In jeder Hemisphäre wurde jeweils ein ROI bestehend aus drei Kanälen definiert, was zu einem adjustierten Alpha-Niveau von  $p < .017$  führte.

Die Auswertung der zweiten Datenerhebung erfolgte mit einer anderen Methode als die der ersten, da sich der Zeitverlauf der NIRS Daten der zweiten Erhebung nicht in einer Boxcar Funktion abbilden ließ. Anstatt eines allgemeinen linearen Modells wurde die mittlere Konzentration von O<sub>2</sub>Hb und HHb in einer Baseline fünf Sekunden vor Blockbeginn und während der 44 s innerhalb eines Blocks pro Kanal und Bedingung berechnet. Zur Berechnung der relativen Konzentrationen wurde die Baseline von der aktiven Periode subtrahiert. Die erhaltenen relativen Daten wurden in einer ANOVA mit den Faktoren Bedingung (Alertness, motorische Kontrolle, visuelle Kontrolle) und Kanal getrennt für ROI 1 und 2 analysiert. Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert. In den Ergebnisdarstellungen sind unkorrigierte Freiheitsgrade und korrigierte *p*-Wert dargestellt.

## **Probabilistische Registrierung der NIRS Kanäle in Bezug auf die Raumkoordinaten des Montreal Neurological Institute (MNI)**

Um die Lokation der NIRS Kanäle innerhalb der Raumkoordinaten eines MNI Standardhirns zu erfassen wurde eine Methode zur virtuellen Registrierung genutzt (Tsuzuki et al., 2007). Diese Methode erlaubt das Plazieren einer virtuellen NIRS Haube auf der Kopfoberfläche. Mit Hilfe dieser Methode wurde die Deformation der Kopfoberfläche simuliert und erfasst, wo die Optoden und Kanäle auf dem virtuellen Referenzhirn platziert sind. Dazu wurde eine MRT Datenbank genutzt, welche strukturelle Informationen über Köpfe, Hirne und charakteristische Kopfoberflächen beinhaltet (Jurcak, Okamoto, Singh, & Dan, 2005; Okamoto et al., 2004). Aus diesen Informationen wurden 1000 künstliche Köpfe und Hirne generiert, welche die Variation in Größe und Form innerhalb der Population nachbildeten. Die virtuelle NIRS Haube wurde auf den künstlichen Köpfen platziert und auf die kortikalen Oberflächen projiziert (Okamoto & Dan, 2005). Die so erfassten Positionen der NIRS Kanäle wurden anhand der MNI Raumkoordinaten normalisiert. Anschließend wurde mit den erhaltenen MNI Koordinaten eine statistische Analyse durchgeführt, um die wahrscheinlichsten Positionen der Kanäle in der hier erfassten tatsächlichen Stichprobe zu schätzen, einschließlich der mit der Schätzung verbundenen Innersubjekt Standardabweichung (Singh, Okamoto, Dan, Jurcak, & Dan, 2005). Die geschätzten Lokationen wurden mit Hilfe einer MATLAB Funktion anatomisch benannt (Tzourio Mazoyer et al., 2002).

## **1.4 Ergebnisse<sup>1</sup>**

### **1.4.1 Verhaltensdaten**

Aufgrund von Datenverlust gingen die Verhaltensdaten von jeweils einem Probanden der ersten wie auch der zweiten Erhebung nicht mit in die Auswertung ein. Die mittlere Reaktionszeit der verbliebenen zwölf Probanden der ersten Datenerhebung betrug 244.6 ms ( $SD = 70.6$ ), keiner beging einen Fehler. Die Probanden der zweiten Datenerhebung hatten eine mittlere Reaktionszeit von 199.4 ms ( $SD = 90.7$ ). Drei Probanden verpassten jeweils eine Reaktion auf das Kreuz während der Aufgabe zur Alertness.

---

<sup>1</sup> (Herrmann, Woidich, Schreppel, Pauli, & Fallgatter, 2008)

## 1.4.2 NIRS Ergebnisse

### Ergebnisse der ersten Datenerhebung

Die Alertness Aufgabe führte im Vergleich zur visuellen Kontrollaufgabe nur in einem Kanal zu einem signifikanten Anstieg der  $[O_2Hb]$  ( $t[11] > 3.91$ ;  $p < .05$ ). Die probabilistische Registrierung der NIRS Kanäle bezüglich der MNI Raumkoordinaten ergab, dass der relevante Kanal (#33) über dem rechten superioren temporalen Kortex liegt (Abb. 4c). Der rechte temporale Kortex hatte sich auch in einer fMRT Studie (Sturm & Willmes, 2001) als relevante Region erwiesen. Die höchste Aktivierung nach der des Kanals #33 wiesen die zwei angrenzende Kanäle #43 ( $t[11] > 2.36$ ) und #44 ( $t[11] > 2.96$ ) auf, die ebenfalls über dem temporalen Kortex liegen und der ersten ROI hinzugefügt wurden.

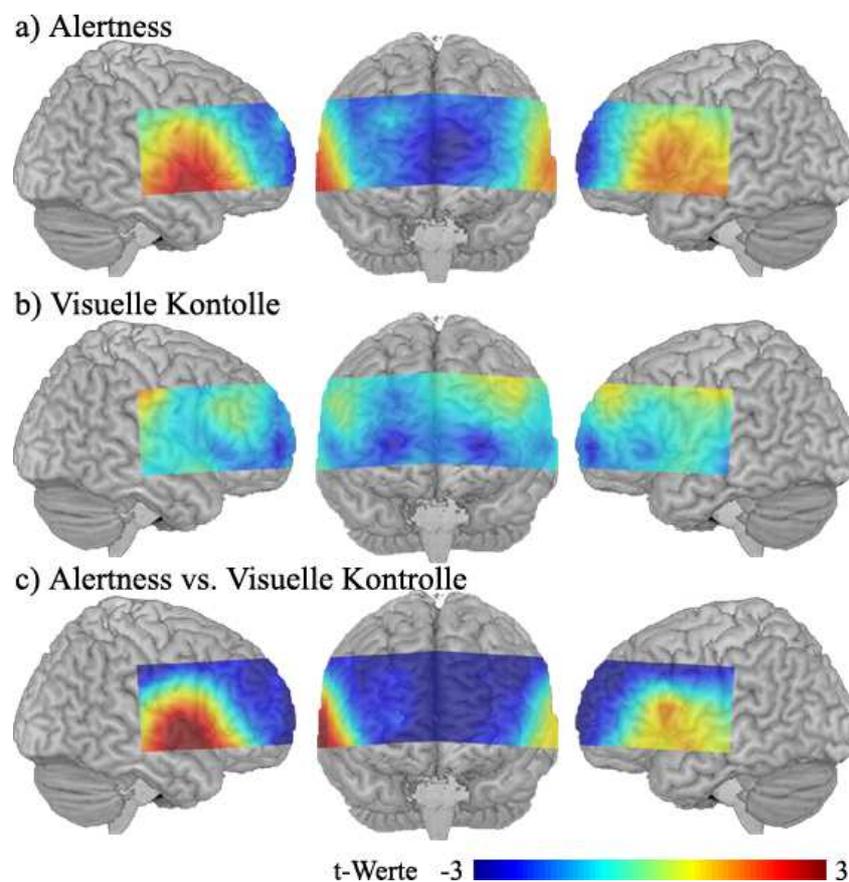


Abb. 4: Statistische Abbildung ( $t$ -Werte) der durchschnittlichen  $[O_2Hb]$  differenziert nach Experimental- und Kontrollbedingung, gemittelt über Personen und Zeit. Die Aktivierungsmuster basieren auf der Interpolierung der Ergebnisse einzelner Kanäle und wurden näherungsweise auf ein durchschnittliches anatomisches Hirn gelegt.

Auch wenn keine weitere Aktivierung ein signifikantes Niveau erreichte kann man in Abb. 4c eine mögliche Aktivierung über dem linken ventro-lateralen frontalen Gyrus der linken Hemisphäre erkennen, welche in einer früheren fMRT Studie als neuronales Korrelat der Alertness gefunden wurde (Sturm & Willmes, 2001). Deshalb wurden die über diesem Areal liegenden Kanäle #39, #40 und #50 als zweite ROI definiert.

Die Auswertung der [HHb] ergab keinerlei signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen ( $t[11] > -3.44$ ), weshalb für die zweite Datenerhebung bzgl. HHb dieselben Kanäle als ROI 1 (#33, #43, #44) und ROI 2 (#39, #40, #50) ausgewählt wurden wie für O<sub>2</sub>Hb.

### Ergebnisse der zweiten Datenerhebung

Im temporalen Kortex der rechten Hemisphäre (ROI 1) zeigte sich für die relative [O<sub>2</sub>Hb] ein signifikanter Aktivierungsunterschied zwischen den Bedingungen (Haupteffekt Bedingung:  $F[2,44] = 8.21, p < .005$ ), der unabhängig vom jeweiligen Kanal auftrat (Wechselwirkung Bedingung x Kanal:  $F[4,88] = 2.10, p = .11$ ). Der Unterschied beruhte auf einer signifikant stärkeren Aktivierung in der Alertnessbedingung ( $M = 0.11, SD = 0.18$ ) im Vergleich zu den Kontrollbedingung (motorisch:  $M = -0.02, SD = 0.08, t[21] = 3.4, p < .05$ ; visuell:  $M = -0.02, SD = 0.09, t[21] = 2.83, p < .05$ ; Abb. 5).

Der Aktivierungsunterschied zwischen den Bedingung (Haupteffekt Bedingung:  $F[2,44] = 5.24, p < .05$ ) bestätigte sich in der Auswertung der relativen [HHb], der ebenfalls unabhängig vom jeweiligen Kanal auftrat (Wechselwirkung Bedingung x Kanal:  $F[2,88] < 1$ ). Alertness führte zu einer signifikant stärkeren Deaktivierung ( $M = -0.04, SD = 0.09$ ) im Vergleich zu den Kontrollbedingungen (motorisch:  $M = 0.02, SD = 0.06; t[21] = -2.72, p < .05$ ; visuell:  $M = -0.0004, SD = 0.05, t[21] = -1.95, p < .05$ ).

Auch im linken VL-PFK (ROI 2) zeigte sich für die relative [O<sub>2</sub>Hb] ein signifikanter Aktivierungsunterschied zwischen den Bedingung (Haupteffekt Bedingung:  $F[2, 44] = 4.54, p < .05$ ), der allerdings in Abhängigkeit der einzelnen Kanäle variierte (Wechselwirkung Bedingung x Kanal:  $F[4,88] = 3.72, p < .05$ ). Im Kanal #39 zeigten sich keine Unterschiede in der Aktivierung zwischen der Alertness- und den Kontrollbedingungen. In den beiden anderen Kanälen fanden sich signifikant erhöhte Werte für Alertness im Vergleich zur motorischen Kontrollbedingung (#40:  $t[21] = 2.97, p < .05$ ; #50:  $t[21] = 4.03, p < .05$ ) und in der Tendenz erhöhte Werte im Vergleich zur visuellen Kontrollbedingung (#40:  $t[21] = 2.22, p < .05$ ; #50:  $t[21] = 1.97, p < .05$ ).

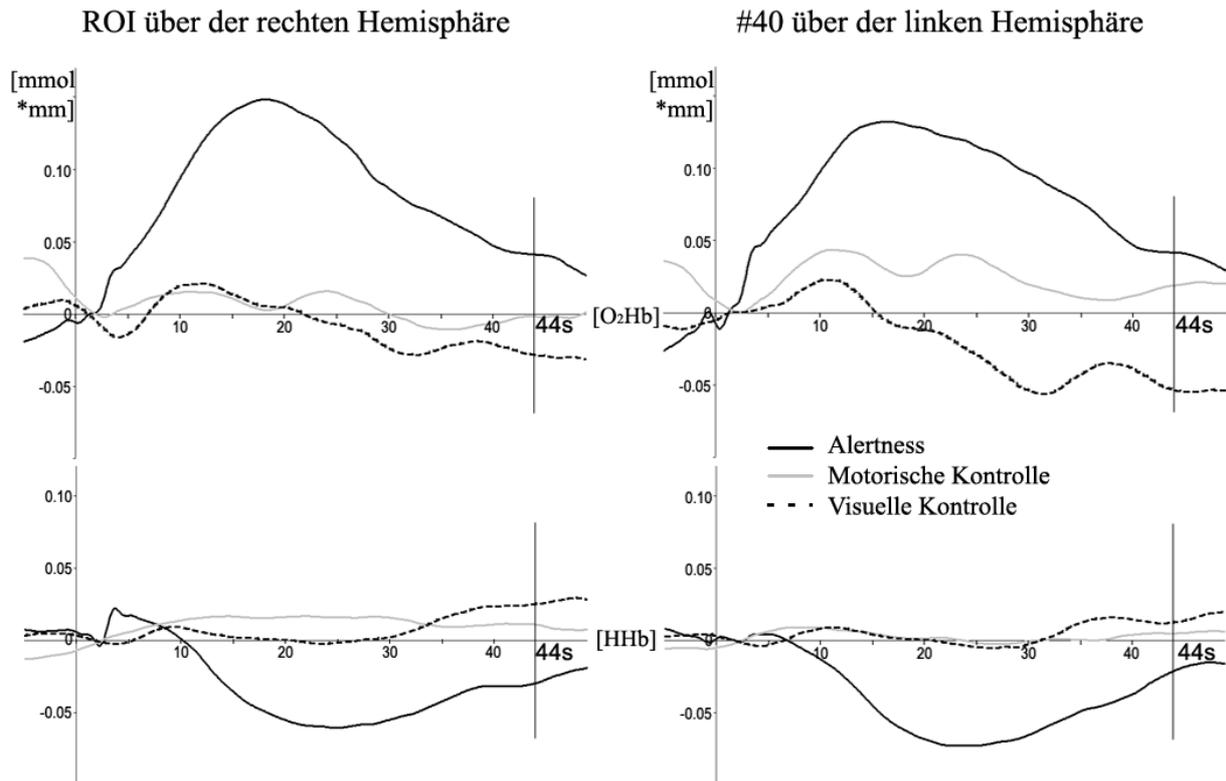


Abb. 5: Zeitverlauf der Aktivierung differenziert nach Experimental- und Kontrollbedingungen für [O<sub>2</sub>Hb] und [HHb], gemittelt über Personen und Zeit. Die linke Spalte zeigt den Zeitverlauf für die drei Kanäle der ROI der rechten Hemisphäre und die rechte Spalte den für den Kanal 40 der linken Hemisphäre. Die vertikalen Linien verdeutlichen den Anfang und das Ende der aktiven Periode, davor und danach gibt es eine kurze Baseline.

Die Ergebnisse zur relativen [O<sub>2</sub>Hb] wurden durch die Daten zur relativen [HHb] unterstützt. Auch hier zeigte sich in der Tendenz ein Aktivierungsunterschied zwischen den Bedingungen (Haupteffekt Bedingung:  $F[2, 44] = 3.21, p < .10$ ), der in Abhängigkeit der einzelnen Kanäle variierte (Wechselwirkung Bedingung x Kanal:  $F[4, 88] = 3.73, p < .05$ ). Im Kanal #39 fanden sich keine Effekte, in den beiden anderen Kanälen schon. Im Kanal #40 zeigte sich eine signifikante Deaktivierung bei Alertness im Vergleich zu beiden Kontrollbedingungen (motorisch:  $t[21] = -2.42, p < .05$ ; visuell:  $t[21] = -2.30, p < .05$ ), im Kanal #50 im Vergleich zur motorischen Kontrolle ( $t[21] = -2.09, p < .05$ ).

## 1.5 Diskussion

Mit Hilfe eines zweistufigen Studiendesigns gelang es, ein für die NIRS geeignetes Paradigma zur Messung neuronaler Korrelate der Alertness zu etablieren. Trotz des Problems der multiplen Testung standen die Ergebnisse der ersten Datenerhebung in Einklang mit Befunden der fMRT Forschung, die für Alertness ein überwiegend rechtshemisphärisches Netzwerk postulierten (Sturm et al., 1999; Sturm & Willmes, 2001). Die zuvor gezeigte Aktivierung des mittleren und superioren temporalen Kortex konnte auch mit der NIRS gefunden werden. Zusätzlich fanden sich Hinweise auf eine Aktivierung des linken VL-PFK, welche sich ebenfalls in fMRT Studien als für die phasische Alertness relevant erwiesen hatte (Sturm & Willmes, 2001).

Auf der Grundlage der Ergebnisse der ersten Datenerhebung und den Erkenntnissen bestehender Literatur wurden zwei ROIs über dem linken VL-PFK und dem rechten superioren und mittleren temporalen Kortex definiert, für die bei Aufgaben zur Alertness eine Aktivierung erwarten werden kann. Für beide ROIs wurde eine Aktivierung mit einem Anstieg des O<sub>2</sub>Hb und einem Abfall des HHb während der Alertness Aufgabe gefunden, welche nicht durch Fingerbewegungen oder visuelle Stimulation verursacht wurde. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Methode der NIRS geeignet ist, neuronale Korrelate grundlegender Funktionen der Aufmerksamkeit zu erfassen.

## **2 Neuronale Korrelate komplexer Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit unter niedriger Auslastung des Arbeitsgedächtnisses**

### **2.1 Experiment 2: Der Einfluss von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle auf die neuronale Verarbeitung visueller Stimuli: Eine EEG Studie**

#### **2.1.1 Herleitung der Fragestellung**

Ziel dieses Experiments war die Entwicklung eines Studiendesigns zur Erforschung der Bedeutung der selektiven Aufmerksamkeit für Arbeitsgedächtnisprozesse. Dazu sollten in einem EEG Design bereits bestehende Befunde zur Modulation der neuronalen Verarbeitung von Gesichtsstimuli durch Aufmerksamkeitsprozesse (Gazzaley et al., 2005) mit verändertem Studiendesign repliziert und erweitert werden. Überprüft wurde, ob die gesichtsspezifische Komponente N170 (Eimer, 2000; Herrmann, Ellgring, & Fallgatter, 2004) des ereigniskorrelierten Potentials (EKP), die über temporo-okzipitalen Elektrodenpositionen gemessen wird, tatsächlich durch die Relevanz von identischen, zentral präsentierten Gesichtsstimuli beeinflusst wird. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurde versucht, Gedächtnis- und Inhibitionsprozesse zu trennen und differenziert zu evaluieren. Zusätzlich sollte die Beteiligung des PFK an Prozessen der selektiven Aufmerksamkeit innerhalb des Arbeitsgedächtnisses untersucht werden. Die Datenerhebung erfolgte, während die Versuchspersonen eine Variante der klassischen n-back Aufgabe lösten, bei der relevante zu merkende und irrelevante zu ignorierende Stimuli präsentiert wurden. Als Stimuli dienten sequentiell präsentierte Gesichter und Landschaften. Die Aufmerksamkeit der Probanden wurde mit Hilfe einer Instruktion, lediglich die Gesichter oder die Landschaften zu enkodieren und zu merken, selektiv auf eine der beiden Stimuluskategorien gerichtet. In einer Kontrollbedingung sollten dieselben Stimuli passiv und ohne Intention betrachtet werden. Diese Versuchsanordnung ermöglichte es, die neuronale Verarbeitung identischer sequentiell präsentierter Stimuli in Abhängigkeit von der instruktionsbedingten Aufmerksamkeit zu vergleichen.

## 2.1.2 Hypothesen

- Selektive Aufmerksamkeit führt zu einer Modulation der neuronalen Verarbeitung, gemessen anhand der Amplitude und Latenz der N170. Diese Modulation erfolgt in Relation zu einer perzeptuellen Kontrollbedingung. Das Beachten eines Stimulus geht mit einer erhöhten, das Ignorieren mit einer verminderten neuronalen Verarbeitung einher.
- Explorativ sollte untersucht werden, ob sich auch im frontalen Kortex ein neuronales Korrelat der Aufmerksamkeitslenkung nachweisen lässt.

## 2.1.3 Methode

### 2.1.3.1 Versuchspersonen

Teilnehmer waren 16 gesunde Probanden (9 Frauen) im Alter von 19 bis 30 Jahren. Das durchschnittliche Alter betrug 24.3 Jahre ( $SD = 3.7$  Jahre). Alle Probanden waren Rechtshänder, besaßen ein normales oder korrigiertes Sehvermögen und wurden mündlich aus dem Bekanntenkreis der Autorin geworben. Zwei Probanden wurden über eine Online-Anzeige rekrutiert und bekamen eine Entschädigung von 10.- Euro für die Versuchsteilnahme. Bei keinem war eine neurologische oder psychiatrische Störung bekannt, eine schriftliche Einverständniserklärung wurde von jedem unterzeichnet.

### 2.1.3.2 Untersuchungsdesign

Als Arbeitsgedächtnisaufgabe wurde eine Variante der klassischen 1-back Aufgabe in einem stimulusbezogenen Design genutzt. In den Experimentalblöcken sahen die Probanden abwechselnd sequentiell präsentierte aufgaben-relevante und -irrelevante Stimuli (Gesichter und Landschaften) auf einem Computermonitor und sollten eine Antworttaste drücken, wann immer ein identischer relevanter Stimulus zweimal hintereinander erschien mit nur einem irrelevanten Stimulus dazwischen (Abb. 6).

Die Stimuli wurden in zweiminütigen Blöcken präsentiert, in denen die Anordnung des Stimulusmaterials jeweils identisch war. Der einzige Unterschied zwischen den Blöcken war die Instruktion, die die Versuchspersonen erhielten.

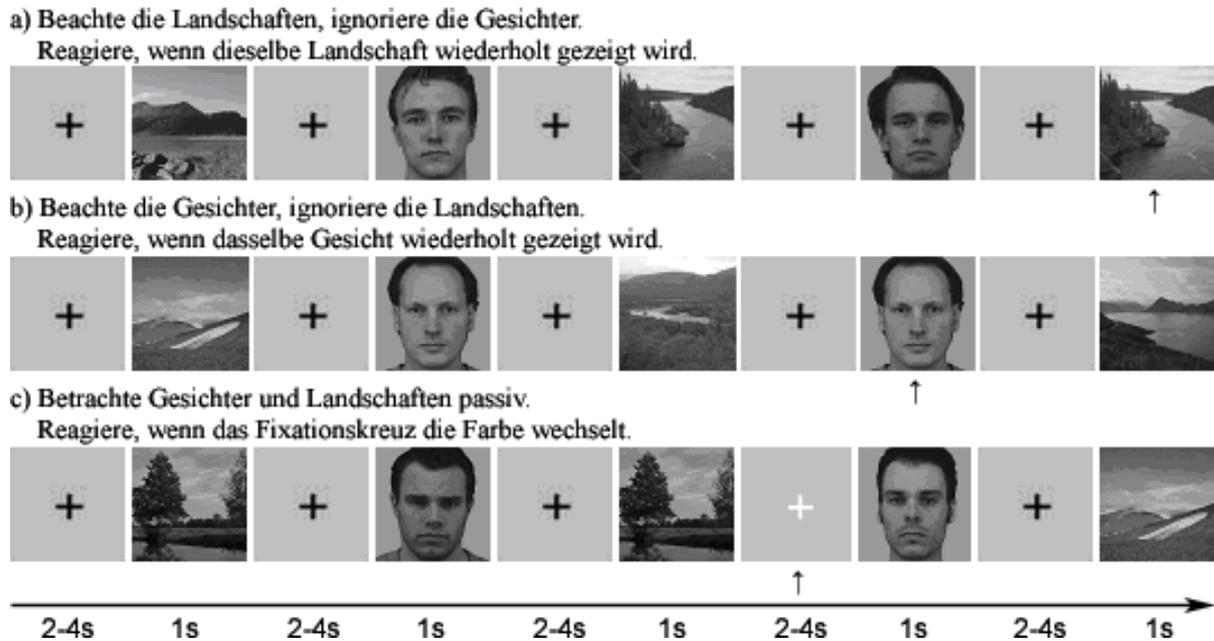


Abb. 6: Schaubild des experimentellen Designs. Bei dieser 1-back Aufgabe sollten die Probanden immer dann reagieren, wenn dasselbe Bild der relevanten Kategorie zweimal hintereinander erschien (angedeutet durch die schwarzen Pfeile unterhalb des jeweiligen Stimulus). Jeder Stimulus wurde für 1000 ms präsentiert, das Interstimulusintervall (ISI) betrug 2000 bis 4000 ms (mittleres ISI = 3000 ms). Die Instruktion der verschiedenen Bedingungen steht jeweils über der Bildabfolge hinter der Nummerierung.

- Bedingung 1: Achte auf Landschaften, ignoriere Gesichter; reagiere, wenn dieselbe Landschaft wiederholt gezeigt wird (Abb. 6a);
- Bedingung 2: Achte auf Gesichter, ignoriere Landschaften; reagiere, wenn dasselbe Gesicht wiederholt gezeigt wird (Abb. 6b);

Mit Hilfe dieser Instruktion wurde die Aufmerksamkeit der Teilnehmer selektiv auf eine der beiden Stimuluskategorien (Gesichter oder Landschaften) gelenkt. Irrelevante Stimuli, die nicht erinnert werden mussten, stellten eine überflüssige Information dar und wirkten als Distraktor. Aufgrund der Annahme, dass das Nichtbeachten solcher Distraktoren zu einem besseren Gelingen der Arbeitsgedächtnisaufgabe führen würde, sollten diese auch unabhängig von der Instruktion automatisch ignoriert werden. In einer dritten Kontrollbedingung, die ebenfalls dieselbe Anordnung des Stimulusmaterials besaß, sollten alle Stimuli passiv betrachtet werden ohne eine spezielle Intention.

- Bedingung 3: Betrachte Landschaften und Gesichter passiv; reagiere, wenn das Fixationskreuz die Farbe wechselt (Abb. 6c);

Aufgrund der identischen Stimulusinformation in allen Bedingungen war es möglich, selektiv die Auswirkung von „top down“ Prozessen zu analysieren, die durch die Instruktion ausgelöst wurden.

Aufgabe der Versuchspersonen war das Drücken einer Antworttaste mit dem Zeigefinger der rechten Hand, wann immer auf einen relevanten Stimulus und dem nachfolgenden irrelevanten Stimulus derselbe relevante Stimulus erneut präsentiert wurde. Andere Arten von Wiederholungen waren ausgeschlossen. Auf irrelevante (zu ignorierende) oder neutrale (passiv betrachtete) Stimuli erfolgte keine Reaktion. Die Aufgabe der Teilnehmer in den Kontrollblöcken, in denen die Stimuli passiv betrachtet werden sollten, bestand darin, auf das Fixationskreuz zu achten und immer dann die Antworttaste zu drücken, wenn das Kreuz die Farbe von dunkelgrau zu hellgrau wechselte.

Insgesamt wurden 15 zweiminütige Blöcke präsentiert, jede Instruktion (achte auf Landschaften, achte auf Gesichter, passives Betrachten der Stimuli) wurde fünf Mal gegeben. Die Reihenfolge der Blöcke war randomisiert, wobei nie mehr als zwei gleiche Blöcke hintereinander dargeboten wurden. Nach jedem Block gab es eine Pause, deren Länge die Probanden selbst bestimmen konnten. Pro Block wurden 26 Bilder dargeboten, immer ein Gesicht und eine Landschaft abwechselnd. Pro Block wurden jeweils drei Gesichts- und Landschaftsstimuli wiederholt präsentiert, so dass pro Block drei Reaktionen der Probanden notwendig waren. Die Datenerhebung erstreckte sich insgesamt pro Person auf 30 Minuten. Vor der eigentlichen Durchführung hatte jeder Proband die Möglichkeit, die Aufgabe am Computer zu üben.

### **2.1.3.3 Stimulusmaterial**

Als Stimulusmaterial dienten je 150 grauskalierte Gesichter und Landschaften. Für die Gesichtstimuli wurden Abbildungen von kaukasischen Männern mit neutralem Gesichtsausdruck genutzt. Keiner der abgebildeten Männer trug eine Bille oder einen Bart (unter anderem stammen die Bilder aus Karolinska Directed Emotional Faces (Lundqvist, Flykt, & Öhman, 1998)). Auf den Landschaftsszenen waren keine Menschen oder Tiere abgebildet. Die Bilder wurden in der Mitte eines dunkelgrauen Bildschirms präsentiert. Während des ISIs erschien ein mittelgraues Fixationskreuz, ebenfalls in der Mitte des Monitors. Jeder Stimulus wurde für 1000 ms gezeigt; das ISI betrug im Durchschnitt 3000 ms (2000, 2500, 3000, 3500, 4000 ms), wobei die unterschiedlichen Längen randomisiert dargeboten wurden. Landschaften und Gesichter erschienen immer abwechselnd, die Reihenfolge der einzelnen Landschafts- bzw. Gesichtsstimuli war jedoch randomisiert. Die Stimuli wurden auf einem Computermonitor präsentiert, der in einem Abstand von 100 cm vor den Probanden in einem abgedunkelten und ruhigen Raum stand.



