

André Jörg Szameitat: Die Funktionalität des lateral-präfrontalen Cortex für die Verarbeitung von Doppelaufgaben. Leipzig: Max Planck Institute of Cognitive Neuroscience, 2003 (MPI Series in Cognitive Neuroscience; 32)

---



# Die Funktionalität des lateral-präfrontalen Cortex für die Verarbeitung von Doppelaufgaben

Von der Fakultät für Biowissenschaften, Pharmazie und Psychologie  
der Universität Leipzig genehmigte

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum naturalium  
Dr. rer. nat.,

vorgelegt von  
Diplom-Psychologe André Jörg Szameitat  
geboren am 17. April 1975 in Braunschweig

Dekan:  
Prof. Dr. Kurt Eger

Gutachter:  
Prof. Dr. D. Yves von Cramon  
Prof. Dr. Axel Mecklinger  
Prof. Dr. Stefan Pollmann

Tag der Verteidigung: 12. Dezember 2002



# Danksagung

Viele Personen haben auf unterschiedlichste Weise durch ihre tatkräftige Unterstützung am Entstehen dieser Arbeit mitgewirkt.

Mein größter Dank gebührt Dr. Torsten Schubert und Prof. Dr. D. Yves von Cramon, die mich in ihrer Eigenschaft als Betreuer umfangreich unterstützt und gefördert haben. Durch viele konstruktive Anregungen und Diskussionen haben sie mir geholfen, eigene Ideen zu entwickeln und diese Arbeit zu erstellen.

Weiterhin möchte ich einen großen Dank an PD Dr. Gabriele Lohmann und Dr. Karsten Müller aussprechen, die nicht nur die fMRT-Analyse-Software zur Verfügung gestellt haben, sondern mir auch durch zahlreiche intensive Diskussionen die Hintergründe der Analysetechniken näher gebracht haben. Ebenso bedanke ich mich bei Bettina Johst, Anke Mempel, Mandy Naumann, Anke Pitzmaus und Kathrin Wiesner für ihre Hilfe bei der Datenerhebung und Andrea Gast-Sandmann und Stefan Liebig für ihre Hilfe bei der Erstellung von Präsentationen und Abbildungen.

Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Max-Planck-Instituts für neuropsychologische Forschung in Leipzig für ihre vielfältige Unterstützung. Insbesondere bedanke ich mich herzlichst bei Marcel Braß, Evelyn Ferstl, Oliver Gruber, Grit Hein, Jöran Lepsien, Stefan Pollmann, Ricarda Schubotz, Markus Ullsperger und Stefan Zysset, die mir immer mit fachkundigem Rat bei Seite standen und so zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein spezieller Dank gebührt Prof. Dr. Dirk Vorberg der Technischen Universität Braunschweig, der mir gezeigt hat, wie interessant, spannend und erfüllend die Arbeit in der Forschung sein kann. Ohne seinen Einfluß wäre ich diesen Weg nicht gegangen.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern und bei meinen Freunden bedanken, die mich immer bedingungslos in meinem Weg unterstützt haben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Der LPFC und die Verarbeitung von Doppelaufgaben</b>	<b>5</b>
2.1	Neuroanatomie des lateral-frontalen Cortex . . . . .	5
2.2	LPFC und exekutive Funktionen . . . . .	7
2.3	LPFC und Doppelaufgaben: Patientenstudien . . . . .	10
2.3.1	Evidenzen für einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung . . . . .	10
2.3.2	Evidenzen gegen einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung . . . . .	11
2.3.3	Methodische Probleme neuropsychologischer Studien . . . . .	12
2.4	LPFC und Doppelaufgaben: Bildgebende Studien . . . . .	14
2.4.1	Evidenzen für einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung . . . . .	15
2.4.2	Evidenzen gegen einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung . . . . .	17
2.4.3	Mögliche Ursachen der divergierenden Befunde . . . . .	20
2.4.4	Implikationen für die Studien dieser Arbeit . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>25</b>
3.1	Einleitung . . . . .	25
3.2	Zusätzliche Anforderungen in Doppelaufgaben . . . . .	26
3.2.1	Koordination der Verarbeitung . . . . .	26
3.2.2	Gedächtnisbelastung . . . . .	26
3.2.3	Geteilte Aufmerksamkeit . . . . .	27
3.2.4	Zusammenfassung . . . . .	27
3.3	PRP-Paradigma . . . . .	28
3.3.1	Einführung . . . . .	28
3.3.2	RSB-Theorie . . . . .	30

3.3.3	Vorteile des Paradigmas . . . . .	31
3.4	Zusätzliche Anforderungen im PRP-Paradigma . . . . .	31
3.4.1	Reihenfolge-Koordination und Einstellen des Flaschenhalses . . .	32
3.4.2	Zusätzliche Anforderungen auf Basis theoretischer Modelle . . .	34
3.4.3	Das Modell von Norman & Shallice . . . . .	36
3.4.4	Resümee . . . . .	37
3.5	Zusammenfassung . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Allgemeine Fragestellung</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>Funktionelle MRT</b>	<b>43</b>
5.1	Magnetresonanztomographie . . . . .	43
5.2	Funktionelle Magnetresonanztomographie . . . . .	44
5.2.1	Physiologische Grundlagen . . . . .	44
5.2.2	Der BOLD-Effekt . . . . .	45
5.3	Prozedur der FMRT-Messungen . . . . .	46
5.4	Logik der FMRT-Experimente . . . . .	47
5.5	Auswertung der FMRT-Daten . . . . .	47
5.5.1	Vorverarbeitung . . . . .	48
5.5.2	Registrierung . . . . .	48
5.5.3	Statistische Auswertung . . . . .	49
5.5.4	Visualisierung . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Experiment 1</b>	<b>53</b>
6.1	Einleitung . . . . .	53
6.2	Methode . . . . .	55
6.2.1	Probanden . . . . .	55
6.2.2	Versuchsplan . . . . .	56
6.2.3	Material . . . . .	56
6.2.4	Aufgaben . . . . .	56
6.2.5	Übungssitzung . . . . .	59
6.2.6	Versuchsdurchführung . . . . .	59
6.2.7	MRT Daten-Erfassung . . . . .	59
6.2.8	MRT-Auswertung . . . . .	60
6.3	Ergebnisse . . . . .	60
6.3.1	Behaviorale Ergebnisse . . . . .	60
6.3.2	FMRT Ergebnisse . . . . .	62
6.4	Diskussion . . . . .	66

---

6.4.1	Lateral-präfrontale Areale . . . . .	66
6.4.2	Frontomediane Areale . . . . .	70
6.4.3	Parietale Areale . . . . .	71
6.4.4	Sonstige Areale . . . . .	72
6.4.5	LPFC und Einzelaufgaben-Verarbeitung . . . . .	72
6.4.6	Limitationen der Interpretation . . . . .	72
6.4.7	Zusammenfassung . . . . .	73
<b>7</b>	<b>Experiment 2</b>	<b>75</b>
7.1	Einleitung . . . . .	75
7.2	Methode . . . . .	77
7.2.1	Aufgaben . . . . .	77
7.2.2	Übungssitzung . . . . .	79
7.2.3	Versuchsdurchführung . . . . .	79
7.2.4	MRT Daten-Erfassung . . . . .	79
7.2.5	MRT-Auswertung . . . . .	79
7.3	Ergebnisse . . . . .	80
7.3.1	Behaviorale Ergebnisse . . . . .	80
7.3.2	FMRT Ergebnisse . . . . .	82
7.4	Diskussion . . . . .	89
7.4.1	Spezifikation der Prozesse . . . . .	90
7.4.2	Zusammenfassung . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Experiment 3</b>	<b>93</b>
8.1	Einleitung . . . . .	93
8.2	Vorexperiment . . . . .	95
8.3	Methode . . . . .	95
8.3.1	Probanden . . . . .	95
8.3.2	Aufgaben . . . . .	96
8.3.3	Übungssitzung . . . . .	97
8.3.4	Versuchsdurchführung und -design . . . . .	98
8.3.5	MRT Daten-Erfassung . . . . .	99
8.3.6	MRT-Auswertung . . . . .	99
8.4	Ergebnisse . . . . .	99
8.4.1	Behaviorale Ergebnisse . . . . .	99
8.4.2	FMRT Ergebnisse . . . . .	100
8.5	Diskussion . . . . .	101



<b>9 Experiment 4</b>	<b>105</b>
9.1 Einleitung . . . . .	105
9.2 Vorexperiment . . . . .	107
9.3 Methode . . . . .	108
9.3.1 Aufgaben . . . . .	108
9.3.2 Übungssitzung . . . . .	109
9.3.3 Versuchsdurchführung . . . . .	109
9.3.4 MRT Daten-Erfassung . . . . .	110
9.3.5 MRT-Auswertung . . . . .	110
9.4 Ergebnisse . . . . .	110
9.4.1 Behaviorale Ergebnisse . . . . .	110
9.4.2 FMRT Ergebnisse . . . . .	111
9.4.3 ROI-Analysen . . . . .	117
9.5 Diskussion . . . . .	118
9.5.1 Graduelle Überlappungsunterschiede: SOA 100 ms und SOA 300 ms . . . . .	118
9.5.2 Absolute Überlappungsunterschiede: SOA 800 ms . . . . .	122
9.5.3 Zusammenfassung . . . . .	125
<b>10 Allgemeine Diskussion</b>	<b>127</b>
10.1 Identifikation doppelaufgaben-relatierter Areale . . . . .	127
10.2 Lokalisation doppelaufgaben-relatierter Areale . . . . .	129
10.2.1 Lateral-präfrontaler Cortex . . . . .	129
10.2.2 Parietaler Cortex . . . . .	130
10.2.3 Resümee . . . . .	130
10.3 Funktionalität doppelaufgaben-relatierter Areale . . . . .	131
10.3.1 Allgemeine Funktionalität . . . . .	131
10.3.2 Lateral-präfrontaler Cortex . . . . .	131
10.3.3 Superior-parietaler Cortex . . . . .	134
10.4 Arbeitsweise doppelaufgaben-relatierter Areale . . . . .	135
10.5 Das Modell von Norman & Shallice . . . . .	136
10.6 Bezug zu bisherigen Studien . . . . .	137
10.6.1 Bildgebende Studien . . . . .	137
10.6.2 Patientenstudien . . . . .	139
10.7 Aufgabenschwierigkeit . . . . .	140
10.8 Resümee und Ausblick . . . . .	141
<b>Literatur</b>	<b>143</b>

---

<b>Abkürzungen</b>	<b>163</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>165</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>166</b>
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>167</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Im Alltag begegnen wir oft Situationen, in denen verschiedene Handlungen miteinander kombiniert werden müssen, um sinnvolles, kohärentes und zielgerichtetes Verhalten zu zeigen. Ein typisches Beispiel ist die Zubereitung einer Mahlzeit, in der verschiedene Teilschritte in einer vorgegebenen Reihenfolge kombiniert werden müssen (Kimberg et al., 1997). So muß darauf geachtet werden, daß das Gemüse gesäubert wird, *bevor* es gekocht wird. Bei der Zubereitung größerer Mahlzeiten, wie eines Menüs, kommt häufig die Anforderung hinzu, verschiedene Verarbeitungsschritte gleichzeitig zu koordinieren und zu überwachen. So ist es durchaus angebracht, während des Gemüse-Säuberns darauf zu achten, daß die Kartoffeln nicht überkochen, das Fleisch in der Pfanne rechtzeitig gewendet wird und das Dessert im Backofen nicht verbrennt. Mit anderen Worten, es besteht die Anforderung, die Bearbeitung mehrerer Aufgaben sinnvoll zu koordinieren.

Allgemein wird angenommen, daß solch eine komplexe Verhaltenssteuerung durch den lateral-präfrontalen Cortex (LPFC) ermöglicht wird (z. B. Duncan, 2001; Fuster, 2000; Passingham, 1996). So haben Patienten mit Läsionen im (prä)frontalen Cortex häufig erhebliche Schwierigkeiten, die Bearbeitung verschiedener Aufgaben selbständig zu koordinieren, obwohl sie mit der Bearbeitung der einzelnen Aufgaben z. T. keine Probleme haben (Shallice & Burgess, 1991).

Aufgrund dieser zentralen Stellung des LPFC für unser alltägliches Verhalten ist eine umfangreiche Forschungsarbeit geleistet worden, die zum Ziel hatte, die Funktionalität des LPFC möglichst genau zu beschreiben. So konnten diesem Areal verschiedene Funktionen zugeordnet werden, die für komplexes Verhalten wichtig sind: Koordination von Aufgaben (D'Esposito et al., 1995), Steuerung von Aufmerksamkeit (Corbetta et al., 1991) und Gedächtnis (Fiez et al., 1996).

Ein prototypisches Paradigma, welches mit komplexer Verhaltenssteuerung in Verbindung gebracht wird und somit geeignet erscheint, den LPFC zu untersuchen, sind

sogenannte Doppelaufgaben. In einer Doppelaufgabe müssen zwei Aufgaben gleichzeitig ausgeführt werden. In solch einer Situation sind fast immer deutliche Leistungseinbußen im Vergleich zur separaten Bearbeitung der Teilaufgaben zu beobachten. Diese Leistungseinbußen sind vermutlich auf eine Unfähigkeit des menschlichen kognitiven Systems zur vollständig parallelen Verarbeitung der Aufgaben zurückzuführen. So stellte William James bereits 1890 fest (S. 409):

„ ... how many ideas or things can we attend to at once ... the answer is, not easily more than one ... there must be a rapid oscillation of the mind from one idea to the next ... “<sup>1</sup>

Diese Einschränkung in der parallelen Verarbeitung resultiert darin, daß die Verarbeitung der Aufgaben koordiniert werden muß. Des weiteren muß in einer Doppelaufgabe die Aufmerksamkeit auf beide Aufgaben aufgeteilt werden. Und schließlich stellt eine Doppelaufgabe erhöhte Anforderungen an das Gedächtnis, da zwei Aufgaben anstatt nur einer aktiv gehalten werden müssen. Somit beinhalten Doppelaufgaben in hohem Maße kognitive Anforderungen, die mit dem LPFC assoziiert worden sind.

Erstaunlicherweise ist die Funktionalität des LPFC für die Verarbeitung einer Doppelaufgabe noch nicht geklärt. Mehr noch, nicht nur die Frage, *was* für eine Funktionalität, sondern darüber hinaus, *ob* er überhaupt eine Funktionalität bei der Verarbeitung von Doppelaufgaben besitzt, ist unbeantwortet und in der Literatur umstritten (z. B. Collette & Van der Linden, 2002). So gibt es zwar einerseits Patienten- und Bildgebungs-Studien, die einen Zusammenhang zwischen (prä-)frontalem Cortex und Doppelaufgaben-Verarbeitung herstellen konnten. Dagegen stehen jedoch Studien, die diesen Zusammenhang nicht beobachtet haben. Des weiteren wird eine Bewertung der Studien durch oft auftretende konzeptuelle und methodische Schwächen erschwert. Entsprechend kann meist nicht entschieden werden, was für Anforderungen in den verwendeten Doppelaufgaben überhaupt auftraten. Somit ist die Funktionalität des LPFC für die Verarbeitung von Doppelaufgaben noch weitgehend ungeklärt.

In dieser Arbeit sollen genau diese Fragen mit Hilfe der Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) untersucht werden: Sind Areale des LPFC an der Verarbeitung von Doppelaufgaben beteiligt? Wenn das der Fall ist, wo genau sind diese Areale im LPFC lokalisiert? Und schließlich, welche spezifische Funktionalität und Charakteristik besitzen sie im Rahmen der Doppelaufgaben-Verarbeitung?