Stimulusbeginn bis 2000 ms danach definiert. Alle Epochen mit Amplitudensprüngen über  $\pm 70 \mu\text{V}$  wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die artefaktfreien Zeitabschnitte (mindestens 25) wurden separat für jede Person und jede Bedingung zu einem EKP gemittelt. Aufgrund der Augenartefaktkorrektur konnten die Daten aller Versuchspersonen ausgewertet werden. Für den Zeitabschnitt von -200 ms bis zum Stimulusbeginn wurde eine Baseline-Korrektur durchgeführt.

### **Bestimmung der EKPs**

Um die Effekte der Aufmerksamkeitsmodulation in temporo-okzipitalen Hirnarealen zu erkennen wurden die Pik Latenzen und Amplituden visuell für die, über alle Versuchspersonen gemittelten, EKPs bestimmt und dann für jeden einzelnen Probanden erfasst. Bestimmt wurden der positivste Wert zwischen 90 und 150 ms (P100) und der negativste Wert zwischen 130 und 240 ms (N170) für die Einzelelektroden O1, O2, T5 und T6. Die Segmentgrenzen wurden visuell anhand des Kurvenverlaufs des EKPs festgelegt, die gewählten Elektrodenpositionen aufgrund der Verteilung des hirnelektrischen Feldes zu den jeweiligen Zeitpunkten. Auch wenn die Verteilung des hirnelektrischen Feldes für die N170 ausschließlich die Elektroden T5 und T6 nahe legte, wurden die Positionen O1 und O2 trotzdem zur Überprüfung der Aufmerksamkeitseffekte herangezogen. Eine Differenzwelle zwischen den EKPs auf relevante und irrelevante Gesichter ergab für die okzipitalen Elektroden zum Zeitpunkt der N170 stärkere Unterschiede als für die temporalen Elektroden.

Um Effekte der Kontrollprozesse in frontalen Hirnarealen messen zu können, wurden mittlere Amplituden in drei gleich langen Zeitfenstern von 800 bis 1200 ms, 1200 bis 1600 ms und 1600 bis 2000 ms nach dem Stimulusbeginn für jede Versuchsperson und alle Bedingungen für die Elektroden F9, F10, T1 und T2 berechnet. Die Auswahl der Elektrodenpositionen richtete sich nach Befunden aktueller Literatur (Kessler & Kiefer, 2005), in welcher die Autoren unter anderem diese Positionen zur Evaluation präfrontaler Effekte nach Störung des visuellen Arbeitsgedächtnisses analysierten.

### **Statistische Auswertung**

In Anlehnung an Gazzaley und Kollegen (2005) beschränkte sich die Analyse der Aufmerksamkeitseffekte im EEG auf die Verarbeitung von Gesichtsstimuli. Zur Analyse der Pik Latenzen und Amplituden wurden ANOVAs mit Messwiederholung berechnet mit den Innersubjektfaktoren Relevanz der Stimuli (relevant/ passiv betrachtet/ irrelevant), Hemisphäre (links/ rechts) und Elektrodenposition (temporal/ okzipital). Freiheitsgrade

wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert. In den Ergebnisdarstellungen sind unkorrigierte Freiheitsgrade und korrigierte  $p$ -Wert dargestellt. Korrelationen zwischen temporo-okzipitalen und temporo-frontalen Effekten wurden mit dem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten berechnet. Reaktionszeiten und Fehlerraten wurden non-parametrisch mit dem Wilcoxon Test analysiert. Da nur auf relevante Stimuli eine Reaktion der Probanden erfolgte, wurden nur diese in die Auswertung mit einbezogen. Das Signifikanzniveau wurde für alle Analysen auf 5% festgelegt.

## 2.1.4 Ergebnisse<sup>2</sup>

### 2.1.4.1 Verhaltensdaten

Es zeigte sich, dass die Reaktion auf Gesichter schneller erfolgte als auf Landschaften (Gesichter:  $M = 560$  ms,  $SD = 117$  ms; Landschaften:  $M = 607$  ms,  $SD = 103$  ms;  $Z = 2.69$ ,  $p < .01$ ). Außerdem waren Reaktionen auf Gesichter (insgesamt zwei Fehler über alle Probanden hinweg) weniger fehlerbehaftet als Reaktionen auf Landschaften (insgesamt 26 Fehler über alle Probanden hinweg;  $Z = -2.69$ ,  $p < .01$ ).

### 2.1.4.2 EEG Ergebnisse über okzipitalen Elektroden

#### Die N170

Wie erwartet hatte die Modulation der Aufmerksamkeit einen Einfluss auf die Höhe der N170 Amplitude ( $F[2,30] = 8.21$ ,  $p < .005$ ; Abb. 8), auf relevante Gesichter folgte eine erhöhte Amplitude der N170 im Vergleich zu irrelevanten Gesichtern (relevant:  $M = -3.67$ , irrelevant:  $M = -2.85$ ;  $t[15] = 2.73$ ,  $p < .05$ ). Im Vergleich zur perzeptuellen Baseline konnte lediglich eine erhöhte Amplitude für relevante Gesichter im Gegensatz zu den passiv betrachteten Gesichtern festgestellt werden (passiv:  $M = -2.55$ ;  $t[15] = 3.71$ ,  $p < .005$ ). Irrelevante Gesichter führten nicht zu einer verminderten Amplitude im Vergleich zur Baseline ( $t[15] = 1.19$ ,  $p = .253$ ).

---

<sup>2</sup> (Schreppel, Pauli, Ellgring, Fallgatter, & Herrmann, 2008)

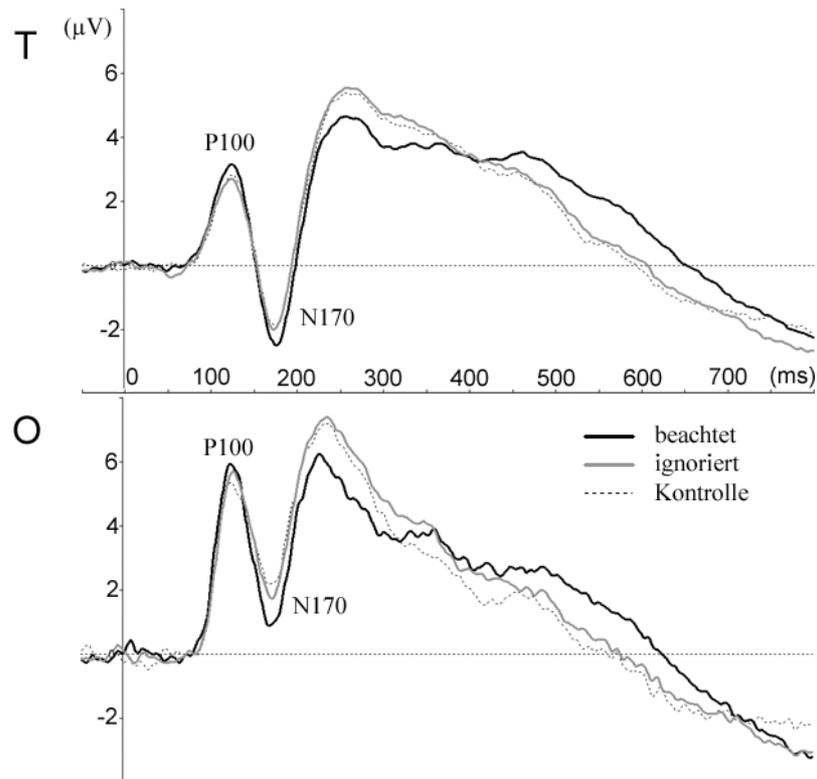


Abb. 8: Grand Mean EKP-Kurven der Gesichtsverarbeitung über dem temporalen (T steht für die Elektroden T5/ T6) und okzipitalen Kortex (O steht für die Elektroden O1/ O2), gemittelt über Personen, Hemisphären und Zeit.

Eine Interaktion zwischen der Relevanz der Stimuli und der Elektrodenposition (temporal, okzipital) zeigte allerdings, dass die Effekte nur an okzipitalen Elektroden (O1, O2) auftraten und nicht an temporalen (T5, T6; Tabelle 1).

Tabelle 1: Ergebnisse der post hoc *t*-Tests zur Auflösung der Wechselwirkung Relevanz der Stimuli x Elektrodenposition für die Amplitude der N170.

<i>t</i> -Werte	relevant > irrelevant	relevant > passiv	passiv > irrelevant
temporal	1.63	2.02	0.61
okzipital	3.24 **	4.84 ***	1.40

Anmerkung: \* entspricht  $p < .05$ ; \*\* entspricht  $p < .01$ ; \*\*\* entspricht  $p < .001$

Entgegen den Hypothesen ergab sich hinsichtlich der Latenz der N170 kein signifikanter Effekt der Aufmerksamkeitsmodulation ( $F[2,30] < 1$ ; siehe Anhang A9, Tabelle A6).

## Die P100

Neben der N170 untersuchten Gazzaley und Kollegen (2005) auch die P100. Sie fanden weder hinsichtlich der Amplitude noch der Latenz eine Modulation durch Aufmerksamkeit. Dieses Ergebnis wurde durch die aktuellen Daten bestätigt (Abb. 8; Anhang A9, Tabelle A7, A8).

### 2.1.4.3 EEG Ergebnisse über frontalen Elektroden

Die Analyse der Zeitepochen 1 und 2 zeigte eine unterschiedliche mittlere Aktivierung in Abhängigkeit von der Relevanz der verarbeiteten Gesichter (Epoche 1:  $F[2,30] = 4.99$ ,  $p < .05$ ; Epoche 2:  $F[2,30] = 16.36$ ,  $p < .001$ ; Epoche 3:  $F[2,30] = 2.86$ ,  $p = .073$ ;  $t$ -Tests siehe Tabelle 2), wobei jeweils auf die relevanten Stimuli eine erhöhte Aktivierung im Vergleich zu den passiv betrachteten und den irrelevanten Stimuli folgte (Abb. 9).

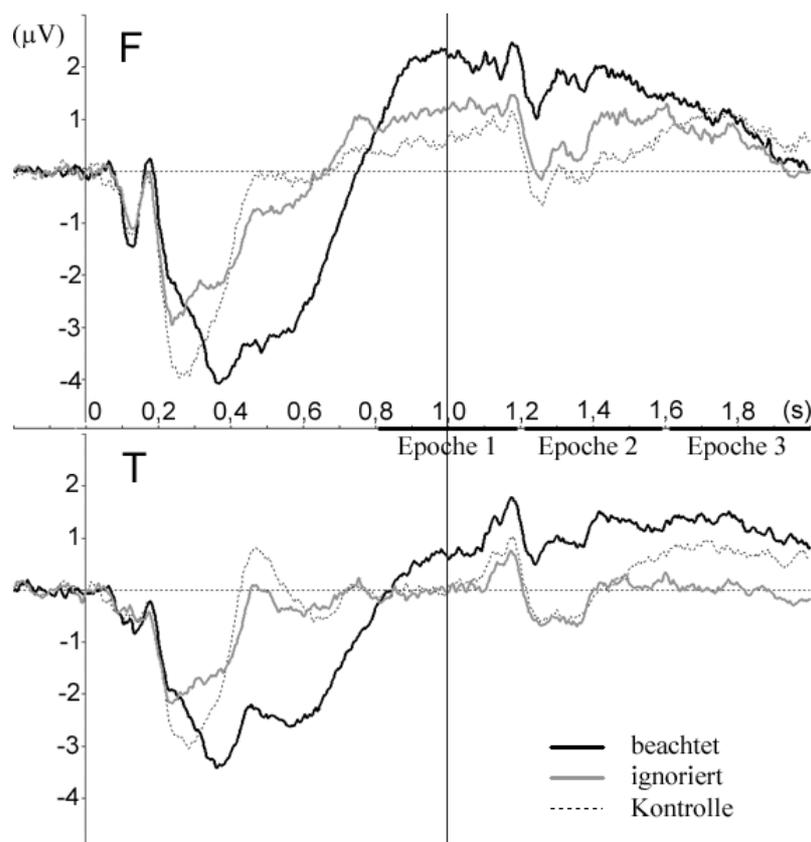


Abb. 9: Grand Mean EKP-Kurven über frontalen Elektrodenpositionen (F steht für die Elektrodenpositionen F9/ F10 und T für die Elektrodenpositionen T1/T2) gemittelt über Personen, Hemisphären und Zeit. Die vertikale Linie nach 1000 ms zeigt an, wann der Stimulus ausgeblendet wurde und das ISI begann.

*Tabelle 2:* Ergebnisse der post hoc *t*-Tests für den Haupteffekt Relevanz der Stimuli über frontalen Arealen.

<i>t</i> -Werte	relevant > irrelevant	relevant > passiv	passiv > irrelevant
<b>Epoche 1</b>	2.92 *	2.75 *	0.16
<b>Epoche 2</b>	5.16 ***	4.87 ***	0.46
<b>Epoche 3</b>	2.27 *	1.85	0.28

*Anmerkung:* \* entspricht  $p < .05$ ; \*\* entspricht  $p < .01$ ; \*\*\* entspricht  $p < .001$

### 2.1.5 Diskussion

Ziel dieser Untersuchung war es, eine Modulation der neuronalen Verarbeitung visuell präsentierter Stimuli in temporo-okzipitalen Hirnarealen durch Aufmerksamkeitsverschiebungen in einer Aufgabe zum Arbeitsgedächtnis zu erreichen. Explorativ wurden frontale Korrelate analysiert. Dazu wurde der Zeitverlauf der neuronalen Aktivität in unterschiedlichen Hirnarealen während einer 1-back Aufgabe mit Distraktoren analysiert. Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass die neuronale Antwort auf sequentiell präsentierte Stimuli durch die Instruktion zur Aufmerksamkeitslenkung moduliert werden konnte. Im Einklang mit früherer Literatur (Gazzaley et al., 2005) konnte eine stärkere Verarbeitung selektiv beachteter Gesichter im Vergleich zu ignorierten nachgewiesen werden. Darüber hinaus fand sich eine stärkere Verarbeitung beachteter Gesichter im Vergleich zur perzeptuellen Kontrollbedingung. Allerdings fand sich anders als bei Gazzaley und Kollegen (2005) keine verminderte Verarbeitung nicht beachteter Gesichter im Vergleich zu passiv betrachteten und auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit blieb unbeeinflusst von der Aufmerksamkeitsmodulation. Die P100 auf Gesichter trat wie erwartet unabhängig von der Instruktion auf. Die von Gazzaley und Kollegen (2005) gefundene Auf- und Abregulation des Aktivierungsausmaßes und der Verarbeitungsgeschwindigkeit, im Vergleich zu einer perzeptuellen Kontrollbedingung, konnte damit in der aktuellen Studie nur teilweise repliziert werden.

Eine Ursache für die fehlende verminderte Verarbeitung störender Gesichtsstimuli könnte in Unterschieden in den Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis zwischen der aktuellen Studie und der von Gazzaley und Kollegen (2005) liegen. Die Aufgabe in der früheren Studie war es, sich zwei Items über 9 s zu merken, in der aktuellen Studie musste jeweils nur ein Item für im Mittel 3 s erinnert werden. Ein weiterer Unterschied betraf ausschließlich die Verarbeitung relevanter Stimuli. Diese mussten bei Gazzaley lediglich für einen Durchgang memoriert werden, in der aktuellen Studie mussten fortwährend neue Gesichter abgespeichert und die

Repräsentationen älterer Gesichter unterdrückt werden („updating“ Prozesse). Eine motorische Reaktion auf die analysierten Gesichter gab es in beiden Studien nicht.

Andererseits gibt es auch Hinweise darauf, dass die N170 überhaupt nicht durch Aufmerksamkeit modulierbar ist (Carmel & Bentin, 2002; Cauquil, Edmonds, & Taylor, 2000). In diesen Studien wurden den Probanden sequentiell Stimuli verschiedener Kategorien präsentiert. Pro Block sollte auf Stimuli einer bestimmten Kategorie hin eine Taste gedrückt werden. Mit diesem Studiendesign konnte keine Modulation der N170 in Abhängigkeit von der Relevanz der Gesichtsstimuli nachgewiesen werden. Allerdings gibt es einen wesentlichen Unterschied zwischen diesen Studien und der aktuellen Arbeit. In den Studien ohne Nachweis einer Modulation der N170 durch Aufmerksamkeit untersuchten die Autoren ausschließlich Aufmerksamkeitsprozesse und somit die frühe Gesichterverarbeitung, wohingegen in der aktuellen Arbeit das Wiedererkennen von Gesichtern und damit Prozesse des Arbeitsgedächtnisses erfasst wurden. Wenn auch den Probanden in beiden Aufgabenarten aufgrund der sequentiellen Reizpräsentation freie Verarbeitungskapazitäten zur Verfügung standen, so ist das Ausmaß an verfügbarer Gedächtniskapazität doch unterschiedlich. Lavie (1995) zeigte, dass es bei freier Wahrnehmungs- und Gedächtniskapazität zu einer automatischen Verarbeitung störender Informationen kommt, was in diesen Studien (Carmel & Bentin, 2002; Cauquil et al., 2000) der Fall gewesen sein könnte.

Die in der aktuellen Studie gefundenen späten Effekte an fronto-temporalen Elektroden entsprachen den Effekten der N170. Die Verarbeitung relevanter Gesichter führte zu einer Erhöhung der Aktivierung im Gegensatz zur Verarbeitung passiv betrachteter oder irrelevanter Gesichter. Dieser Effekt begann noch während der Stimuluspräsentation und hielt bis in das ISI hinein an. Auch andere Autoren (Egner & Hirsch, 2005) fanden keinerlei Hinweise auf selektive Inhibitionsprozesse, sondern lediglich eine verstärkte Verarbeitung aufgaben-relevanter Reize.

Da der gefundene Effekt erst nach der sensorischen Verarbeitung der Gesichter auftrat, könnte er ein Korrelat der Informationsspeicherung und einfachen Aufrechterhaltung sein. Allerdings sollte der Effekt in diesem Fall zum einen während des kompletten Analysezeitraums aufrechterhalten bleiben, und zum anderen auch nach der Präsentation irrelevanter Reize vorhanden sein, da zur erfolgreichen Bewältigung der 1-back Aufgabe auch während dieser Zeit Repräsentationen von relevanten Gesichtern aufrechterhalten werden mussten. Beides war nicht der Fall.

Einen weiteren Interpretationsansatz liefert ein Review (Curtis & D'Esposito, 2005), in dem die These vertreten wird, dass der PFK eine entscheidende Rolle in einer Reihe von

Kontrollprozessen, allen voran dem Prozess der Selektion, innehat. Unter Selektion verstehen die Autoren einen Prozess, bei welchem im Kurzzeitgedächtnis repräsentierte Informationen in den Fokus der Aufmerksamkeit geraten, um aufrechterhalten zu werden, und möglicherweise um zur Wahl einer adäquaten motorischen Antwort genutzt zu werden. Präfrontale Aktivierung während des „delays“ einer Arbeitsgedächtnisaufgabe ist nach der Meinung der Autoren ein Korrelat der Selektion einer motorischen Antwort. In der aktuellen Studie wurden allerdings nur solche Gesichtsstimuli in die Auswertung aufgenommen, auf die keine motorische Antwort erfolgte, somit war auch keine Selektion einer Antwort erforderlich.

Dass der PFK nicht an Prozessen der einfachen Aufrechterhaltung beteiligt ist, sondern vielmehr an der Vermittlung von Interferenzen, sowie an Aufmerksamkeits- und Selektionsprozessen, wird auch von anderen Autoren in aktuellen Publikationen vertreten (Postle, 2006). Bezüglich der Interferenzkontrolle konnte in der aktuellen Studie kein frontales Korrelat gefunden werden, aber möglicherweise entsprach die erhöhte Aktivierung auf relevante Gesichter, im Vergleich zu der auf passiv betrachtete bzw. irrelevante Gesichter, den von Postle beschriebenen Aufmerksamkeitsprozessen. Möglicherweise veranlasste der PFK, dass relevante Stimuli in den Fokus der Aufmerksamkeit gelangten, und dadurch Repräsentationen dieser Stimuli im visuellen Assoziationskortex aufrechterhalten werden konnten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse dieser zweiten Untersuchung darauf schließen lassen, dass der PFK an Prozessen der selektiven Aufmerksamkeit bezüglich relevanter Informationen beteiligt ist, wie es auch zuvor schon gezeigt wurde (Adleman et al., 2002; Bunge, Dudukovic, Thomason, Vaidya, & Gabrieli, 2002; D'Esposito, Aguirre et al., 1998; de Fockert et al., 2001; Diamond, Briand, Fossella, & Gehlbach, 2004; Ehlis, Herrmann, Wagners, & Fallgatter, 2005; Kwon, Reiss, & Menon, 2002; Nelson et al., 2000; Sakai & Passingham, 2004; Smith & Jonides, 1998). Kritisch zu bemerken ist allerdings, dass sich aufgrund einer Modulation von Amplituden über dem frontalen Kortex keine Aussage darüber machen lässt, ob dieses Hirnareal auch die Ursache für die unterschiedlichen Amplituden darstellt. Um dieses Defizit aufzuheben wurde die Fragestellung in Experiment 3 mit der NIRS untersucht, welche eine direktere Messung der kortikalen Aktivierung erlaubt.

## **2.2 Experiment 3: Fronto-parietale Korrelate von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle: Eine NIRS Studie**

### **2.2.1 Herleitung der Fragestellung**

Ziel der dritten Untersuchung war die Anpassung der modifizierten n-back Aufgabe an die Anforderungen einer NIRS Ableitung, um die frontale Aktivierung während der Aufgabe zum Arbeitsgedächtnis direkter erfassen zu können als mit dem EEG. Trotzdem verschiedene Studien nachweisen konnten, dass selbst geringe Veränderungen der [O<sub>2</sub>Hb] und der [HHb], die während kognitiver Aufgaben auftreten, mit Hilfe der Methode der NIRS abgebildet werden können (Fallgatter & Strik, 1998; Noguchi, Takeuchi, & Sakai, 2002; Tsujimoto, Yamamoto, Kawaguchi, Koizumi, & Sawaguchi, 2004), finden sich nur sehr wenige Studien, die diese Methode zur Untersuchung von Funktionen des Arbeitsgedächtnisses angewandt haben (Gibson, Lee, & Park, 2007; Herrmann et al., 2007; Kwee & Nakada, 2003; Tsujimoto et al., 2004; Watanabe & Kato, 2004). Der Zusammenhang zwischen Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit wurde bisher noch nicht mit der NIRS untersucht.

In einer NIRS Studie zum Arbeitsgedächtnis (Tsujimoto et al., 2004) fanden die Autoren eine bilaterale Aktivierung des lateralen PFK während der Durchführung einer „delayed recognition“ Aufgabe, welche in zwei unterschiedlich schweren Versionen dargeboten wurde. Die Aktivität im lateralen PFK fiel in der leichteren Version geringer aus als in der schwierigeren, womit die Autoren nachweisen konnten, dass NIRS sensitiv genug ist, um eine vom Ausmaß der Gedächtniskapazität abhängige Aktivierung des PFK zu messen. Studien mit anderen bildgebenden Verfahren fanden eine solche Modulation nur für den DL-PFK, nicht für den VL-PFK (Cabeza & Nyberg, 2000), diese Unterscheidung wurde hier, möglicherweise aufgrund der Schwierigkeit, die an der Kopfoberfläche gemessene Hirnaktivierung bestimmten anatomischen Regionen zuzuordnen, nicht getroffen.

In der aktuellen Studie sollten mit der NIRS räumlich spezifische Aktivierungsmuster im PFK auffindig gemacht werden, die mit selektiver Beachtung bzw. selektiver Inhibition von sequentiell präsentierten, identischen visuellen Stimuli einhergehen. Dazu wurde mittels eines ereignisbezogenen NIRS Designs geprüft, ob während einer 1-back Aufgabe mit Distraktorreizen Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit in präfrontalen Regionen erfasst werden können. Gemessen wurden die präfrontalen Veränderungen in der zerebralen Oxygenierung während einer der zweiten Untersuchung (Punkt 2.1.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) ähnlichen Aufgabe. Aufgrund der Tatsache, dass in der vorherigen Studie

ausschließlich die Verarbeitung der Gesichtsstimuli ausgewertet wurde und der Annahme, dass das selektive Beachten bzw. Ignorieren von Gesichtern und Landschaften keine spezifischen präfrontalen Reaktionen auslöst, wurden lediglich Gesichter als Stimuli dargeboten.

## 2.2.2 Hypothesen

- Das Beachten visueller Stimuli führt zu einer bilateralen Aktivierung des mittleren frontalen Gyrus (DL-PFK) und eine Aktivierung des inferioren frontalen Gyrus bis hin zur intraparietalen Furche.
- Das Ignorieren visueller Stimuli führt zu einer Erhöhung der Aktivierung im rechten mittleren und linken inferioren frontalen Gyrus.

## 2.2.3 Methode

### 2.2.3.1 Versuchspersonen

Teilnehmer waren 20 gesunde Probanden im Alter von 21 bis 35 Jahren (davon zehn Frauen; durchschnittliches Alter 24.9,  $SD = 2.9$  Jahre). Alle Probanden hatten eine normale oder korrigierte Sehkraft und waren Rechtshänder, bei keinem war eine neurologische oder psychiatrische Störung bekannt. Die Teilnahme an der Studie war unentgeltlich. Alle Probanden erhielten eine Aufklärung zum Ablauf des Experimentes und der NIRS bevor sie schriftlich ihre Zustimmung zur Teilnahme gaben. Da fehlerhafte Reaktionen nicht in die Auswertung eingingen, wurden keine Probanden aufgrund erhöhter Fehlerraten von der Auswertung ausgeschlossen.

### 2.2.3.2 Untersuchungsdesign

Für diese Studie wurde das oben beschriebene Untersuchungsdesign des EEG Experiments abgewandelt und an die Anforderung eines ereignisbezogenen NIRS Designs angepasst. Da sich die Auswertung der EEG Daten auf die Analyse der Gesichtsstimuli beschränkte und auch für diese Studie keine differenziellen Effekte der Verarbeitung von Gesichts- und Landschaftsstimuli erwartet wurden, wurden in der aktuellen Studie ausschließlich Gesichter

präsentiert. Wie zuvor wurden ausschließlich Männergesichter präsentiert. Entsprechend der Beschreibung unter Punkt 2.1.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“ sahen die Teilnehmer auch hier aufgaben-relevante und aufgaben-irrelevante Stimuli auf einem Computermonitor und sollten eine Antworttaste mit dem Zeigefinger der rechten Hand drücken, wann immer dasselbe relevante Gesicht, nur unterbrochen durch irrelevante Gesichter, zweimal hintereinander erschien.

Innerhalb einer kontinuierlichen Abfolge von Stimuli sollten also einige Gesichter beachtet werden und andere nicht. Die Relevanz eines Gesichtes wurde definiert durch eine farbige Umrandung (grün oder blau) des Stimulus. Um mögliche Farbeffekte zu vermeiden, sollte die eine Hälfte der Probanden die blauumrandeten Stimuli ignorieren, die andere Hälfte die grün umrandeten Stimuli. Dieses Studiendesign ist in Abb. 10 in schwarzweiß verdeutlicht, die relevanten Gesichter sind weiß umrandet, die irrelevanten schwarz.

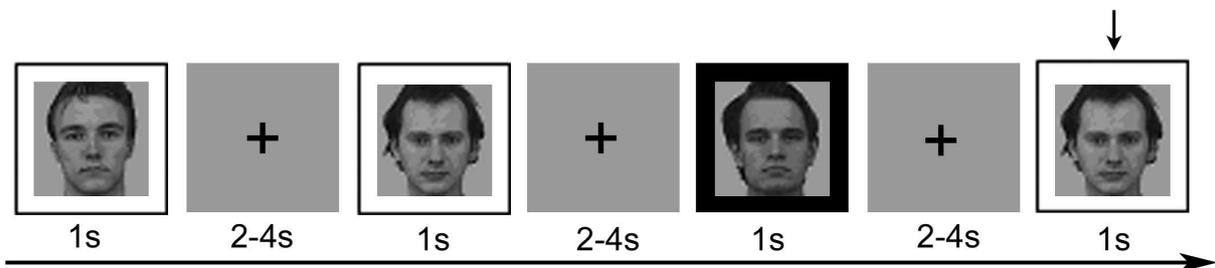


Abb. 10: Schaubild des experimentellen Designs. Bei dieser 1-back Aufgabe sollten die Probanden immer dann reagieren, wenn dasselbe relevante Gesicht (weißer Rahmen) zweimal hintereinander erschien (angedeutet durch den schwarzen Pfeil oberhalb des letzten Stimulus), unabhängig davon, ob dazwischen ein irrelevantes Gesicht präsentiert wurde. Jeder Stimulus wurde für 1000 ms präsentiert, das ISI betrug 2000 bis 4000 ms (mittleres ISI = 3000 ms).

Die Gesichtsstimuli wurden randomisiert auf die beiden Gruppen aufgeteilt. Im zuvor dargestellten Experiment 2 (siehe Punkt 2.1.3.2 der Experimentellen Untersuchungen) wurden immer abwechselnd ein relevanter und ein irrelevanter Reiz präsentiert. Im Gegensatz dazu war die Abfolge der beiden Bedingungen in der aktuellen Studie randomisiert, mit der Einschränkung, dass nicht mehr als zwei Gesichter derselben Bedingung aufeinander folgen durften. Es konnten also höchstens zwei irrelevante Reize zwischen der Präsentation zweier relevanter Reize auftreten und andersherum. Des Weiteren wurden zwischen einigen Durchgängen Nullereignisse präsentiert, während derer der Bildschirm dunkel blieb. Für diese passiven Ereignisse wurde keine Hirnaktivierung erwartet, sie dienten als Kontrolle für die aktiven Bedingungen. Alle Stimuli wurden in einem Durchgang ohne Pausen präsentiert. Die Datenerhebung erstreckte sich über 15 Minuten. Vor der eigentlichen Durchführung hatte jeder Proband die Möglichkeit, die Aufgabe am Computer zu üben.

Die Stimuli wurden wie auch während der zuvor dargestellten EEG Studie in einem ereigniskorrelierten Design präsentiert und ausgewertet. Ein Vorteil der ereigniskorrelierten Auswertung in Studien mit kognitiven Paradigmen ist die Analyse von Ereignissen, deren Dauer wesentlich kürzer ist als die eigentliche Latenz der vaskulären Antwort, so dass das Intervall zwischen den einzelnen Durchgängen relativ kurz gewählt werden kann. Zum anderen ermöglicht ein ereigniskorreliertes Design die randomisierte Präsentation der experimentellen Bedingungen. Damit eignen sich ereigniskorrelierte Designs besonders, um kognitive Prozesse abzubilden. Im Block-Design spiegelt die gefundene Aktivierung immer die Summe aller abgelaufenen Prozesse wieder, das ereignisbezogene Design ermöglicht eine Auswertung der neuronalen Antwort auf jeden dargebotenen Stimulus.

Alle Probanden saßen in einem bequemen Stuhl in einem Abstand von 60 cm vor einem Computermonitor in einem dunklen und ruhigen Raum. Vor der eigentlichen NIRS Messung erhielt jeder die Instruktion, während der Ableitung entspannt und ruhig zu sitzen und Bewegungen des Körpers zu vermeiden.

### **2.2.3.3 Stimulusmaterial**

Verwendet wurden 120 der unter Punkt 2.1.3.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“ beschriebenen Gesichtsstimuli. Jeweils 60 Gesichter waren grün umrandet, die anderen 60 blau umrandet. Die Zuordnung der Gesichter zur Rahmenfarbe geschah zufällig für jede Versuchsperson. Alle Stimuli wurden vor einem grauen Hintergrund präsentiert. 15 zufällig ausgewählte Gesichter aus jeder Bedingung wurden wiederholt präsentiert, insgesamt sah also jeder Proband 75 relevante und 75 irrelevante Stimuli. Zusätzlich wurden 75 Nullereignisse präsentiert, sie zeigten einen grauen Bildschirm mit einem weißen Fixationskreuz in der Mitte des Monitors. Einschließlich den Nullereignissen wurden insgesamt 225 Stimuli in einem ereignisbezogenen Design präsentiert. Jeder Stimulus wurde 1000 ms dargeboten, das ISI betrug im Durchschnitt 3000 ms (die Intervalle 2000, 2500, 3000, 3500 und 4000 ms wurden randomisiert ausgewählt). Wie während der Nullereignisse wurde auch während der ISI ein weißes Fixationskreuz auf einem grauen Bildschirm gezeigt.

### 2.2.3.4 Datenaufzeichnung und Auswertung

#### Erhebung der NIRS Daten

Das NIRS Gerät und auch die genutzte NIRS Haube entsprachen denen des ersten Experiments, eine Beschreibung findet sich unter Punkt 1.3.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“. Auch die Position der 52-Kanal Haube über dem frontalen Kortex war identisch mit der Position der Haube im Experiment 1.

#### Auswertung der NIRS Daten

Um “baseline drifts” und den Pulsschlag aufgrund des Herzschlags zu eliminieren wurden die Rohdaten mit einem Hochpassfilter von 0.02 Hz aufbereitet. Im Anschluss daran wurde mit den aufbereiteten Daten eine hämodynamische Modellfunktion (HRF) berechnet. Dazu wurde eine Gauss’sche Funktion mit den Parametern Dauer (15 s), Pik (7.5 s) und Streuung (2 s) verwendet. Auf der Ebene einzelner Probanden wurde sowohl die erste als auch die zweite Ableitung der HRF zum Anpassen der HRF an die Daten bezüglich Beginn und Streuung genutzt. Um einen Prädiktor für die hämodynamische Antwort auf jede einzelne Bedingung zu erhalten, wurde die HRF mit einer Delta-Funktion, die den Beginn der sensorischen Stimulation anzeigt, abgeglichen. Im Anschluss daran wurde eine Regressionsgleichung errechnet (Ermittlung der Betagewichte über die Methode der kleinsten Quadrate), welche einen Fehlerterm enthielt, der durch physiologische Prozesse wie Atmung, Blutdruckänderungen, Puls, etc. mit den Daten autokorreliert war (Plichta, Heinzl, Ehli, Pauli, & Fallgatter, 2007). Deshalb wurde der Fehlerterm mit einer Autoregression ersten Grades korrigiert (Cochrane & Orcutt, 1949). Die danach neu geschätzten Betagewichte (ein Betagewicht pro Kanal, Bedingung und Versuchsperson) können als Indikator für Aktivierung betrachtet werden und wurden mittels einseitiger *t*-Tests gegen Null getestet.

Um die Power des ereignisbezogenen Designs mit kurzen ISIs zu steigern wurden Nullereignisse eingebaut und als Kontrastbedingung verwendet. Dazu wurden Differenzen zwischen den Betagewichten der aktiven Bedingungen (Verarbeitung relevanter bzw. irrelevanter Gesichter) und der Kontrastbedingung (Nullereignisse) berechnet. Diese Differenzen wurden als Index der Aktivierung angenommen und gegen Null getestet (einseitiger *t*-Test). Es wurde deshalb eine einseitige Testung gewählt, da eine Beteiligung des PFK an Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der selektiven Aufmerksamkeit in zahlreichen Befunden neurowissenschaftlicher Forschung nachgewiesen werden konnte. Zusätzlich wurde die Differenz zwischen den beiden aktiven Bedingungen getestet

(zweiseitiger  $t$ -Test) um mögliche spezifische neuronale Korrelate des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzinhibition zu finden. In die Analyse ging jeweils nur die erste Präsentation eines Reizes ein, um Aktivierungen aufgrund der Motorik zu vermeiden. Für die Analyse der NIRS Daten wurden signifikante kortikale Aktivierungen durch positive  $t$ -Werte für [O<sub>2</sub>Hb] und negative  $t$ -Werte für [HHb] angezeigt. Wegen der multiplen Testung wurden alle statistischen Schlussfolgerungen aufgrund eines adjustierten Alpha-Niveaus von 5% gemacht. Die Adjustierung wurde mit der Bonferroni Korrektur und der Berechnung von Dubey/Armitage-Parmar Alpha-Grenzen vorgenommen (Sankoh et al., 1997). In diesen ist die räumliche Korrelation zwischen den Kanälen mit eingerechnet (Tabelle 3).

Zur Bestimmung der Lokation der NIRS Kanäle wurde die oben beschriebene probabilistische Registrierung in Bezug auf die MNI Raumkoordinaten durchgeführt (Punkt 1.3.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“)

*Tabelle 3:* Mittlere räumliche Korrelation zwischen den 52 NIRS Kanälen für die relevanten Kontraste.

<b>Korrelation</b>	<b>beachtet</b>	<b>ignoriert</b>	<b>beachtet vs. ignoriert</b>
[O <sub>2</sub> Hb]	0.32	0.36	0.50
[HHb]	0.19	0.32	0.31

## 2.2.4 Ergebnisse<sup>3</sup>

### 2.2.4.1 Verhaltensdaten

Die mittlere Reaktionszeit für korrekte Durchgänge lag bei 648 ms ( $SD = 76$  ms). Die durchschnittliche Trefferquote lag bei 14 ( $SD = 2$ ; bei 15 möglichen Treffern).

### 2.2.4.2 NIRS Ergebnisse

Die Abbildungen 11a und 11b zeigen die charakteristischen Aktivierungsmuster für die beiden experimentellen Bedingungen. Man kann ihnen entnehmen, dass sowohl die Verarbeitung relevanter als auch die Verarbeitung irrelevanter Stimuli mit einem Anstieg der [O<sub>2</sub>Hb] im PFK einhergeht. Die probabilistische Registrierung der NIRS Kanäle bezüglich

<sup>3</sup> (Schreppel et al., 2008)

der MNI Raumkoordinaten ergab, dass die Verarbeitung relevanter Gesichter im Vergleich zu den Nullereignissen zu einem bilateralen Anstieg der  $[O_2Hb]$  im mittleren frontalen Kortex (#35, #39, #49) und zu einem linkshemisphärischen Anstieg im inferioren frontalen Kortex (#19, #30) führte. Zusätzlich wurde bilateral eine Aktivierung des präzentralen (#2, #9) und linkslateral des postzentralen Kortex gefunden (#20;  $t[19] > 3.29$ ;  $p < .05$ ; Abb. 11a). Für weitere 10 Kanäle fand sich eine Tendenz (#3, #6-#8, #10, #15, #24, #25, #28, #46;  $t[19] > 2.89$ ;  $p < .10$ ).

Auf aufgaben-irrelevante Gesichter folgte eine Aktivierung von weiten Teilen des rechten PFK. Die probabilistische Registrierung der NIRS Kanäle bezüglich der MNI Raumkoordinaten ergab eine Aktivierung des superioren (#5, #6, #15, #36), mittleren (#15, #35, #46) und inferioren (#13, #24) frontalen Kortex und des präzentralen Kortex (#2;  $t[19] > 3.20$ ;  $p < .05$ ; Abb. 11b). Zusätzlich ergab sich eine Tendenz in weiteren sechs Kanälen (#4, #8, #14, #16, #25, #26;  $t[19] > 2.80$ ;  $p < .10$ ).

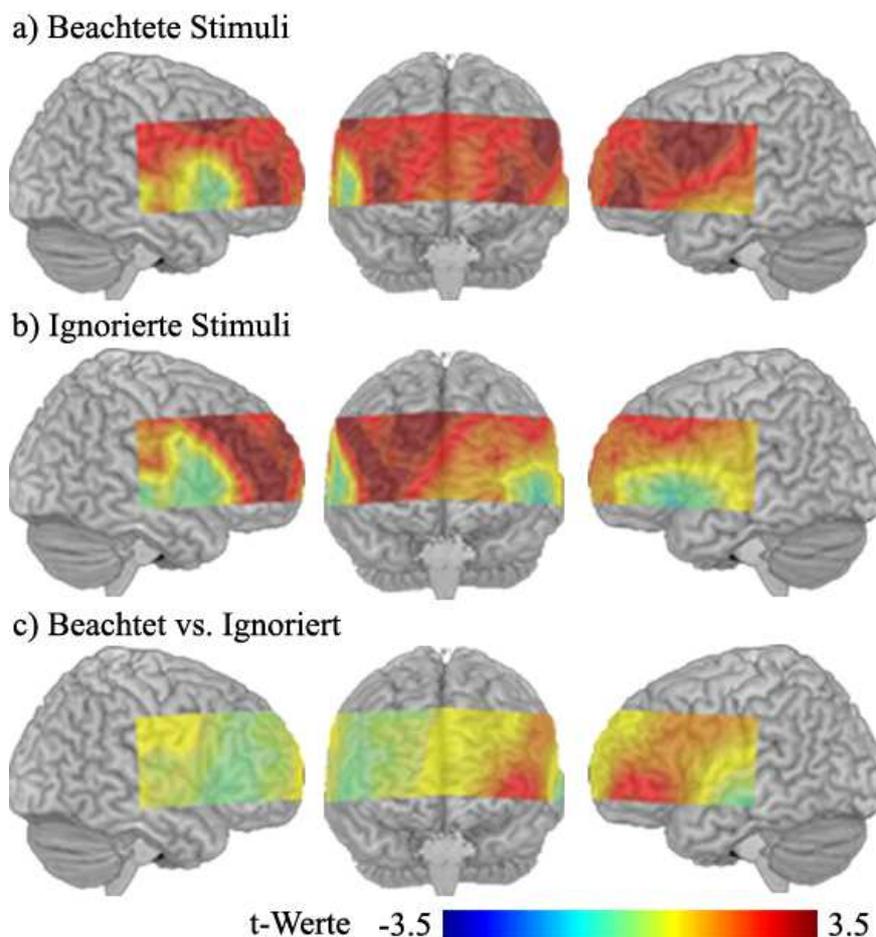


Abb. 11: Statistische Abbildungen ( $t$ -Werte) der  $[O_2Hb]$  differenziert nach Experimentalbedingungen, gemittelt über Personen und Zeit. Die Aktivierungsmuster basieren auf der Interpolierung der Ergebnisse einzelner Kanäle und wurden näherungsweise auf ein durchschnittliches anatomisches Hirn gelegt.

Der Vergleich der beiden Bedingungen zeigte im inferioren frontalen Kortex der linken Hemisphäre eine höhere Aktivierung auf relevante Gesichter als auf irrelevante (Abb. 11c). Dieser Unterschied wurde jedoch nur in Kanal 50 marginal signifikant ( $t[19] > 2.51; p < .10$ ). Auf relevante Gesichter ergab sich ein höherer Anstieg der  $[O_2Hb]$  als auf irrelevante Gesichter. Die Verarbeitung irrelevanter Gesichter führte in keinem Kanal zu einer höheren Hirnaktivierung im Vergleich zu relevanten Gesichtern.

Die Ergebnisse zu HHb sind in Abb. 12 dargestellt. Beschreibend lässt sich festhalten, dass es übereinstimmend mit den Befunden für  $O_2Hb$  zu einer bilateralen Verminderung der Aktivierung im PFK bei der Verarbeitung relevanter Gesichter kommt sowie zu einer rechtslateralen Verminderung bei der Verarbeitung irrelevanter Gesichter.

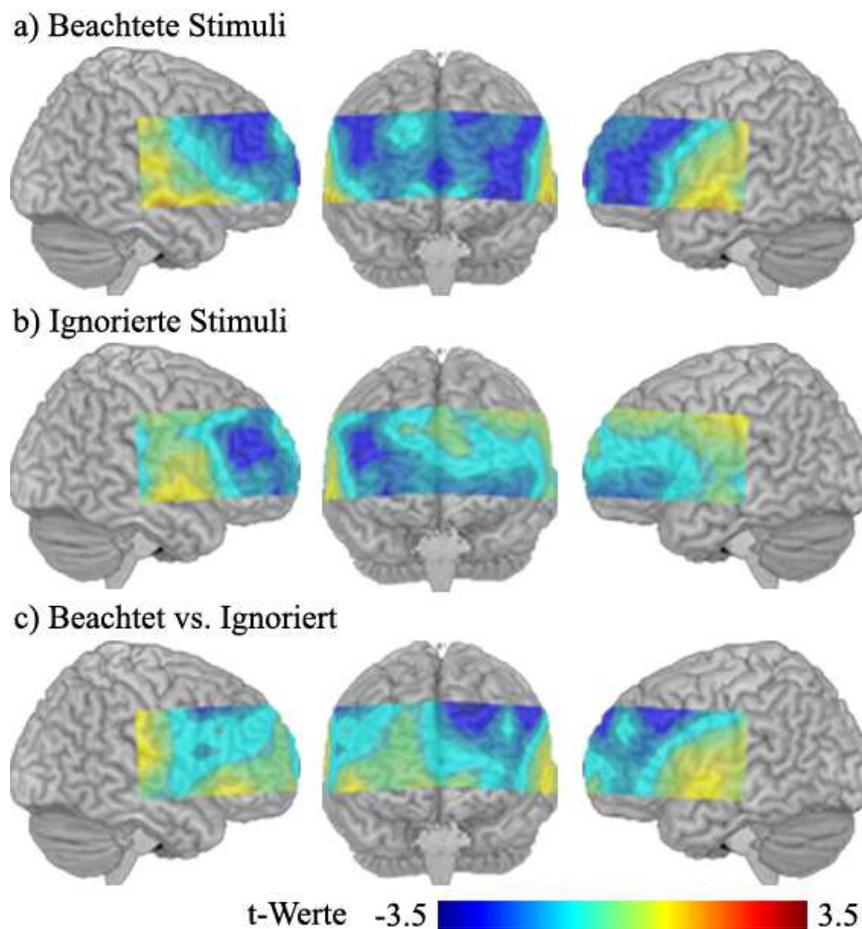


Abb. 12: Statistische Abbildungen ( $t$ -Werte) der  $[HHb]$  differenziert nach Experimentalbedingungen, gemittelt über Personen und Zeit. Die Aktivierungsmuster basieren auf der Interpolierung der Ergebnisse einzelner Kanäle und wurden näherungsweise auf ein durchschnittliches anatomisches Hirn gelegt.

Signifikante Veränderungen waren jedoch kaum zu finden. Eine Verminderung der [HHb] bei der Verarbeitung relevanter Reize zeigte sich in der Tendenz im medialen superior-frontalen Kortex (#37) und im linken mittleren frontalen Kortex (#49;  $t[19] < -3.13$ ;  $p < .10$ ; Abb. 12a). Die Verarbeitung irrelevanter Reize führte zu einer in der Tendenz signifikanten Verringerung im inferioren frontalen Kortex (#24;  $t[19] < -3.10$ ;  $p < .10$ , Abb. 12b). Betrachtet man trotz des mangels an signifikanten Ergebnissen den direkten Vergleich für die einzelnen Bedingungen, fand sich für Kanal 6 im superioren frontalen Kortex ( $t[19] < -3.28$ ;  $p < .05$ ; Abb. 12c) eine signifikant stärkere Verminderung der [HHb] für relevante als für irrelevante Gesichter.

### 2.2.5 Diskussion

Ziel dieser Studie war die Untersuchung der neuronalen Aktivierung in frontalen Hirnarealen bei Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzkontrolle mit der NIRS. Im Einklang mit früheren Ergebnissen (Tsujiimoto et al., 2004) wurde während der n-back Aufgabe eine signifikante Erhöhung des O<sub>2</sub>Hb im lateralen PFK gefunden. Während Prozessen der fokussierten Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses zeigte sich wie erwartet eine Aktivierung fronto-parietaler Hirnareale und hier insbesondere des DL-PFK in beiden Hemisphären und des linken VL-PFK. Die gefundene Aktivierung in prä- und postzentralen Arealen konnte kein Korrelat der motorischen Reaktion sein, da Reize, die eine Reaktion erforderten, aus der Auswertung ausgeschlossen wurden. Diese Ergebnisse wurden in der Tendenz durch eine Verminderung der [HHb] in den entsprechenden Arealen gestützt.

Während selektiver Inhibition fand sich eine weitläufige rechtshemisphärische Aktivierung des gesamten präfrontalen Kortex. Die Aktivierung im mittleren und superioren PFK bezüglich der Inhibition irrelevanter Informationen stand im Einklang mit früheren Ergebnissen (Sakai et al., 2002), eine Aktivierung des linken inferioren frontalen Gyrus (Jha et al., 2004) konnte jedoch nicht gefunden werden. Das könnte möglicherweise an der farbigen Umrandung liegen, aufgrund derer die Bilder kategorisiert wurden. Anhand der Rahmenfarbe konnten die Gesichter sehr schnell als relevant bzw. irrelevant kategorisiert werden ohne dass einzelne Merkmale der Distraktoren verarbeitet werden mussten. Möglicherweise ist es aber gerade das Ausblenden von Repräsentationen, die bereits im Arbeitsgedächtnis verfügbar sind, welches die neuronalen Korrelate der Interferenzinhibition auslösen. Gegen diese Erklärung spricht allerdings, dass auch die Distraktoren in der Studie

von Jha und Kollegen (2004) auf den ersten Blick als irrelevant identifizierbar waren (Gesichter vs. Schuhe) und die Autoren trotzdem für kongruente Distraktoren eine höhere Aktivierung im linken inferioren frontalen Gyrus fanden als für inkongruente.

Ein spezifisches Aktivierungsmuster hinsichtlich der Inhibition aufgaben-irrelevanter Reize konnte weder für das oxygenierte noch für das deoxygenierte Hämoglobin nachgewiesen werden. In keinem Kanal zeigte sich eine erhöhte Aktivierung auf irrelevante Gesichter im Vergleich zu relevanten Gesichtern.

Im Gegensatz dazu zeigte sich für das Memorieren aufgaben-relevanter Reize eine erhöhte Aktivierung im Vergleich zur Inhibition in jeweils einem Kanal für O<sub>2</sub>Hb (marginal signifikant) und HHb. Allerdings sind die beiden Kanäle nicht identisch und auch wenn sie beide in der linken Hemisphäre liegen, decken sie doch unterschiedliche Hirnareale ab. Eine eindeutige Interpretation dieser Aktivierungsmuster ist deshalb nur schwer möglich. Unter der Annahme, dass in NIRS-Studien mit kognitiven Paradigmen O<sub>2</sub>Hb möglicherweise ein robusterer Indikator für Veränderungen des regionalen zerebralen Blutflusses ist (Ehlis et al., 2005; Herrmann, Ehlis, Wagener, Jacob, & Fallgatter, 2005; Hoshi, Kobayashi, & Tamura, 2001), könnte man spekulieren, dass die linksseitige Aktivierung über dem Kanal 50 mit der Strategie zusammenhängt, mit der die Probanden die relevanten Stimuli erinnerten. Frühere Studien konnten zeigen, dass Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis, die die subvokale Wiederholung von verbalen Informationen („rehearsal“) erforderten, mit einer Aktivierung des Broca Areal im VL-PFK in Verbindung gebracht werden können (Paulesu, Frith, & Frackowiak, 1993; Spinks et al., 2004). Tatsächlich gaben die meisten Probanden in der aktuellen Studie an, dass sie verbale Strategien nutzten um relevante Gesichter zu erinnern. Irrelevante Gesichter sollten nicht erinnert werden und erforderten somit keine „rehearsal“ Strategien. Hier fand sich keine Aktivierung des Broca Areal, was dafür spricht, dass tatsächlich nur Prozesse der Inhibition gemessen wurden und nicht Prozesse der Aufrechterhaltung von Gedächtnisrepräsentationen.

Allgemein sind die fehlenden klaren Effekte für HHb einschränkend zu bemerken. Im Gegensatz zu den eindeutigen Veränderungen der [O<sub>2</sub>Hb] verringerte sich die [HHb] nur wenig. Allerdings unterstützten die Ergebnisse für HHb auf einer deskriptiven Ebene die Ergebnisse für O<sub>2</sub>Hb, zumindest beim Vergleich der Experimentalbedingungen gegen das Nullereignis. Das steht in Einklang mit den Ergebnissen einer früheren Studie (Tsujimoto et al., 2004), bei der die Autoren während Prozessen des Arbeitsgedächtnisses lediglich einen nichtsignifikanten Trend eines Abfalls der [HHb] fanden. Auch in anderen Studien konnte gezeigt werden, dass kortikale Aktivierung zu unterschiedlichen Datenmustern von O<sub>2</sub>Hb

und HHb führt und dass, wie zuvor erwähnt, in NIRS Studien mit kognitiven Paradigmen O<sub>2</sub>Hb möglicherweise ein robusterer Indikator für Veränderungen des regionalen zerebralen Blutflusses ist (Ehlis et al., 2005; Herrmann et al., 2005; Hoshi et al., 2001).

Ein weiterer kritischer Punkt ist die Platzierung der NIRS Haube. Sie wurde zentral auf die Elektrodenposition Fpz gelegt und symmetrisch zu den Positionen T3 und T4 ausgerichtet (entsprechend dem internationalen 10-20 System). Somit variierte das gemessene Hirnareal je nach Kopfumfang des jeweiligen Probanden, vor allem rechts und links an den seitlichen Enden der Haube. Erschwerend kommt hinzu, dass die räumliche Auflösung der NIRS begrenzt ist und weniger genau als die der fMRT. Allerdings konnte gezeigt werden, dass die Auflösung der NIRS ausreichend ist, um räumlich spezifische Aktivierungen während kognitiver Aufgaben zu erfassen (Ehlis et al., 2005; Herrmann, Walter, Ehlis, & Fallgatter, 2006).

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse dieser Studie, dass man mit der NIRS eine Beteiligung frontaler Hirnareale an Arbeitsgedächtnisprozessen nachweisen kann. Trotz einer ereignisbezogenen Auswertung mit sehr kurzen ISIs war eine Darstellung präfrontaler Prozesse der Aufmerksamkeitslenkung möglich. Im Einklang mit zahlreichen Befunden aktueller Literatur (Awh & Jonides, 2001; Berti & Schroger, 2003a; Bunge et al., 2001; de Fockert et al., 2001; Dolcos & McCarthy, 2006; Gomar, Althaus, A., & Minderaa, 2006; Kane & Engle, 2003; Lepsien et al., 2005; Sakai et al., 2002; Soto et al., 2005; Spinks et al., 2004) zeigte sich außerdem, dass an Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzkontrolle ähnliche Regionen des PFK beteiligt sind. Ein für die Interferenzkontrolle spezifisches neuronales Korrelat konnte nicht nachgewiesen werden.

### **3 Neuronale Korrelate komplexer Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses**

#### **3.1 Herleitung der Fragestellung**

In den Experimenten 2 und 3 (Punkt 2.1.4 und 2.2.4 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) konnte gezeigt werden, dass das selektive Beachten von Stimuli (Arbeitsgedächtnis) und das selektive Ignorieren (Inhibition) zwar zum Teil zu unterschiedlichen Aktivierungen des PFK führte, der direkte Vergleich der beiden Bedingungen jedoch kein spezifisches Aktivierungsmuster für Inhibitionsprozesse ergab. Die Befunde einer Studie zum Zusammenhang von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis (de Fockert et al., 2001) ergaben, dass die Unterdrückung irrelevanter visueller Information unter erhöhter Auslastung des Arbeitsgedächtnisses schwieriger ist. Hirnareale, die diese Unterdrückung steuern, sollten damit aufgrund der erhöhten Anstrengung stärker aktiv sein. Deshalb wurden mögliche neuronale Korrelate der Interferenzinhibition in der nachfolgenden Untersuchung unter erhöhter Auslastung des Arbeitsgedächtnisses erforscht.

Dazu wurde den Probanden anstatt einer 1-back eine schwierigere 2-back Aufgabe präsentiert und in einer ersten Datenerhebung frontale Aktivierungen mit der NIRS erfasst. Parallel wurden okzipitale Korrelate der Gesichtsverarbeitung mit dem EEG erhoben.

In einer zweiten Datenerhebung wurde eine mögliche Modulation der visuellen Verarbeitung aufgrund von Aufmerksamkeitsverschiebungen über dem okzipitalen Kortex mit der NIRS untersucht. Dass eine Modulation der visuellen Verarbeitung im okzipitalen Kortex auch mit der NIRS erfasst werden kann, zeigte eine aktuelle Studie (Herrmann et al., 2008) für emotionale Aufmerksamkeitslenkung. Das passive Betrachten positiver und negativer Stimuli führte zu einer stärkeren Hirnaktivierung als das Betrachten neutraler Stimuli, vermutlich aufgrund natürlich auftretender selektiver Aufmerksamkeit hin zu emotionalen Reize. Dies soll nun erstmalig für kognitive Strategien der Aufmerksamkeitslenkung nachgewiesen werden, indem die okzipitalen Korrelate der Verarbeitung relevanter, irrelevanter und neutraler Gesichtsstimuli miteinander verglichen werden.

### **3.2 Experiment 4a: Fronto-parietale Korrelate von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle: Eine kombinierte EEG und NIRS Studie**

#### **3.2.1 Hypothesen**

##### **Hypothesen zu den NIRS Daten**

- Die erhöhte Auslastung des Arbeitsgedächtnisses führt zu einer stärkeren Aktivierung des bilateralen PFK im Vergleich zu Experiment 3.
- Das Ignorieren von Stimuli führt unter erhöhter Auslastung des Arbeitsgedächtnisses zu einer Aktivierung des linken inferioren frontalen Gyrus.
- Explorativ soll die Aktivierung fronto-parietaler Areale für den Vergleich der Experimentalbedingungen gegen die perzeptuelle Kontrollbedingung untersucht werden. Erwartet wird, dass auf passiv betrachtete Stimuli selbst keine Aktivierung des PFK folgt, auf die Experimentalbedingungen eine erhöhte Aktivierung im Vergleich zur Kontrollbedingung.

##### **Hypothese zu den EEG Daten**

- Selektive Aufmerksamkeit führt zu einer Modulation der neuronalen Verarbeitung, gemessen anhand der Amplitude und Latenz der N170. Diese Modulation der N170 erfolgt in Relation zu einer perzeptuellen Kontrollbedingung. Das Beachten eines Stimulus geht mit einer erhöhten, das Ignorieren mit einer verminderten neuronalen Verarbeitung einher.