---

<sup>1</sup> „... wie vielen Ideen oder Dingen können wir uns gleichzeitig zuwenden ... die Antwort ist, nicht mehr als einer/einem ... es muß ein schnelles Pendeln der Gedanken zwischen den Ideen geben ...“  
[Übers. d. Verf.]

**Gliederung der Arbeit** Das folgende Kapitel dient zunächst der Charakterisierung des lateral-präfrontalen Cortex. Hierzu werden neben neuroanatomischen Befunden allgemeine Erkenntnisse über die Funktionalität des LPFC diskutiert. An diese Diskussion schließt sich eine ausführliche Betrachtung bisheriger – vor allem bildgebender – Studien an. Diese Studien werden nicht nur im Hinblick auf die funktionelle Neuroanatomie analysiert, sondern auch auf ihren konzeptuellen Rahmen und die verwendeten Methodiken. Aus diesen Betrachtungen soll eine möglichst spezifische funktionell-neuroanatomische Hypothese über den Zusammenhang des LPFC mit der Doppelaufgaben-Verarbeitung hervorgehen. Durch die ausführliche Diskussion der bisherigen bildgebenden Studien sollen gleichzeitig die Anforderungen an ein geeignetes Paradigma abgeleitet werden.

Dieses Paradigma soll im dritten Kapitel vorgestellt werden. Neben der technischen Beschreibung wird besonderer Wert auf die zugrunde liegende Theorie gelegt. Die exakte theoretische Beschreibung soll es ermöglichen, die in der Doppelaufgabe auftretenden Anforderungen bestmöglich zu charakterisieren, so daß entsprechend auch die funktionell-neuroanatomischen Korrelate möglichst spezifisch charakterisiert werden können.

Im vierten Kapitel werden die Erkenntnisse der vorigen zwei Kapitel integriert, um die spezifische Fragestellung dieser Arbeit zu formulieren. Die allgemeine Methode der fMRT und die Analyse der fMRT-Daten wird anschließend im fünften Kapitel beschrieben. Die Kapitel sechs bis neun beschreiben und diskutieren die vier durchgeführten fMRT-Experimente.

Im zehnten Kapitel werden die Befunde der Experimente zusammengeführt und gemeinsam diskutiert. Hier werden allgemeine Schlußfolgerungen und Interpretationen über die Funktionalität des LPFC bei der Verarbeitung von Doppelaufgaben formuliert.



## Kapitel 2

# Der lateral-präfrontale Cortex und die Verarbeitung von Doppelaufgaben

In diesem Kapitel werden zunächst allgemeine neuroanatomische Erkenntnisse über den lateral-frontalen Cortex (LFC) kurz dargestellt. Im Anschluß wird die allgemeine Funktionalität des lateral-präfrontalen Cortex (LPFC) beschrieben. Schließlich soll die spezifische Funktionalität des LPFC für die Verarbeitung von Doppelaufgaben erörtert werden. Diese Erörterung beruht auf den bisher durchgeführten Studien, die Zusammenhänge zwischen lateral-frontalen und Doppelaufgaben-Verarbeitung nachweisen wollten und beinhaltet eine kritische Auseinandersetzung mit den konzeptuellen und methodischen Ansätzen der Studien. Das Ziel ist die Generierung einer funktionell-neuroanatomischen Hypothese zur Doppelaufgaben-Verarbeitung und die Formulierung von Anforderungen an weitere Untersuchungen zu diesem Thema.

### 2.1 Neuroanatomie des lateral-frontalen Cortex

Der lateral-frontale Cortex, der cortikale Areale anterior zum Sulcus centralis umfaßt, kann in drei Kategorien eingeteilt werden (vgl. Kolb & Wishaw, 1996, für einen Überblick): (1) Der motorische Cortex (Brodmann-Areal (BA) 4; Brodmann, 1909) verläuft vor allem entlang des Sulcus centralis, wobei er sich auch etwas in den Gyrus präcentralis ausdehnt (Von Bonin, 1944; White et al., 1997). (2) Anterior zum motorischen Cortex befindet sich der laterale prämotorische Cortex (LPMC), der entlang des Sulcus präcentralis verläuft. Er umfaßt den nicht vom motorischen Cortex eingenommenen Anteil des Gyrus präcentralis und posteriore Teile des Gyrus/Sulcus frontalis superior (z. B. Picard & Strick, 2001, BA 6/8). (3) Der restliche, noch weiter anteriore



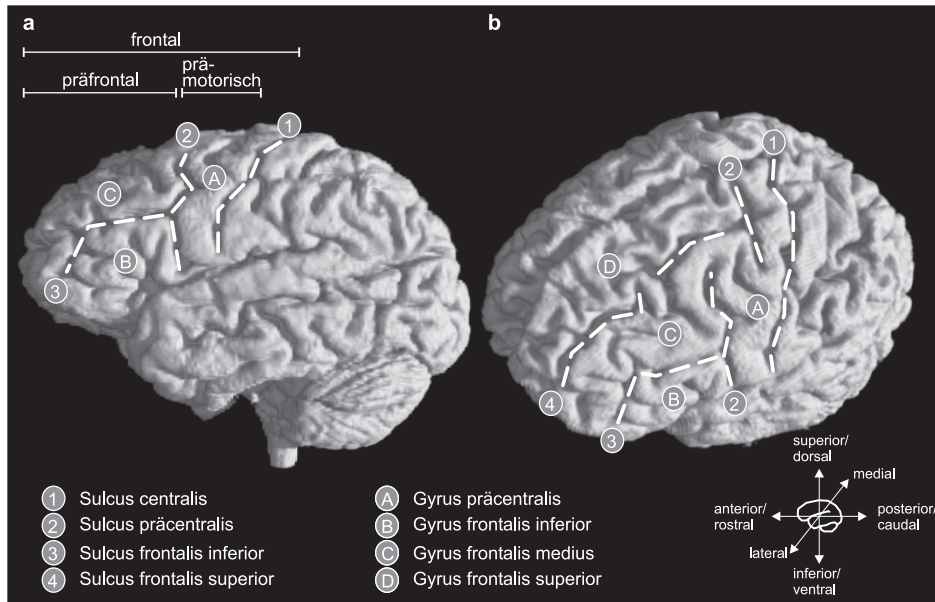


Abbildung 2.1: Anatomie des lateral-frontalen Cortex. **a** Laterale Ansicht der linken Hemisphäre **b** Anterior/superiore Ansicht der linken Hemisphäre. Verläufe der Sulci durch unterbrochene Linien illustriert. Dieses Gehirn wurde für alle Abbildungen dieser Arbeit als anatomische Referenz benutzt.

Cortex wird als lateral-präfrontaler Cortex bezeichnet. Dieser Cortex wird durch die inferioren und superioren frontalen Sulci in die Gyri frontalis inferior, medius und superior unterteilt (Abb. 2.1; BAs 9 – 11/ 44 – 47). Da der motorische Cortex in dieser Arbeit nicht von Interesse ist, soll im Folgenden die Bezeichnung „lateral-frontaler Cortex (LFC)“ nur die Areale des lateral-prämotorischen (LPMC) und lateral-präfrontalen (LPFC) Cortex umfassen.

Während der Sulcus centralis als eindeutige anatomische Landmarke den motorischen Cortex in seiner posterioren Ausdehnung begrenzt (White et al., 1997), sind die anderen hier getroffenen Aussagen eher als grobe Anhaltspunkte zu verstehen. So kann sich z. B. der prämotorische Cortex auch anterior über den Sulcus präcentralis ausdehnen und posteriore Teile der frontalen Gyri und Sulci umfassen (z. B. Fink et al., 1997; Grèzes & Decety, 2001).

Der LPFC besitzt eine extensive Konnektivität mit anderen Hirnarealen, wie z. B. auditorischen und visuellen Assoziationscortices (für detaillierte Überblicke siehe z. B. Barbas & Pandya, 1991; Fuster, 1989; Goldman-Rakic, 1987; Nauta, 1971; Petrides & Pandya, 1999). Diese Verbindungen, die über lange Assoziationsfasern realisiert sind

(z. B. Ebeling & von Cramon, 1992; Petrides & Pandya, 1984), sind häufig reziproker Natur, d. h. im LPFC können verschiedene Informationen nicht nur integriert werden, sondern der LPFC kann auch die Informationsverarbeitung in den Assoziationscortices beeinflussen (z. B. Cohen et al., 1996; Duncan, 2001; Luria, 1980; Miller, 2000; Weinberger, 1993). Diese Konnektivität legt nahe, daß der LPFC zentral für höhere Kognition ist.

## 2.2 LPFC und exekutive Funktionen

Menschen besitzen die Fähigkeit, vielfältiges und flexibles Verhalten zu zeigen. Diese Flexibilität setzt voraus, daß einerseits elaborierte sensorische Systeme detaillierte Informationen der Umwelt erfassen und daß andererseits elaborierte motorische Systeme vielfältige Handlungen zulassen (vgl. Miller & Cohen, 2001). Somit bestehen zu (nahezu) jedem Zeitpunkt verschiedenste Handlungsoptionen. Verschiedene gleichzeitig wahrgenommene Reize können verschiedene Reaktionen auslösen. Diese mannigfaltigen Möglichkeiten führen jedoch zu einem Problem. Je mehr sensorische Information verarbeitet wird, desto wahrscheinlicher ist eine mögliche Interferenz dieser Information, und je mehr Handlungsoptionen zur Verfügung stehen, desto unklarer ist die gegenwärtig optimale Handlung. Der Vorteil der zahlreichen Verhaltensmöglichkeiten führt daher zu erhöhten Anforderungen an Aufmerksamkeit, Entscheidungsfindung und koordinative Funktionen. Um die verschiedenen Verhaltensoptionen zu handhaben und zielgerichtetes, kohärentes Verhalten zu ermöglichen, haben sich Mechanismen entwickelt, die relevante Informationen aktiv halten können, auf der Basis dieser Informationen Handlungsziele etablieren können und basalere sensorische und motorische Prozesse gemäß diesen Handlungszielen beeinflussen können (Duncan, 2001; Luria, 1980; Miller, 2000; Weinberger, 1993). Verschiedene Evidenzen deuten darauf hin, daß dem LPFC eine wichtige Rolle bei der Realisierung dieser Mechanismen zukommt.

So zeigen Patienten mit frontalen Läsionen relativ typische Verhaltensdefizite: Während einfache Aufgaben häufig kein Problem darstellen, führen komplexere Aufgaben, die mit höheren Planungs- oder Koordinations-Anforderungen einhergehen, zu deutlichen Leistungseinbrüchen (z. B. Shallice & Burgess, 1991). Ein prominentes Beispiel für diesen Befund ist die Stroop-Aufgabe (Stroop, 1935). In dieser Aufgabe müssen entweder Farbwörter vorgelesen werden oder es muß die Farbe, in der sie geschrieben sind, benannt werden. Um diese Aufgabe erfolgreich zu bearbeiten, muß die Aufmerksamkeit selektiv auf ein Attribut des Reizes, Wort- oder Farb-Information, gelenkt werden. Das ist besonders gefordert, wenn bei widersprüchlichen Reizen (z. B. das Wort BLAU in roter Farbe) die Farbe benannt werden muß. Hier entsteht zwischen der starken Tendenz,

das Wort zu lesen (BLAU) und der korrekten Antwort auf die Farbe (rot) ein Konflikt (für einen Überblick siehe MacLeod, 1991). In solch einem Fall wird angenommen, daß der LPFC Kontrolle auf die Aufgaben-Verarbeitung ausübt (z. B. Miller & Cohen, 2001; Zysset et al., 2001). Er muß sicherstellen, daß nicht die sich „aufdrängende“ Aufgabe, sondern die schwächere, durch Instruktion geforderte Aufgabe, bearbeitet wird. Entsprechend haben Patienten mit frontalen Läsionen genau in dieser Bedingung Probleme, während sie in Bedingungen mit nicht-widersprüchlichen Reizen (z. B. ROT in rot oder XXXX in rot) keine Probleme haben (z. B. Shallice & Burgess, 1991). Dieses Beispiel verdeutlicht die Aufgabe des LPFC: Information der Umwelt wird integriert und auftretende Interferenz wird so aufgelöst, daß zielgerichtetes Handeln ermöglicht wird.

Neben dieser Aufgaben-Koordination sind weitere Funktionen für den LPFC postuliert worden, die komplexes Verhalten ermöglichen. So ist zunächst Gedächtnis erforderlich, welches ein Aufrechterhalten von Informationen über einen bestimmten Zeitraum ermöglicht, wodurch Verhalten auch durch nicht mehr präsenze Reize gesteuert werden kann. Des weiteren dient ein Teil des Gedächtnisses (Arbeitsgedächtnis) als Arbeitsraum (*workspace*), in dem aktuell zu verarbeitende Informationen aktiv gehalten und manipuliert werden können (Baddeley, 1986). Beide Aspekte, sowohl das kurzzeitige Aufrechterhalten von Informationen, als auch das Manipulieren von Informationen im Arbeitsgedächtnis sind mit lateral-präfrontalen Arealen assoziiert worden (z. B. D’Esposito et al., 1998a; Fiez et al., 1996; Mecklinger et al., 2000; Rypma et al., 1999).

Eine weitere Funktion besteht in der Steuerung von Aufmerksamkeit. Einerseits können saliente Reize die Aufmerksamkeit auf sich ziehen, sie also steuern (*bottom-up control*, z. B. James, 1890; Schröger, 1996). Andererseits kann Aufmerksamkeit aber auch gezielt gesteuert werden, z. B. um sie von einem salienten aber handlungs-irrelevanten Reiz zu lösen und auf einen nicht-salienten aber handlungs-relevanten Reiz zu fokussieren (*top-down control*, z. B. Miller & Cohen, 2001; Pollmann & von Cramon, 2000). Eine weitere komplexe Anforderung an die Aufmerksamkeitssteuerung liegt im Teilen der Aufmerksamkeit, wenn also z. B. auf die auditorische und visuelle Modalität gleichzeitig Aufmerksamkeit fokussiert wird. Bisherige bildgebende Studien deuten darauf hin, daß für die beiden letztgenannten Anforderungen, gezielte reizunabhängige Steuerung und Aufteilung der Aufmerksamkeit, ebenfalls lateral-präfrontale Areale benötigt werden (z. B. Corbetta et al., 1991; Hopfinger et al., 2000).

Für komplexes Verhalten ist ein Zusammenspiel dieser drei Funktionen, Aufgaben-Koordination, Gedächtnis und Aufmerksamkeitssteuerung erforderlich. Entsprechend der aus dem Gedächtnis gewonnenen aktuellen Handlungsziele, die in Laborsituationen

meist durch die Instruktion vorgegeben sind, können die Handlungsoptionen abgewogen werden und die korrekte Handlung initiiert werden, wozu die Aufmerksamkeit auf die handlungsrelevanten Aspekte der Umwelt fokussiert werden muß.

Diese Funktionalität ist in der psychologischen Literatur mit dem Begriff der „exekutiven Funktionen“ zusammengefaßt worden. Im Sinne einer theoretischen kognitiven Architektur wird angenommen, daß exekutive Funktionen hierarchisch übergeordnete Prozesse darstellen, die die Aufgabenverarbeitung beeinflussen können. Diese Annahme ist im Einklang mit verschiedenen Theorien, wovon die populärsten das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley (Baddeley, 1986; Baddeley & Hitch, 1974) und das der Aufmerksamkeitskontrolle von Norman & Shallice (1986) (ausgeführt in Abschnitt 3.4.3, S. 36) sein dürften. In beiden Modellen wird eine übergeordnete Instanz angenommen (*Supervisory Attentional System* (SAS) bei Norman & Shallice und die darauf Bezug nehmende Zentrale Exekutive bei Baddeley), die die Aufgabenverarbeitung so beeinflussen kann, daß aktuelle Handlungsziele berücksichtigt und interferierende Informationen koordiniert werden können.