#### **3.2.2 Methode**

##### **3.2.2.1 Versuchspersonen**

Teilnehmer waren 20 gesunde Probanden im Alter von 19 bis 29 Jahren (davon 12 Frauen; durchschnittliches Alter 23.2 Jahre,  $SD = 2.6$  Jahre). Alle Probanden hatten eine normale oder korrigierte Sehkraft und waren Rechtshänder, bei keinem war eine neurologische oder psychiatrische Störung bekannt. 12 Probanden wurden mündlich aus dem Bekanntenkreis der Autorin geworben und nahmen unentgeltlich an der Studie teil. Die restlichen acht wurden über eine Online-Anzeige rekrutiert, diese bekamen eine Unkostenerstattung von 10.- Euro. Alle Probanden erhielten eine Aufklärung zum Ablauf des Experiments und den Methoden

EEG und NIRS bevor sie schriftlich ihre Zustimmung zur Teilnahme gaben. Eine Versuchsperson musste aufgrund von Datenverlust aus der Auswertung ausgeschlossen werden. Es blieben 19 Probanden (davon 12 Frauen; durchschnittliches Alter 23 Jahre,  $SD = 2.6$  Jahre). Da fehlerhafte Reaktionen nicht in die Auswertung gingen, wurden keine Probanden aufgrund erhöhter Fehlerraten von der Auswertung ausgeschlossen.

### 3.2.2.2 Untersuchungsdesign

Anstatt der zuvor verwendeten 1-back Aufgabe wurde in dieser Studie eine schwierigere 2-back Aufgabe verwendet. Um den zusätzlichen Verarbeitungsschritt von der Rahmenfarbe eines Stimulus hin zu seiner Relevanz zu vermeiden, wurde in dieser Studie auf die Farbkodierung verzichtet. Die Relevanz der Stimuli wurde stattdessen über das Geschlecht der abgebildeten Person definiert. Jede Versuchsperson sollte entweder männliche oder weibliche Gesichter erinnern. Die Aufgabe der Probanden war es, auf alle relevanten Reize mit einem der beiden Zeigefinger zu reagieren. Erschien ein relevanter Reiz, der identisch war mit dem relevanten Reiz zwei relevante Reize zuvor, sollte mit der linken Steuerungs-Taste reagiert werden, ansonsten mit der rechten. Für die Hälfte der Probanden war die Zuordnung der Reaktionstasten entgegengesetzt. Anders als in den Experimenten 2 und 3 wurde somit auf jeden relevanten Reiz reagiert und nicht nur auf die wiederholt präsentierten. Auf irrelevante Reize erfolgte keine Reaktion. Wie im Experiment 3 (Punkt 2.2.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) wurden lediglich Gesichter als Stimuli gewählt. Das Studiendesign ist in Abb. 13 veranschaulicht.

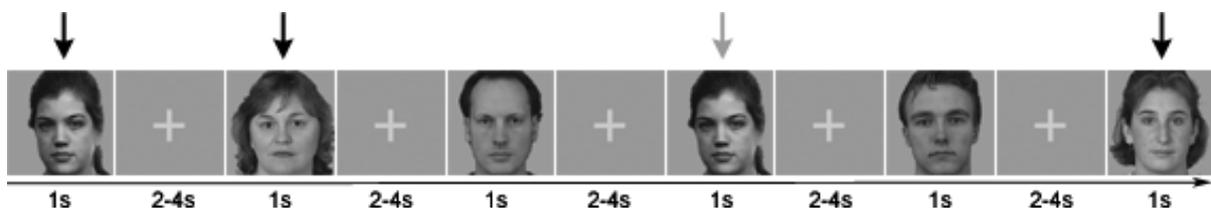


Abb. 13: Schaubild des experimentellen Designs. Eine Reaktion erfolgte auf jedes relevante Gesicht (hier auf weibliche Gesichter), angedeutet durch die Pfeile über den Stimuli. Auf erstmals präsentierte Stimuli erfolgte die Reaktion mit der einen Steuerungs-Taste (schwarzer Pfeil), gleich das aktuelle relevante Gesicht dem relevanten Gesicht zwei Präsentationen zuvor, wurde mit der anderen Steuerungs-Taste reagiert (grauer Pfeil). Irrelevante Gesichter sollten ignoriert werden und gingen nicht in die Zählung mit ein. Jeder Stimulus wurde für 1000 ms präsentiert, das ISI betrug 2000 bis 4000 ms (mittleres ISI = 3000 ms).

Um mögliche Geschlechtseffekte zu vermeiden, wurden jeweils der Hälfte der weiblichen und männlichen Probanden weibliche Gesichter als Distraktoren präsentiert, der anderen Hälfte

männliche Gesichter. Wie in Experiment 3 (Punkt 2.2.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) war die Zuordnung der Stimuli zu den Bedingungen (relevant bzw. irrelevant) zufällig. Die Abfolge der Stimuli war randomisiert, mit der Einschränkung, dass nicht mehr als zwei Stimuli derselben Bedingung aufeinander folgen durften. Es konnten also höchsten zwei irrelevante Reize zwischen der Präsentation zweier relevanter Reize auftreten, und andersherum. Des Weiteren wurden Nullereignisse präsentiert. Ein Defizit der dritten Studie (Punkt 2.2.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) war das Fehlen einer perzeptuellen Kontrollbedingung. Deshalb wurde in dieser Studie zusätzlich zum Experimentalblock eine Kontrollbedingung eingeführt, in der alle Probanden weibliche und männliche Gesichter präsentiert bekamen. Diese sollten passiv und ohne Intention betrachtet werden. Aufgabe der Probanden war es, wie in der Kontrollbedingung des zweiten Experiments (Punkt 2.1.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“), auf das Fixationskreuz zu achten, und je nach Farbe des Kreuzes (grau oder weiß) mit einem der beiden Zeigefinger zu reagieren. Damit konnte diese Aufgabe nicht nur als perzeptuelle Kontrollbedingung für die Arbeitsgedächtnisaufgabe dienen sondern auch als motorische Kontrollbedingung. Mit dieser konnte geprüft werden, ob sich ein Teil der gefundenen Aktivierung auf relevante Gesichter (bzw. der Unterschied zwischen relevanten und irrelevanten oder zwischen relevanten und passiv betrachteten Gesichtern) auf ein motorisches Artefakt zurückführen lässt. Insgesamt bestand die Datenerhebung aus zwei Experimentalblöcken und einem Kontrollblock.

Alle Probanden saßen in einem bequemen Stuhl in einem Abstand von 60 cm vor einem Computermonitor in einem dunklen und ruhigen Raum. Vor der Datenerhebung unterschrieb jede Versuchsperson eine Einverständniserklärung, füllte einen Händigkeitsfragebogen (Oldfield, 1971) aus und konnte die 2-back Aufgabe am Computer üben. Außerdem gab es die Instruktion, während der Ableitung entspannt und ruhig zu sitzen und Bewegungen des Kopfes und der Extremitäten zu vermeiden.

### **3.2.2.3 Stimulusmaterial**

Verwendet wurden je 100 weibliche und männliche Gesichter. Die Bearbeitung der Bilder ist unter Punkt 2.1.3.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“ beschrieben. Alle Stimuli wurden vor einem grauen Hintergrund präsentiert. In jedem Experimentalblock sowie im Kontrollblock wurden zehn zufällig ausgewählte Gesichter (fünf relevant/ fünf irrelevant) wiederholt dargeboten. In der Kontrollbedingung wurden fünf der grauen Fixationskreuze

als weißes Zielkreuz präsentiert. Jeder Stimulus wurde 1000 ms dargeboten, das ISI betrug im Durchschnitt 3000 ms (die Intervalle 2000, 2500, 3000, 3500 und 4000 ms wurden randomisiert ausgewählt). Während der Nullereignisse wurde wie auch während der ISI ein hellgraues Fixationskreuz auf einem dunkelgrauen Bildschirm gezeigt.

### 3.2.2.4 Datenaufzeichnung und Auswertung

#### Erhebung der EEG Daten

Um die parallele Ableitung von EEG und NIRS Daten zu vereinfachen wurden lediglich vier Elektroden ausgewählt (T5, T6, O1 und O2, nach dem internationalen 10-20 System (Jasper, 1958)). Wie in Abbildung 14 dargestellt, wurde die Referenz zwischen Fz und Cz angelegt, die Erdung zwischen Cz und Pz. Zur Kontrolle von Augenartefakten wurden zusätzlich eine Elektrode unter dem rechten Auge und eine links und rechts neben den Augen abgeleitet. Die Aufnahme-Rate lag bei 1000 Hz. Die Daten wurden während der Erhebung online mit einem Tiefpass von 70 Hz und einem Hochpass von 0.1 Hz gefiltert. Der Hautwiderstand lag für alle Elektroden bei maximal fünf k $\Omega$ .

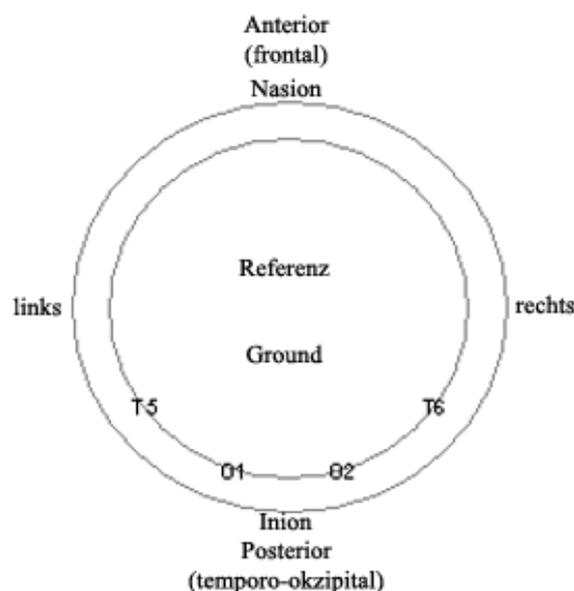


Abb. 14: Darstellung der Elektrodenpositionen.

#### Verarbeitung der EEG Daten

Das Vorgehen entsprach in weiten Teilen dem unter Punkt 2.1.3.4 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“ beschriebenen. Aufgrund der geringen Anzahl der abgeleiteten Elektroden wurden die Daten nicht neu referenziert. Da keine frontalen Elektroden abgeleitet wurden und die im Zentrum der EEG Auswertung stehende

Komponente N170 sehr früh auftritt, konnte ein kürzeres Zeitintervall für die Auswertung gewählt werden. Die Epochen wurden von -100 ms vor bis 500 ms nach Beginn der Präsentation des jeweiligen Stimulus definiert. Eine Augenartefaktkorrektur war aufgrund des kurzen Intervalls nicht nötig. Alle Epochen mit Amplitudensprüngen über  $\pm 100 \mu\text{V}$  wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die artefaktfreien Zeitabschnitte (mindestens 20) wurden separat für jede Person und jede Bedingung zu einem EKP gemittelt. Die Daten aller Versuchspersonen konnten ausgewertet werden. Für den Zeitabschnitt von -100 ms bis zum Beginn des Stimulus wurde eine Baseline-Korrektur durchgeführt. Analysiert wurden die relevanten und irrelevanten Gesichter aus den Experimentalblöcken und die passiv betrachteten Gesichter aus dem Kontrollblock. Für die Elektroden O1, O2, T5 und T6 wurde der positivste Wert zwischen 90 und 150 ms bestimmt und als P100 definiert, der negativste Wert zwischen 140 und 220 ms wurde als N170 definiert.

### **Statistische Auswertung der EEG Daten**

Pik Latenzen und Amplituden der EKPs wurden mit ANOVAs analysiert. Ausgewertet wurden die Innersubjektfaktoren Relevanz der Stimuli (relevant/ passiv betrachtet/ irrelevant), Hemisphäre (links/ rechts) und Elektrodenposition (temporal/ okzipital). Das Signifikanzniveau wurde für alle Analysen auf 5% festgelegt. Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert. In den Ergebnisdarstellungen sind unkorrigierte Freiheitsgrade und korrigierte  $p$ -Wert dargestellt. Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert. In den Ergebnisdarstellungen sind unkorrigierte Freiheitsgrade und korrigierte  $p$ -Wert dargestellt.

### **Erhebung der NIRS Daten**

Das NIRS Gerät und auch die genutzte NIRS Haube entsprachen denen des ersten Experiments, eine Beschreibung findet sich unter Punkt 1.3.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“. Auch die Lage der 52-Kanal Haube über dem frontalen Kortex war identisch mit der Lage der Haube in der ersten Studie.

### **Auswertung der NIRS Daten**

Die Auswertung der NIRS Daten entsprach der unter Punkt 2.2.3.4 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“ erläuterten. Um die frontale Beteiligung an Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzinhibition zu erfassen, wurden die Differenzen zwischen den Betagewichten der aktiven Bedingungen (Verarbeitung relevanter bzw. irrelevanter Gesichter)

und der Kontrastbedingung (Nullereignisse) berechnet. Diese wurden als Index der Aktivierung angenommen und gegen Null getestet (einseitiger  $t$ -Test).

Da mit der passiven Betrachtung visueller Stimuli keine kognitive Aufgabe einher ging, sollte auch keine frontale Aktivierung auftreten. Die Testung dieser explorativen Nullhypothese erfolgte mit einem Signifikanzniveau von 20%.

Weiterhin wurde die Aktivierung einzelner Bedingungen gegeneinander getestet mit Hilfe einer ANOVA mit den Faktoren Bedingung (relevante, passiv betrachtete und irrelevante Stimuli) und Kanal (1-52). Für diese ANOVA wurde eine Wechselwirkung Bedingung  $\times$  Kanal erwartet. Für die nachfolgenden  $t$ -Tests wurde erwartet, dass die Verarbeitung relevanter wie auch irrelevanter Gesichter zu einer stärkeren Aktivierung des frontalen Kortex führt, als die Verarbeitung passiv betrachteter Gesichter (einseitige Testung). Um spezifische neuronale Korrelate des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzinhibition zu finden, wurden die beiden aktiven Bedingungen gegeneinander getestet (zweiseitige Testung). Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert. In den Ergebnisdarstellungen sind unkorrigierte Freiheitsgrade und korrigierte  $p$ -Wert dargestellt.

Trotz der NIRS Befunde der dritten Studie (Punkt 2.2.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) wurde über alle Kanäle getestet. Zum einen, da im vorherigen Experiment mit dem Erinnern wie auch mit dem Ignorieren von Stimuli eine eher verteilte Aktivierung des frontalen bzw. fronto-parietalen Kortex einherging und es somit nicht möglich war, eng umgrenzte ROIs zu definieren. Zum anderen, da aufgrund der höheren kognitiven Auslastung (2-back anstatt 1-back) eine stärkere und weiter verbreitete Aktivierung erwartet wurde (Braver et al., 1997; Herrmann et al., 2007). Diese würde durch eine Begrenzung auf die in der vorherigen Studie signifikanten Kanäle nicht erfasst.

Um motorische Artefakte bei der Analyse der Verarbeitung relevanter Reize auszuschließen, wurden die Reaktionen auf das Fixationskreuz in der Kontrollbedingung gegen das Nullereignis getestet (einseitige Testung). Eine mögliche neuronale Aktivierung rein aufgrund der motorischen Aktivität könnte so erkannt und ausgeschlossen werden.

Um möglichst homogene Daten zu erhalten, wurde jeweils nur die erste Präsentation eines Reizes in die Auswertung eingeschlossen. Signifikante kortikale Aktivierungen wurden durch positive  $t$ -Werte für [O<sub>2</sub>Hb] und negative  $t$ -Werte für [HHb] angezeigt. Wegen der multiplen Testung wurden alle statistischen Schlussfolgerungen aufgrund eines adjustierten Alpha-Niveaus von 5% (einseitige Testung) bzw. 2.5% (zweiseitige Testung) gemacht. Die Adjustierung wurde mit der Bonferroni Korrektur und der Berechnung von Dubey/Armitage-

Parmar Alpha-Grenzen vorgenommen (Sankoh et al., 1997). In dieser ist die räumliche Korrelation zwischen den Kanälen mit eingerechnet, welche in der Tabelle 4 aufgeführt sind.

*Tabelle 4:* Mittlere räumliche Korrelation zwischen den 52 NIRS Kanälen für die relevanten Kontraste.

<b>Korrelation</b>	<b>beachtet</b>	<b>ignoriert</b>	<b>Kontrolle</b>	<b>Motorik</b>	<b>beachtet vs. ignoriert</b>	<b>beachtet vs. Kontrolle</b>	<b>ignoriert vs. Kontrolle</b>
<b>[O<sub>2</sub>Hb]</b>	0.29	0.18	0.29	0.44	0.31	0.34	0.24
<b>[HHb]</b>	0.14	0.18	0.25	0.27	0.18	0.21	0.17

Zur Bestimmung der Lokation der NIRS Kanäle wurde die oben beschriebene probabilistische Registrierung in Bezug auf die MNI Raumkoordinaten durchgeführt (Punkt 1.3.3 des aktuellen Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“)

### **Auswertung der Verhaltensdaten**

Die Reaktionszeiten der Probanden wurden nonparametrisch mit dem Wilcoxon Test analysiert (erstmalig präsentierte im Vergleich zu wiederholt präsentierte Gesichter). Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt.

## **3.2.3 Ergebnisse**

### **3.2.3.1 Verhaltensdaten**

Die mittlere Reaktionszeit für relevante Reize lag bei 865 ms ( $SD = 162$  ms), wobei die Reaktion auf erstmalig präsentierte Gesichter mit 830 ms ( $SD = 169$  ms) schneller erfolgte als die auf wiederholt präsentierte Gesichter ( $M = 900$  ms,  $SD = 168$  ms;  $Z = 2.91$ ,  $p < .005$ ). Auf neutrale und irrelevante Gesichter erfolgte instruktionsgemäß keine Reaktion, die mittlere Reaktionszeit für weiße Kreuze lag bei 607 ( $SD = 107$  ms), die für graue Kreuze bei 637 ms ( $SD = 189$  ms). Die durchschnittliche Fehlerzahl pro Person lag bei 7.2 ( $SD = 7.5$ ), wobei im Durchschnitt 1.9 Reaktionen ausgelassen wurden („miss“), 0.8 Reaktionen an Stellen gegeben wurden, an denen keine notwendig war („false alarm“) und 4.5 falsche Reaktionen auftraten.

### 3.2.3.2 EEG Ergebnisse

Wie schon für die 1-back Aufgabe in der zweiten Studie (Punkt 2.1.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) ergab sich weder für die Amplitude noch für die Latenz der P100 ein signifikanter Einfluss der Aufmerksamkeitslenkung an den okzipitalen Elektroden (O1, O2; Anhang A11, Tabelle A14, A15).

Die N170 wurde wie auch im zweiten Experiment an temporalen und okzipitalen Elektroden (T5, T6, O1, O2) analysiert. Hier ergab sich ein signifikanter Haupteffekt der Relevanz der Stimuli für die Latenz der N170 ( $F[2,38] = 5.18, p < .05$ ), für die Amplitude fand sich kein Effekt. Die Latenz war bei passiv betrachteten Gesichtern signifikant verkürzt im Vergleich zu relevanten ( $t[19] = -3.46, p < .01$ ) und irrelevanten ( $t[19] = -2.61, p < .05$ ) Gesichtern. Zwischen beachteten und ignorierten Gesichtern zeigte sich kein Unterschied ( $t[19] = 0.24, p = .82$ ; Abb. 15)

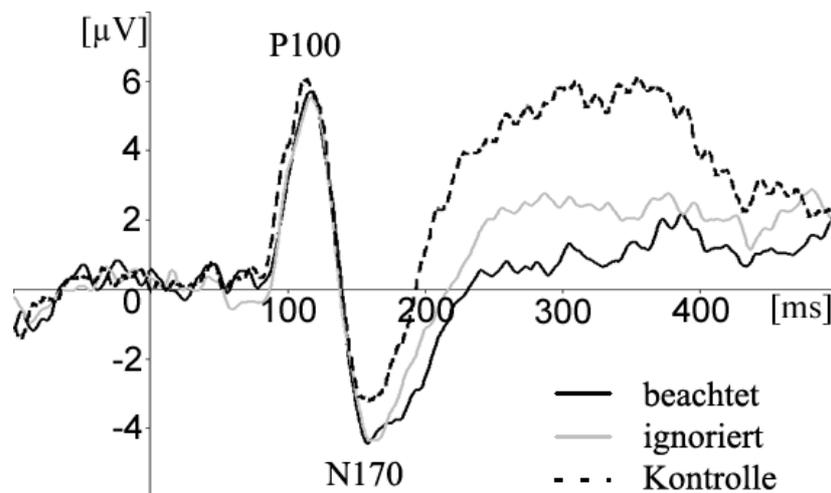


Abb. 15: Grand Mean EKP-Kurven für Experimental- und Kontrollbedingungen gemittelt über Personen, Hemisphären, Elektrodenpositionen (T4, T5, O1, O2) und Zeit.

### 3.2.3.3 NIRS Ergebnisse

Die Verarbeitung relevanter Gesichter führte zu einem Anstieg der  $[O_2Hb]$  in 19 Kanälen. Es zeigte sich eine bilaterale Aktivierung im mittleren frontalen Kortex (rechte Hemisphäre: #14, #25; linke Hemisphäre: #8, #18, #28, #39, #49) und im inferioren frontalen Kortex (rechts: #13, #24; links: #19, #29), sowie eine linkshemisphärische (#38) und mediale (#16) Aktivierung des superioren PFK. Zusätzlich wurde bilateral eine Aktivierung des supramarginalen (rechts: #1, #11; links: #10, #21) und postzentralen Kortex (rechts: #12; links: #20) gefunden ( $t[18] > 3.36; p < .05$ ; Abb. 16a).

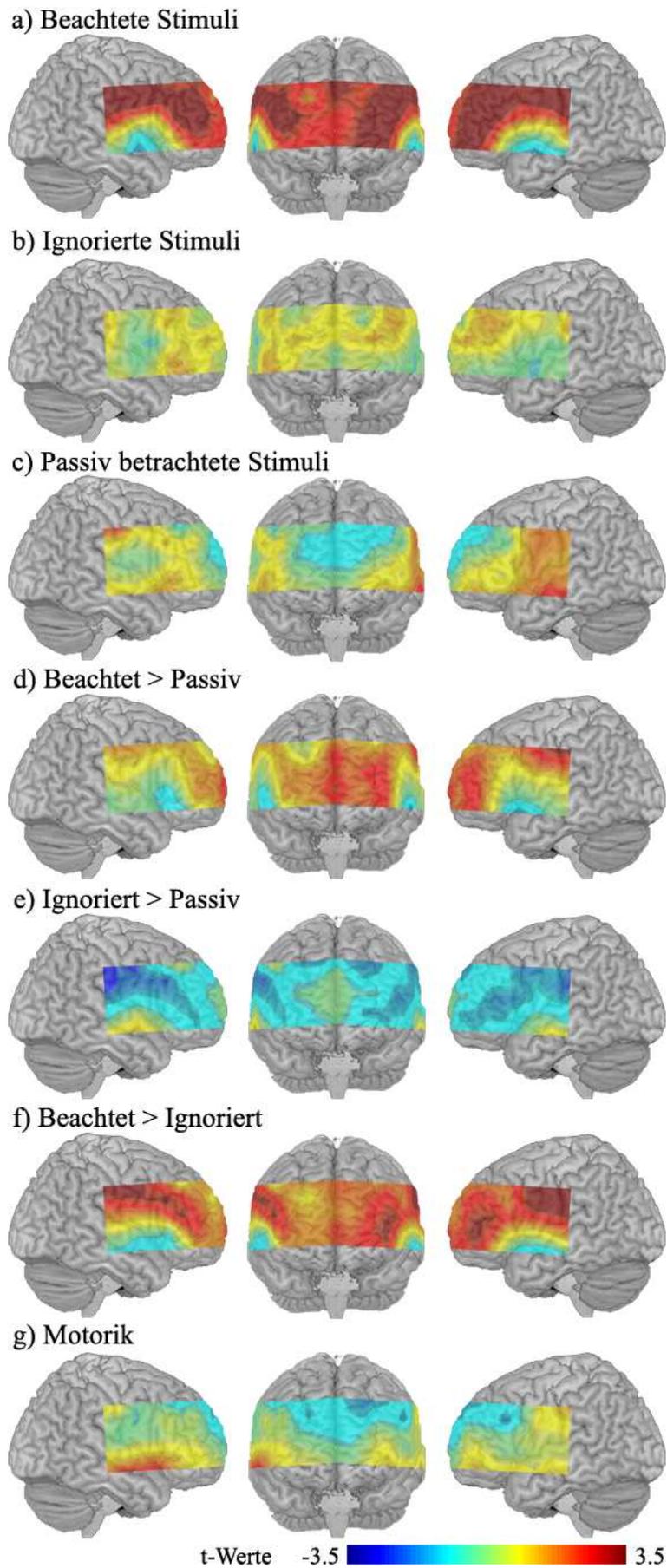


Abb. 16: Statistische Abbildungen ( $t$ -Werte) der relevanten Kontraste für  $[O_2Hb]$ .

Für weitere sechs Kanäle fand sich eine Tendenz (#2, #5, #6, #9, #35, #48;  $t[18] > 2.96$ ;  $p < .10$ ). Die Inhibition aufgaben-irrelevanter Gesichter ging nicht wie erwartet mit einer Aktivierung des PFK einher ( $t[18] > 3.20$ ;  $p < .10$ ; Abb. 16b). Passiv betrachtete Gesichter riefen erwartungsgemäß keine präfrontale Aktivierung hervor, allerdings fanden sich zwei signifikante Kanäle im rechten supramarginalen Kortex (#1;  $t[18] > 2.53$ ;  $p < .20$ ) und im linken temporalen Kortex (#52;  $t[18] > 2.95$ ;  $p < .10$ ; Abb. 16c). Die Nullhypothese konnte beibehalten werden.

Der Vergleich der drei Bedingungen (relevante, passiv betrachtete und irrelevante Stimuli) über alle Kanäle hinweg ergab einen signifikanten Einfluss der Bedingung ( $F[2,36] = 4.40$ ,  $p < .05$ ) und eine Wechselwirkung Bedingung x Kanäle ( $F[102,1836] = 2.16$ ,  $p < .05$ ). Auf relevante Reize folgte im Vergleich zu den perzeptuellen Kontrollstimuli eine erhöhte Aktivierung im linken supramarginalen Kortex (#10;  $t[18] > 3.25$ ;  $p < .05$ ) und in der Tendenz im medialen superior-frontalen (#37) und linken mittleren frontalen Kortex (#28;  $t[18] > 2.85$ ;  $p < .10$ ; Abb. 16d). Der Vergleich von irrelevanten Reizen mit Kontrollreizen ergab keine signifikante Aktivierung ( $t[18] > 3.06$ ;  $p < .10$ ; Abb. 16e).

Das Erinnern relevanter Reize führt im Vergleich zur Inhibition irrelevanter Distraktoren zu einer erhöhten Aktivierung des rechten inferioren (#13, #24) und linken mittleren PFK (#39), des linken postzentralen Kortex (#20) und des linken (#10, #21) und rechten (#1) supramarginalen Kortex ( $t[18] > 3.31$ ;  $p < .05$ ; Abb. 16f). Für weitere drei Kanäle fand sich eine Tendenz (#9, #12, #23;  $t[18] > 2.91$ ;  $p < .10$ ). Die Verarbeitung irrelevanter Gesichter führte in keinem Kanal zu einer höheren Hirnaktivierung im Vergleich zu relevanten Gesichtern. Die motorische Antwortreaktion führte in der Tendenz zu einer Erhöhung der [O<sub>2</sub>Hb] im rechten temporalen Kortex (#44;  $t[18] > 2.64$ ;  $p < .10$ ; Abb. 16g).

Signifikante Ergebnisse zur [HHb] sind kaum vorhanden. Eine Verminderung der Konzentration bei der Verarbeitung relevanter Reize zeigte sich in der Tendenz im rechten präzentralen Kortex (#2;  $t[18] < -3.28$ ;  $p < .10$ , Abb. 17a). Die Verarbeitung irrelevanter Reize führte zu einer signifikanten Verringerung im rechten postzentralen Kortex (#12;  $t[18] < -3.61$ ;  $p < .05$ ; Abb. 17b). Auf passiv betrachtete Kontrollstimuli folgte in der Tendenz eine Verminderung der [HHb] im linken supramarginalen Kortex (#21;  $t[18] < -3.04$ ;  $p < .10$ ; Abb. 17c). Der Vergleich der drei Bedingungen (relevante, passiv betrachtete und irrelevante Stimuli) über alle Kanäle hinweg ergab keinerlei Befunde (Abb. 17d-f, siehe Anhang A12, Tabelle A17). Die motorische Antwortreaktion führte bei keinem der erfassten Kanäle zu einer Verringerung der [HHb] ( $t[18] > -3.05$ ;  $p < .10$ ; Abb. 17g).