Entsprechend wird angenommen, daß der präfrontale Cortex für exekutive Funktionen notwendig ist und somit ein neuroanatomisches Korrelat der Zentralen Exekutive und des SAS darstellt (Baddeley, 1996; Norman & Shallice, 1986, vgl. auch Collette & Van der Linden, 2002). Gestützt wird diese Annahme durch die Beobachtung, daß Patienten mit frontalen Läsionen häufig Defizite in neuropsychologischen Tests zeigen, die spezifische Anforderungen an exekutive Funktionen stellen. Defizite in dieser Kategorie von Tests werden unter dem Begriff des „dysexekutiven Syndroms“ zusammengefaßt (Baddeley, 1996; Matthes-von Cramon & von Cramon, 2000).

Doppelaufgaben gelten als ein prototypisches Paradigma, um exekutive Funktionen zu untersuchen und bei Patienten das dysexekutive Syndrom zu erfassen (Baddeley & Della Sala, 1996; D’Esposito et al., 1995; Smith & Jonides, 1999; Umiltà et al., 1992). Wenn zwei Aufgaben gleichzeitig bearbeitet werden müssen, erfordert dies die Koordination der beiden Informations-Ströme, die Aufteilung der Aufmerksamkeit auf die beiden aufgaben-relevanten Reize und eine erhöhte Gedächtnisbelastung, da zwei Instruktionen aufrechterhalten werden müssen.

Aufgrund dieser engen Verbindungen zwischen exekutiven Funktionen mit dem LPFC einerseits und exekutiven Funktionen mit der Doppelaufgaben-Verarbeitung andererseits, sollte sich ein konsistenter Zusammenhang zwischen Doppelaufgaben-Verarbeitung und dem lateral-präfrontalen Cortex beobachten lassen. Solch ein Zusammenhang ist zwar in der Tat beobachtet worden – erstaunlicherweise sind die Befunde aber in keiner Weise als konsistent anzusehen. Im restlichen Kapitel sollen diese Befunde

dargestellt und diskutiert werden. In dieser Darstellung sollen neben einer neuroanatomischen Hypothese insbesondere auch die möglichen Ursachen der Inkonsistenz herausgearbeitet werden, um im Abschluß des Kapitels Anforderungen an ein optimales Paradigma zur Untersuchung der funktionell-neuroanatomischen Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung formulieren zu können.

## **2.3 LPFC und Doppelaufgaben: Patientenstudien**

Ein klassischer neuropsychologischer Ansatz zur Funktionsbestimmung cortikaler Areale besteht darin, einen Zusammenhang zwischen Läsionsorten und den beobachteten Verhaltensdefiziten herzustellen. Somit besteht eine Forschungsstrategie zur Untersuchung der funktionellen Neuroanatomie der Doppelaufgaben-Verarbeitung darin, Patienten-Gruppen auf ihre Fähigkeiten zur Bearbeitung von Doppelaufgaben hin zu untersuchen und ein Muster zu identifizieren, bei welchen Läsionen Doppelaufgaben-Verarbeitung problemlos verläuft, und bei welchen nicht.

### **2.3.1 Evidenzen für einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung**

Wenn zwei Aufgaben gleichzeitig ausgeführt werden müssen, treten fast immer sogenannte Doppelaufgaben-Defizite auf (für eine Ausnahme vgl. z. B. Hirst et al., 1980). Diese Doppelaufgaben-Defizite definieren sich als verminderte Leistung, z. B. in Form langsamerer Reaktionen oder erhöhter Fehlerraten, einer oder beider Aufgaben in der Doppelaufgaben-Situation im Vergleich zur separaten Ausführung der Aufgaben.

Verschiedene Studien konnten nachweisen, daß bei Patienten mit Frontalhirn-Läsionen Doppelaufgaben-Defizite größer als bei vergleichbaren Kontrollgruppen sind (z. B. Azouvi et al., 1996; Dell'Acqua et al., 2001; McDowell et al., 1997).<sup>1</sup> Die Studie von Dell'Acqua et al. (2001) ist dabei von besonderem Interesse, da in ihr das Paradigma der vorliegenden Arbeit benutzt wurde. Die untersuchten Patienten litten an traumatischen Hirnschädigungen, welche vor allem durch präfrontale und anterior-temporale Läsionen und durch eine diffuse axonale Schädigung gekennzeichnet sind. Diese axonalen Schädigungen führen dazu, daß die Verbindungen des präfrontalen Cortex zu

---

<sup>1</sup>In den hier vorgestellten Patientenstudien wird häufiger der Begriff „frontal“ und nicht „präfrontal“ verwendet. Diese Verwendung begründet sich darin, daß die Läsionen zwar in ihrem Schwerpunkt den präfrontalen Cortex betreffen, sich jedoch z. T. auch in prämotorische Areale ausdehnen. In der Literatur ist es daher üblich, solche „frontalen Läsionen“ auch im Rahmen der Funktionalität präfrontaler Areale zu interpretieren (vgl. z. B. Cohen et al., 1996).

den übrigen Hirnregionen läsiert sind und somit das gesamte Netzwerk, welches für exekutive Prozesse angenommen wird, beeinträchtigt ist (Matthes-von Cramon & von Cramon, 2000).

Dell'Acqua et al. fanden durch die Benutzung der kritischen Pfadtechnik (Schweickert, 1983), daß die überproportional großen Defizite der Patienten im Vergleich zur Kontrollgruppe auf eine beeinträchtigte Verarbeitung zentraler Verarbeitungsstufen wie der Antwort-Auswahl zurückzuführen sind und nicht auf eine Beeinträchtigung peripherer Stufen, wie der Perzeption oder Motorik.

Somit läßt sich zusammenfassen, daß Studien mit Patienten die Annahme, daß der präfrontale Cortex eine zentrale Rolle bei der Verarbeitung von Doppelaufgaben einnimmt, bestätigen. Diese Auffassung wird heute allerdings nicht mehr uneingeschränkt geteilt.

### **2.3.2 Evidenzen gegen einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung**

So gilt zunächst heute die Sichtweise, daß exekutive Funktionen nicht ausschließlich durch den präfrontalen Cortex realisiert werden, sondern durch ein Netzwerk von Arealen, welches unter anderem den präfrontalen Cortex enthält (Andres & Van der Linden, 2002; Baddeley, 1998; Carpenter et al., 2000). Diese neuere Sichtweise wird dadurch gestützt, daß Doppelaufgaben-Defizite vor allem bei Patienten mit diffuseren Hirn-Schädigungen, wie dem Schädelhirntrauma, zu beobachten waren (vgl. z. B. Baddeley et al., 1991; Cicerone, 1996). Die einzelnen Komponenten des Netzwerkes könnten an der Verarbeitung unterschiedlicher Aufgaben unterschiedlich wichtig sein.

Die Befunde von Vilkki et al. (2002) unterstützen die Annahme, daß sowohl parietale als auch frontale Areale für die Verarbeitung von Doppelaufgaben notwendig sind. Sie zeigten, daß sowohl fokale frontale als auch fokale parietale Läsionen zu Doppelaufgaben-Defiziten führten, wobei sich das Ausmaß der Defizite nicht zwischen den Läsionsorten unterschied. Dieser Befund, daß Doppelaufgaben-Defizite auch ohne frontale Läsionen auftreten können, wirft allerdings die Frage auf, wie eng die Assoziation des frontalen Cortex mit der Doppelaufgaben-Verarbeitung überhaupt ist.

Die Befunde von Andres & Van der Linden (2002) und Vilkki et al. (1996) legen nahe, daß diese Assoziation überhaupt nicht vorhanden ist, d. h. der frontale Cortex gar keine Funktionalität für die Verarbeitung von Doppelaufgaben besitzt. In beiden Studien mit Patienten, die an Frontalhirn-Läsionen litten, war die Performanz der Patienten- und Kontroll-Gruppen vergleichbar. Diese Studien lassen dementsprechend vermuten, daß die Verarbeitung von Doppelaufgaben keine frontalen Areale benötigt,

es also keinen Zusammenhang zwischen Doppelaufgaben-Verarbeitung und der Funktionalität frontaler Areale gibt.

Somit zeigt sich ein uneinheitliches Bild. Manche Studien zeigten, daß fokale frontale Läsionen zu vergrößerten Doppelaufgaben-Defiziten führten, während andere Studien zeigten, daß fokale frontale Läsionen keine besonderen Defizite verursachten. Entsprechend kann auf der Basis bisheriger Befunde die Frage, ob der präfrontale Cortex an der Verarbeitung von Doppelaufgaben beteiligt ist, nicht endgültig geklärt werden. Wodurch könnten die unterschiedlichen Befunde, die eine klare Beantwortung der Frage verhindern, jedoch verursacht sein? Eine Diskussion möglicher Probleme der Studien kann hier eventuell helfen, das uneinheitliche Bild zu vereinheitlichen.

### 2.3.3 Methodische Probleme neuropsychologischer Studien

Kognitiv-neuropsychologische Studien weisen häufig methodische Probleme auf, die eindeutige Schlußfolgerungen verhindern können (vgl. Humphreys & Price, 2001).

So ist es fraglich, ob läionierte und gesunde Gehirne prinzipiell vergleichbar arbeiten. Entsprechend muß sichergestellt sein, daß das Verhalten bezüglich der residuellen Funktionen erfaßt wird, und es nicht zu einer Verschleierung durch kompensatorische Verarbeitungs-Strategien oder cortikale Umorganisationen kommt (Humphreys & Price, 2001). Solch eine Kompensation könnte z. B. dazu führen, daß Patienten trotz fokaler frontaler Läsionen keine behavioralen Defizite bei der Doppelaufgaben-Verarbeitung zeigen, obwohl die läionierten Areale normalerweise, d. h. bei Gesunden, dafür notwendig sind.

Ein weiteres Problem besteht darin, daß meist nicht unterschieden werden kann, ob eine Läsion die tatsächliche Implementation einer Funktion innerhalb eines Areals zerstört, oder ob die Verbindung zwischen verschiedenen, für die Funktion notwendigen Arealen unterbrochen ist, wobei die funktions-implementierenden Areale selbst noch intakt sind (Humphreys & Price, 2001). Dieser Fall kann auftreten, da häufig nicht nur graue, sondern auch weiße Substanz, d. h. Marklager, von Läsionen betroffen ist. So ist bei den Studien, die vergrößerte Doppelaufgaben-Defizite bei frontalen Läsionen beobachtet haben unklar, ob die Läsionen tatsächlich eine für die Doppelaufgaben-Verarbeitung wichtige Funktion oder eine Verbindung betroffen haben.

Des weiteren beruhen die Studien häufig auf Patienten, deren Läsionen sich bezüglich Größe und genauem Ort unterscheiden. Diese Variabilität der Läsionen entsteht, da die Läsionen nicht durch „kontrollierte Manipulationen“ sondern eher durch „Zufall“ entstanden sind, wie z. B. durch Infarkte, Tumore oder Unfälle. Die Zusammenfassung heterogener Läsionen in den Studien ist problematisch, wenn angenommen wird, daß der frontale Cortex funktionelle Unterteilungen besitzt, und daß nur bestimmte Teile

des frontalen Cortex für Doppelaufgaben-Verarbeitung notwendig sind (Collette & Van der Linden, 2002; Owen, 2000). In diesem Fall ließen sich die divergierenden Ergebnisse der Studien durch unterschiedliche Stichproben erklären: Bei manchen Stichproben könnten so bei jedem Patienten die doppelaufgaben-relatierten Areale läsiert gewesen sein, bei manchen Stichproben nur bei einigen Patienten und bei manchen könnte kein Patient eine Läsion in einem doppelaufgaben-relatierten Areal aufgewiesen haben.

Somit könnte die Divergenz der Befunde durch Effekte der neuropsychologischen Methode verursacht worden sein. Da die Studien beider Befundlagen, positive und negative Assoziation des frontalen Cortex mit Doppelaufgaben-Verarbeitung, diesen methodischen Problemen ausgesetzt sind, ergeben die bisherigen Befunde kein klares Bild. Somit läßt sich zusammenfassen, daß es zwar Hinweise auf einen Zusammenhang frontaler Cortices mit Doppelaufgaben-Verarbeitung gibt, dieser Zusammenhang aber nicht zweifelsfrei nachgewiesen ist.<sup>2</sup>

Abhilfe kann hier eine Methode schaffen, die den gerade genannten Kritikpunkten nicht ausgesetzt ist: bildgebende Verfahren, z. B. fMRT oder Positronen Emissions Tomographie (PET). Zunächst arbeiten diese Verfahren non-invasiv (fMRT) oder nur leicht-invasiv (PET), womit die Möglichkeit gegeben ist, gesunde Probanden zu untersuchen. Hierdurch kann das Problem, daß in Patienten-Studien eventuell kompensatorische Funktionen erfaßt werden, vermieden werden. Die Methode der fMRT erfaßt des weiteren vor allem synaptische Aktivität, weshalb eher funktions-implementierende Areale erfaßt werden und nicht die Verbindung zwischen zwei funktions-implementierenden Arealen (z. B. Logothetis et al., 2001). Schließlich zeigen bildgebende Verfahren nur die Areale an, die tatsächlich aktiv sind, wodurch die Kritik der zufällig lokalisierten und ausgedehnten Läsionen nicht zutrifft. Hieraus läßt sich ableiten, daß bildgebende Studien zur Doppelaufgaben-Verarbeitung möglicherweise ein klareres Bild über die Funktionalität des lateral-präfrontalen Cortex erbringen.

---

<sup>2</sup>Diese Ausführungen sollen nicht bedeuten, daß neuropsychologische Untersuchungen weniger sinnvoll sind. Sie stellen ein Grundelement der Untersuchung funktionell-neuroanatomischer Zusammenhänge dar. Auch bildgebende Verfahren schränken den Wert neuropsychologischer Untersuchungen nicht ein, da sich beide Verfahren bezüglich ihrer Schlußfolgerungen unterscheiden und sie somit als sich gegenseitig ergänzend und nicht als redundant aufzufassen sind (z. B. Sarter et al., 1996).

Die aktuellen Ausführungen sollten vielmehr verdeutlichen, daß die *unterschiedliche Befundlage* durch methodische Probleme der neuropsychologischen Methode verursacht worden sein kann.



## 2.4 LPFC und Doppelaufgaben: Bildgebende Studien

Im Folgenden soll ein Überblick über die bisherige bildgebende Forschung zu Doppelaufgaben gegeben werden. Da sich aus diesen Studien wichtige Implikationen für die vorliegende Arbeit ableiten lassen, werden sie ausführlich diskutiert.