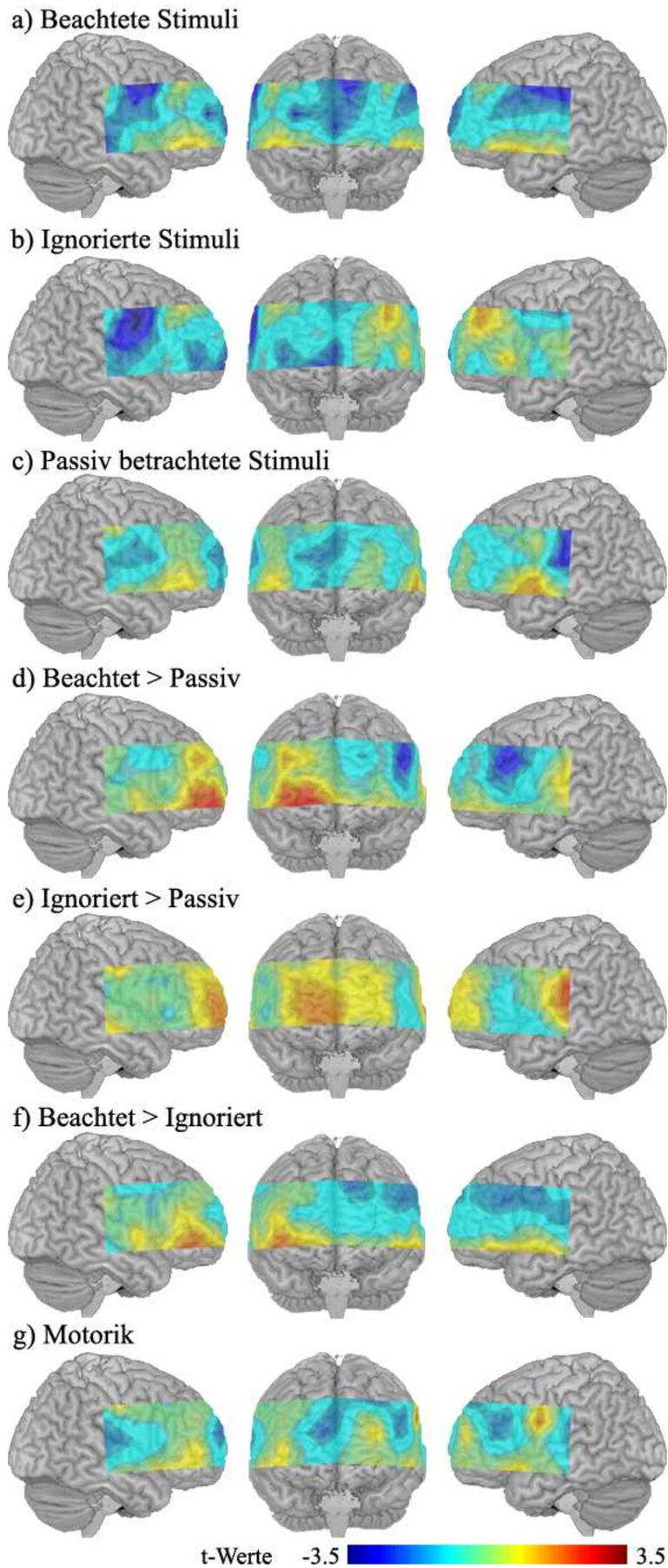


Abb. 17: Statistische Abbildungen ( $t$ -Werte) der relevanten Kontraste für [HHb].

### 3.2.4 Diskussion

Nachdem in der vorangegangenen NIRS Studie (Experiment 3) die neuronale Aktivierung in frontalen Hirnarealen bei Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzkontrolle unter geringer Auslastung des Arbeitsgedächtnisses untersucht wurde, wurde hier die Aktivierung unter hoher Auslastung erhoben. Im Einklang mit den Ergebnissen der zweiten Studie (Punkt 2.1.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) fand sich für Prozesse der fokussierten Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses eine Aktivierung fronto-parietaler Hirnareale. Wie schon mehrfach gezeigt (Braver et al., 1997; Herrmann et al., 2007; Tsujimoto et al., 2004) stieg die Aktivierung mit der Auslastung des Arbeitsgedächtnisses an. An Stelle der acht signifikanten Kanäle bei der 1-back Aufgabe waren bei der 2-back Aufgabe 16 Kanäle signifikant. Diese 16 Kanäle umfassten den DL-PFK sowie die Schnittstelle inferiorer PFK zu parietalem Kortex in beiden Hemisphären. Nachdem der Schwerpunkt der Aktivierung beim 1-back noch in der linken Hemisphäre lag, fand sich beim 2-back also eine bilaterale Aktivierung. Für vier der acht signifikanten Kanäle des dritten Experiments (Punkt 2.2.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) fand sich auch in der aktuellen Studie eine signifikant erhöhte Aktivierung, für weitere drei eine Tendenz. Diese Ergebnisse wurden in der Tendenz durch eine Verminderung der [HHb] in den entsprechenden Arealen gestützt.

Die in der aktuellen Studie gefundene fronto-parietale Aktivierung auf beachtete Reize ist zwar konfundiert mit dem auf jeden relevanten Reiz folgenden Tastendruck, ist aber kein neuronales Korrelat der Motorik. In einer Kontrollaufgabe zeigte sich kein Anzeichen einer Aktivierung aufgrund der motorischen Reaktion in den für beachtete Reize relevanten Hirnarealen.

Auf die während der Arbeitsgedächtnisaufgabe präsentierten irrelevanten Distraktoren folgte im dritten Experiment (Punkt 2.2.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) eine Aktivierung des PFK der rechten Hemisphäre. Aufgrund des Befundes, dass die Unterdrückung irrelevanter visueller Information unter erhöhter Auslastung des Arbeitsgedächtnisses schwieriger ist (de Fockert et al., 2001), wurde wegen der erhöhten Anstrengung aufgrund der 2-back Aufgabe für die aktuelle Studie eine bilaterale Aktivierung erwartet. Aufgrund der Befunde anderer Forschergruppen (Jha et al., 2004; Jonides, Smith, Marshuetz, Koeppe, & Reuter-Lorenz, 1998) wurde vor allem eine Aktivität des linken inferioren frontalen Gyrus erwartet. Überraschenderweise fand sich hinsichtlich irrelevanter Reize in der aktuellen Studie keinerlei präfrontale Aktivierung. Dieses Fehlen einer

Beteiligung des PFK an der Verarbeitung von Distraktoren während einer Arbeitsgedächtnisaufgabe ist aufgrund der zahlreichen gegenläufigen Befunde vorangegangener Forschung kaum erklärbar. Ein Unterschied zu anderen Studien könnte sein, dass die 2-back Aufgabe mit zusätzlichen Distraktoren zu einer sehr hohen Auslastung des Arbeitsgedächtnisses führt. Zuvor genutzte „delayed recognition“ (Jha et al., 2004) oder „Sternberg item recognition“ Paradigmen (Bunge et al., 2001) und auch die im dritten Experiment genutzte 1-back Aufgabe sind kognitiv weniger anspruchsvoll, was zu unterschiedlichen Hirnaktivierungen führen könnte. Möglich wäre auch, dass mit Hilfe des genutzten Designs einer n-back Aufgabe mit zusätzlichen Distraktoren Prozesse der Interferenzkontrolle im PFK nicht abgebildet werden konnten. Dagegen spricht aber eindeutig die gefundene Aktivierung in der dritten Studie.

Der Vergleich der Aktivierung auf beachtete und ignorierte Stimuli erbrachte für das 1-back lediglich eine Tendenz einer verstärkten Verarbeitung beachteter Stimuli im linken inferioren PFK. Für die 2-back Aufgabe zeigte sich ein deutlicher ausgeprägter bilateralen Unterschied, wobei sich für den im 1-back marginal signifikanten Kanal im linken inferioren frontalen Kortex im 2-back kein Effekt zeigte. Dafür fand sich eine Aktivierung in einem angrenzenden Kanal im linken mittleren frontalen Kortex. Des Weiteren war der rechte inferiore frontale Kortex aktiv, und bilateral Teile des parietalen Kortex. Der ausgeprägte Unterschied zwischen beachteten und ignorierten Stimuli im 2-back ist zum einen mit der verstärkten Beteiligung des PFK an der Verarbeitung beachteter Reize zu erklären und zum anderen mit dem Fehlen einer Beteiligung an der Verarbeitung ignorierte Stimuli.

Wie schon für die 1-back Aufgabe zeigte sich auch für die 2-back Aufgabe kein spezifisches Aktivierungsmuster hinsichtlich der Inhibition aufgaben-irrelevanter Reize. In keinem Kanal zeigte sich eine erhöhte Aktivierung auf irrelevante Gesichter im Vergleich zu relevanten Gesichtern.

Die Verarbeitung der visuellen Stimuli in der neu eingeführten perzeptuellen Kontrollbedingung ging mit keiner mentalen Anstrengung einher, wie erwartet fand sich auf das passive Betrachten visueller Stimuli keine präfrontale Aktivierung. Der Vergleich der Experimentalbedingungen mit dieser Kontrollbedingung ergab für die Verarbeitung beachteter Stimuli eine Aktivierung des parietalen Kortex der linken Hemisphäre und in der Tendenz des medialen superioren und linken mittleren PFK. Dieser Befund bestätigt das Ergebnis der 1-back Aufgabe, dass der linke PFK stärker an der Verarbeitung beachteter Reize beteiligt ist als der rechte PFK. Der Vergleich der Kontrollbedingung mit der Verarbeitung irrelevanter Stimuli blieb ohne signifikantes Ergebnis.

Im zweiten Experiment (Punkt 2.1.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) konnte gezeigt werden, dass bei einer 1-back Aufgabe die Verarbeitung beachteter Reize im Vergleich zur Verarbeitung ignorierte Reize erhöht ist. Für die 2-back Aufgabe konnte dieser Befund nicht repliziert werden. Weder bezüglich der Amplitude noch der Latenz ergab sich ein Unterschied in der N170. Dieser Befund steht im Einklang mit den Ergebnissen einer Studie von de Fockert und Kollegen (2001), die zeigen konnten, dass Distraktoren unter erhöhter Auslastung des Arbeitsgedächtnisses stärker verarbeitet werden.

Allerdings fand sich in der aktuellen Studie ein Unterschied in der Gesichtsverarbeitung zwischen den beiden Experimentalbedingungen und der perzeptuellen Kontrollbedingung, die passive Verarbeitung visueller Stimuli war vermindert. Das könnte möglicherweise daran liegen, dass die Stimuli in den Experimentalblöcken mit einer kognitiven Aufgabe verknüpft waren, diejenigen im Kontrollblock jedoch nicht, was zu einer unterschiedlich hohen allgemeinen Erregung („arousal“) führte. Allerdings war die Kontrollaufgabe auch schon in der 1-back Aufgabe mit einem niedrigeren „arousal“ verknüpft, trotzdem fand sich dort kein Unterschied in der Verarbeitung passiv betrachteter und ignorierte visueller Stimuli.

Neben den Unterschieden im „arousal“ gab es für die verschiedenen Bedingungen auch Unterschiede in der Anzahl der artefaktfreien Epochen. Möglicherweise blinzelten die Versuchspersonen bei den handlungsrelevanten beachteten Stimuli seltener, was zu einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis führen würde. Dies könnte die Ergebnisse beeinflusst haben.

Insgesamt betrachtet widersprachen die EEG Ergebnisse der 1-back und der 2-back Aufgabe nicht nur den aufgestellten Hypothesen, die Befunde fielen auch in sich widersprüchlich aus. Konnte für die 1-back Aufgabe noch eine erhöhte Verarbeitung beachteter Reize festgestellt werden, war dies in der 2-back Aufgabe nicht mehr der Fall. Eine verminderte Verarbeitung irrelevanter Reize konnte weder unter niedriger noch unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses nachgewiesen werden.

### **3.3 Experiment 4b: Der Einfluss von Arbeitsgedächtnis und Interferenzkontrolle auf die neuronale Verarbeitung visueller Stimuli: Eine NIRS Studie**

#### **3.3.1 Hypothesen**

- Die Verarbeitung visueller Stimuli führt zu einer bilateralen Aktivierung des okzipitalen Kortex.
- Selektive Aufmerksamkeit führt zu einer Modulation der neuronalen Verarbeitung, relativ zu einer Kontrollbedingung. Beachtete Stimuli werden verstärkt verarbeitet, ignorierte vermindert.

#### **3.3.2 Methode**

##### **3.3.2.1 Versuchspersonen**

Teilnehmer waren 16 gesunde Probanden im Alter von 20 bis 27 Jahren (davon 8 Frauen; durchschnittliches Alter 22.3 Jahre,  $SD = 2.0$  Jahre). Alle Probanden hatten eine normale oder korrigierte Sehkraft, 13 waren Rechtshänder, drei Linkshänder und bei keinem der Teilnehmer war eine neurologische oder psychiatrische Störung bekannt. 15 Probanden wurden mündlich aus dem Bekanntenkreis der Versuchsleiterin geworben und nahmen unentgeltlich an der Studie teil. Eine Person wurde über eine Online-Anzeige rekrutiert, diese bekam eine Unkostenrückerstattung von 10.- Euro. Alle Probanden erhielten eine Aufklärung zum Ablauf des Experiments und der NIRS bevor sie schriftlich ihre Zustimmung zur Teilnahme gaben.

##### **3.3.2.2 Untersuchungsdesign**

Das Untersuchungsdesign war identisch mit dem ersten Teil dieser Studie (Experiment 4a). Eine Beschreibung findet sich unter dem Punkt 3.2.2.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“.

### 3.3.2.3 Stimulusmaterial

Das Stimulusmaterial war identisch mit dem des ersten Teils dieser Studie (Experiment 4a). Eine Beschreibung findet sich unter dem Punkt 3.2.2.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“.

### 3.3.2.4 Datenaufzeichnung und Auswertung

#### Erhebung der NIRS Daten

Das NIRS Gerät und auch die genutzte NIRS Haube entsprachen denen der oben vorgestellten ersten Studie, eine Beschreibung findet sich unter Punkt 1.3.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“. Verwendet wurde dieselbe 52-Kanal NIRS Haube wie in den Studien zuvor, mit dem Unterschied, dass sie nun über dem okzipitalen Kortex (Abb. 18) angelegt wurde. Die mittlere Optode der untersten Optodenreihe wurde über Oz angebracht und die Haube so ausgerichtet, dass sie sich symmetrisch hin zu T3 und T4 (Elektrodenpositionen nach dem internationalen 10-20 System (Jasper, 1958)) erstreckte. Aufgrund des festen Abstandes zwischen den Elektroden war die Lage der äußeren Optoden der Haube nicht exakt bestimmbar (zur Schädel-Hirn Übereinstimmung siehe (Okamoto et al., 2004)).



Abb. 18: Lokation der NIRS Kanäle über dem okzipitalen Kortex.

### **Auswertung der NIRS Daten**

Die zuvor beschriebene Auswertung der NIRS Daten (Experiment 3 und 4a, Punkt 2.2.3.4. und 3.2.2.4 des Abschnitts „Experimentellen Untersuchungen“) geschah modellbasiert. Eine Voraussetzung für diese Art der Auswertung sind stationäre Daten. In der okzipitalen Hirnaktivierung zeigten sich allerdings starke Baseline-Unterschiede bei der Verarbeitung relevanter, passiv betrachteter und irrelevanter Stimuli, weshalb trotz des ereigniskorrelierten Designs mit kurzen ISIs eine andere Art der Auswertung gewählt wurde. Für jeden Stimulus wurden Epochen von -2 s vor bis 20 s nach Stimulusbeginn definiert. Alle Zeitabschnitte wurden separat für jede Person und jede Bedingung zu einer ereigniskorrelierten Antwort gemittelt. Für den Zeitabschnitt von -2 s bis zum Stimulusbeginn wurde eine Baseline-Korrektur durchgeführt. Wie zuvor ging aus Gründen einer möglichst homogenen Datenlage jeweils nur die erste Präsentation der relevanten, irrelevanten und passiv betrachteten Gesichter in die Auswertung ein.

Um die Aktivierung aufgrund der visuellen Stimulation zu erfassen, wurden die ereigniskorrelierten Antworten auf alle Gesichtsstimuli unabhängig von der Instruktion gemittelt und die Differenzkurve zu den Nullereignissen gebildet. Die über alle Personen und Kanäle gemittelte Differenzkurve diente der Festlegung von Segmentgrenzen anhand von Verlaufsmerkmalen, innerhalb welcher die  $[O_2Hb]$  bzw.  $[HHb]$  bestimmt werden sollte. Als Epoche wurde die Zeit von 3.9 s bis 11.4 s ausgewählt. Die Aktivierung innerhalb dieses Zeitraums wurde für jede Versuchsperson einzeln erfasst. Zur Überprüfung der Frage nach einer Aktivierung des okzipitalen Kortex durch die Verarbeitung visueller Stimuli wurde für die gerade beschriebene Differenzkurve (visuelle Stimulation gegen Nullereignis) die mittlere Aktivierung innerhalb des gewählten Zeitraums pro Person und Kanal ermittelt. Mittels  $t$ -Tests für eine Stichprobe wurde die Aktivierung pro Kanal gegen Null getestet. Aufgrund bestehender Befunde (Herrmann et al., 2008; Plichta, Herrmann, Bähne et al., 2006; Plichta, Herrmann, Ehliis et al., 2006), die eine Erhöhung des  $[O_2Hb]$  und eine Verminderung des  $[HHb]$  auf die Präsentation visueller Reize hin in einfachen visuellen Paradigmen nachweisen konnten, wurde einseitig getestet.

In einer NIRS Studie (Plichta, Herrmann, Bähne et al., 2006), in der ebenfalls eine 52-Kanal Haube zur Messung der okzipitalen Hirnaktivierung genutzt wurde, beschränkten die Autoren die Auswertung auf eine ROI von insgesamt 22 Kanälen um die Elektrodenpositionen O1 und O2 herum. Die Elektrodenposition O1 lag in der vorliegenden Arbeit zwischen den Kanälen 46 und 47, O2 lag zwischen 48 und 49. In Anlehnung an die publizierte Studie (Plichta, Herrmann, Bähne et al., 2006) wurden deshalb die Kanäle 25, 26, 27, 28, 35, 36, 37, 38, 39,

46, 47, 48 und 49 als ROI definiert (diese Kanäle sind in Abb. 19 grau unterlegt) und bildeten die Grundlage für die weitere Auswertung.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	

Abb. 19: Schematische Darstellung der Anordnung der 52 NIRS Kanäle. Die grau unterlegte Fläche markiert die 13 Kanäle der ROI.

Zur Analyse möglicher Effekte der Instruktion auf die neuronale Verarbeitung von Gesichtsstimuli wurden die Differenzkurven der verschiedenen Bedingungen (relevant, passiv betrachtet, irrelevant) gegen das Nullereignis berechnet. Pro Person und Kanal wurde für jede der drei Differenzkurven die maximale Aktivierung im ausgewählten Zeitraum erfasst, die ermittelten Piks wurden mittels gepaarter *t*-Tests gegeneinander getestet. Aufgrund von Vorbefunden (Gazzaley et al., 2005; Herrmann et al., 2008) wurde einseitig getestet. Signifikante kortikale Aktivierungen wurden angenommen bei positiven *t*-Werten für [O<sub>2</sub>Hb] und negativen *t*-Werten für [HHb]. Wegen der multiplen Testung wurden alle statistischen Schlussfolgerungen aufgrund eines adjustierten Alpha-Niveaus von 5% gemacht. Die Adjustierung wurde mit der Bonferroni Korrektur und der Berechnung von Dubey/Armitage–Parmar Alpha-Grenzen vorgenommen (Sankoh et al., 1997). In diesen ist die räumliche Korrelation zwischen den Kanälen mit eingerechnet, welche in Tabelle 5 aufgeführt sind.

Tabelle 5: Mittlere räumliche Korrelation zwischen den 52 NIRS Kanälen für die relevanten Kontraste.

Korrelation	Visuelle Stimulation	beachtet gegen ignoriert	beachtet gegen Kontrolle	ignoriert gegen Kontrolle
[O <sub>2</sub> Hb]	0.59	0.77	0.85	0.75
[HHb]	0.19	0.42	0.45	0.46

Die Möglichkeit, eine probabilistische Registrierung der NIRS Kanäle bezüglich der MNI Raumkoordinaten für den okzipitalen Kortex durchzuführen, bestand nicht.

### 3.3.3 Ergebnisse

#### 3.3.3.1 Verhaltensdaten

Die mittlere Reaktionszeit für relevante Reize lag bei 789 ms ( $S = 60$  ms), wobei die Reaktionszeit bei erstmalig präsentierten Gesichtern mit 758 ms ( $SD = 57$  ms) schneller erfolgte, als die auf wiederholt präsentierten Gesichtern mit 820 ms ( $SD = 94$  ms;  $Z = 2.22$ ,  $p < .05$ ). Auf neutrale und irrelevante Gesichter erfolgte keine Reaktion, die mittlere Reaktionszeit für weiße und graue Kreuze lag gleichermaßen bei 589 ms ( $SD = 110$  ms). Die durchschnittliche Fehlerzahl pro Person lag bei 3.2 ( $SD = 2.3$ ), wobei im Durchschnitt 0.8 Reaktionen ausgelassen wurden („miss“), 0.3 Reaktionen gegeben wurden an Stellen, an denen keine notwendig war („false alarm“) und 2.1 falsche Reaktionen auftraten.

#### 3.3.3.2 NIRS Ergebnisse

Wie erwartet führte die visuelle Stimulation zu einem signifikanten Anstieg der  $[O_2Hb]$  ( $t[15] > 2.60$ ;  $p < .05$ ) und einem entsprechendem Abfall der  $[HHb]$  ( $t[15] < -3.39$ ;  $p < .05$ ) in beiden Hemisphären des okzipitalen Kortex (Abb. 20). Der Anstieg der  $[O_2Hb]$  wurde in 26 der 52 Kanäle signifikant (#1, #4-#6, #9, #10, #14-#18, #25-#29, #35-#39, #45-#47, #49, #50), der Abfall der  $[HHb]$  in 21 Kanälen (#3-#7, #10, #12-#15, #17, #20, #24-#27, #35, #36, #38, #46, #49).

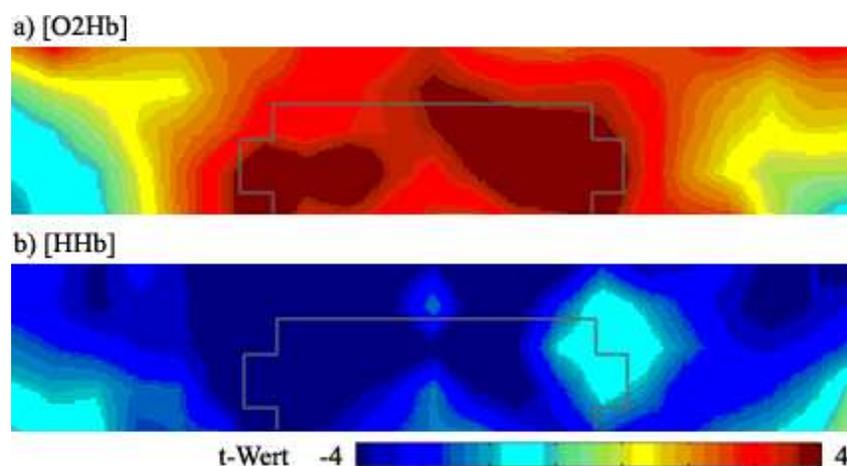


Abb. 20: Statistische Abbildung ( $t$ -Werte) der visuellen Stimulation für  $[O_2Hb]$  und  $[HHb]$  gemittelt über Personen, Zeit und alle Bedingungen. Die Aktivierungsmuster basieren auf der Interpolierung der Ergebnisse einzelner Kanäle. Die ROI ist grau umrahmt.

Die Aufmerksamkeitsmodulation führte hinsichtlich der  $[O_2Hb]$  zu signifikanten Unterschieden in der Aktivierung des okzipitalen Kortex (siehe beispielhaft für #35 in Abb. 21). Beachtete Gesichtsstimuli wurden in fünf Kanälen stärker verarbeitet als ignorierte (#25, #26, #35, #37, #47;  $t[15] > 2.08$ ;  $p < .05$ ). Im Vergleich zur perzeptuellen Kontrollbedingung konnte eine erhöhte Aktivierung für beachtete Gesichter im Gegensatz zu den passiv betrachteten Gesichtern in zwei Kanälen festgestellt werden (#35, #49;  $t[15] > 1.96$ ;  $p < .05$ ). Ignorierte Gesichter führten nicht zu einer verminderten Amplitude im Vergleich zur Kontrollbedingung ( $t[15] > 2.10$ ;  $p < .05$ ). Hinsichtlich der  $[HHb]$  zeigten sich keinerlei Effekte der Aufmerksamkeitsmodulation (beachtet gegen ignoriert:  $t[15] < -2.55$ , beachtet gegen Kontrolle:  $t[15] < -2.51$ , Kontrolle gegen ignoriert:  $t[15] < -2.49$ ;  $p < .05$ ).

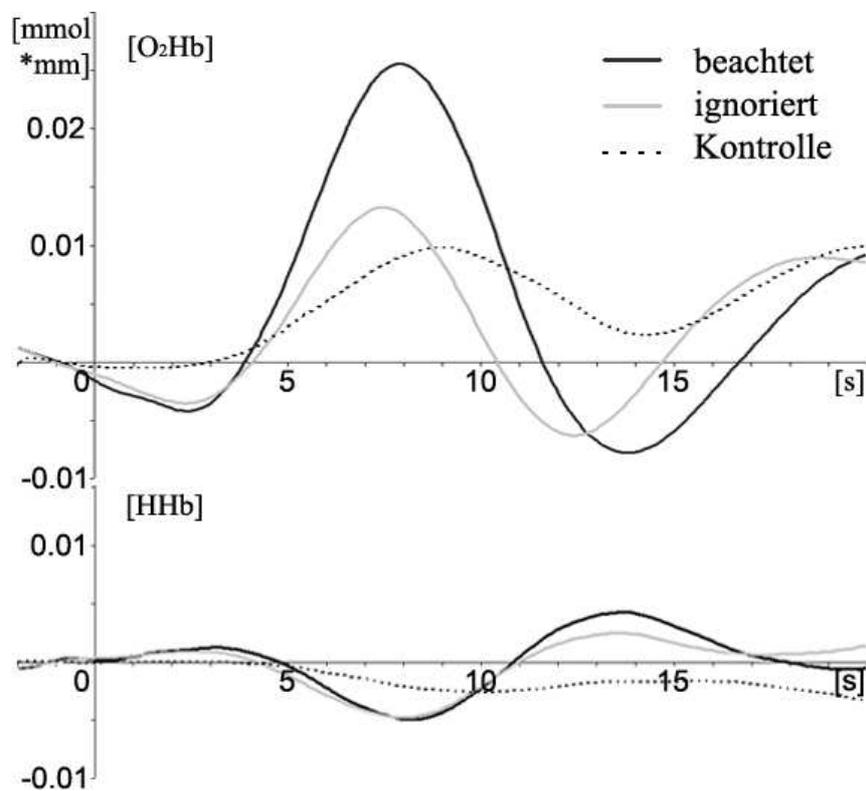


Abb. 21: Zeitverlauf der Aktivierung differenziert nach Experimental- und Kontrollbedingungen für  $[O_2Hb]$  und  $[HHb]$  beispielhaft für den Kanal 35, gemittelt über Personen und Zeit.

### 3.3.4 Diskussion

Die Ergebnisse dieser NIRS Studie legen nahe, dass eine visuelle Stimulation unter hoher kognitiver Auslastung zu einer vergleichbaren Aktivierung des okzipitalen Kortex führt wie beim passiven Betrachten visueller Stimuli. Das Aktivierungsmuster lässt in beiden Hemisphären klare Zentren der Aktivierung erkennen, deren Lokation mit der bei einer visuellen Stimulation (z.B. beim Betrachten eines Schachbrettmusters (Plichta, Herrmann, Bähne et al., 2006)) ohne kognitive Aufgabe übereinstimmen. Konsistent mit einem Anstieg der [O<sub>2</sub>Hb] ging ein Abfall der [HHb] einher. Daraus kann man schlussfolgern, dass die visuelle Stimulation innerhalb eines 2-back Paradigmas mit Distraktoren zu einer vergleichbaren Aktivierung des okzipitalen Kortex führt, wie das passive Betrachten von Stimuli.

Die Hauptfragestellung dieser Studie betraf die Modulation der visuellen Verarbeitung von Gesichtsstimuli im okzipitalen Kortex aufgrund von Prozessen der Aufmerksamkeitslenkung. Es zeigte sich eine verstärkte Verarbeitung beachteter Stimuli im Vergleich zur Verarbeitung von Distraktoren. Dieser Befund konnte in fMRT Studien wiederholt für die räumliche Aufmerksamkeit nachgewiesen werden (Buracas & Boynton, 2007; Gandhi, Heeger, & Boynton, 1999), die Modulation der Verarbeitung sequentiell präsentierter Reize zeigte sich erstmals in einer fMRT Studie von Gazzaley und Kollegen (2005)(Gazzaley et al., 2005). Dieses Ergebnis konnte in der aktuellen Studie erstmalig mit der NIRS repliziert werden.

Weniger erfolgreich war der Vergleich der Aktivierung der Experimentalbedingungen mit der perzeptuellen Kontrollbedingung. Es zeigte sich zwar eine verstärkte Verarbeitung beachteter Gesichter, anders als in bestehender Literatur (Gazzaley et al., 2005) konnte allerdings keine verminderte Verarbeitung ignoriertter Reize gefunden werden. Damit stehen die Ergebnisse dieser NIRS Studie im Einklang mit den EEG Befunden der zweiten Studie (Punkt 2.1.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“). Diese beiden Untersuchungen zeigten zwar für die 1-back wie auch für die 2-back Aufgabe eine verstärkte Verarbeitung beachteter Reize, die Verarbeitung von Distraktoren war jedoch nicht vermindert. Aus der Reihe fallen die EEG Ergebnisse des ersten Teils dieser Studie (Experiment 4a, Punkt 3.2.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“), welche bei identischem Studiendesign keinen Unterschied in der Verarbeitung von beachteten und ignorierten Stimuli feststellen konnten.

Eine mögliche Ursache dieses Unterschieds könnte in der zeitlichen Auflösung und der Quelle der erfassten Effekte der erhobenen Daten liegen. Mit dem EEG werden zum einen kurzfristige Effekte im Bereich von Millisekunden erfasst und zum anderen spiegelt die

gesichtsspezifische N170 eine Aktivierung der FFA und damit des extrastriaten Assoziationskortex wider. Grundlage der erfassten NIRS Daten ist die hämodynamische Antwortreaktion, welche ihren Höhepunkt erst nach sieben bis acht Sekunden erreicht. Die Quelle der erhobenen Daten sind kortexnahe Areale des primären visuellen Kortex.

### **III Abschließende Diskussion und Ausblick**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung gemeinsamer und unabhängiger neuronaler Korrelate von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis in unterschiedlichen Hirnregionen und deren funktionale Bedeutung, erfasst durch neurophysiologische (EEG) und bildgebende (NIRS) Methoden. Dazu wurden insgesamt fünf Experimente durchgeführt. Das erste beschäftigte sich mit der grundlegenden Aufmerksamkeitsfunktion Alertness, welche die Basis für komplexere kognitive Prozesse wie Arbeitsgedächtnis und selektive Aufmerksamkeit darstellt. Die restlichen vier Experimente widmeten sich der Frage, inwiefern die neuronale Verarbeitung visueller Stimuli durch Aufmerksamkeit modulierbar ist und welche „top down“ Prozesse diese Modulation bewirken. Hier wurde zum einen der Einfluss von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis auf die Verarbeitung visueller Stimuli in temporo-okzipitalen Hirnarealen, zum anderen präfrontale Korrelate steuernder „top down“ Prozesse erfasst.

Neu an den letzteren war die kombinierte Messung von Prozessen der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses in einer n-back Aufgabe. Die Auswertung der NIRS Daten erfolgte außerdem wie die der EEG Daten ereignisbezogen, was im Gegensatz zum Blockdesign die Analyse der neuronalen Antwort auf einzelne Stimuluskategorien ermöglichte.

Die mit der NIRS erhobenen Befunde zeigten eine eindeutige Beteiligung präfrontaler Strukturen an der Fokussierung auf und dem Erinnern von relevanten Stimuli. Die als bedeutsam gefundenen Hirnstrukturen wie der DL-PFK und der inferiore frontale Gyrus vor allem der linken Hemisphäre stehen in Einklang mit bestehenden Befunden zur Aktivierung in n-back Aufgaben im Blockdesign (Braver et al., 1997). Wie erwartet fanden wir unter erhöhter Auslastung des Arbeitsgedächtnisses eine erhöhte Aktivierung des PFK bei der Verarbeitung beachteter Reize.

Zumindest für die leichtere 1-back Aufgabe fand sich auch für das Ignorieren irrelevanter Stimuli eine Beteiligung präfrontaler Strukturen. Es ist auszuschließen, dass diese Aktivierung ein Korrelat der Aufrechterhaltung relevanter Information war, da mögliche Prozesse der Aufrechterhaltung auch während den Nullereignissen auftraten, gegen die die Verarbeitung irrelevanter Reize getestet wurde. Das Ignorieren von Reizen führte, zumindest unter niedriger Auslastung des Arbeitsgedächtnisses, zu einer großflächigen Aktivierung

fronto-parietaler Strukturen der rechten Hemisphäre. Bestehende Befunde zeigten aber vor allem eine Beteiligung des linken inferioren Gyrus (Bunge et al., 2002; Jha et al., 2004; Jonides et al., 1998), was sich in den vorliegenden Studien nicht replizieren ließ. Möglicherweise lag das an den unterschiedlichen Untersuchungsparadigmen, die verwendet wurden. Zwei der früheren Studien verwendeten eine „Sternberg item recognition“ Aufgabe, bei welcher proaktive Interferenzen auftreten. Die Interferenz in der dritten Studie trat zwar wie auch in den aktuellen Studien zwischen Enkodierung und Abruf auf, allerdings wurde eine „delayed recognition“ Aufgabe verwendet, bei welcher die Auslastung des Arbeitsgedächtnisses geringer ausfällt als bei einer n-back Aufgabe.

Wie erwartet fand sich also für Prozesse des Arbeitsgedächtnisses und der Aufmerksamkeit ein neuronales Korrelat im frontalen Kortex, wobei der Vergleich der beiden Experimentalbedingungen ergab, dass sowohl das Fokussieren auf als auch das Ignorieren von visuellen Stimuli zu einer Aktivität in stark überlappenden Hirnarealen führte. Bei niedrigerer Auslastung des Arbeitsgedächtnisses gab es lediglich einen Hinweis darauf, dass das Beachten von Reizen im linken inferioren frontalen Gyrus mit einer stärkeren Aktivierung einher ging, als das Ignorieren von Reizen. Auf das Ignorieren selbst folgte keinerlei spezifische Aktivierung. Unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses konnte zwar ein weitläufigeres spezifisches Aktivierungsmuster für das Beachten visueller Reize festgestellt werden, dieses Muster ist jedoch vor allem auf das Fehlen einer frontalen Aktivierung nach ignorierten Reizen zurückzuführen und damit kaum interpretierbar. Das Fehlen spezifischer Aktivierungsmuster bezüglich Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der Aufmerksamkeit steht im Einklang mit bestehenden Befunden, die ebenfalls gemeinsame frontale Korrelate gefunden haben (Braver et al., 1997; Mayer et al., 2007). Es liefert einen ersten Hinweis darauf, dass das Fokussieren auf und das Ignorieren von Stimuli nicht als zwei unterschiedliche aktive Prozesse angesehen werden können. Stattdessen stellen sie die beiden Enden eines einheitlichen Mechanismus dar. Einschränkend beachtet werden muss allerdings die relativ schlechte räumliche Auflösung der NIRS, aufgrund derer möglicherweise kleinere Unterschiede in der Aktivierung des frontalen Kortex übersehen werden konnten.

Ein zweiter Hinweis ergab sich aus der Betrachtung des Aktivierungsmusters im okzipitalen Kortex, welches keinerlei Anzeichen eines aktiven Inhibitionsprozesses lieferte. Weder mit den elektrophysiologischen noch mit den bildgebenden Daten konnten eine verminderte Verarbeitung irrelevanter Stimuli nachgewiesen werden. Bestehende Befunde (Gazzaley et al., 2005) konnten somit nicht repliziert werden. Eindeutig nachgewiesen werden konnte

jedoch eine Modulation der visuellen Verarbeitung aufgrund der Aufmerksamkeitslenkung. Unter niedriger Auslastung des Arbeitsgedächtnisses fand sich eine verstärkte Verarbeitung relevanter Reize im Vergleich zur Verarbeitung irrelevanter wie auch passiv betrachteter Reize im EEG (Experiment 2; Punkt 2.1.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“). Parallel dazu fielen die Ergebnisse der NIRS Erhebung unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses aus (Experiment 4b; Punkt 3.3.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“). Lediglich die unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses erhobenen EEG Daten fielen aus der Reihe (Experiment 4a; Punkt 3.2.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“). Hier fand sich kein Unterschied zwischen der Verarbeitung beachteter und ignorierte Reize, beide wurden jedoch stärker verarbeitet als passiv betrachtete. Betrachtet man lediglich die EEG Daten, zeigte sich also unter geringer Auslastung des Arbeitsgedächtnisses ein Unterschied zwischen beachteten und nicht beachteten Reizen, unter hoher Auslastung nicht. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den Befunden von de Fockert und Kollegen (2001), die ebenfalls zeigen konnten, dass es vom Ausmaß der verfügbaren kognitiven Kontrolle abhängt, ob die Verarbeitung von Distraktoren verhindert werden kann (Punkt 3.3 des Abschnitts „theoretische Einführung“). Allerdings sprechen die okzipital erhobenen NIRS Daten (Experiment 4b) gegen diese Interpretation, da sich hier trotz hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses ein Unterschied fand. Möglicherweise könnte der Widerspruch zwischen den EEG Daten bei 1-back und 2-back auch aus den unterschiedlichen Studiendesigns und den damit verbundenen unterschiedlichen Auswirkungen der Aufmerksamkeitslenkung resultieren.

Im zweiten Experiment (Punkt 2.1.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) waren die präsentierten Gesichter innerhalb eines Blocks entweder ausschließlich aufgabenrelevant oder –irrelevant. Innerhalb eines solchen Blocks wäre es also möglich, dass die Instruktion, Gesichter zu beachten, zu einer Erhöhung der Grundaktivierung der FFA führte. Möglicherweise ist eine solche tonische Erhöhung ausschlaggebend für die Modulation der sehr frühen gesichtsspezifischen EEG Komponente N170. Eine solche Baseline Verschiebung konnte bereits vor einigen Jahren nachgewiesen werden (Kastner, Pinsk, De Weerd, Desimone, & Ungerleider, 1999) und könnte auch in der Studie von Gazzaley und Kollegen (2005) aufgetreten sein, da in der verwendeten „delayed recognition“ Aufgabe zwei Sekunden vor jedem Durchgang angegeben wurde, welche Reizkategorie im Folgenden handlungsrelevant sein wird. Diese Zeit könnte ausgereicht haben, um die Grundaktivierung der FFA zu verändern. Gegen diese Hypothese spricht allerdings, dass in der Studie von Gazzaley und Kollegen wie auch in der Vorliegenden im Verlauf der Auswertung eine

Baseline-Korrektur durchgeführt wurde und sich somit rein additive Effekte tonischer Veränderungen nicht auswirken konnten.

Das Studiendesign der nachfolgenden dritten Studie und den Experimenten 4a und 4b (Punkt 2.2.3.2 und 3.2.2.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“) unterschied sich von dem des zweiten Experiments. Es wurden durchgängig Gesichter als aufgaben-relevante und –irrelevante Stimuli genutzt, die Relevanz eines Reizes konnte demnach erst mit seinem Erscheinen erkannt werden. Somit ist eine langfristige Veränderung der Grundaktivierung der FFA nicht möglich. Eine andere Möglichkeit, wie Aufmerksamkeit die neuronale Verarbeitung lenken kann, ist die direkte Modulation der stimulusevozierten Aktivierung. Dieser Mechanismus wirkt im Gegensatz zu dem zuerst beschriebenen kurzfristig und spezifisch für einzelne Reize und müsste eigentlich in allen durchgeführten Studien einen Einfluss gehabt haben. Dass trotzdem nur in der ersten EEG Erhebung eine Modulation der N170 gefunden wurde, könnte an der unterschiedlichen Schwierigkeit gelegen haben, die Relevanz der präsentierten Stimuli zu definieren. Die Kategorisierung in Gesichter im Gegensatz zu Landschaften erfolgt schneller, als die in weibliche im Gegensatz zu männliche Gesichter. Möglicherweise hat diese Klassifikation zu lange gebraucht, als dass die frühe N170 noch durch ablaufende Aufmerksamkeitsprozesse beeinflusst werden konnte. Trotzdem zeigte sich im Gegensatz zu den EEG Daten in den NIRS Daten eine Aufmerksamkeitsmodulation, was an der verzögerten hämodynamischen Antwort liegen könnte. Aufgrund dieser können nicht nur initiale „bottom up“, sondern auch länger anhaltende „top down“ Prozesse erfasst werden.

Weiterer Klärungsbedarf besteht bezüglich des EEG Ergebnisses unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses (Experiment 4a, Punkt 3.2.3.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“). Die Verarbeitung relevanter Reize und Distraktoren unterschied sich hier nicht, war jedoch erhöht im Vergleich zur Verarbeitung passiv betrachteter Reize. Möglicherweise führte der hohe Unterschied in der Auslastung des Arbeitsgedächtnisses zwischen Experimental- und Kontrollblock zu einem unterschiedlich hohen „arousal“, was einen Einfluss auf die N170 haben könnte (Gandhi et al., 1999).

Auf zu ignorierende Reize folgte im dritten Experiment eine Aktivierung des rechten PFK (Punkt 2.2.4.2 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“). Unter höherer Auslastung des Arbeitsgedächtnisses fand sich im Experiment 4a keinerlei frontale Beteiligung an der Interferenzinhibition (Punkt 3.2.3.3 des Abschnitts „Experimentelle Untersuchungen“). Eine mögliche Erklärung für dieses widersprüchliche Ergebnis könnten die anfangs beschriebenen Filtermodelle liefern (Punkt 2.1 des Abschnitts „Theoretische Einführung“). Es wäre möglich,

dass der Filter der selektiven Aufmerksamkeit je nach Studiendesign zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt gewirkt hat. In Experiment 3 war die Relevanz der Stimuli durch einen farblichen Rahmen um den jeweiligen Stimulus herum definiert, wodurch irrelevante Reize sehr früh und ohne Verarbeitung des Gesichts oder seiner Merkmale ausgefiltert werden konnten. Im Experiment 4a war das Geschlecht des abgebildeten Gesichts ausschlaggebend. Um aber das Geschlecht definieren zu können mussten die Probanden zumindest einige Merkmale des Gesichts wie z.B. Haarlänge oder Lippenform verarbeiten und damit konnte der Filter erst zu einem späteren Zeitpunkt ansetzen. Möglicherweise wirkten während früher und später Selektion unterschiedliche Inhibitionsmechanismen, was in unterschiedlichen neuronalen Korrelaten münden könnte. Allerdings ist das keine Erklärung dafür, warum für das Inhibieren von Distraktoren unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses keinerlei frontale Beteiligung zu finden war. Dies widerspricht nicht nur den eigenen Befunden des dritten Experiments sondern auch einer Vielzahl an bestehenden Forschungsergebnissen (Bunge et al., 2002; Jha et al., 2004; Jonides et al., 1998; Sakai et al., 2002).

Die hier verwendete n-back Aufgabe ist ein häufig verwendetes Paradigma zur Untersuchung von Prozessen des Arbeitsgedächtnisses. Im Gegensatz zu „delayed recognition“ Aufgaben, mit denen hauptsächlich Prozesse der Aufrechterhaltung von Gedächtnisinhalten erfasst werden, sind n-back Aufgaben durch das kontinuierliche Merken und wieder Ausblenden fortlaufender Stimuli gekennzeichnet („updating“ Prozesse). Das erlaubt das Analysieren komplexerer Arbeitsgedächtnisprozesse. Ein Nachteil ist allerdings die Heterogenität der Aufgabe, da man sich nicht nur eine bestimmte Anzahl an Stimuli merken muss, sondern diese auch in eine Reihenfolge bringen und die Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis fortlaufend auffrischen muss. Ein zusätzlicher Nachteil der n-back Aufgabe, die in dieser Arbeit verwendet wurde, ist die Konfundierung von Prozessen der fokussierten Aufmerksamkeit mit den verschiedenen Arbeitsgedächtnisprozessen. Aufgrund dessen bleibt es unklar, ob die gefunden Effekte bezüglich des Beachtens relevanter Stimuli auf Prozesse der Aufmerksamkeit oder des Arbeitsgedächtnisses zurückgeführt werden können. Vorteilhaft ist allerdings die Möglichkeit der spezifischen Untersuchung von Prozessen der Interferenzinhibition, da parallel ablaufende Prozesse der Aufrechterhaltung relevanter Informationen aufgrund des Auswertedesigns von der Analyse ausgeschlossen wurden.

Wie schon diskutiert, wurde in der vorliegenden Arbeit kein eigenständiges neuronales Korrelat für Prozesse der Interferenzinhibition gefunden, was dafür spricht, dass störende

Reize nicht aktiv unterdrückt werden. Stattdessen scheint das Fokussieren auf beachtete Reize aufgrund begrenzter kognitiver Kapazität automatisch mit dem Nichtbeachten anderer, störender Reize, einherzugehen. Dafür spricht, dass für das Beachten und Ignorieren von Stimuli eine vergleichbare präfrontale Aktivierung gefunden wurde. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit der „emergent property view“ des Arbeitsgedächtnisses (Postle, 2006), nach der der PFK keine domänenspezifischen Module für die Speicherung und Aufrechterhaltung unterschiedlicher Informationen hat. Stattdessen wird angenommen, dass der PFK das Arbeitsgedächtnis durch die Lenkung der Aufmerksamkeit, also durch einen einheitlichen Prozess, steuert. Auch der Befund einer erhöhten Aktivierung der FFA auf das Beachten und Erinnern von Gesichtsstimuli spricht für die „emergent property view“, die postuliert, dass der PFK durch Aufmerksamkeitslenkung die Aufrechterhaltung von Informationen in spezifischen Verarbeitungsarealen steuert. Ob diese Aktivierung allerdings während der gesamten Erinnerungszeit von Gedächtnis- zu Testreiz aufrechterhalten wurde, konnte mit den hier verwendeten Studiendesigns nicht nachgewiesen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Aufmerksamkeit mit Hilfe einer kognitiven Aufgabe auf bestimmte Reizkategorien fokussiert. Im Gegensatz dazu tritt bei emotionalen Stimuli eine natürliche Aufmerksamkeitslenkung auf, möglicherweise bedingt durch die evolutionäre Notwendigkeit, schnell auf potentiell bedeutsame Stimuli zu reagieren (Öhman & Mineka, 2001). Verschiedene Studien konnten zeigen, dass die Verarbeitung emotionaler Reize mit einer erhöhten Aktivierung im visuellen Kortex einhergeht im Vergleich zur Verarbeitung neutraler Reize (Herrmann et al., 2008; Mitchell et al., 2007; Vuilleumier, 2005). Bis heute gibt es allerdings keine Befunde zu den Auswirkungen einer Inhibition der vermeintlich automatisch auftretenden Emotionsverarbeitung auf die perzeptuelle Verarbeitung visueller Reize.

Es gibt Hinweise, dass die verstärkte Verarbeitung emotionaler Stimuli aufgrund einer Interaktion der Amygdala mit sensorischen Arealen zustande kommt (Mitchell et al., 2007). Mit dem Einfluss selektiver Aufmerksamkeit auf die Aktivierung der Amygdala während der Emotionsverarbeitung haben sich verschiedene Studien beschäftigt, die Ergebnisse sind bis heute widersprüchlich.

Auf der einen Seite gibt es Befunde, die nahelegen, dass Emotionen unabhängig von der Aufmerksamkeit verarbeitet werden. So fanden z.B. Vuilleumier und Kollegen keinen Effekt der räumlichen Aufmerksamkeit auf die Amygdalaaktivierung während der Verarbeitung emotionaler Gesichter (Vuilleumier, Armony, Driver, & Dolan, 2001). Auf der anderen Seite

gibt es verschiedene Studien, welche einen Einfluss der Aufmerksamkeit auf emotionsrelevante Areale wie die Amygdala nachweisen konnten. So fanden Pessoa und Kollegen nur unter geringer attentionaler Auslastung einen Unterschied in der Amygdalaaktivierung auf zentral dargebotene emotionale und neutrale Distraktoren (Pessoa, McKenna, Gutierrez, & Ungerleider, 2002). Unter hoher Auslastung konnte dieser Unterschied zwischen der Verarbeitung emotionaler und neutraler Reize nicht mehr gefunden werden, die vermeintlich automatische Aufmerksamkeitslenkung auf emotionale Reize konnte unterdrückt werden. Nach diesem Befund ist auch die Aktivierung der Amygdala abhängig von verfügbaren Aufmerksamkeitsressourcen. Dies zeigte sich auch in einer aktuellen Studie, welche die Verarbeitung emotionaler und neutraler Gesichtsstimuli unter hoher und niedriger perzeptueller Auslastung untersuchten (Mitchell et al., 2007). Die Autoren fanden lediglich dann einen Unterschied in der Amygdalaaktivierung zwischen emotionalen und neutralen Gesichtsausdrücken, wenn die Probanden auf die Gesichter achten sollten. Sollten sie auf gleichzeitig präsentierte Worte achten, verschwand dieser Unterschied. Dieser Befund zeigte, dass die Verarbeitung emotionaler Stimuli ebenso durch „top down“ Prozesse der selektiven Aufmerksamkeit gesteuert wird wie die Verarbeitung neutraler Stimuli.

Damit ist die Aufmerksamkeitslenkung auf emotionale Reize ebenso von zur Verfügung stehenden Ressourcen abhängig wie die auf alle anderen Reize. Möglicherweise lassen sich mit der Theorie des „perceptual load“ (Lavie, 1995) die widersprüchlichen Befunde zur Amygdala erklären. Nur wenn den Probanden genügend Ressourcen zur Verfügung stehen, kommt es zu einer natürlichen Aufmerksamkeitslenkung auf emotionale Reize. Ist dies nicht der Fall, gleicht die neuronale Reaktion auf emotionale Reize der neuronalen Reaktion auf neutrale Reize.

Verschiedene Studien konnten nachweisen, dass mit der Emotionsregulation eine Aktivierung des rechten VL-PFK einhergeht (Cunningham et al., 2004; Hariri, Mattay, Tessitore, Fera, & Weinberger, 2003). Die Aktivierung dieser Region ist bei emotional relevanten Distraktoren stärker ausgeprägt als bei neutralen, was als aktive Emotionsregulation interpretiert wird (Dolcos & McCarthy, 2006). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sprechen allerdings für eine andere Interpretation. Die Aktivierung spiegelt einen Selektionsprozess wider, der aufgrund der natürlich auftretenden selektiven Aufmerksamkeit hin zu emotionalen Reizen für emotionale Distraktoren mehr kognitive Ressourcen benötigt als für neutrale Reize und deshalb auch mit einer erhöhten Aktivierung einhergeht.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit lag auf der Erforschung des Zusammenhangs zwischen Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit. Da die hier untersuchte Komponente der fokussierten bzw. selektiven Aufmerksamkeit nach dem Modell von Van Zomeren und Brouwer (1994) allerdings auf grundlegenden Aspekten der Aufmerksamkeitsintensität basiert, wurde in der vorliegenden Arbeit in einem Exkurs das Konzept der Alertness untersucht. Alertness gilt als grundlegende Funktion der Aufmerksamkeitsintensität (Sturm et al., 1999) und ist somit für ein Verständnis komplexerer Aufmerksamkeitsprozesse relevant. Bezüglich der Alertness Aufgabe fand sich eine Beteiligung temporaler Strukturen der rechten Hemisphäre; in der linken Hemisphäre war der ventrale Teil des inferioren frontalen Kortex aktiv. Keine der an der Alertness beteiligten Strukturen zeigte sich als für die n-back Aufgabe relevant, weder für das Beachten relevanter noch für das Ignorieren irrelevanter Stimuli. Unter hoher Auslastung des Arbeitsgedächtnisses fand sich zwar ein neuronales Korrelat des Beachtens von Reizen im inferioren frontalen Kortex, allerdings war hier der dorsale und nicht der ventrale Teil dieser Region aktiv.

Zusammenfassend konnte in der vorliegenden Arbeit zum einen für Prozesse des Arbeitsgedächtnisses wie auch der Aufmerksamkeit ein neuronales Korrelat im frontalen Kortex nachgewiesen werden, wobei das Fokussieren auf wie auch das Ignorieren von visuellen Stimuli zu einer vergleichbaren neuronalen Aktivität führte. Ein für die Interferenzkontrolle spezifisches neuronales Korrelat wurde im PFK nicht gefunden. Zum anderen ergaben sich auch hinsichtlich des Aktivierungsmusters im okzipitalen Kortex keinerlei Anzeichen eines aktiven Inhibitionsprozesses. Auch wenn das Ausbleiben von Befunden, hier also die fehlende Verminderung der Verarbeitung irrelevanter Reize, nur eingeschränkt interpretierbar ist, so sprechen beide Befunde zusammengenommen doch für die Hypothese einer Aufteilung begrenzter Verarbeitungsressourcen zugunsten beachteter Reize. Demnach sind das Fokussieren auf und das Ignorieren von Stimuli nicht zwei unterschiedliche aktive Prozesse, sondern die beiden Endpunkte eines einheitlichen Mechanismus.

Um diesen Befund zu festigen ist allerdings weitere Forschung nötig. Vorteilhaft wäre eine unabhängige Modulation von Prozessen des Arbeitsgedächtnisses und der Interferenzkontrolle. Durch ein solches Studiendesign konnten in bestehenden Publikationen bereits für den Prozess des Enkodierens und des Abrufs („Retrievals“) von Informationen nicht nur gemeinsame neuronale Korrelate für Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit gefunden

werden, sondern es fanden sich auch Regionen, die selektiv auf die Manipulation eines der beiden Prozesse reagierten.

Ein Großteil der bisherigen Forschung befasste sich ausschließlich mit räumlicher Aufmerksamkeit, Paradigmen zur Untersuchung von Objekt-Aufmerksamkeit sind rar. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Paradigma entwickelt, mit dessen Hilfe komplexe Prozesse der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses bezüglich sequentiell präsentierter Reize erfasst werden können. Auch wenn es mit dem aktuellen Design nicht konsistent gelang, eine Beteiligung des PFK an der Interferenzkontrolle nachzuweisen, liefert die vorliegende Arbeit doch einen Beitrag zur Untersuchung der Inhibition einzeln und zentral dargebotener Distraktoren. Der Vorteil des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Studiendesigns der getrennten Analyse von Effekten des Zielreizes und des Distraktors ohne gegenseitige Konfundierung sollte in weiteren Studien genutzt werden.

## IV Literaturverzeichnis

- Adleman, N. E., Menon, V., Blasey, C. M., White, C. D., Warsofsky, I. S., Glover, G. H., et al. (2002). A developmental fMRI study of the Stroop color-word task. *Neuroimage*, *16*(1), 61-75.
- Awh, E., & Jonides, J. (2001). Overlapping mechanisms of attention and spatial working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(3), 119-126.
- Awh, E., Vogel, E. K., & Oh, S. H. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience*, *139*(1), 201-208.
- Baddeley, A. (1996). The fractionation of working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U S A*, *93*(24), 13468-13472.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Review Neuroscience*, *4*(10), 829-839.
- Belger, A., Puce, A., Krystal, J. H., Gore, J. C., Goldman-Rakic, P., & McCarthy, G. (1998). Dissociation of mnemonic and perceptual processing during spatial and nonspatial working memory using fMRI. *Human Brain Mapping*, *6*, 14-32.
- Berti, S., & Schroger, E. (2003a). Working memory controls involuntary attention switching: evidence from an auditory distraction paradigm. *European Journal of Neuroscience*, *17*(5), 1119-1122.
- Berti, S., & Schroger, E. (2003b). Working memory controls involuntary attention switching: evidence from an auditory distraction paradigm. *European Journal of Neuroscience*, *17*(5), 1119-1122.
- Bjorklund, D. F., & Harnishfeger, K. K. (1990). The resources construct in cognitive development: diverse sources of evidence and a theory of inefficient inhibition. *Developmental Review*, *10*(1), 48-71.
- Braver, T. S., Barch, D. M., Kelley, W. M., Buckner, R. L., Cohen, N. J., Miezin, F. M., et al. (2001). Direct comparison of prefrontal cortex regions engaged by working and long-term memory tasks. *Neuroimage*, *14*, 48-59.
- Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *Neuroimage*, *5*, 49-62.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication* London, New York: Pergamon.