Die im Folgenden diskutierten Studien benutzten z. T. sehr unterschiedliche Doppelaufgaben-Paradigmen. Eine Gemeinsamkeit der Paradigmen besteht darin, daß sie zu einer zeitlichen Überlappung bestimmter aufgaben-spezifischer Prozesse führen sollten. In allen Studien wurde des weiteren angenommen, daß diese Überlappung in zusätzlichem kognitiven Aufwand resultiert. Dieser zusätzliche Aufwand ist als „über-additiv“ aufzufassen, d. h. die kognitiven Anforderungen in der Doppelaufgaben sind größer, als durch die Summe der kognitiven Anforderungen der Einzelaufgaben prä-diziert (vgl. auch Einleitung Kapitel 3, S. 25). Da dieser über-additive Aufwand nur bei Aufgaben-Überlappung auftritt, ist eine der wichtigsten Voraussetzungen in einer Doppelaufgabe, daß sich die Aufgaben auch tatsächlich so überlappen, daß eine gleich-zeitige Verarbeitung stattfindet. Die Aufgaben-Überlappung wird dabei üblicherweise über den zeitlichen Präsentations-Abstand der beiden Aufgaben-Reize (*Stimulus-Onset-Asynchrony*; SOA) kontrolliert und manipuliert.

Die meisten bildgebenden Studien hatten die Hypothese, daß der zur Verarbeitung einer Doppelaufgabe zusätzliche kognitive Aufwand in Form neuronaler Aktivität meßbar ist. Da der kognitive Aufwand der Doppelaufgabe als über-additiv im Vergleich zu den summierten Einzelaufgaben anzusehen ist, ist entsprechend die Hypothese zu prüfen, daß auch doppelaufgaben-relatierte neuronale Aktivität über-additiv ist. Fast alle Studien haben diese Hypothese getestet, indem die Probanden nicht nur die Doppelaufgabe, sondern auch die Einzelaufgaben separat ausführen mußten. Dieses Vorgehen ermöglicht es zu testen, ob in der Doppelaufgabe mehr neuronale Aktivität zu beobachten ist, als durch die Summe der Effekte der Einzelaufgaben prä-diziert wird. Neuronale Aktivität in der Doppelaufgabe, die ausschließlich durch die summierte Aktivität der Einzelaufgaben erklärt werden kann, ist somit kein Ausdruck zusätzlichen Aufwands in der Doppelaufgaben-Verarbeitung und kann entsprechend nicht als doppelaufgaben-relatiert aufgefaßt werden. Insofern ist die Auswertung der Daten ein kritischer Punkt in der Identifikation doppelaufgaben-relatierter Areale. Aus diesem Grund werden im Folgenden auch die von den Studien angewandten Auswertungs-Methoden kritisch auf ihre Möglichkeit analysiert, über-additive Aktivierung zu entdecken.

### 2.4.1 Evidenzen für einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung

Die erste Studie, die sich mit diesem Thema befaßte, ist von D'Esposito und Mitarbeitern (1995) durchgeführt worden. In dieser Studie haben die Probanden in einer geblockten Darbietung abwechselnd entweder eine Aufgabe separat oder zwei Aufgaben gleichzeitig bearbeitet. D'Esposito et al. verwendeten zwei Aufgaben, von denen sie annahmen, daß sie unabhängig vom Arbeitsgedächtnis sind. Die eine Aufgabe war eine auditorisch präsentierte semantische Kategorisierung, bei der die Probanden eine Liste von Wörtern hörten und reagieren mußten, sobald das Wort einer bestimmten Kategorie, wie z. B. Gemüse, angehörte. Die andere Aufgabe war eine visuell-räumliche Rotationsaufgabe. Doppelaufgaben-spezifische Aktivierung wurde bestimmt, indem von der Aktivierung der Doppelaufgabe jeweils die Aktivierung einer Einzelaufgabe abgezogen wurde. Areale, die in beiden Vergleichen, aber in keiner Einzelaufgabe aktiviert waren, reflektieren entsprechend über-additive Aktivierungen und wurden mit der Verarbeitung von Doppelaufgaben assoziiert. D'Esposito et al. beobachteten, daß ausschließlich in der Doppelaufgabe cortikale Areale in dorsolateral-präfrontalen und anterior-cingulären Cortices aktiviert waren. Sie interpretierten die präfrontale Aktivierung als neuronales Korrelat der Zentralen Exekutive des Arbeitsgedächtnisses nach dem Modell von Baddeley (1986).

Diese Befunde sind von Koechlin et al. (1999) bestätigt worden. In dieser Studie haben die Probanden zwei Aufgaben auf Basis des gleichen Stimulus ausgeführt. Die eine Aufgabe bestand darin, in einer Folge von nacheinander präsentierten Buchstaben zu entscheiden, ob der aktuelle und der vorherige Buchstabe in der gleichen Reihenfolge präsentiert wurden, wie in dem Wort „tablet“. Die Buchstaben konnten dabei entweder klein oder groß geschrieben sein. Die zweite Aufgabe bestand darin, bei jedem Wechsel der Schreibung zu entscheiden, ob der aktuelle Buchstabe ein ‚T‘ (bzw. ‚t‘) war. Bei der Auswertung wurde allerdings nur eine Einzelaufgabe (Reihenfolge-Entscheidung) berücksichtigt, wodurch nicht auszuschließen ist, daß Aktivierungen in der Doppelaufgabe durch die zweite Aufgabe und nicht durch zusätzlichen Aufwand der Doppelaufgaben-Verarbeitung verursacht wurden.<sup>3</sup> Koechlin et al. identifizierten doppelaufgaben-relatierte Areale im dorsolateralen präfrontalen Cortex, die mit den von D'Esposito et al. gefundenen Arealen vergleichbar sind. Zusätzlich war der parietale Cortex aktiviert. Sie interpretieren die doppelaufgaben-relatierten Areale als Ausdruck

---

<sup>3</sup>Somit testet diese Analyse nicht auf über-additive Effekte. Man muß allerdings anmerken, daß die Untersuchung der Doppelaufgabe nicht der eigentliche Untersuchungsgegenstand der Studie war. Vielmehr wurde *branching* untersucht, was Koechlin et al. als Kombination aus Doppelaufgabe und Gedächtnisbelastung definieren.

eines sukzessiven Zuweisens von Aufmerksamkeitsressourcen zu den einzelnen Aufgaben.

Eine Studie mit eher ungewöhnlichem Ergebnis wurde von Goldberg et al. (1998) durchgeführt. Hier mußten die Probanden zwei extrem anspruchsvolle Aufgaben gleichzeitig bearbeiten, zum einen den *Wisconsin Card Sorting Test* und zum anderen ein schnelles auditorisch-verbales *shadowing*.<sup>4</sup> Sie beobachteten in verschiedenen Analysen auf über-additive Effekte, daß in der Doppelaufgabe der präfrontale Cortex weniger stark aktiviert war, als in den Einzelaufgaben. Mit anderen Worten, sie beobachteten eine *Unter-Additivität*. Sie interpretieren diesen nicht sehr eingängigen Befund mit einer Kapazitäts-Überlastung des präfrontalen Cortex. Eine mögliche Strategie, mit der Überlastung umzugehen, seien sogenannte „Leerlauf-Zyklen“, die dazu führten, daß die Aktivierung geringer wird. Nach dieser Interpretation müßte man also den Schluß ziehen, daß die geringere Aktivierung ein Ausdruck gesteigener Anforderungen in der Doppelaufgabe war, so daß die Ergebnisse als Hinweis für das Vorhandensein neuroanatomischer Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung angesehen werden können.

Eine weitere Studie wurde von Herath et al. (2001) durchgeführt. In dieser Studie mußten die Probanden zwei Einfach-Reaktionsaufgaben durchführen, eine visuelle und eine somatosensorische. Zusätzlich mußten sie zwei Doppelaufgaben mit unterschiedlichem Abstand der Reizpräsentationen (SOA) bearbeiten. Sie unterschieden die Prozesse dabei zwischen der in jeder Doppelaufgabe vorhandenen Anforderung nach geteilter Aufmerksamkeit und der nicht zwangsläufig auftretenden Interferenz zwischen den Aufgaben. Die globalen Anforderungen der Doppelaufgaben-Bearbeitung untersuchten sie mittels eines Vergleichs der Summe der Effekte beider Doppelaufgaben mit der Summe der Effekte der Einzelaufgaben. Dieser Vergleich ist problematisch, wenn beide Einzelaufgaben das gleiche Areal aktivieren. Für solch ein Areal müßte für die Summe der Doppelaufgaben ein vierfacher Effekt (2 Einzelaufgaben \* 2 Doppelaufgaben) prädiziert werden, während nur ein zweifacher Effekt (Summe der Einzelaufgaben) abgezogen wird. Entsprechend kann durch diesen Vergleich ein additiver Effekt irrtümlich als doppelaufgaben-relatiert interpretiert werden. Mit diesem somit kritisierbaren Vergleich identifizierten sie doppelaufgaben-relatierte Areale in posterior-superioren Teilen des lateral-präfrontalen Cortex. Interferenz wurde hingegen mit dem Vergleich zwischen der Doppelaufgabe mit langem SOA und der mit kurzem SOA untersucht. Hier zeigte sich eine Aktivierung in posterior-inferioren Teilen des rechten präfrontalen Cortex. Die Autoren interpretierten diese Aktivierung als Ausdruck motorischer Interferenz.

---

<sup>4</sup>In der *shadowing*-Aufgabe wurden den Probanden über Kopfhörer Wörter vorgespielt, die sie unmittelbar laut aussprechen sollten.

**Zusammenfassung** Somit läßt sich festhalten, daß eine Reihe von Studien Hinweise dafür gefunden hat, daß zwischen der Bearbeitung von Doppelaufgaben und lateral-präfrontalen Arealen ein Zusammenhang besteht. Wie bereits in Abschnitt 2.2 (S. 7) angesprochen, könnte der LPFC verschiedene Funktionalitäten, Aufgaben-Koordination, geteilte Aufmerksamkeit und/oder Gedächtnis für die Doppelaufgaben-Verarbeitung besitzen. Die eben genannten Studien geben keinen Aufschluß darüber, welche dieser Anforderungen zu den zusätzlichen Aktivierungen führte.<sup>5</sup>

Auch ist die Schlußfolgerung, daß überhaupt ein Zusammenhang zwischen Doppelaufgaben-Verarbeitung und LPFC besteht eingeschränkt, da in einigen Studien die Möglichkeit additiver Effekte der Einzelaufgaben nicht berücksichtigt wurde (vgl. z. B. Bunge et al., 2000, für eine ähnliche Kritik). So würden die Auswertungen von Herath et al. (2001) und Koechlin et al. (1999) Areale als spezifisch für die Doppelaufgaben-Verarbeitung identifizieren, obwohl sie nur durch die Summe der Einzelaufgabeneffekte entstanden sind. Mit der Annahme der Rekrutierung zusätzlicher neuronaler Ressourcen muß man aber konsequenterweise auch bei der Analyse auf zusätzliche, d. h. über-additive, Effekte prüfen.

#### 2.4.2 Evidenzen gegen einen Zusammenhang von LPFC und Doppelaufgaben-Verarbeitung

Smith et al. (2001) untersuchten ältere ( $\phi$  66 Jahre) und jüngere ( $\phi$  23 Jahre) Probanden und fanden nur eingeschränkt Aktivierungen, die mit der Verarbeitung von Doppelaufgaben assoziiert waren. Sie benutzten als Aufgabe einen *Operation Span Task* (Arbeitsgedächtnisspanne), bei dem die Probanden gleichzeitig die Richtigkeit einer mathematische Gleichung beurteilen und ein Wort memorieren mußten. Während die Probanden für jede Gleichung ein unmittelbares Urteil abgeben mußten, wurde die Gedächtnisleistung erst nach einer Serie von fünf Durchgängen getestet. Zusätzlich mußten beide Einzelaufgaben separat bearbeitet werden. Doppelaufgaben-relatierte Aktivierung wurde bestimmt, indem Aktivierungen der Doppelaufgabe mit dem *Mittel* – und nicht, wie für einen Test auf Über-Additivität notwendig, der Summe – der Einzelaufgaben-Aktivierungen verglichen wurden. Das ist problematisch, wenn beide Einzelaufgaben das gleiche Areal aktivieren. In diesem Fall würde man in der Doppelaufgabe die Summe der Aktivierungen erwarten, während durch die Mittelung der Einzelaufgaben nur ein einfacher Effekt abgezogen würde. Zusätzliche Aktivierungen konnten nur bei den älteren Probanden und bei jüngeren Probanden, die verhältnismäßig

<sup>5</sup>Zwar haben Herath et al. eine Differenzierung der Funktionalität angestrebt, die Befunde sind jedoch aufgrund der methodischen Problematik nicht eindeutig interpretierbar.

schlechte behaviorale Leistungen zeigten, nachgewiesen werden. Diese waren vor allem in lateral-prämotorischen, superior-parietalen und okzipitalen Arealen lokalisiert. Smith et al. schließen, daß die für die aktuelle Aufgabe benötigten exekutiven Funktionen nicht auf ein bestimmtes Areal im präfrontalen Cortex angewiesen sind, da ansonsten alle Probanden entsprechende Aktivierungen aufweisen müßten. Die Aktivierungen der älteren und leistungsschwachen jüngeren Probanden interpretieren die Autoren als Korrelat selektiver Aufmerksamkeit, welche nur von Personen benötigt wird, die die Aufgabe als extrem beanspruchend empfinden.

Klingberg (1998) versuchte mit zwei Arbeitsgedächtnis-Aufgaben doppelaufgabenrelatierte Aktivierung zu lokalisieren. In diesen Aufgaben mußten die Probanden in einer Serie von Reizen, die alle 2 – 5 s dargeboten wurden, den aktuellen Reiz mit dem vorherigen vergleichen und entscheiden, ob sich eine bestimmte Reizmodalität verändert hat. Als Reize wurden Töne unterschiedlicher Frequenz und visuelle Reize unterschiedlicher Helligkeit verwendet. In der Doppelaufgabe wurden die Reize so präsentiert, daß zwischen Reizpräsentation, bzw. Reaktion, ein Abstand von jeweils mindestens 1 s gewährleistet war. Somit besteht die Anforderung dieser Doppelaufgabe im Gegensatz zu den meisten anderen ausschließlich darin, zwei Gedächtnisrepräsentationen aufrecht zu erhalten. Bereits die Einzelaufgaben führten zu Aktivierungen im lateral-präfrontalen Cortex. In der Doppelaufgabe stieg die Aktivierung zwar leicht, aber nicht signifikant an. Daraus schloß Klingberg, daß es keine Notwendigkeit gibt, zusätzliche Areale anzunehmen, die für die Bearbeitung von Doppelaufgaben notwendig sind.

Eine weitere Studie, die keine Hinweise auf zusätzliche Aktivierungen bei der Bearbeitung von Doppelaufgaben fand, wurde von Bunge et al. (2000) durchgeführt. Sie verwendeten, ähnlich zu Smith et al. (2001), eine Aufgabe zur Messung der Arbeitsgedächtnisspanne. Die erste Aufgabe bestand darin, die Aussage eines Satzes, der über einen Zeitraum von 1,8 s wortweise dargeboten wurde, als wahr oder falsch zu klassifizieren. Für die zweite Aufgabe mußten die Probanden jeweils das letzte Wort eines Satzes memorieren. Nach fünf Sätzen wurde die Gedächtnisleistung abgefragt, wofür die Probanden 8 s Zeit hatten. Bunge et al. testeten nur auf eine Neu-Aktivierung von Arealen, die nicht schon durch die Einzelaufgaben aktiviert wurden, und nicht generell auf über-additive Aktivierung. Obwohl sie keine neu-aktivierten Areale beobachteten, gibt es allerdings Hinweise darauf, daß lateral-präfrontale und parietale Areale, die schon durch die Einzelaufgaben aktiviert wurden, über-additiv stärker in der Doppelaufgabe aktiviert waren (nicht von Bunge et al. getestet, aber vgl. Abb. 3b auf S. 3576 in ihrem Artikel). Die Autoren schließen, daß für die Verarbeitung von Doppelaufgaben wahrscheinlich keine zusätzlichen exekutiven Prozesse benötigt werden. Falls dieser Schluß falsch ist und doch exekutive Prozesse beteiligt sind, postulieren sie, daß sich

exekutive Prozesse durch einen Anstieg der Aktivierung in einzelaufgaben-relatierten Arealen abbilden würden.

Adcock et al. (2000) benutzten Aufgaben, die mit den von D'Esposito et al. (1995) verwendeten vergleichbar sind. Sie fanden wie Bunge et al. keinen Hinweis auf die Aktivierung neuer Areale in der Doppelaufgabe, allerdings auch nicht-signifikante Hinweise auf eine über-additiv stärkere Aktivierung lateral-präfrontaler Areale. Sie diskutieren, daß die negativen Befunde möglicherweise darauf zurückzuführen sind, daß schon die Einzelaufgaben exekutive Prozesse benötigten, so daß keine Neu-Aktivierungen zu erwarten wären. Alternativ sei es möglich, daß das Paradigma keine doppelenaufgabenspezifischen Prozesse angesprochen hat. Sie schließen, konform zu Bunge et al., daß exekutive Prozesse nicht durch eigenständige Areale, sondern durch das Zusammenspiel aufgabenspezifischer Areale realisiert werden.

Die letzte Studie, die hier genannt werden soll, wurde von Just et al. (2001) durchgeführt. Die Aufgaben bestanden darin, einen Satz nach seinem Wahrheitsgehalt zu beurteilen und eine räumliche Rotation vorzunehmen. Ein Durchgang der Satz-Aufgabe dauerte 6 s, ein Durchgang der Rotationsaufgabe-Aufgabe 5 s. In der Doppelaufgabe wurden die beiden Aufgaben mit SOAs von bis zu 2,5 s dargeboten, wobei sich die Reaktionen nie überlappten. Die Aufgaben waren so gewählt, daß ihre separate Ausführung möglichst verschiedene cortikale Areale aktiviert. Das besondere dieser Studie liegt darin, daß ausschließlich das Volumen der Aktivierungen analysiert wurde. Während sie für präfrontale Areale ausschließlich additive Effekte beobachteten, fanden sie in Assoziationsarealen des temporalen und parietalen Lappens weniger aktiviertes Volumen in der Doppelaufgabe als in den summierten Einzelaufgaben. Dieses Muster zeigte sich, obwohl die Einzelaufgaben unterschiedliche Bereiche der Assoziationsareale aktivierten. Sie diskutieren unterschiedliche Erklärungsmöglichkeiten der Befunde, wie z. B. daß sich die Verarbeitung einer Doppelaufgabe qualitativ von der einer Einzelaufgabe unterscheidet.

**Zusammenfassung** Die Abwesenheit zusätzlicher Aktivierungen in der Doppelaufgabe wird durch zwei Alternativen erklärt. Manche Autoren postulieren, daß für die Bearbeitung von Doppelaufgaben keine zusätzlichen Prozesse benötigt werden, bzw. daß es keine neuroanatomischen Korrelate eventuell vorhandener Prozesse gibt (Just et al., 2001; Klingberg, 1998; Smith et al., 2001). Andere Autoren vermuten, daß es zusätzliche Prozesse gibt, daß das neuroanatomische Korrelat aber nicht in von den Einzelaufgaben unabhängigen Arealen, sondern durch eine veränderte Verarbeitung oder ein verändertes Zusammenspiel aufgabenspezifischer Areale repräsentiert ist (Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000).

Auch die Evidenz dieser Studien ist kritisch zu betrachten. Ein grundsätzliches Problem besteht darin, daß die Argumentationen auf einem Null-Effekt beruhen. Genau genommen ist solch ein Ergebnis mit den verwendeten Tests statistisch nicht interpretierbar (z. B. Cortina & Folger, 1998; Kluger & Tikochinsky, 2001; Tryon, 2001). Z. B. ist es möglich, daß die Effektstärke der Manipulationen nicht groß genug war. Ein Hinweis darauf läßt sich in den Studien von Adcock et al., Bunge et al. und Klingberg finden, die nicht-signifikante Anzeichen für über-additive Effekte in der Doppelaufgabe gefunden haben.

### 2.4.3 Mögliche Ursachen der divergierenden Befunde

Bei einer derartig konträren Evidenz stellt sich die Frage, ob Ursachen für die unterschiedlichen Befunde identifiziert werden können. Dabei können mehrere Ursachen diskutiert werden.

**Komplexität der Paradigmen** Die verwendeten Doppelaufgaben-Paradigmen können die Ergebnisse erheblich beeinflussen. Hierbei muß man zunächst die Frage stellen, welche Eigenschaften der Doppelaufgabe dazu führen, daß zusätzliche Anforderungen an Gedächtnis, geteilte Aufmerksamkeit und Koordination der Aufgaben-Verarbeitung bestehen. Gedächtnisanforderungen entstehen zunächst in jeder Doppelaufgabe, da zwei Aufgaben aufrecht erhalten werden müssen. Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit und Koordination der Aufgaben-Verarbeitung müssen jedoch nicht zwangsläufig in jeder Doppelaufgabe auftreten. Wie Herath et al. (2001) gezeigt hat und im nächsten Kapitel noch ausführlich dargelegt wird, scheint für die letzten beiden Anforderungen die *Gleichzeitigkeit* der Aufgaben eine kritische Rolle zu spielen (vgl. auch Broadbent, 1982; Craik, 1947). Nur wenn die Aufgaben zeitlich überlappend verarbeitet werden müssen, muß die Aufmerksamkeit geteilt werden. Des weiteren tritt nur in dieser Situation die Limitation des kognitiven Systems zu tage, zwei Aufgaben nicht vollständig parallel verarbeiten zu können. Diese Limitation führt zu Interferenz und erfordert exekutive Prozesse, die die Aufgaben-Verarbeitung koordinieren (Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997).

In Hinblick auf die Studien, die keine Evidenz für zusätzliche Aktivierungen in der Doppelaufgaben-Verarbeitung gefunden haben, kann man kritisieren, daß zu komplexe Paradigmen verwendet wurden. Paradigmen, wie z. B. ein Gedächtnisspannen-Test (Bunge et al., 2000; Smith et al., 2001), erlauben wenig Rückschlüsse, welche Prozesse genau zu welcher Zeit stattfinden. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, daß die Probanden in der Lage waren, die Aufgabenverarbeitung flexibel zu organisieren und Interferenz zu vermeiden. Zum Beispiel hatten die Probanden in der Studie von

Bunge et al. zunächst 1800 ms Zeit, einen Satz zu lesen und danach weitere 3 s, um die Richtigkeit des Satzes zu beurteilen und das letzte Wort zu memorieren. Auch in den Studien von Adcock et al. (2000), Just et al. (2001) und Klingberg (1998) ist es fraglich, ob Interferenz auftrat, da in diesen Studien der Präsentationsabstand der beiden Aufgaben (das SOA) im Mittel jeweils circa 1 s betrug. Somit ist es bei diesen Studien fraglich, ob die Aufgaben überhaupt zeitlich überlappend, d. h. interferierend, verarbeitet werden mußten, oder ob durch eine flexible Organisation der Aufgabenverarbeitung Interferenz und somit Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit und Aufgabenkoordination vermieden werden konnten (Broadbent, 1982; Craik, 1947; Pashler, 1994a, vgl. auch Kapitel 3). Für den letzten Punkt spricht, daß zum Teil keine oder nur sehr geringe behaviorale Doppelaufgaben-Kosten beobachtet wurden (z. B. Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000). Entsprechend ist die Abwesenheit neuroanatomischer Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung in diesen Studien möglicherweise darauf zurückzuführen, daß überhaupt keine doppelaufgaben-relatierten kognitiven Anforderungen vorlagen.

Studien mit positivem Befund, wie die von Herath et al. (2001) und Koechlin et al. (1999) benutzten dagegen Paradigmen, in denen eine zeitliche Überlappung der Aufgaben zwingend ist. So mußten bei Koechlin et al. die Probanden beide Aufgaben auf dem identischen Reiz ausüben (SOA = 0 ms), während bei Herath et al. das SOA 200 – 300 ms betrug. Somit ist ein Auftreten von Interferenz – und entsprechend exekutiver Prozesse – wahrscheinlicher, was durch die behavioralen Daten dieser Studien belegt wird.

Allerdings trennen die Kriterien die Studien nicht eindeutig. So konnten z. B. D’Esposito et al. (1995) mit einem ähnlich komplexen Paradigma, wie den eben kritisierten, doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen zeigen. Im Gegensatz zu den Studien mit negativem Befund konnten jedoch in allen Studien mit positivem Befund deutliche behaviorale Kosten beobachtet werden. Diese divergierende Beobachtung könnte damit zu erklären sein, daß solch komplexe Paradigmen zwar zu Interferenz führen können, aber nicht zwangsläufig müssen.

Somit lassen sich Hinweise auf zwei mögliche Unterscheidungsmerkmale finden. Zum einen war in den Studien mit positivem Befund eine deutlichere behaviorale Evidenz für das Auftreten von Interferenz zu beobachten. Zum anderen benutzten diese Studien zum Teil Paradigmen, die die zeitliche Überlappung der Aufgaben besser garantieren konnten. Gerade die zeitliche Überlappung scheint aber eine wichtige Voraussetzung für die Beobachtung doppelaufgaben-relatierter Areale zu sein (Herath et al., 2001).



**Komplexität der Einzelaufgaben** Ein weiterer Grund für die unterschiedlichen Befunde können die verwendeten Aufgaben sein, da sie einerseits die geeignete Analyse-methode beeinflussen und andererseits doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen verschleiern können. In allen Studien wurde angenommen, daß die zusätzlichen Prozesse bei der Bearbeitung von Doppelaufgaben hierarchisch höhergeordnet sind, und entsprechend wurden Aktivierungen im lateral-präfrontalen Cortex erwartet. Nun haben aber einige Studien sehr komplexe Aufgaben verwendet, von denen bekannt ist, daß ihre alleinige Ausführung schon den lateral-präfrontalen Cortex aktivieren (z. B. mentale Rotation, Zacks et al., 1999). Entsprechend würde man bei der Verwendung von Einzelaufgaben, die bereits exekutive Prozesse benötigen, erwarten, daß bestimmte einzelaufgaben-bezogene Aktivierungen in der Doppelaufgabe stärker aktiviert sind. Neu-Aktivierungen sind dagegen nicht zwingend notwendig.<sup>6</sup> Dieser Sachverhalt muß in der Analyse-methode berücksichtigt werden, indem die Daten nicht nur auf Neu-Aktivierungen, sondern auch auf Veränderungen, z. B. über-additive Aktivierungsanstiege, in einzelaufgaben-relatierten Aktivierungen untersucht werden.

Kritisch wird es, wenn die Einzelaufgaben cortikale Areale so stark beanspruchen, daß diese in der Doppelaufgabe ihre Aktivität aufgrund von Sättigungs- oder Decken-Effekten nicht mehr steigern können (Callicott et al., 1999; Just et al., 2001). Hier zeichnet sich ein relativ deutlicher Zusammenhang ab: Alle Studien (D'Esposito et al., Herath et al. und Koechlin et al.), die zusätzliche Aktivierung in der Doppelaufgabe fanden, beobachteten keine präfrontalen Aktivierungen in den Einzelaufgaben. Smith et al. fand zwar doppelaufgaben-relatierte Aktivierung (im LPMC), obwohl bereits die Einzelaufgaben vergleichbare Areale aktivierten, allerdings nur in abgeschwächter Form für manche Probandengruppen. In den Studien die keine zusätzlichen Aktivierungen in der Doppelaufgabe beobachteten, aktivierten ausnahmslos schon die Einzelaufgaben extensiv den lateral-präfrontalen Cortex. Goldberg et al. konnten schließlich zeigen, daß bei extrem anspruchsvollen Einzelaufgaben, die entsprechend starke präfrontale Aktivierungen auslösten, die präfrontale Aktivierung sogar wieder abnehmen kann.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß bereits die Art der Einzelaufgaben einen Einfluß auf die zu verwendenden Analysemethoden hat und daß im ungünstigsten Fall die durch die Einzelaufgaben ausgelösten Aktivierungen doppelaufgaben-spezifische Aktivierungen verdecken können.

---

<sup>6</sup>Hinweise darauf zeigen die Studien von Adcock et al., Bunge et al. und Klingberg, die alle zumindest Trends stärkerer Aktivierungen in einzelaufgaben-bezogenen Arealen in der Doppelaufgabe fanden, jedoch keine Neu-Aktivierungen.

#### 2.4.4 Implikationen für die Studien dieser Arbeit

Diese Arbeit hatte zum Ziel, die Funktionalität des lateral-präfrontalen Cortex im Rahmen der Doppelaufgaben-Verarbeitung zu untersuchen. Im ersten Kapitel ist dieses Ziel in drei Unter-Fragen aufgeteilt worden.

(1) Besitzt der LPFC überhaupt eine Funktionalität bei der Verarbeitung von Doppelaufgaben? Wie in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich dargelegt wurde, kann diese Frage nach dem aktuellen Stand der Forschung nicht eindeutig beantwortet werden. Problematisch waren vor allem die Verwendung zu komplexer Doppelaufgaben-Paradigmen und die mögliche Involvierung exekutiver Prozesse bei der Verarbeitung der Einzelaufgaben. Um diese Kritik zu umgehen und so die eindeutige Identifikation neuroanatomischer Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung zu ermöglichen, sollte das in dieser Arbeit verwendete Paradigma folgende Punkte sicherstellen.

Erstens sollte garantiert sein, daß sich die Verarbeitung der Aufgaben zeitlich überlagert, weshalb fast ausschließlich sehr kurze SOAs ( $\leq 200$  ms) verwendet wurden. Zweitens sollte das Paradigma auf Aufgaben beruhen, deren prozessuale Verarbeitung gut bekannt ist und die den lateral-präfrontalen Cortex, wenn überhaupt, nicht bis zur möglichen Obergrenze aktivieren. Aus diesem Grund wurden relativ einfache Wahlreaktionsaufgaben mit möglichst kompatiblen Reiz-Reaktions Verknüpfungen benutzt. Schließlich sollte das verwendete Paradigma Rückschlüsse auf die von den Probanden angewandten Strategien zulassen und detaillierten Aufschluß über die ablaufenden Prozesse geben. Hiermit konnte ausgeschlossen werden, daß die Probanden die Doppelaufgabe interferenzfrei verarbeiten. Des weiteren ergibt sich die Möglichkeit, genauer zu untersuchen, welche Anforderungen der Doppelaufgabe mit kortikalen Arealen des LPFC assoziiert sind (siehe auch Punkt 3). All diese Kriterien werden vom Paradigma der psychologischen Refraktärperiode erfüllt, weshalb es für die Studien dieser Arbeit gewählt wurde. Dieses Paradigma wird im nächsten Kapitel ausführlich dargestellt.

(2) Wenn der LPFC eine Funktionalität für Doppelaufgaben-Verarbeitung besitzt, welche Areale des LPFC sind besonders relevant? Patientenstudien zeigen hier kein eindeutiges Bild, da sich die vorkommenden Läsionen häufig in Bezug auf ihre Größe und Lage beträchtlich unterscheiden. Die meisten bildgebenden Studien identifizierten den dorsolateral-präfrontalen Cortex (Ausnahme Herath et al. (2001), welche den ventrolateralen-präfrontalen Cortex identifizierten). Allerdings könnten auch andere Areale an der Verarbeitung von Doppelaufgaben beteiligt sein, da bei diesen Studien nicht klar ist, welche doppelaufgaben-relatierten Prozesse sie abgebildet haben.