- Bunge, S. A., Dudukovic, N. M., Thomason, M. E., Vaidya, C. J., & Gabrieli, J. D. (2002). Immature frontal lobe contributions to cognitive control in children: evidence from fMRI. *Neuron*, 33(2), 301-311.
- Bunge, S. A., Ochsner, K. N., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. E. (2001). Prefrontal regions involved in keeping information in and out of mind. *Brain*, 124, 2074-2086.
- Buracas, G. T., & Boynton, G. M. (2007). The effect of spatial attention on contrast response functions in human visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 27(1), 93-97.
- Cabeza, R., & Nyberg, L. (2000). Neural bases of learning and memory: functional neuroimaging evidence. *Current Opinion in Neurology*, 13, 415-421.
- Carmel, D., & Bentin, S. (2002). Domain specificity versus expertise: factors influencing distinct processing of faces. *Cognition*, 83, 1-29.
- Cauquil, A. S., Edmonds, G. E., & Taylor, M. J. (2000). Is the face-sensitive N170 the only ERP not affected by selective attention? *Neuroreport*, 11(10), 2167-2171.
- Chafee, M. V., & Goldman-Rakic, P. S. (1998). Matching patterns of activity in primate prefrontal area 8a and parietal area 7ip neurons during a spatial working memory task. *Journal of Neurophysiology*, 79(6), 2919-2940.
- Chen, Z., & Chan, C. C. (2007). Distractor interference stays constant despite variation in working memory load. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(2), 306-312.
- Cherry, E. C. (1953). Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with 2 Ears. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25(5), 975-979.
- Cochrane, D., & Orcutt, G. H. (1949). Application of Least Squares Regression to Relationships Containing Autocorrelated Error Terms. *Journal of the American Statistical Association*, 44(245), 32-61.
- Corbetta, M., Miezin, F. M., Dobmeyer, S., Shulman, G. L., & Petersen, S. E. (1991). Selective and Divided Attention During Visual Discriminations of Shape, Color, and Speed - Functional-Anatomy by Positron Emission Tomography. *Journal of Neuroscience*, 11(8), 2383-2402.
- Cunningham, W. A., Johnson, M. K., Raye, C. L., Chris Gatenby, J., Gore, J. C., & Banaji, M. R. (2004). Separable Neural Components in the Processing of Black and White Faces. *Psychological Science*, 15(12), 806-813.
- Curtis, C. E., & D'Esposito, M. (2005). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Science*, 7(9), 415-423.

- D'Esposito, M. (2007). From cognitive to neural models of working memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 362(1481), 761-772.
- D'Esposito, M., Aguirre, G. K., Zarahn, E., Ballard, D., Shin, R. K., & Lease, J. (1998). Functional MRI studies of spatial and nonspatial working memory. *Cognitive Brain Research*, 7(1), 1-13.
- D'Esposito, M., Ballard, D., Aguirre, G. K., & Zarahn, E. (1998). Human prefrontal cortex is not specific for working memory: a functional MRI study. *Neuroimage*, 8(3), 274-282.
- de Fockert, J. W., Rees, G., Frith, C. D., & Lavie, N. (2001). The role of working memory in visual selective attention. *Science*, 291(5509), 1803-1806.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural Mechanisms of Selective Visual-Attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 193-222.
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention - Some Theoretical Considerations. *Psychological Review*, 70(1), 80-90.
- Diamond, A., Briand, L., Fossella, J., & Gehlbach, L. (2004). Genetic and neurochemical modulation of prefrontal cognitive functions in children. *American Journal of Psychiatry*, 161(1), 125-132.
- Dolcos, F., & McCarthy, G. (2006). Brain systems mediating cognitive interference by emotional distraction. *Journal of Neuroscience*, 26(7), 2072-2079.
- Duncan, A., Meek, J. H., Clemence, M., Elwell, C. E., Fallon, P., Tyszczuk, L., et al. (1996). Measurement of cranial optical path length as a function of age using phase resolved near infrared spectroscopy. *Pediatric Research*, 39(5), 889-894.
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, 113(4), 501-517.
- Egner, T., & Hirsch, J. (2005). Cognitive control mechanisms resolve conflict through cortical amplification of task-relevant information. *Nature Neuroscience*, 8(12), 1784-1790.
- Ehlis, A.-C., Herrmann, M. J., Wagnener, A., & Fallgatter, A. J. (2005). Multi-channel near-infrared spectroscopy detects specific inferior-frontal activation during incongruent stroop trials. *Biological Psychology*, 69, 315-331.
- Eimer, M. (2000). Event-related brain potentials distinguish processing stages involved in face perception and recognition. *Clinical Neurophysiology*, 111(4), 694-705.
- Fallgatter, A. J., & Strik, W. K. (1998). Frontal brain activation during the wisconsin card sorting test assessed with two-channel near-infrared spectroscopy. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 248, 245-249.

- Friston, K. J., Holmes, A. P., Poline, J. B., Grasby, P. J., Frackowiak, R. S. J., & Turner, R. (1995). Analysis of fMRI time-series revisited. *Neuroimage*, 2(1), 45-53.
- Funahashi, S., Bruce, C. J., & Goldman-Rakic, P. S. (1989). Mnemonic Coding of Visual Space in the Monkeys Dorsolateral Prefrontal Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 61(2), 331-349.
- Gandhi, S. P., Heeger, D. J., & Boynton, G. M. (1999). Spatial attention affects brain activity in human primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U S A*, 96, 3314-3319.
- Garavan, H., Ross, T. J., Li, S. J., & Stein, E. A. (2000). A parametric manipulation of central executive functioning. *Cerebral Cortex*, 10(6), 585-592.
- Gazzaley, A., Cooney, J. W., McEvoy, K., Knight, R. T., & D'Esposito, M. (2005). Top-down enhancement and suppression of the magnitude and speed of neural activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(3), 507-517.
- Gibson, C., Lee, J., & Park, S. (2007). Increased bilateral frontal activation during verbal working memory in schizophrenia: A near infrared spectroscopy (NIRS) study. *Schizophrenia Bulletin*, 33(2), 367-367.
- Giesbrecht, B., Kingstone, A., Handy, T. C., Hopfinger, J. B., & Mangun, G. R. (2006). Functional neuroimaging of attention. In R. Cabeza & A. Kingstone (Eds.), *Handbook of functional neuroimaging of cognition*. Cambridge: MIT Press.
- Goldman-Rakic, P. S. (1995). Cellular Basis of Working Memory. *Neuron*, 14, 477-485.
- Gomarus, H. K., Althaus, M., A., W. A., & Minderaa, R. B. (2006). The effects of memory load and stimulus relevance on the EEG during a visual selective memory search task: An ERP and ERD/ERS study. *Clinical Neurophysiology*, 117, 871-884.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55(4), 468-484.
- Hariri, A. R., Mattay, V. S., Tessitore, A., Fera, F., & Weinberger, D. R. (2003). Neocortical modulation of the amygdala response to fearful stimuli. *Biological Psychiatry*, 53(6), 494-501.
- Herrmann, M. J., Ehlis, A.-C., Wagener, A., Jacob, C. P., & Fallgatter, A. J. (2005). Near-infrared optical topography to assess activation of the parietal cortex during a visuo-spatial task. *Neuropsychologia*, 43, 1713-1720.

- Herrmann, M. J., Ellgring, H., & Fallgatter, A. J. (2004). Early-stage face processing dysfunction in patients with schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, *161*(5), 915-917.
- Herrmann, M. J., Huter, T. J., Plichta, M. M., Ehlis, A.-C., Alpers, G. W., Mühlberger, A., et al. (2008). Enhancement of activity of the primary visual cortex during processing of emotional stimuli as measured with event-related functional near-infrared spectroscopy and event-related potentials. *Human Brain Mapping*, *29*(1), 28-35.
- Herrmann, M. J., Walter, A., Ehlis, A.-C., & Fallgatter, A. J. (2006). Cerebral oxygenation changes in the prefrontal cortex: effects of age and gender. *Neurobiology of Aging*, *27*, 888-894.
- Herrmann, M. J., Walter, A., Schreppel, T., Ehlis, A.-C., Pauli, P., Lesch, K.-P., et al. (2007). D4 receptor gene variation modulates activation of prefrontal cortex during working memory. *European Journal of Neuroscience*, *26*, 2713-2718.
- Herrmann, M. J., Woidich, E., Schreppel, T., Pauli, P., & Fallgatter, A. J. (2008). Brain activation for alertness measured with functional near infrared spectroscopy (fNIRS). *Psychophysiology*, *45*(3), 480-486.
- Hillyard, S. A., Vogel, E. K., & Luck, S. J. (1999). Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. In G. W. Humphreys, J. Duncan & A. M. Treisman (Eds.), *Attention, Space and Action. Studies in Cognitive Neuroscience*. New York: Oxford University Press.
- Hoshi, Y. (2003). Functional near-infrared optical imaging: utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*, *40*(4), 511-520.
- Hoshi, Y., Kobayashi, N., & Tamura, M. (2001). Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *Journal of Applied Physiology*, *90*, 1657-1662.
- Hoshi, Y., Shimada, M., Sato, C., & Iguchi, Y. (2005). Reevaluation of near-infrared light propagation in the adult human head: implications for functional near-infrared spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*, *10*(6), 1-10.
- Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, *10*(2), 371-375.
- Jha, A. P., Fabian, S. A., & Aguirre, G. K. (2004). The role of prefrontal cortex in resolving distractor interference. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *4*(4), 517-527.

- Johnson, S. (1825). Idler. In *The works of Samuel Johnson, LL. D.* (1 ed., pp. 80). London: Jones & Company.
- Jonides, J., Smith, E. E., Marshuetz, C., Koeppe, R. A., & Reuter-Lorenz, P. A. (1998). Inhibition in verbal working memory revealed by brain activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U S A*, 95(14), 8410-8413.
- Jurcak, V., Okamoto, M., Singh, A., & Dan, I. (2005). Virtual 10-20 measurement on MR images for inter-modal linking of transcranial and tomographic neuroimaging methods. *Neuroimage*, 26(4), 1184-1192.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working-memory capacity and the control of attention: the contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132(1), 47-70.
- Kanwisher, N., & Wojciulik, E. (2000). Visual attention: insights from brain imaging. *Nature Reviews Neuroscience*, 1(2), 91-100.
- Kastner, S., Pinsk, M. A., De Weerd, P., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1999). Increased activity in human visual cortex during directed attention in the absence of visual stimulation. *Neuron*, 22, 751-761.
- Kessler, K., & Kiefer, M. (2005). Disturbing visual working memory: electrophysiological evidence for a role of the prefrontal cortex in recovery from interference. *Cerebral Cortex*, 15(7), 1075-1087.
- Klingberg, T., O'Sullivan, B. T., & Roland, P. E. (1997). Bilateral activation of fronto-parietal networks by incrementing demand in a working memory task. *Cerebral Cortex*, 7(5), 465-471.
- Kwee, I. L., & Nakada, T. (2003). Dorsolateral prefrontal lobe activation declines significantly with age - Functional NIRS study. *Journal of Neurology*, 250(5), 525-529.
- Kwon, H., Reiss, A. L., & Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U S A*, 99(20), 13336-13341.
- Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(3), 451-468.
- Lepsien, J., Griffin, I. C., Devlin, J. T., & Nobre, A. C. (2005). Directing spatial attention in mental representations: Interactions between attentional orienting and working-memory load. *Neuroimage*, 26(3), 733-743.

- Lundqvist, D., Flykt, A., & Öhman, A. (1998). *The Karolinska directed emotional faces*. Psychology section. Department of clinical neuroscience. Karolinska Institute, Stockholm, Sweden.
- Mayer, J. S., Bittner, R. A., Nikolic, D., Bledowski, C., Goebel, R., & Linden, D. E. J. (2007). Common neural substrates for visual working memory and attention. *Neuroimage*, *36*(2), 441-453.
- Mitchell, D. G. V., Nakic, M., Fridberg, D., Kamel, N., Pine, D. S., & Blair, R. J. R. (2007). The impact of processing load on emotion. *NeuroImage*, *34*(3), 1299-1309.
- Müller, N. G., & Knight, R. T. (2006). The functional neuroanatomy of working memory: Contributions of human brain lesion studies. *Neuroscience*, *139*(1), 51-58.
- Nelson, C. A., Monk, C. S., Lin, J., Carver, L. J., Thomas, K. M., & Truwit, C. L. (2000). Functional neuroanatomy of spatial working memory in children. *Developmental Psychology*, *36*(1), 109-116.
- Noguchi, Y., Takeuchi, T., & Sakai, K. L. (2002). Lateralized activation in the inferior frontal cortex during syntactic processing: event-related optical topography study. *Human Brain Mapping*, *17*, 89-99.
- O'Craven, K. M., Downing, P. E., & Kanwisher, N. (1999). fMRI evidence for objects as the units of attentional selection. *Nature*, *401*, 584-587.
- Öhman, A., & Mineka, S. (2001). Fears, phobias, and preparedness: toward an evolved module of fear and fear learning. *Psychological Review*, *108*(3), 483-522.
- Okada, E., & Depty, D. T. (2003). Near-infrared light propagation in an adult head model. I. Modeling of low-level scattering in the cerebrospinal fluid layer. *Applied Optics*, *42*(16), 2906-1914.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., et al. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, *21*(1), 99-111.
- Okamoto, M., & Dan, I. (2005). Automated cortical projection of head-surface locations for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, *26*(1), 18-28.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analyses of handedness; the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113.
- Paulesu, E., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, *362*(6418), 342-345.

- Pessoa, L., McKenna, M., Gutierrez, E., & Ungerleider, L. G. (2002). Neural processing of emotional faces requires attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*(17), 11458-11463.
- Plichta, M. M., Heinzl, S., Ehlis, A. C., Pauli, P., & Fallgatter, A. J. (2007). Model-based analysis of rapid event-related functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) data: A parametric validation study. *Neuroimage*, *35*(2), 625-634.
- Plichta, M. M., Herrmann, M. J., Bähne, C. G., Ehlis, A.-C., Richter, M. M., Pauli, P., et al. (2006). Event-related functional near-infrared spectroscopy (fNIRS): Are the measurements reliable? *Neuroimage*, *31*, 116-124.
- Plichta, M. M., Herrmann, M. J., Ehlis, A.-C., Bähne, C. G., Richter, M. M., & Fallgatter, A. J. (2006). Event-related visual versus blocked motor task: detection of specific cortical activation patterns with functional near-infrared spectroscopy. *Neuropsychobiology*, *53*, 77-82.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *32*(1), 3-25.
- Posner, M. I., & Dehaene, S. (1994). Attentional Networks. *Trends in Neurosciences*, *17*(2), 75-79.
- Postle, B. R. (2005). Delay-period activity in prefrontal cortex: one function is sensory gating. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(11), 1679-1690.
- Postle, B. R. (2006). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, *139*, 23-38.
- Postle, B. R., Brush, L. N., & Nick, A. M. (2004). Prefrontal cortex and the mediation of proactive interference in working memory. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *4*(4), 600-608.
- Postle, B. R., Druzgal, T. J., & D'Esposito, M. (2003). Seeking the neural substrates of visual working memory storage. *Cortex*, *39*, 927-946.
- Postle, B. R., Stern, C. E., Rosen, B. R., & Corkin, S. (2000). An fMRI investigation of cortical contributions to spatial and nonspatial visual working memory. *Neuroimage*, *11*, 409-423.
- Ranganath, C. (2006). Working memory for visual objects: complementary roles of inferior temporal, medial temporal, and prefrontal cortex. *Neuroscience*, *139*, 277-289.
- Ranganath, C., DeGutis, J., & D'Esposito, M. (2004). Category-specific modulation of inferior temporal activity during working memory encoding and maintenance. *Cognitive Brain Research*, *20*, 37-45.

- Rees, G., & Frith, C. D. (1999). How do we select perceptions and actions? Human brain imaging studies. In G. W. Humphreys, J. Duncan & A. M. Treisman (Eds.), *Attention, Space and Action. Studies in Cognitive Neuroscience*. New York: Oxford University Press.
- Rissman, J., Gazzaley, A., & D'Esposito, M. (2004). Measuring functional connectivity during distinct stages of a cognitive task. *Neuroimage*, *23*, 752-763.
- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, R. S. J., & Passingham, D. E. (2000). The prefrontal cortex: response selection or maintenance within working memory? *Science*, *288*, 1656-1660.
- Sakai, K., & Passingham, R. E. (2004). Prefrontal selection and medial temporal lobe reactivation in retrieval of short-term verbal information. *Cerebral Cortex*, *14*(8), 914-921.
- Sakai, K., Rowe, J. B., & Passingham, R. E. (2002). Active maintenance in prefrontal area 46 creates distractor-resistant memory. *Nature Neuroscience*, *5*(5), 479-484.
- Sankoh, A. J., Huque, M. F., & Dubey, S. D. (1997). Some comments on frequently used multiple endpoint adjustment methods in clinical trials. *Statistics in Medicine*, *16*(22), 2529-2542.
- Schreppel, T., Egetemeir, J., Scheckelmann, M., Plichta, M. M., Pauli, P., Ellgring, H., et al. (2008). Activation of the prefrontal cortex in working memory and interference resolution processes assessed with near-infrared spectroscopy. *Neuropsychobiology*, *57*, 188-193.
- Schreppel, T., Pauli, P., Ellgring, H., Fallgatter, A. J., & Herrmann, M. J. (2008). The impact of prefrontal cortex for selective attention in a visual working memory task. *International Journal of Neuroscience*, *118*(12), 1673-1688.
- Singh, A. K., Okamoto, M., Dan, H., Jurcak, V., & Dan, I. (2005). Spatial registration of multichannel multi-subject fNIRS data to MNI space without MRI. *Neuroimage*, *27*(4), 842-851.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1998). Neuroimaging analyses of human working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U S A*, *95*(20), 12061-12068.
- Soto, D., Heinke, D., Humphreys, G. W., & Blanco, M. J. (2005). Early, involuntary top-down guidance of attention from working memory. *Journal of Experimental Psychology - Human Perception and Performance*, *31*(2), 248-261.

- Spinks, J. A., Zhang, J. X., Fox, P. T., Gao, J. H., & Hai Tan, L. (2004). More workload on the central executive of working memory, less attention capture by novel visual distractors: evidence from an fMRI study. *Neuroimage*, *23*(2), 517-524.
- Stern, C. E., Sherman, S. J., Kirchoff, B. A., & Hasselmo, M. E. (2001). Medial temporal and prefrontal contributions to working memory tasks with novel and familiar stimuli. *Hippocampus*, *11*(4), 337-346.
- Strangman, G., Boas, D. A., & Sutton, J. P. (2002). Non-invasive neuroimaging using near-infrared light. *Biological Psychiatry*, *52*(7), 679-693.
- Sturm, W. (2004). Cognitive control of attention intensity: Functional neuroanatomy. *Zeitschrift für Psychologie*, *212*(2), 107-114.
- Sturm, W., de Simone, A., Krause, B. J., Specht, K., Hesselmann, V., Radermacher, I., et al. (1999). Functional anatomy of intrinsic alertness: evidence for a fronto-parietal-thalamic-brainstem network in the right hemisphere. *Neuropsychologia*, *37*(7), 797-805.
- Sturm, W., & Willmes, K. (2001). On the functional neuroanatomy of intrinsic and phasic alertness. *Neuroimage*, *14*(1), S76-S84.
- Toichi, M., Findling, R. L., Kubota, Y., Calabrese, J. R., Wiznitzer, M., McNamara, N. K., et al. (2004). Hemodynamic differences in the activation of the prefrontal cortex: attention vs. higher cognitive processing. *Neuropsychologia*, *42*(5), 698-706.
- Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *12*, 242-248.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, *12*, 97-136.
- Tsujimoto, S., Yamamoto, T., Kawaguchi, H., Koizumi, H., & Sawaguchi, T. (2004). Prefrontal cortical activation associated with working memory in adults and preschool children: an event-related optical topography study. *Cerebral Cortex*, *14*(7), 703-712.
- Tsuzuki, D., Jurcak, V., Singh, A. K., Okamoto, M., Watanabe, E., & Dan, I. (2007). Virtual spatial registration of stand-alone fNIRS data to MNI space. *Neuroimage*, *34*(4), 1506-1518.
- Tzourio Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., et al. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *Neuroimage*, *15*(1), 273-289.

- 
- Van Zomeren, A. H., & Brouwer, W. H. (1994). *Clinical Neuropsychology of Attention*. New York: Oxford University Press.
- Vuilleumier, P. (2005). How brains beware: neural mechanisms of emotional attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(12), 585-594.
- Vuilleumier, P., Armony, J. L., Driver, J., & Dolan, R. J. (2001). Effects of Attention and Emotion on Face Processing in the Human Brain: An Event-Related fMRI Study. *Neuron*, 30(3), 829-841.
- Watanabe, A., & Kato, T. (2004). Cerebrovascular response to cognitive tasks in patients with schizophrenia measured by near-infrared spectroscopy. *Schizophrenia Bulletin*, 30(2), 435-444.
- Weis, S., Fimm, B., Longoni, F., Dietrich, T., Zahn, R., Herzog, H., et al. (2000). The functional anatomy of intrinsic and phasic alertness - a PET study with auditory stimulation. *Neuroimage*, 10(5), S10.
- Yoon, J. H., Curtis, C. E., & D'Esposito, M. (2006). Differential effects of distraction during working memory on delay-period activity in the prefrontal cortex and the visual association cortex. *Neuroimage*, 29, 1117-1126.
- Zhang, J. X., Feng, C. M., Fox, P. T., Gao, J. H., & Tan, L. H. (2004). Is left inferior frontal gyrus a general mechanism for selection? *Neuroimage*, 23(2), 596-603.



## V Anhang

### Inhaltsverzeichnis

- A1) Informationstext zu Experiment 1
- A2) Informationstext zu Experiment 2
- A3) Informationstext zu Experiment 3
- A3) Informationstext zu Experiment 4a
- A3) Informationstext zu Experiment 4b
- A6) Schriftliche Instruktion der Probanden zu Experiment 4a und 4b
- A7) Übungsblatt für die Experimente 4a und 4b
- A8) Varianzanalytische NIRS Auswertung zu Experiment 1, Datenerhebung 2
  - Tabelle A1:* ANOVA für [O<sub>2</sub>Hb] der ROI 1 (Bedingung x Kanal)
  - Tabelle A2:* ANOVA für [O<sub>2</sub>Hb] der ROI 2 (Bedingung x Kanal)
  - Tabelle A3:* ANOVA für [HHb] der ROI 1 (Bedingung x Kanal)
  - Tabelle A4:* ANOVA für [HHb] der ROI 2 (Bedingung x Kanal)
- A9) Varianzanalytische EEG Auswertung zu Experiment 2: okzipitale Elektroden
  - Tabelle A5:* ANOVA für die Amplitude der N170 (Relevanz x Hemisphäre x Position)
  - Tabelle A6:* ANOVA für die Latenz der N170 (Relevanz x Hemisphäre x Position)
  - Tabelle A7:* ANOVA für die Amplitude der P100 (Relevanz x Hemisphäre)
  - Tabelle A8:* ANOVA für die Latenz der P100 (Relevanz x Hemisphäre)
- A10) Varianzanalytische EEG Auswertung zu Experiment 2: frontale Elektroden
  - Tabelle A9:* ANOVA für die Epoche 1 (Relevanz x Hemisphäre x Position)
  - Tabelle A10:* ANOVA für die Epoche 2 (Relevanz x Hemisphäre x Position)
  - Tabelle A11:* ANOVA für die Epoche 3 (Relevanz x Hemisphäre x Position)
- A11) Varianzanalytische EEG Auswertung zu Experiment 4a
  - Tabelle A12:* ANOVA für die Amplitude der N170 (Relevanz x Hemisphäre x Position)
  - Tabelle A13:* ANOVA für die Latenz der N170 (Relevanz x Hemisphäre x Position)
  - Tabelle A14:* ANOVA für die Amplitude der P100 (Relevanz x Hemisphäre)
  - Tabelle A15:* ANOVA für die Latenz der P100 (Relevanz x Hemisphäre)
- A12) Varianzanalytische NIRS Auswertung zu Experiment 4a
  - Tabelle A16:* ANOVA für [O<sub>2</sub>Hb] (Relevanz x Kanal)
  - Tabelle A17:* ANOVA für [HHb] (Relevanz x Kanal)
- A13) Lebenslauf

**A1) Informationstext zu Experiment 1**

**Universitätsklinikum Würzburg**  
Klinikum der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität



**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**  
Direktor: Prof. J. Deckert

**Unabhängige Nachwuchsgruppe: Genomische Bildgebung**  
Leiter: Dr. Martin J. Herrmann, Dipl.-Psych.

Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie  
Füchsleinstraße 15 97080 Würzburg  
www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging

Nachrichtlich:

Ihre Nachricht vom:

Unser Zeichen:

Telefon: (0931) 201 - 76650

Würzburg, 18.  
Dezember 2008

Ihr Zeichen:

Telefax: (0931) 201 - 77550

Herrmann\_M@klinik.uni-wuerzburg.de

**AUFKLÄRUNG UND EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG  
ZUR TEILNAHME AN EINER NIRS-UNTERSUCHUNG  
(ERFASSUNG DER HIRNDURCHBLUTUNG)**

**Name:** \_\_\_\_\_

**Vorname:** \_\_\_\_\_

**Geb.-Datum:** \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 19 \_\_\_\_

**ZIEL DER UNTERSUCHUNG?**

Ihre Aufgabe ist es, eine einfache Reaktionszeitaufgabe durchzuführen. Auf dem Bildschirm erscheint in zufälliger zeitlicher Abfolge ein Kreuz. Sobald dieses Kreuz erscheint, sollte so schnell wie möglich eine Reaktionstaste gedrückt werden. Auf diese Weise kann die Aufmerksamkeit und das Reaktionsvermögen getestet werden. Um die bei dieser Aufgabe beteiligten Prozesse des Gehirns sichtbar zu machen, wird die funktionelle Nah-Infrarot-Spektroskopie eingesetzt. Die Untersuchung findet im Labor für Psychophysiologie und funktionelle Bildgebung der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie in Würzburg statt und dauert insgesamt ca. 30 Minuten.

Klinik und Poliklinik  
für Psychiatrie und  
Psychotherapie  
Füchsleinstr. 15  
97080 Würzburg

Tel.: (09 31) 201 – 7 60 00  
Fax: (09 31) 201 – 7 70 20  
deckert@mail.uni-wuerzburg.de  
www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging



## Fortsetzung

**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**

Direktor: Prof. J. Deckert

18.12.2008



### **WURUM HANDELT ES SICH BEI DER NAH-INFRAROT-SPEKTROSKOPIE?**

Die Nah-Infrarot-Spektroskopie ist ein nicht-eingreifendes Untersuchungsverfahren, mit dem die Durchblutung des Gehirns gemessen werden kann. Dazu werden kleine „Messknöpfchen“ (Optoden) in einer Gummipatte auf die Kopfhaut gelegt und mit einem Band fixiert. Mittels dieses Messinstruments wird nun unschädliches Licht genau festgelegter Wellenlängen ausgesendet und die Menge an reflektiertem Licht gemessen. Aus diesem Messergebnis können dann Durchblutungsänderungen des Gehirns errechnet werden, die einen Hinweis auf Hirnaktivierung geben.

### **IST MIT IRGENDWELCHEN NEBENWIRKUNGEN ZU RECHNEN?**

Nein. Die geplante Untersuchung ist nicht-invasiv, das heißt, es werden keinerlei Eingriffe am Körper vorgenommen. Die Nah-Infrarot-Spektroskopie wird seit über 20 Jahren am Menschen angewandt, Nebenwirkungen sind bisher auch bei ununterbrochener Messung über mehrere Tage nicht aufgetreten.

### **IST DIE TEILNAHME FREIWILLIG? KANN ICH SIE WIDERRUFEN?**

Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können Ihre Teilnahme **jederzeit**, auch während der Untersuchung, widerrufen, ohne dass Ihnen daraus irgendwelche Nachteile entstehen.

### **EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG**

Diese Information habe ich gelesen und verstanden. Die Studie wurde mir vom Versuchsleiter erklärt, alle auftretenden Fragen wurden ausreichend beantwortet. Ich befinde mich in keinem Abhängigkeitsverhältnis zum Untersucher dieser Studie. Mit der Durchführung der Untersuchung sowie einer Speicherung, Verarbeitung und evtl. Veröffentlichung der erhobenen Messwerte **in anonymisierter Form** (also ohne Angabe meines Namens) in wissenschaftlichen Fachzeitschriften bin ich einverstanden. Ich stimme zu, dass zu diesem Zweck persönliche Daten gespeichert werden, und ich bei Bedarf noch einmal kontaktiert werde. Ich wurde darüber informiert, dass ich die Studie jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen kann, ohne dass mir daraus irgendwelche Nachteile entstehen. Ich erkläre mich somit freiwillig bereit, an der oben beschriebenen Studie teilzunehmen.