(3) Hier schließt sich die letzte Frage an: Welche spezifische Funktionalität und Charakteristik besitzen diese Areale im Kontext der Doppelaufgaben-Verarbeitung? Auch diese Frage ist noch ungeklärt. Um sie zu beantworten, ist ein Paradigma gefordert, bei

welchem die prozessuale Verarbeitung von Doppelaufgaben gut bekannt ist. Zuvor ist es jedoch notwendig, die allgemeinen theoretischen Hintergründe der Doppelaufgaben-Verarbeitung zu reflektieren. Diese Diskussion ist im nächsten Kapitel gehalten und soll sich spezifisch an dem in dieser Arbeit verwendeten Paradigma orientieren.

## Kapitel 3

# Theoretische Grundlagen der Doppelaufgaben-Verarbeitung

### 3.1 Einleitung

In diesem Kapitel sollen zunächst die theoretischen Grundlagen der Doppelaufgaben-Verarbeitung dargestellt werden. Dabei soll bestimmt werden, was für Anforderungen eine Doppelaufgabe stellt und unter welchen Umständen diese Anforderungen auftreten. Diese eher allgemeine Diskussion soll dann für das verwendete Paradigma, welches in diesem Rahmen auch vorgestellt wird, spezifiziert werden. Das Ziel ist, die kognitive Verarbeitung einer Doppelaufgabe herauszuarbeiten. Erst dieses Verständnis ermöglicht eine hypothesengeleitete Identifikation und Charakterisierung doppelauflagen-relatierter kortikaler Areale.

Wie bereits in der Einleitung zu Abschnitt 2.4 (S. 14) beschrieben, besteht eine allgemeine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Identifikation doppelauflagen-relatierter Areale darin, daß zur Verarbeitung von Doppelaufgaben zusätzlicher Aufwand erforderlich ist. Dieser Aufwand kann in Form von höheren Anforderungen an bestimmte Prozesse oder als Involvierung zusätzlicher Prozesse operationalisiert werden. „Zusätzlich“ bedeutet hier über-additiv, also daß die Anforderungen in der Doppelaufgabe größer sind, als durch die Summe der Anforderungen der Einzelaufgaben vorhergesagt werden würde. Dementsprechend werden zusätzliche Anforderungen, die aufgrund der Doppelaufgaben-Situation entstehen, als doppelauflagen-relatiert oder doppelauflagen-spezifisch bezeichnet. Würde die Verarbeitung von Doppelaufgaben ausschließlich auf der Summe der für die Einzelaufgaben-Verarbeitung notwendigen Prozesse beruhen, dürften sich daher keine neuroanatomischen Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung identifizieren lassen. Entsprechend soll in diesem Kapitel die

Hypothese, daß „das Ganze mehr als die Summe seiner Teile ist“<sup>1</sup> (Duncan, 1979) begründet werden. Im Folgenden werden drei mögliche doppelaufgaben-relatierte Anforderungen diskutiert, Koordination der Verarbeitung, Gedächtnisbelastung und geteilte Aufmerksamkeit.

## 3.2 Zusätzliche Anforderungen in Doppelaufgaben

### 3.2.1 Koordination der Verarbeitung

Eine Doppelaufgabe stellt erhebliche Anforderungen an das kognitive System. Hier müssen nicht nur zwei unvereinbare Reize oder Reaktionen in Einklang gebracht werden, sondern zwei komplette Aufgaben. Wie bereits erwähnt, führt die Bearbeitung einer Doppelaufgabe im Vergleich zur Bearbeitung der einzelnen Aufgaben meist zu erheblichen Leistungs-Einbrüchen. Diese Leistungs-Einbrüche werden allgemein als Nachweis für das Auftreten von Interferenz angesehen, welche aufgrund kapazitätslimitierter Verarbeitung entsteht. Um trotz der Kapazitätslimitation möglichst effektiv und fehlerfrei zu handeln, werden exekutive Prozesse benötigt, die die Aufgaben-Verarbeitung so koordinieren, daß sie möglichst interferenzfrei verläuft. Diese Prozesse müssen die Verarbeitung der einzelnen Informationsströme der Aufgaben koordinieren. Sie werden später noch ausführlich anhand des verwendeten Paradigmas dargestellt. Da diese Prozesse aufgrund der Kapazitätslimitation entstehen, kann die Untersuchung der funktionell-neuroanatomischen Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung allgemeine Erkenntnisse erbringen, welche kortikalen Mechanismen trotz kapazitätsbeschränkter Verarbeitung kohärentes und zielgerichtetes Verhalten ermöglichen.

### 3.2.2 Gedächtnisbelastung

Das markanteste Merkmal einer Doppelaufgabe besteht darin, daß nicht nur eine, sondern zwei Aufgaben ausgeführt werden müssen. Entsprechend müssen auch die Aufgabeninformationen, wie Instruktion oder Reiz-Reaktions-Verknüpfungen, von zwei Aufgaben aufrechterhalten werden. Somit führt die Doppelaufgaben-Situation zu allgemein erhöhten Anforderungen an das Gedächtnissystem (Klingberg, 1998; Kray & Lindenberger, 2000).

Da diese Informationen kurzzeitig durch die Instruktion aufrechterhalten werden müssen, werden sie entsprechend der Unterteilung des Gedächtnissystems in Langzeit- und Arbeitsgedächtnis in letzterem gespeichert (Baddeley, 1990, für einen Überblick).

---

<sup>1</sup> „The whole is more than the sum of its parts“

Das Arbeitsgedächtnis wird häufig wiederum in die zwei Komponenten Aufrechterhaltung und Manipulation des Gedächtnisinhalts aufgeteilt (Baddeley, 1990). Da es sich hier um eine bloße Aufrechterhaltung von Aufgabeninformation handelt, wird entsprechend im Folgenden davon ausgegangen, daß die Doppelaufgabe erhöhte Anforderungen an das Aufrechterhalten von Inhalten im Arbeitsgedächtnis stellt. Eine Reihe bildgebender Studien zeigten, daß diese Anforderung mit Aktivierungen in lateral-präfrontalen Arealen assoziiert sind (z. B. Fiez et al., 1996).

Diese Anforderung ist jedoch zunächst nur additiv, d. h. die Anforderungen an das Gedächtnis in der Doppelaufgabe entspricht den summierten Anforderungen der Einzelaufgaben. Solch eine Anforderung ist daher nicht als spezifisch für die Doppelaufgaben-Verarbeitung anzusehen. Allerdings haben z. B. Rypma et al. (1999) gezeigt, daß auch ein Anstieg der Gedächtnisbelastung zur neuen, über-additiven Rekrutierung neuronaler Ressourcen führen kann. Dies scheint dann der Fall zu sein, wenn die aufrechtzuerhaltende Information die Gedächtnisspanne übersteigt. Falls die Kombination zweier Aufgaben zu einer Überschreitung der Gedächtnisspanne führt, was stark von den verwendeten Aufgaben abhängt, ließen sich identifizierte neuroanatomische Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung auf diese Gedächtnisprozesse zurückführen.

### 3.2.3 Geteilte Aufmerksamkeit

Doppelaufgaben beruhen gewöhnlich darauf, daß zwei Reize verarbeitet werden müssen, wobei jeder Reiz eine Reaktion erfordert. Durch die zeitliche Nähe der Reizpräsentation und die Anforderung, beide Reize schnellstmöglich zu verarbeiten, muß die Aufmerksamkeit zwischen diesen Reizen aufgeteilt werden (Braun, 1998). Verschiedene Autoren haben postuliert, daß die Aufmerksamkeits-Ressourcen limitiert sind und geteilte Aufmerksamkeit daher zusätzlichen Aufwand kostet (z. B. Corbetta et al., 1991; Duncan, 1979; Herath et al., 2001; Navon & Gopher, 1979).

### 3.2.4 Zusammenfassung

Die hier postulierten Prozesse besitzen eine wichtige Eigenschaft: Sie sind ausschließlich in der Doppelaufgaben-Situation gefordert, nicht jedoch in der Einzelaufgaben-Situation. Das ist eine entscheidende Voraussetzung, um die neuroanatomischen Korrelate dieser Prozesse zu identifizieren.

Wie bereits im letzten Kapitel erwähnt, sind diese Prozesse aber nicht zwangsläufig in jeder Doppelaufgabe gefordert. Zum Beispiel könnte eine zu starke zeitliche Trennung dazu führen, daß keine Anforderung an geteilte Aufmerksamkeit vorhanden ist. Des weiteren wurde kritisiert, daß viele Studien so komplexe Paradigmen verwendet

haben, daß keine Kontrolle über die tatsächlich ablaufenden Prozesse und die von den Probanden angewandten Strategien möglich ist. Diese Kritik kann durch die Verwendung des Paradigmas der psychologischen Refraktärperiode umgangen werden, das dieser Arbeit zugrunde liegt und als nächstes vorgestellt wird.

### 3.3 Das Paradigma der psychologischen Refraktärperiode

#### 3.3.1 Einführung

Im Paradigma der psychologischen Refraktärperiode (PRP) werden zwei Reize (S1 und S2) kurz aufeinanderfolgend dargeboten. Der Darbietungsabstand zwischen S1 und S2 ist fest definiert und wird als *Stimulus-Onset-Asynchrony* (SOA; üblicherweise 0 – 1000 ms) bezeichnet. Die Probanden müssen meist auf beide Reize getrennte Reaktionen (R1 auf S1 und R2 auf S2) abgeben, wobei die Antwort-Reihenfolge häufig entweder durch die Präsentations-Reihenfolge der Reize festgelegt ist, oder die erste Aufgabe besonders betont wird.

Die wichtigste Beobachtung in solch einer experimentellen Anordnung ist, daß eine Veränderung des SOAs unterschiedliche Auswirkungen auf die Reaktionszeiten der ersten (RZ1) und der zweiten (RZ2) Aufgabe hat (für einen Überblick siehe Pashler, 1994a). Während RZ1 im Wesentlichen unabhängig vom SOA ist, ist RZ2 extrem SOA-abhängig. Bei sehr kurzen SOAs ist RZ2 stark verlängert. Wird das SOA vergrößert, also die Überlappung der Aufgaben verringert, verkürzt sich RZ2 linear. Bei großen SOAs wird RZ2 schließlich auch vom SOA unabhängig, d. h. RZ2 verkürzt sich ab einem bestimmten SOA nicht weiter. Gewöhnlich wird dieses Muster als Nachweis angesehen, daß vor allem die zweite Aufgabe unter Doppelaufgaben-Interferenz leidet, während die erste Aufgabe relativ interferenzfrei verarbeitet werden kann (Logan & Gordon, 2001).

Die Entdeckung dieses behavioralen Musters geht auf Telford (1931) zurück. In Analogie zur neuronalen Refraktärzeit nach einem Aktionspotential, erklärte er das Muster mit einer *psychologischen Refraktärperiode*, die nach der Bearbeitung der ersten Aufgabe einsetzt. Entsprechend wird die SOA-abhängige Veränderung der zweiten Reaktionszeit als PRP-Effekt bezeichnet. Dieser Gedanke wurde von Welford (1952) weiterentwickelt, der die *single-channel*-Theorie der psychologischen Refraktärperiode aufstellte (vgl. auch Broadbent, 1957; Craik, 1948). Die Grundidee war, daß jede Reaktion einen zentralen Engpaß durchlaufen muß. Dieser Engpaß, auch Flaschenhals (*bottleneck*) genannt, konstituiert eine Verarbeitungs-Stufe, die nur eine Aufgabe zur

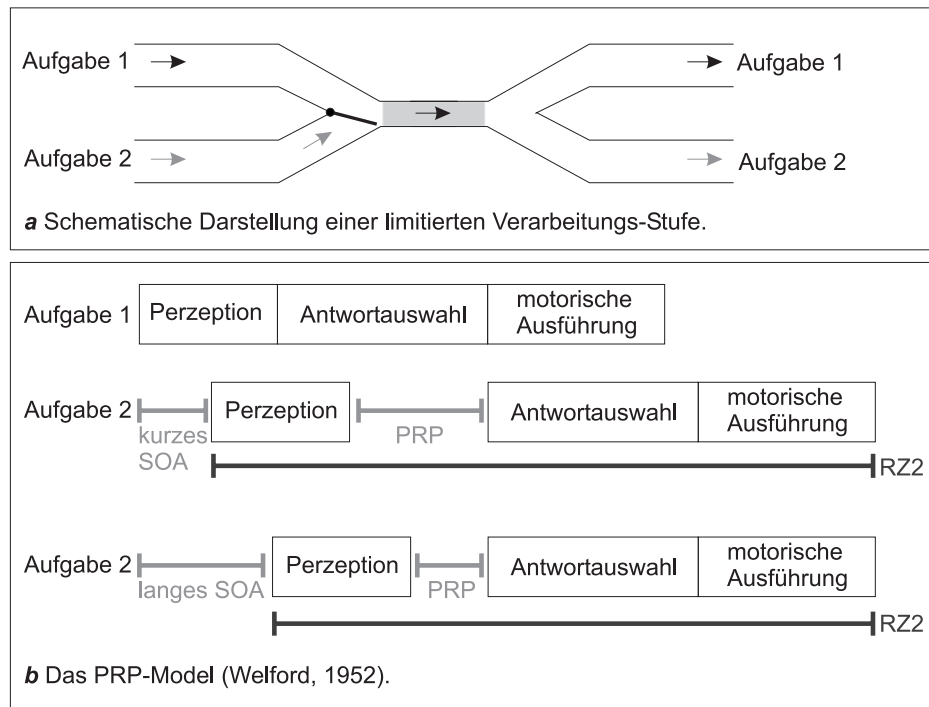


Abbildung 3.1: *Verarbeitung der Aufgaben im PRP-Paradigma. (a) Eine limitierte Verarbeitungsstufe führt zu serieller Verarbeitung der Aufgaben an dieser Stufe. (b) Das PRP-Modell erklärt die Abhängigkeit des PRP-Effektes vom SOA. In diesem Beispiel wird ein zentraler Flaschenhals an der Stufe der Antwort-Auswahl angenommen. PRP Psychologische Refraktärperiode, RZ2 Reaktionszeit auf die 2. Aufgabe, SOA Stimulus-Onset-Asynchrony.*

Zeit verarbeiten kann (vgl. Abb. 3.1a). Interferenz entsteht, wenn beide Aufgaben zeitlich so nah beieinander verarbeitet werden müssen, daß sie um die Verarbeitung durch den Flaschenhals konkurrieren.

Heute wird recht übereinstimmend angenommen, daß die Interferenz dadurch aufgelöst wird, daß die Verarbeitung der zweiten Aufgabe unterbrochen wird und daß diese Unterbrechung den PRP-Effekt verursacht (De Jong, 1995; Levy & Pashler, 2001; Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997; Pashler, 1994a; Schubert, 1999). Alternativ-Erklärungen des PRP-Effektes beruhten vor allem auf Ressourcen-Theorien (z. B. Kahnemann, 1973), die aber weitgehend durch experimentelle Befunde ausgeschlossen werden konnten (für Überblicke siehe Meyer & Kieras, 1997; Pashler, 1994a, vgl. aber Navon & Miller, 2002).