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift der VP

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des VL

**A2) Informationstext zu Experiment 2**

**Universitätsklinikum Würzburg**  
Klinikum der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität



**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**  
Direktor: Prof. Dr. Dr. h. c. (Univ. Asunción) H. Beckmann

**Unabhängige Nachwuchsgruppe: Genomische Bildgebung**  
Leiter: Dr. Martin J. Herrmann, Dipl.-Psych.

Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie  
Füchslinstraße 15 97080 Würzburg  
[www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging](http://www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging)

Nachrichtlich:

Ihre Nachricht vom:

Unser Zeichen:

Telefon: (0931) 201 - 76310

Würzburg, 18.  
Dezember 2008

Ihr Zeichen:

Telefax: (0931) 201 - 77550

Herrmann\_M@klinik.uni-wuerzburg.de

**AUFKLÄRUNG UND EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG  
ZUR TEILNAHME AN EINER EEG-UNTERSUCHUNG**

**Name:** \_\_\_\_\_

**Vorname:** \_\_\_\_\_

**Geb.-Datum:** \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 19 \_\_\_\_

**WAS SOLLEN SIE WÄHREND DER UNTERSUCHUNG TUN?**

Ihre Aufgabe ist es, aufmerksam Bilder von Gesichtern und Landschaften auf einem Computermonitor für ca. 30 Minuten zu betrachten und auf bestimmte Bilder mit Tastendruck zu reagieren. Während dessen wird Ihre Gehirnaktivität mittels EEG gemessen. Die Untersuchung findet im neurophysiologischen Labor für Psychophysiologie und funktionelle Bildgebung der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie statt und dauert insgesamt ca. 2 Stunden.

Klinik und Poliklinik  
für Psychiatrie und  
Psychotherapie  
Füchslinstr. 15  
97080 Würzburg

Tel.: (09 31) 201 – 7 60 00  
Fax: (09 31) 201 – 7 70 20  
[beckmann@mail.uni-wuerzburg.de](mailto:beckmann@mail.uni-wuerzburg.de)  
[www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging](http://www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging)



## Fortsetzung

### Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie

Direktor: Prof. Dr. Dr. h.c. H. Beckmann

18.12.2008



#### **WURUM HANDELT ES SICH BEIM EEG?**

Mit dem EEG werden an der Kopfoberfläche die schwachen elektrischen Ströme gemessen, mit denen das Gehirn arbeitet. Hierfür werden Ihnen mit Hilfe einer Paste Messelektroden auf die Kopfhaut gelegt. Von der Hirnstrommessung selbst merken Sie gar nichts. Die Paste lässt sich problemlos durch Waschen der Haare wieder entfernen.

#### **IST MIT IRGENDWELCHEN NEBENWIRKUNGEN ZU RECHNEN?**

Nein, für die geplante EEG-Untersuchung sind keinerlei Nebenwirkungen bekannt und nach dem heutigen Stand der Wissenschaft sind auch keine zu erwarten.

#### **IST DIE TEILNAHME FREIWILLIG? KANN ICH SIE WIDERRUFEN?**

An diesem Forschungsprojekt nehmen Sie freiwillig teil. Ihr Einverständnis können Sie **jederzeit** und ohne Angabe von Gründen widerrufen, auch während der Untersuchung, ohne dass Ihnen daraus Nachteile entstehen.

#### **DATENSCHUTZERKLÄRUNG**

Für diese Untersuchung werden Ihre personenbezogenen Daten, die wir von ihnen erfragen, sowie die Messung der hirnelektrischen Aktivierung gespeichert.

#### **EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG**

Diese Information habe ich gelesen und verstanden. Die Studie wurde mir erklärt, alle auftretenden Fragen wurden ausreichend beantwortet. Ich befinde mich in keinem Abhängigkeitsverhältnis zum Untersucher dieser Studie. Mit der Teilnahme an dieser Studie bin ich ebenso wie mit der evtl. Veröffentlichung der erhobenen Messwerte **in anonymisierter Form** (also ohne Angabe meines Namens) in wissenschaftlichen Fachzeitschriften einverstanden. Ich stimme zu, dass zu diesem Zweck persönliche Daten gespeichert werden, und ich bei Bedarf noch einmal kontaktiert werde. Ich wurde darüber informiert, dass ich die Studie jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen kann, ohne dass mir daraus irgendwelche Nachteile entstehen. Ich erkläre mich somit freiwillig bereit, an der oben beschriebenen Studie teilzunehmen.

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Proband

\_\_\_\_\_  
Untersucher

**A3) Informationstext zu Experiment 3**

**Universitätsklinikum Würzburg**  
Klinikum der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität

**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**  
Direktor: Prof. Dr. Dr. h. c. (Univ. Asunción) H. Beckmann

**Unabhängige Nachwuchsgruppe: Genomische  
Bildgebung**  
Leiter: Dr. Martin J. Herrmann, Dipl.-Psych.

Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie  
Füchslinstraße 15 97080 Würzburg  
www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging



Nachrichtlich:

Ihre Nachricht vom:

Unser Zeichen:

Telefon: (0931) 201 - 76310

Würzburg, 18.  
Dezember 2008

Ihr Zeichen:

Telefax: (0931) 201 - 77550

Herrmann\_M@klinik.uni-wuerzburg.de

## AUFKLÄRUNG UND EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG

### ZUR TEILNAHME AN EINER UNTERSUCHUNG DER HIRNDURCHBLUTUNG MIT NAH-INFRAROT-SPEKTROSKOPIE (KONTROLLPERSONEN)

**Name:** \_\_\_\_\_

**Vorname:** \_\_\_\_\_

**Geb.-Datum:** \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.19\_\_\_\_

#### WAS SOLLEN SIE WÄHREND DER UNTERSUCHUNG TUN?

Ihre Aufgabe ist es, für ca. 20 Minuten aufmerksam Bilder von Gesichtern auf einem Computermonitor zu betrachten und auf bestimmte Bilder mit Tastendruck zu reagieren. Während dessen wird Ihre Gehirnaktivität mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie gemessen. Die Untersuchung findet im neurophysiologischen Labor für Psychophysiologie und funktionelle Bildgebung der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie statt und dauert insgesamt ca. 45 Minuten.

Klinik und Poliklinik  
für Psychiatrie und  
Psychotherapie  
Füchslinstr. 15  
97080 Würzburg

Tel.: (09 31) 201 – 7 60 00  
Fax: (09 31) 201 – 7 70 20  
beckmann@mail.uni-wuerzburg.de  
www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging



## Fortsetzung

### Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie

Direktor: Prof. Dr. Dr. h.c. H. Beckmann

18.12.2008



Nein. Die geplante Untersuchung ist nicht-invasiv, das heißt, es werden keinerlei Eingriffe am Körper vorgenommen. Die Nah-Infrarot-Spektroskopie wird seit über 20 Jahren am Menschen angewandt, Nebenwirkungen sind bisher auch bei ununterbrochener Messung über mehrere Tage nicht aufgetreten.

### IST DIE TEILNAHME FREIWILLIG? KANN ICH SIE WIDERRUFEN?

Die Teilnahme an dieser Studie ist absolut freiwillig. Sie können Ihre Teilnahme auch **jederzeit** während der Untersuchung widerrufen, ohne dass Ihnen daraus irgendwelche Nachteile entstehen.

### EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG

Diese Information habe ich gelesen und verstanden. Die Studie wurde mir vom Versuchsleiter erklärt, alle auftretenden Fragen wurden ausreichend beantwortet. Mit der Durchführung der Untersuchung sowie einer Speicherung, Verarbeitung und evtl. Veröffentlichung der erhobenen Meßwerte **in anonymisierter Form** (also ohne Angabe meines Namens) in wissenschaftlichen Fachzeitschriften bin ich einverstanden. Ich wurde darüber informiert, dass ich die Studie jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen kann. Ich erkläre mich somit freiwillig bereit, an der oben beschriebenen Studie teilzunehmen.

---

Datum

---

Unterschrift der VP

---

Unterschrift des VL

**A4) Informationstext zu Experiment 4a**

**Universitätsklinikum Würzburg**  
Klinikum der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität



**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**  
Direktor: Prof. J. Deckert

**Unabhängige Nachwuchsgruppe: Genomische Bildgebung**  
Leiter: Dr. Martin J. Herrmann, Dipl.-Psych.

Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie  
Füchslinstraße 15 97080 Würzburg  
[www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging](http://www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging)

Nachrichtlich:

Ihre Nachricht vom:	Unser Zeichen:	Telefon: (0931) 201 - 76650	Würzburg, 18. Dezember 2008
Ihr Zeichen:		Telefax: (0931) 201 - 77550 Herrmann_M@klinik.uni-wuerzburg.de	

## AUFKLÄRUNG UND EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG

### ZUR TEILNAHME AN EINER KOMBINIERTEN EEG- UND NIRS-UNTERSUCHUNG (ERFASSUNG DER NEURONALEN AKTIVIERUNG UND DER HIRNDURCHBLUTUNG)

**Name:** \_\_\_\_\_

**Vorname:** \_\_\_\_\_

**Geb.-Datum:** \_\_\_\_\_ .19 \_\_\_\_

#### WAS SOLLEN SIE WÄHREND DER UNTERSUCHUNG TUN?

Ihre Aufgabe ist es, für ca. 30 Minuten aufmerksam Bilder von Gesichtern auf einem Computermonitor zu betrachten und auf bestimmte Bilder mit Tastendruck zu reagieren. Während dessen wird Ihre Gehirnaktivität mittels dem Elektroenzephalogramm (EEG) und der Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) gemessen. Die Untersuchung findet im neuro-physiologischen Labor für Psychophysiologie und funktionelle Bildgebung der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie statt und dauert insgesamt ca. 90 Minuten.

#### WORUM HANDELT ES SICH BEIM EEG?

Mit dem EEG werden an der Kopfoberfläche die schwachen elektrischen Ströme gemessen,

Klinik und Poliklinik  
für Psychiatrie und  
Psychotherapie  
Füchslinstr. 15  
97080 Würzburg

Tel.: (09 31) 201 – 7 60 00  
Fax: (09 31) 201 – 7 70 20  
[www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging](http://www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging)



## Fortsetzung

**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**  
Direktor: Prof. J. Deckert

18.12.2008



mit denen das Gehirn arbeitet. Hierfür werden Ihnen mit Hilfe einer Paste Messelektroden auf die Kopfhaut gelegt. Von der Hirnstrommessung selbst merken Sie gar nichts. Die Paste lässt sich problemlos durch Waschen der Haare wieder entfernen.

### **WORUM HANDELT ES SICH BEI DER NAH-INFRAROT-SPEKTROSKOPIE?**

Die Nah-Infrarot-Spektroskopie ist ein nicht-eingreifendes Untersuchungsverfahren, mit dem die Durchblutung des Gehirns gemessen werden kann. Dazu werden Messinstrumente in einer Gummipatte auf die Kopfhaut gelegt und mit einem Gummiband befestigt. Über diese Messinstrumente wird nun unschädliches Licht genau festgelegter Wellenlängen in das Kopfinnere abgegeben und die Menge an reflektiertem Licht gemessen. Aus diesem Messergebnis können dann Durchblutungsänderungen des Gehirns errechnet werden.

### **IST MIT IRGENDWELCHEN NEBENWIRKUNGEN ZU RECHNEN?**

Nein. Die geplante Untersuchung ist nicht-invasiv, das heißt, es werden keinerlei Eingriffe am Körper vorgenommen. Weder für die EEG- noch für die NIRS-Messung sind Nebenwirkungen bekannt. Die Nah-Infrarot-Spektroskopie wird seit über 20 Jahren am Menschen angewandt, Nebenwirkungen sind bisher auch bei ununterbrochener Messung über mehrere Tage nicht aufgetreten.

### **IST DIE TEILNAHME FREIWILLIG? KANN ICH SIE WIDERRUFEN?**

Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können Ihre Teilnahme **jederzeit**, auch während der Untersuchung, widerrufen, ohne dass Ihnen daraus irgendwelche Nachteile entstehen.

### **EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG**

Diese Information habe ich gelesen und verstanden. Die Studie wurde mir vom Versuchsleiter erklärt, alle auftretenden Fragen wurden ausreichend beantwortet. Ich befinde mich in keinem Abhängigkeitsverhältnis zum Untersucher dieser Studie. Mit der Durchführung der Untersuchung sowie einer Speicherung, Verarbeitung und evtl. Veröffentlichung der erhobenen Messwerte **in anonymisierter Form** (also ohne Angabe meines Namens) in wissenschaftlichen Fachzeitschriften bin ich einverstanden. Ich stimme zu, dass zu diesem Zweck persönliche Daten gespeichert werden, und ich bei Bedarf noch einmal kontaktiert werde. Ich wurde darüber informiert, dass ich die Studie jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen kann, ohne dass mir daraus irgendwelche Nachteile entstehen. Ich erkläre mich somit freiwillig bereit, an der oben beschriebenen Studie teilzunehmen.

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift der VP

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des VL

**A5) Informationstext zu Experiment 4b**

**Universitätsklinikum Würzburg**  
Klinikum der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität

**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**  
Direktor: Prof. J. Deckert

**Unabhängige Nachwuchsgruppe: Genomische  
Bildgebung**

Leiter: Dr. Martin J. Herrmann, Dipl.-Psych.

Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie  
Füchslinstraße 15 97080 Würzburg  
www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging



Nachrichtlich:

Ihre Nachricht vom:

Unser Zeichen:

Telefon: (0931) 201 - 76650

Würzburg, 18.  
Dezember 2008

Ihr Zeichen:

Telefax: (0931) 201 - 77550

Herrmann\_M@klinik.uni-wuerzburg.de

**AUFKLÄRUNG UND EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG  
ZUR TEILNAHME AN EINER NIRS-UNTERSUCHUNG  
(ERFASSUNG DER HIRNDURCHBLUTUNG)**

**Name:** \_\_\_\_\_

**Vorname:** \_\_\_\_\_

**Geb.-Datum:** \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.19\_\_\_\_

**WAS SOLLEN SIE WÄHREND DER UNTERSUCHUNG TUN?**

Ihre Aufgabe ist es, für ca. 30 Minuten aufmerksam Bilder von Gesichtern auf einem Computermonitor zu betrachten und auf bestimmte Bilder mit Tastendruck zu reagieren. Während dessen wird Ihre Gehirnaktivität mittels der Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) gemessen. Die Untersuchung findet im neuro-physiologischen Labor für Psychophysiologie und funktionelle Bildgebung der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie statt und dauert insgesamt ca. 60 Minuten.

Klinik und Poliklinik  
für Psychiatrie und  
Psychotherapie  
Füchslinstr. 15  
97080 Würzburg

Tel.: (09 31) 201 – 7 60 00  
Fax: (09 31) 201 – 7 70 20  
deckert@mail.uni-wuerzburg.de  
www.uni-wuerzburg.de/nervenklinik/GenomicImaging



## Fortsetzung

**Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie**

Direktor: Prof. J. Deckert

18.12.2008



### **WURUM HANDELT ES SICH BEI DER NAH-INFRAROT-SPEKTROSKOPIE?**

Die Nah-Infrarot-Spektroskopie ist ein nicht-eingreifendes Untersuchungsverfahren, mit dem die Durchblutung des Gehirns gemessen werden kann. Dazu werden Messinstrumente in einer Gummipatte auf die Kopfhaut gelegt und mit einem Gummiband befestigt. Über diese Messinstrumente wird nun unschädliches Licht genau festgelegter Wellenlängen in das Kopfinnere abgegeben und die Menge an reflektiertem Licht gemessen. Aus diesem Messergebnis können dann Durchblutungsänderungen des Gehirns errechnet werden.

### **IST MIT IRGENDWELCHEN NEBENWIRKUNGEN ZU RECHNEN?**

Nein. Die geplante Untersuchung ist nicht-invasiv, das heißt, es werden keinerlei Eingriffe am Körper vorgenommen. Die Nah-Infrarot-Spektroskopie wird seit über 20 Jahren am Menschen angewandt, Nebenwirkungen sind bisher auch bei ununterbrochener Messung über mehrere Tage nicht aufgetreten.

### **IST DIE TEILNAHME FREIWILLIG? KANN ICH SIE WIDERRUFEN?**

Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können Ihre Teilnahme **jederzeit**, auch während der Untersuchung, widerrufen, ohne dass Ihnen daraus irgendwelche Nachteile entstehen.

### **EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG**

Diese Information habe ich gelesen und verstanden. Die Studie wurde mir vom Versuchsleiter erklärt, alle auftretenden Fragen wurden ausreichend beantwortet. Ich befinde mich in keinem Abhängigkeitsverhältnis zum Untersucher dieser Studie. Mit der Durchführung der Untersuchung sowie einer Speicherung, Verarbeitung und evtl. Veröffentlichung der erhobenen Messwerte **in anonymisierter Form** (also ohne Angabe meines Namens) in wissenschaftlichen Fachzeitschriften bin ich einverstanden. Ich stimme zu, dass zu diesem Zweck persönliche Daten gespeichert werden, und ich bei Bedarf noch einmal kontaktiert werde. Ich wurde darüber informiert, dass ich die Studie jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen kann, ohne dass mir daraus irgendwelche Nachteile entstehen. Ich erkläre mich somit freiwillig bereit, an der oben beschriebenen Studie teilzunehmen.

---

Datum

---

Unterschrift der VP

---

Unterschrift des VL

**A6) Schriftliche Instruktion der Probanden zu Experiment 4a und b****Instruktion****(002\_TH\_f1)**

Im Folgenden sehen Sie verschiedene Bilder auf dem Computemonitor, einige davon sollen Sie sich merken und andere ignorieren. Ihre Aufgabe ist es, auf zu merkende relevante Bilder zu reagieren; auf irrelevante zu ignorierende Bilder erfolgt keine Reaktion.

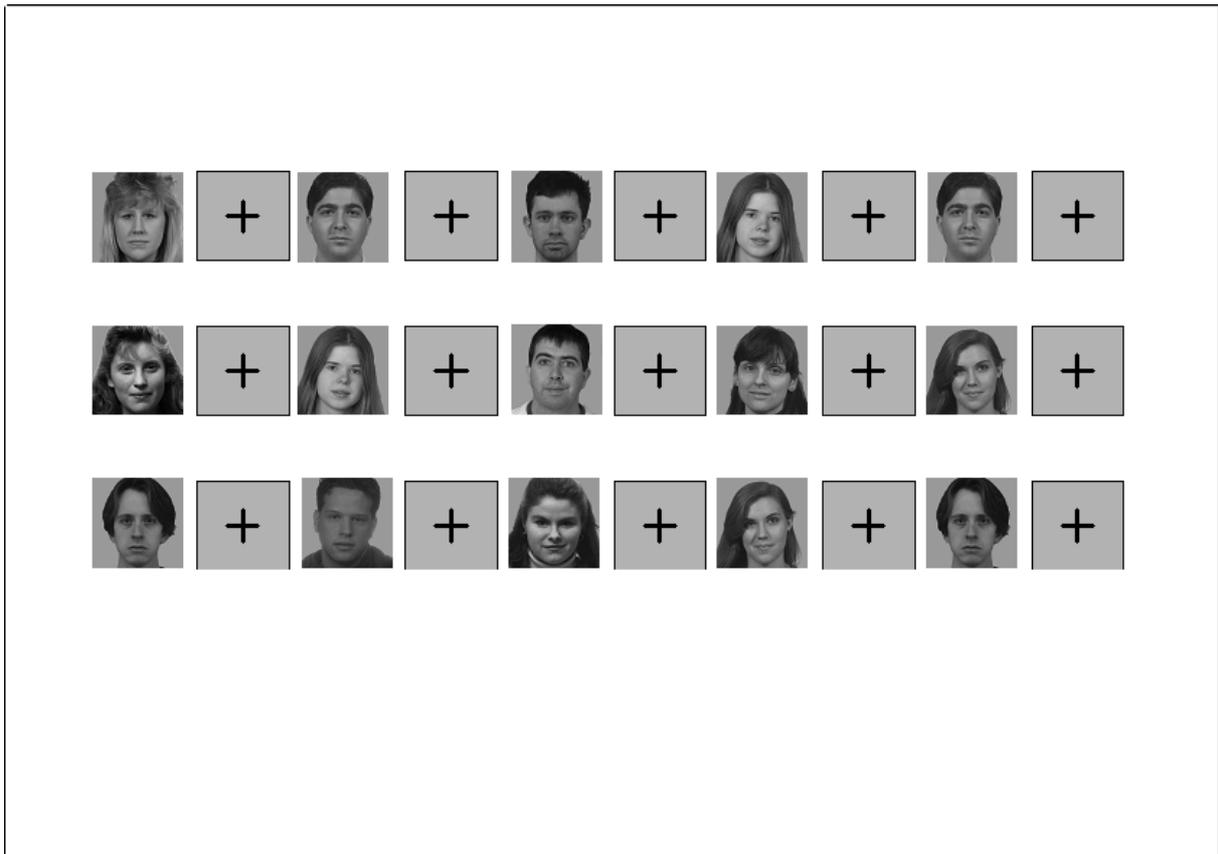
Entspricht ein relevantes Bild dem Bild, das zwei relevante Stimuli zuvor präsentiert wurde, dann drücken Sie bitte die **linke** Strg-Taste, bei allen anderen relevanten Bildern drücken Sie bitte die **rechte** Strg-Taste.

Diese Aufgabe wird Ihnen in drei Variationen präsentiert:

1. Achten Sie auf die weiblichen Gesichter und ignorieren Sie die Männlichen.
2. Achten Sie auf die weiblichen Gesichter und ignorieren Sie die Landschaften.
3. Betrachten Sie weibliche und männliche Gesichter passiv. Reagieren Sie auf graue Kreuze mit der **rechten** Strg-Taste und auf weiße Kreuze mit der **linken** Strg-Taste.

Die Aufgaben 1) und 2) werden zwei Mal präsentiert, Aufgabe 3) nur ein Mal. Die Aufgabenreihenfolge ist zufällig. Nach jeder Aufgabe gibt es eine kurze Pause in der Sie sich entspannen und Fragen stellen können. Insgesamt dauert die Messung 30 Minuten. Versuchen Sie genau zu arbeiten und Fehler zu vermeiden.

Bitte suchen Sie sich jeweils vor Beginn einer Aufgabe eine bequeme Sitzposition, so dass Sie während der Aufgabenbearbeitung größere Bewegungen der Arme oder Beine vermeiden können. Entspannen Sie Ihre Stirn, Ihren Kiefer und den Nackenbereich und versuchen Sie nur zwischen der Präsentation von Bildern zu blinzeln. Vermeiden Sie tiefes Einatmen oder Seufzen.

**A7) Übungsblatt für die Experimente 4a und b**

**A8) Varianzanalytische NIRS Auswertung zu Experiment 1, Datenerhebung 2**

*Tabelle A1:* ANOVA für [O<sub>2</sub>Hb] der ROI 1 (rechte Hemisphäre) mit den Faktoren Bedingung (Alertness, motorische und visuelle Kontrolle) und Kanal (#33, #43, #44).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Bedingung	2, 44	8.21	0.03
HE Kanal	2, 44	1.33	0.27
WW Bedingung * Kanal	4, 88	2.10	0.11

*Tabelle A2:* ANOVA für [O<sub>2</sub>Hb] der ROI 2 (linke Hemisphäre) mit den Faktoren Bedingung (Alertness, motorische und visuelle Kontrolle) und Kanal (#39, #40, #50).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Bedingung	2, 44	4.54	0.02
HE Kanal	2, 44	1.30	0.28
WW Bedingung * Kanal	4, 88	3.72	0.03

*Tabelle A3:* ANOVA für [HHb] der ROI 1 (rechte Hemisphäre) mit den Faktoren Bedingung (Alertness, motorische und visuelle Kontrolle) und Kanal (#33, #43, #44).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Bedingung	2, 44	5.24	0.02
HE Kanal	2, 44	0.97	0.38
WW Bedingung * Kanal	4, 88	0.61	0.58

*Tabelle A4:* ANOVA für [HHb] der ROI 2 (linke Hemisphäre) mit den Faktoren Bedingung (Alertness, motorische und visuelle Kontrolle) und Kanal (#39, #40, #50).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Bedingung	2, 44	3.21	0.06
HE Kanal	2, 44	2.67	0.10
WW Bedingung * Kanal	4, 88	3.73	0.02

**A9) Varianzanalytische EEG Auswertung zu Experiment 2: okzipitale Elektroden**

*Tabelle A5:* ANOVA für die Amplitude der N170 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet), Hemisphäre (links, rechts) und Position (temporal, okzipital).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 30	8.21	0.00
HE Hemisphäre	1, 15	0.60	0.45
HE Position	1, 15	35.45	0.00
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 30	2.00	0.16
WW Relevanz * Position	2, 30	10.08	0.00
WW Hemisphäre * Position	1, 15	1.72	0.21
WW Position * Hemisphäre * Relevanz	2, 30	0.63	0.50

*Tabelle A6:* ANOVA für die Latenz der N170 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet), Hemisphäre (links, rechts) und Position (temporal, okzipital).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 30	0.56	0.56
HE Hemisphäre	1, 15	0.07	0.79
HE Position	1, 15	0.51	0.49
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 30	0.13	0.83
WW Relevanz * Position	2, 30	0.92	0.40
WW Hemisphäre * Position	1, 15	0.19	0.67
WW Position * Hemisphäre * Relevanz	2, 30	0.67	0.42

*Tabelle A7:* ANOVA für die Amplitude der P100 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet) und Hemisphäre (links, rechts).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 30	0.71	0.50
HE Hemisphäre	1, 15	3.71	0.07
WW Hemisphäre * Relevanz	2, 30	2.92	0.07

*Tabelle A8:* ANOVA für die Latenz der P100 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet) und Hemisphäre (links, rechts).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 30	0.18	0.80
HE Hemisphäre	1, 15	0.12	0.73
WW Hemisphäre * Relevanz	2, 30	0.29	0.70

**A10) Varianzanalytische EEG Auswertung zu Experiment 2: frontale Elektroden**

*Tabelle A9:* ANOVA für die Epoche 1 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet), Hemisphäre (links, rechts) und Position (temporal, okzipital).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 30	4.99	0.14
HE Hemisphäre	1, 15	0.15	0.70
HE Position	1, 15	32.01	0.00
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 30	1.08	0.35
WW Relevanz * Position	2, 30	1.95	0.16
WW Hemisphäre * Position	1, 15	0.10	0.76
WW Position * Hemisphäre * Relevanz	2, 30	1.05	0.36

*Tabelle A10:* ANOVA für die Epoche 2 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet), Hemisphäre (links, rechts) und Position (temporal, okzipital).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 30	16.36	0.00
HE Hemisphäre	1, 15	0.00	0.99
HE Position	1, 15	3.37	0.09
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 30	0.08	0.96
WW Relevanz * Position	2, 30	1.18	0.32
WW Hemisphäre * Position	1, 15	0.00	0.96
WW Position * Hemisphäre * Relevanz	2, 30	0.04	0.94

*Tabelle A11:* ANOVA für die Epoche 3 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet), Hemisphäre (links, rechts) und Position (temporal, okzipital).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 30	2.86	0.07
HE Hemisphäre	1, 15	0.24	0.63
HE Position	1, 15	1.03	0.33
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 30	0.11	0.89
WW Relevanz * Position	2, 30	0.88	0.42
WW Hemisphäre * Position	1, 15	0.31	0.58
WW Position * Hemisphäre * Relevanz	2, 30	0.08	0.91

**A11) Varianzanalytische EEG Auswertung zu Experiment 4a**

*Tabelle A12:* ANOVA für die Amplitude der N170 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet), Hemisphäre (links, rechts) und Position (temporal, okzipital).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 38	2.15	0.14
HE Hemisphäre	1, 19	1.09	0.31
HE Position	1, 19	24.69	0.00
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 38	0.95	0.40
WW Relevanz * Position	2, 38	0.96	0.39
WW Hemisphäre * Position	1, 19	0.07	0.80
WW Relevanz * Hemisphäre * Position	2, 38	0.69	0.48

*Tabelle A13:* ANOVA für die Latenz der N170 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet), Hemisphäre (links, rechts) und Position (temporal, okzipital).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 38	5.18	0.01
HE Hemisphäre	1, 19	0.04	0.83
HE Position	1, 19	0.00	0.99
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 38	1.63	0.21
WW Relevanz * Position	2, 38	0.73	0.48
WW Hemisphäre * Position	1, 19	0.06	0.81
WW Relevanz * Hemisphäre * Position	2, 38	0.54	0.58

*Tabelle A14:* ANOVA für die Amplitude der P100 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet) und Hemisphäre (links, rechts).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 38	1.48	0.24
HE Hemisphäre	1, 19	1.60	0.22
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 38	0.91	0.40

*Tabelle A15:* ANOVA für die Latenz der P100 mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet) und Hemisphäre (links, rechts).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 38	1.84	0.18
HE Hemisphäre	1, 19	2.72	0.12
WW Relevanz * Hemisphäre	2, 38	0.65	0.52

**A12) Varianzanalytische NIRS Auswertung zu Experiment 4a**

*Tabelle A16:* ANOVA für [O<sub>2</sub>Hb] mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet) und Kanal (52).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 36	4.40	0.03
HE Kanal	51, 918	6.96	0.00
WW Relevanz * Kanal	102, 1836	2.16	0.03

*Tabelle A17:* ANOVA für [HHb] mit den Faktoren Relevanz der Stimuli (beachtet, ignoriert, passiv betrachtet) und Kanal (52).

Quelle	df	F	Signifikanz
HE Relevanz	2, 36	0.39	0.68
HE Kanal	51, 918	2.51	0.16
WW Relevanz * Kanal	102, 1836	1.22	0.29