Mit dieser Annahme kann der behaviorale Befund, daß die Reaktionszeitkosten der zweiten Aufgabe mit größerem SOA abnehmen, leicht erklärt werden (Abb. 3.1b): Wenn die Aufgabenreize zeitlich sehr nah präsentiert werden (kurzes SOA), muß die Verarbeitung der zweiten Aufgabe fast so lange unterbrochen werden, wie die Flaschenhals-Stufe für die Verarbeitung der ersten Aufgabe benötigt. Mit zunehmendem SOA ist die Verarbeitung der ersten Aufgabe jedoch schon weiter fortgeschritten, wenn die zweite Aufgabe die Flaschenhals-Stufe benötigt, weshalb sich die Refraktärperiode um den Betrag der SOA-Verlängerung verkürzt. Bei einem hinreichend langen SOA überlappen sich die Aufgaben schließlich so wenig, daß die Flaschenhals-Stufe nicht mehr gleichzeitig von den Aufgaben beansprucht wird und sich die Reaktionszeiten der zweiten Aufgabe nicht mehr verändern.

### 3.3.2 RSB-Theorie

Aus der Frage, welche Verarbeitungs-Stufe den Flaschenhals konstituiert, entstand die *response-selection-bottleneck* (RSB)-Theorie, welche auf den Grundannahmen zur Existenz eines Flaschenhalses von Welford (1952) beruht. Um den Flaschenhals besser lokalisieren zu können, wird die Verarbeitung einer Aufgabe in diskrete, sukzessive Stufen unterteilt (Sternberg, 1969). Die übliche Unterteilung besteht darin, daß die Verarbeitung mit der *Perzeptions*-Stufe beginnt, in der der präsentierte Reiz wahrgenommen und kodiert wird, so daß er in einer abstrakten Repräsentation vorliegt. In der darauf folgenden Stufe der *Antwortauswahl* wird diese abstrakte Reizrepräsentation anhand von Reiz-Reaktions-Regeln in eine abstrakte motorische Repräsentation überführt, welche in der letzten Stufe, der *Motorischen Ausführung*, durch die Transformation in ein konkretes motorisches Programm ausgeführt wird.<sup>2</sup>

Bis heute ist noch nicht endgültig geklärt, welche Verarbeitungsstufe den Flaschenhals konstituiert.<sup>3</sup> Die meiste Evidenz spricht für die Stufe der Antwortauswahl (*response-selection*), was den Namen *response-selection-bottleneck* (RSB)-Theorie begründet (De Jong, 1993; McCann & Johnston, 1992; Pashler, 1984; Schubert, 1999). Allerdings gibt es auch Evidenz für limitierte Verarbeitung an anderen Stufen, wie der Perzeption und Antwort-Initiierung (Arnell & Duncan, 2002; De Jong, 1993; Hein &

---

<sup>2</sup>In Sanders (1990) kann eine ausführliche Beschreibung unabhängiger Verarbeitungs-Stufen gefunden werden. Er beschreibt die Verarbeitungsstruktur u. a. mit den Stufen Vorverarbeitung, Eigenschafts-Extraktion, Identifikation, Antwortauswahl, motorische Programmierung und motorische Adjustierung.

<sup>3</sup>Die limitierte Verarbeitungsstufe wird gewöhnlich mittels der kritischen Pfadtechnik (Schweickert, 1983) identifiziert. Diese Methode basiert darauf, daß die Schwierigkeitsmanipulation einer Prozeß-Stufe der zweiten Aufgabe je nach ihrer Position zum Flaschenhals zu unterschiedlichen behavioralen Effekten führt.

Schubert, eingereicht; Pashler, 1994a). Es ist plausibel anzunehmen, daß die Limitationen in Abhängigkeit der verwendeten Paradigmen, Aufgaben, Stimuli und Reaktionen variieren können (Arnell & Duncan, 2002; De Jong, 1993; Meyer & Kieras, 1997; Schubert, 1999).

### 3.3.3 Vorteile des Paradigmas

Das PRP-Paradigma besitzt eine Reihe von Eigenschaften, die für eine genaue Untersuchung der neuroanatomischen Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung behilflich sind. So kann eine anspruchsvolle Doppelaufgabe aus der Kombination von zwei einfachen Aufgaben generiert werden. Entsprechend kann das im letzten Kapitel genannte Problem ausgeschlossen werden, daß schon die Einzelaufgaben so anspruchsvoll sind, daß lateral-präfrontale Areale bis an ihre Kapazitätsgrenze gefordert sind. Das sollte die Identifikation doppelaufgaben-relatierter kortikaler Areale erleichtern.

Des weiteren kann die zeitliche Überlappung der Aufgaben durch die Veränderbarkeit des SOAs leicht kontrolliert und manipuliert werden. Die Beobachtung eines PRP-Effektes zeigt an, daß die Aufgaben zeitlich überlappend bearbeitet wurden.

Bei zeitlich überlappender Aufgaben-Verarbeitung tritt Interferenz auf, da die Aufgaben um die Verarbeitung durch den Flaschenhals-Mechanismus konkurrieren. Somit kann der PRP-Effekt als Nachweis dienen, daß Konkurrenz und Interferenz zwischen den Aufgaben auftritt.

Ein weiterer Vorteil des Paradigmas begründet sich schließlich in den elaborierten Theorien zur Aufgaben-Verarbeitung, die postuliert worden sind. Auf Basis dieser Theorien sollen im nächsten Abschnitt die zusätzlichen Prozesse, die für die Doppelaufgaben-Verarbeitung benötigt werden, detailliert beschrieben werden.

## 3.4 Zusätzliche Anforderungen im PRP-Paradigma

Im PRP-Paradigma steigen die Anforderungen an das Gedächtnis. Ob diese Anforderungen jedoch so stark sind, daß es zur zusätzlichen Rekrutierung neuronaler Ressourcen kommt, wie es von Rypma et al. (1999) beobachtet wurde, hängt von den verwendeten Aufgaben ab und kann vorher kaum abgeschätzt werden. Des weiteren besteht die Anforderung, die Aufmerksamkeit auf die beiden Reize S1 und S2 aufzuteilen, wenn kurze SOAs verwendet werden. Schwieriger zu beantworten ist jedoch die Frage, ob auch zusätzliche Prozesse zur Koordination der Aufgaben-Verarbeitung benötigt werden und, wenn das der Fall ist, welcher Natur diese Prozesse sind. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf diese Prozesse detailliert eingegangen.

Wenn die Aufgaben-Verarbeitung ohne zusätzliche Prozesse verlaufen würde, d. h. sie nicht koordiniert werden kann, müßte die Ankunfts-Reihenfolge der Aufgaben am Flaschenhals die Verarbeitungs-Reihenfolge determinieren. Die zuerst ankommende Aufgabe wird automatisch sofort verarbeitet und die zweite Aufgabe muß warten. Ist die erste Aufgabe abgearbeitet, wird automatisch die zweite Aufgabe verarbeitet. Diese Annahme wird als *first-come first-served* Prinzip oder als *recruitment model* bezeichnet (z. B. De Jong, 1995). Wenn sie zutrifft, dürften neuroanatomische Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung nicht auf Prozesse der Aufgaben-Koordination zurückzuführen sein.

### 3.4.1 Reihenfolge-Koordination und Einstellen des Flaschenhalses

Es gibt jedoch Hinweise, daß die Verarbeitungs-Reihenfolge nicht ausschließlich anhand der Ankunftszeiten am Flaschenhals bestimmt wird, sondern willentlich kontrolliert werden kann. So sind Probanden in der Lage, die Aufgaben in der instruierten Reihenfolge zu bearbeiten, selbst wenn die Aufgaben gleichzeitig oder in der falschen Reihenfolge präsentiert werden (Hawkins et al., 1979; Meyer & Kieras, 1997; Van Selst et al., 1999). Wenn die Flaschenhals-Stufe die Aufgaben also nicht immer in der Reihenfolge ihrer Ankunft verarbeitet, muß die Kontrolle über die Verarbeitungs-Reihenfolge von einem anderen Prozeß realisiert werden. Solch ein zusätzlicher Prozeß ist von De Jong (1995) vorgeschlagen worden (vgl. auch Umiltà et al., 1992). Auf Basis seiner Befunde beschreibt er eine übergeordnete Kontrollstruktur, die die Flaschenhals-Stufe den Aufgaben in der geforderten Reihenfolge zuweist.

De Jongs (1995) Annahme eines zusätzlichen Prozesses beruht auf einer experimentellen Schwierigkeits-Manipulation der Reihenfolge-Koordination. Er wollte zunächst untersuchen, ob der Flaschenhals-Mechanismus die Aufgaben automatisch auf Basis ihrer Ankunftszeit verarbeitet oder ob die Reihenfolge willentlich kontrolliert werden kann. Um diese Frage zu testen, kreierte De Jong eine Situation, in der durch die Präsentation eines Hinweisreizes eine bestimmte Verarbeitungs-Reihenfolge erwartet und vorbereitet wurde, in der die Reize dann aber in der entgegengesetzten Reihenfolge präsentiert wurden, so daß sie in der falschen Reihenfolge am Flaschenhals eintrafen. Die kritische Frage war, ob die Probanden in der vorbereiteten Reihenfolge antworten oder in der Reihenfolge der Reizpräsentation. De Jong konnte zeigen, daß die Probanden in solchen Durchgängen häufig in der vorbereiteten Reihenfolge reagierten, nicht jedoch in der Reihenfolge der Reizrepräsentation. Entsprechend schloß er, daß die Aufgaben-Verarbeitung an der Flaschenhals-Stufe explizit kontrolliert werden kann.

Diese Befunde stützte De Jong (1995) durch ein weiteres Experiment, in dem

die Präsentations-Reihenfolge der Reize zufällig wechselte, aber kein Hinweisreiz über die zu erwartende Reihenfolge dargeboten wurde. Die Probanden mußten stattdessen die Präsentations-Reihenfolge wahrnehmen und ihre Antwort-Reihenfolge entsprechend anpassen. Wenn die Verarbeitungs-Reihenfolge am Flaschenhals nicht explizit vorbereitet wird, sollte der Flaschenhals auf die Aufgabe eingestellt sein, die er zuletzt bearbeitet hat (De Jong, 1995). Entsprechend sollte sich ein Vorteil ergeben, wenn die Präsentations-Reihenfolge zwischen zwei Durchgängen wechselt, da hier die zuletzt ausgeführte Aufgabe des letzten Durchgangs der zuerst auszuführenden Aufgabe des aktuellen Durchgangs entspricht. Wenn jedoch die Verarbeitungs-Reihenfolge explizit geplant wird, erscheint die Strategie sinnvoll, die gleiche Reihenfolge wie im vorigen Durchgang wieder vorzubereiten (De Jong, 1995). In diesem Fall sollte eine Wiederholung der Präsentations-Reihenfolge vorteilhaft sein. Die Daten De Jongs sprechen für letztere Annahme: Die Probanden reagierten langsamer und machten mehr Fehler, wenn die Präsentations-Reihenfolge relativ zum vorherigen Durchgang wechselte. Dieser Befund zeigt, daß Probanden willentlich eine bestimmte Aufgaben-Verarbeitung am Flaschenhals vorbereiten können. Willentliche Vorbereitung impliziert direkt, daß Kontrolle über die Aufgaben-Verarbeitung ausgeübt werden kann.

De Jong (1995) interpretiert die Vorbereitung als Voreinstellung der Flaschenhals-Stufe auf eine bestimmte Aufgabe. Wenn diese Vorbereitung falsch ist, wie bei einem Reihenfolge-Wechsel, dann muß der Flaschenhals durch einen zusätzlichen Prozeß auf die korrekte Aufgabe umgeschaltet werden.

Ein ähnlicher oder identischer Prozeß in der Verarbeitung von Doppelaufgaben ist das Umschalten der Flaschenhals-Stufe auf die zweite Aufgabe, wenn die Verarbeitung der ersten Aufgabe beendet ist. De Jong (1995) zeigte durch Manipulation der möglichen Vorbereitung, daß nicht nur die Aufgaben, sondern auch der Wechsel zwischen den Aufgaben vorbereitet werden kann. Das deutet darauf hin, daß das Umschalten der Flaschenhals-Stufe durch einen zusätzlichen Prozeß geschieht. Momentan gibt es keine Hinweise, daß dieses Einstellen des Flaschenhalses auf die zweite Aufgabe von dem o. g. Einstellen bei einem Reihenfolge-Wechsel differenzierbar ist, weshalb beide Prozesse im Folgenden zusammengefaßt werden.

Somit zeigt sich, daß ein zusätzlicher, aufgaben-koordinierender Prozeß für die Verarbeitung von PRP-Doppelaufgaben postuliert werden kann, der den Flaschenhals-Mechanismus auf die Verarbeitung der korrekten Aufgabe einstellt. Sobald sich die Aufgaben-Verarbeitung zeitlich überlappt und die Verarbeitung der zweiten Aufgabe unterbrochen wird, ist der Prozeß gefordert, da er den Flaschenhals-Mechanismus auf die zweite Aufgabe umschalten muß, wenn die erste verarbeitet ist. Wenn der Flaschenhals-Mechanismus auf die falsche Aufgabe voreingestellt ist, wie es bei einem

Reihenfolge-Wechsel vorkommt, ist der Prozeß ein zusätzliches Mal gefordert, da der Flaschenhals-Mechanismus vor der Aufgaben-Verarbeitung erst auf die korrekte Aufgabe umgeschaltet werden muß. Somit ist es über eine Manipulation der Verarbeitungs-Reihenfolge möglich, den hoch-spezifischen Prozeß des einmaligen Umschaltens des Flaschenhals-Mechanismus zu isolieren. Diese Spezifität der Manipulation soll auch in dieser Arbeit ausgenutzt werden, um die Funktionalität doppelaufgaben-relatierter Areale möglichst genau zu bestimmen (Experimente 2 und 3).

Auch auf Basis theoretischer Überlegungen und Simulationen ist postuliert worden, daß die Doppelaufgaben-Verarbeitung zusätzliche koordinierende Prozesse benötigt. Im Wesentlichen sind diese Prozesse im Einklang mit den Vorschlägen von De Jong (1995), weshalb sie im folgenden Abschnitt nur kurz diskutiert werden sollen.

### 3.4.2 Zusätzliche Anforderungen auf Basis theoretischer Modelle

Im Folgenden sollen zwei elaborierte theoretische Modelle zur Aufgaben-Verarbeitung im PRP-Paradigma diskutiert werden, die exekutive Prozesse explizit berücksichtigen: das EPIC-Modell (Executive-Process Interactive Control; Meyer et al., 1995; Meyer & Kieras, 1997) und das ECTVA-Modell (Executive Control of Visual Attention; Logan & Gordon, 2001). Beide Modelle nehmen an, daß die Unterbrechung der zweiten Aufgabe nicht notwendigerweise durch einen unumgänglichen Flaschenhals-Mechanismus entsteht, sondern auch durch eine Verarbeitungs-Strategie der Probanden verursacht werden kann, die Aufgaben zumindest an einer Verarbeitungs-Stufe seriell zu verarbeiten.<sup>4</sup> Diese Strategie dient der Vermeidung von Interferenz und der Sicherstellung der korrekten Antwort-Reihenfolge. Für die vorliegende Arbeit ist relevant, daß beide Modelle annehmen, daß auch diese serielle Verarbeitungs-Strategie zusätzliche exekutive Prozesse zur Aufgaben-Koordination erfordern (Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997). Interessanterweise ähnelt die Funktionalität der postulierten Prozesse derer, die De Jong (1995) für das Einstellen der Flaschenhals-Stufe vorgeschlagen hat.

**Zusätzliche Prozesse im EPIC-Modell** Meyer & Kieras (1997) nehmen im prozeduralen EPIC-Modell zunächst an, daß die beiden Aufgaben jeweils in einen bestimmten Verarbeitungs-Modus gesetzt werden, der bestimmt, ob die Aufgaben-Verarbeitung

---

<sup>4</sup>Somit gehen beide Modelle davon aus, daß in manchen Situationen prinzipiell auch eine parallele Verarbeitung möglich ist. Für diese Annahme gibt es bislang allerdings wenig experimentelle Evidenz, z. B. von Schumacher et al. (2001). Levy & Pashler (2001) konnten weiterhin zeigen, daß die Befunde von Schumacher et al. nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen replizierbar sind. Darüber hinaus haben Logan & Gordon (2001) in Simulationen zeigen können, daß eine serielle Verarbeitungs-Strategie häufig effektiver als eine parallele ist (vgl. auch Pashler, 1994b).

durchgängig verläuft (unmittelbarer Modus oder *immediate mode*) oder unterbrochen wird (verzögerter Modus oder *deferred mode*). Dieses Setzen des Aufgaben-Modus ist nicht von der automatischen Vorbereitung auf eine Aufgabe zu unterscheiden, wie es De Jong (1995) beobachtet hat. Dementsprechend kann es auch nicht von einer Vor-einstellung der Flaschenhals-Stufe auf eine bestimmte Aufgabe unterschieden werden. Sollte die geforderte Verarbeitungs-Reihenfolge der Aufgaben unvorhergesehen wechseln, so ist nach De Jong ein Umschalten der Flaschenhals-Stufe gefordert, während nach Meyer & Kieras der Verarbeitungs-Modus der Aufgaben gewechselt werden muß. Diese Konzepte sind aber nach aktuellem Kenntnisstand empirisch nicht trennbar.

Im Verlauf der Aufgaben-Verarbeitung sind dann weitere exekutive Prozesse notwendig, die die Aufgaben-Verarbeitung überwachen, die Verarbeitung der zu unterbrechenden Aufgabe stoppen, den Verarbeitungs-Modus wechseln und die Verarbeitung der Aufgabe wieder aufnehmen. Wird das Wechseln des Verarbeitungs-Modus wieder durch Umschalten der Flaschenhals-Stufe ersetzt, dann ist diese prozessuale Verarbeitung mit den Annahmen De Jongs im Einklang, auch wenn dieser die Prozesse des Stoppens und Wiederaufnehmens nicht explizit genannt hat.

**Zusätzliche Prozesse im ECTVA-Modell** Im ECTVA-Modell ist eine serielle Verarbeitung durch eine sukzessive Priorisierung der Aufgaben an zentralen Verarbeitungs-Stufen wie der Antwort-Auswahl realisiert. Priorisierung bedeutet, daß die für die Ausführung einer Aufgabe benötigten Parameter (Aufgaben-Set oder *task-set*) besonders aktiviert werden. Im PRP-Paradigma bedeutet dies, daß zunächst das Aufgaben-Set der zuerst zu bearbeitenden Aufgabe priorisiert wird und danach das Aufgaben-Set der zweiten Aufgabe. Somit ist diese Umgewichtung der Aufgaben-Sets nicht von einem Umschalten des Flaschenhals-Mechanismus von einer Aufgabe auf die andere zu unterscheiden.

Logan & Gordon (2001) postulieren, daß die Koordination, also das Umgewichten, der Aufgaben-Sets durch hierarchisch übergeordnete exekutive Prozesse realisiert wird. Diese exekutiven Prozesse beeinflussen die Verarbeitung an zentralen Verarbeitungs-Stufen, indem die Reiz-Kategorisierung (nicht Perzeption) auf die aufgaben-relevanten Reiz-Dimensionen eingestellt wird und die Antwort-Auswahl nach der ersten Aufgabe neu initialisiert wird.

**Resümee** Somit zeigt sich, daß die zusätzlichen Prozesse in der Doppelaufgaben-Verarbeitung in allen Theorien, RSB, EPIC und ECTVA, die gleiche Funktionalität besitzen. Im Wesentlichen stellen diese Prozesse die korrekte Verarbeitungs-Reihenfolge sicher und kontrollieren das gezielte Wechseln der Aufgaben-Verarbeitung. Die verschiedenen Begriffe „Einstellen des Flaschenhalses“, „Setzen des Aufgaben-Modus“

und „Priorisierung von Aufgaben-Sets“, können dabei als konzeptuell äquivalent angesehen werden.

Diese Prozesse sind nach allen Theorien nur dann gefordert, wenn sich die Aufgaben-Verarbeitung zeitlich überlappt. In diesem Fall müssen die Aufgaben an zumindest einer Verarbeitungs-Stufe seriell verarbeitet werden, entweder aufgrund eines unumgänglichen Flaschenhalses oder aufgrund von Strategien zur Interferenzvermeidung. Da für beide Fälle identische Prozesse gefordert sind, ist es für die vorliegende Arbeit nicht relevant, wodurch die serielle Verarbeitung verursacht wurde, sondern nur, daß sie auftritt. Aus diesem Grund wird der Klarheit halber in der restlichen Arbeit davon ausgegangen, daß ein unumgänglicher Flaschenhals-Mechanismus vorliegt.

Die Konvergenz der Annahmen zur Doppelaufgaben-Verarbeitung wird weiter durch das bekannte Modell von Norman & Shallice (1986) gestützt.

### 3.4.3 Das Modell von Norman & Shallice

Norman & Shallice (1986) postulierten eine umfassende Theorie zur Handlungskontrolle, wobei sie sich auch explizit auf das PRP-Paradigma beziehen. Nach ihrer Theorie sind Handlungen auf Basis von Schemata repräsentiert. Diese Schemata können unterschiedliche Aktivierungs-Niveaus aufweisen, die durch externale (z. B. Reize) und internale (z. B. Motivation) Ereignisse beeinflußt werden können. Die Schemata konkurrieren dabei um ihre Aktivierungsstärke, z. B. durch laterale Inhibition und Aktivierung. Übersteigt das Aktivierungs-Niveau eines Schemas eine gegebene Schwelle, wird es von einem *Contention Scheduling* genannten Mechanismus ausgewählt und entsprechend ausgeführt.

In vielen Situationen kann so durch das Contention Scheduling sinnvolles und kohärentes Verhalten garantiert werden. In manchen Fällen, z. B. bei neuen oder komplexen Aufgaben, kann es aber vorkommen, daß das handlungs-angemessene Schema nicht zur Verfügung steht oder nicht stark genug aktiviert ist. In diesem Fall greift eine übergeordnete Kontroll-Struktur ein, das *Supervisory Attentional System* (SAS), welches konkurrierende Schemata hemmen und benötigte Schemata aktivieren kann, so daß die Schema-Auswahl durch das Contention Scheduling beeinflußt wird.

In einer PRP-Doppelaufgabe konkurrieren die Schemata der beiden Einzelaufgaben um die Verarbeitung durch einen limitierten Flaschenhals-Mechanismus. Für diesen konkreten Fall postulieren Norman & Shallice (1986), daß sich die Schemata gegenseitig inhibieren. Um den Effekt der gegenseitigen Inhibition zu mindern und so eine schnelle Schema-Selektion zu gewährleisten, greift das SAS koordinierend ein (Norman & Shallice, 1986). Da durch die Beeinflussung der Aktivierungs-Niveaus der Schemata

somit das SAS bestimmt, welche Aufgabe zuerst verarbeitet wird, kann es im aktuellen Kontext als vergleichbarer Prozeß zu der durch De Jong (1995) vorgeschlagenen Reihenfolge-Koordination, bzw. Flaschenhals-Kontrolle angesehen werden.

Auch wenn dieser Fall nicht explizit von Norman & Shallice diskutiert wurde, sind die Befunde von De Jong (1995) im Einklang mit dem Modell. So besitzen die Schemata unterschiedliche Aktivierungs-Niveaus, die durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst werden können. Wenn angenommen wird, daß die von De Jong gezeigte Vorbereitung dazu führt, daß das im vorigen Durchgang zuerst ausgeführte Schema im aktuellen Durchgang voraktiviert ist, dann würde ein Reihenfolge-Wechsel dazu führen, daß das falsche Schema stärker aktiviert ist, als das korrekte Schema. Entsprechend muß das SAS eingreifen und die Schemata so umgewichten, daß das inkorrekte Schema inhibiert und das korrekte Schema aktiviert wird, so daß das Contention Scheduling die korrekte Aufgabe als erstes auswählt.

Entsprechend kann nach dem Modell von Norman & Shallice (1986) postuliert werden, daß die Ausführung einer PRP-Doppelaufgabe einen zusätzlichen Prozeß – das SAS – benötigt, der die Verarbeitung der Aufgaben – also die Selektion der Schemata – koordiniert.

#### 3.4.4 Resümee

Somit zeigt sich eine große Übereinstimmung in den verschiedenen Theorien zur Aufgaben-Verarbeitung im PRP-Paradigma. Wenn zwei Reize schnell aufeinanderfolgend dargeboten werden und jeder Reiz eine Reaktion erfordert, wird die Verarbeitung der zweiten Aufgabe unterbrochen, d. h. die Verarbeitung an zumindest einer Prozeß-Stufe verläuft seriell. Entscheidend ist, daß sowohl behaviorale Daten (z. B. De Jong, 1995) als auch theoretische Überlegungen (Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997; Norman & Shallice, 1986) nahe legen, daß die Aufgaben-Verarbeitung kontrolliert wird und daß diese Kontrolle durch zusätzliche exekutive Prozesse realisiert wird. Die im Detail postulierten exekutiven Prozesse lassen sich so zusammenfassen, daß sie Kontrolle darüber ausüben, welche Aufgabe wann von der Flaschenhals-Stufe verarbeitet wird.

Wie bereits erwähnt, ist ein Ziel dieser Arbeit nicht nur die Identifikation und Lokalisation doppelaufgaben-relatierter kortikaler Areale, sondern auch die genauere Charakterisierung ihrer Funktionalität. Um zu prüfen, ob neuroanatomische Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung mit dem nach vielen Theorien zentralen Prozeß der Aufgaben-Koordination assoziiert sind, bietet sich die Verwendung der von De Jong



(1995) vorgeschlagenen Reihenfolge-Manipulation an. Da sie es ermöglicht, diesen Prozeß spezifisch zu isolieren, soll sie in dieser Arbeit entsprechend zur Spezifikation der Funktionalität doppelaufgaben-relatierter Areale verwendet werden.

Die verschiedenen Modelle postulieren, daß Interferenz am Flaschenhals durch die zeitnahe Präsentation der Aufgaben entsteht, da in diesem Fall beide Aufgaben um die Verarbeitung durch den Flaschenhals-Mechanismus konkurrieren (Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997; Pashler, 1994a). Im klassischen PRP-Paradigma, bei der die Präsentations-Reihenfolge der geforderten Verarbeitungs-Reihenfolge entspricht, bedeutet dies, daß die Konkurrenz der Aufgaben, und somit auch die Interferenz, mit größerem SOA abnimmt. Wenn die Interferenz geringer wird, sinken entsprechend auch die Anforderungen an die aufgaben-koordinierenden Prozesse. Das Modell von Norman & Shallice (1986) postuliert den gleichen Effekt, nur werden andere Begriffe verwendet: Werden zwei Reize präsentiert, konkurrieren die zugehörigen Schemata miteinander. Ist das SOA groß, setzt die Konkurrenz, z. B. durch laterale Inhibition, erst spät ein, so daß die erste Aufgabe bereits ein hohes Aktivierungs-Niveau aufweist und das SAS kaum eingreifen muß, damit das Contention Scheduling möglichst schnell die korrekte Aufgabe auswählt. Je kürzer das SOA ist, desto früher setzt die Konkurrenz in der Verarbeitung der ersten Aufgabe ein und das SAS ist entsprechend stärker gefordert, die zweite Aufgabe zu inhibieren und die erste zu aktivieren.

Wird das SOA schließlich sehr groß, überlappen sich die Aufgaben nicht mehr, so daß auch keine Interferenz (am Flaschenhals/ zwischen den Schemata) mehr auftritt. Entsprechend sind die hier postulierten Prozesse der Aufgaben-Koordination bei zu langen SOAs gar nicht mehr gefordert. Wenn diese Aufgaben-Koordination durch Areale des lateral-präfrontalen Cortex realisiert wird, ist es verständlich, warum Studien mit zu großem oder unkontrolliertem SOA (Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000; Just et al., 2001; Klingberg, 1998; Smith et al., 2001) keinen Zusammenhang zwischen Doppelaufgaben-Verarbeitung und LPFC beobachten konnten: Es waren möglicherweise gar keine aufgaben-koordinierenden Prozesse gefordert (vgl. auch Herath et al., 2001).

Vor allem die Daten von Herath et al. (2001) stützen diese Interpretation. Diese Autoren konnten zeigen, daß bestimmte lateral-präfrontale Areale nur dann aktiviert sind, wenn sich die Aufgaben überlappen (SOAs 200 – 300 ms), aber keine Aktivierung aufweisen, wenn sich die Aufgaben nicht überlappen (SOAs 1150 – 1250 ms). Ungeklärt ist allerdings noch, ob *graduell* unterschiedlichen Ausmaße der Interferenz neuroanatomisch reflektiert sind. Mit anderen Worten, führt eine mittlere Überlappung der Aufgaben zu weniger Aktivierung als eine starke Überlappung? Diese Frage betrifft die Arbeitsweise dieser Areale: Arbeiten sie immer gleich, sobald Interferenz auftritt („Alles-oder-Nichts“) oder arbeiten sie *graduell* abgestuft, je nach Ausmaß der Interferenz?

Diese Frage kann mit einer klassischen Manipulation im PRP-Paradigma untersucht werden, der graduellen Variation des SOAs. Entsprechend soll auch dieser Ansatz zur Charakterisierung doppelaufgaben-relatierter kortikaler Areale in dieser Arbeit verwendet werden.

Da die Voraussagen der RSB-Theorie und des Modells von Norman & Shallice im aktuellen Kontext identisch sind, wird in den Experimenten hauptsächlich auf Basis der RSB-Theorie argumentiert. Ein ausführlicher Bezug zum Modell von Norman & Shallice wird in der Abschlußdiskussion hergestellt.

### **3.5 Zusammenfassung**

Bei der Verarbeitung einer Doppelaufgabe gemäß des PRP-Effektes lassen sich drei zusätzliche Anforderungen postulieren: geteilte Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Koordination der Aufgaben-Verarbeitung. Der behaviorale PRP-Effekt dient dabei als Indikator dafür, daß Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit bestanden, daß Interferenz auftrat und daß diese Interferenz durch exekutive Prozesse aufgelöst wurde, die die Aufgaben-Verarbeitung an der Flaschenhals-Stufe koordinieren.

Somit lassen sich neuroanatomische Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung, die mit dem PRP-Paradigma gewonnen wurden, auf diese Prozesse zurückführen. Die elaborierten Theorien zur Aufgaben-Verarbeitung ermöglichen es des weiteren, die Anforderungen an die einzelnen Prozesse zu manipulieren, um so die Funktionalität und Charakteristik doppelaufgaben-relatierter Areale zu spezifizieren.



## Kapitel 4

# Allgemeine Fragestellung

Diese Arbeit hatte das Ziel, die Funktionalität lateral-präfrontaler Areale bei der Verarbeitung von Doppelaufgaben zu untersuchen. Dieses Ziel sollte schrittweise in einer Reihe von fMRT-Experimenten erreicht werden. Dabei wurde in allen Experimenten das PRP-Paradigma benutzt. Im Detail wurden in allen Experimenten eine audiotische und eine visuelle 3-fach Wahlreaktionsaufgabe mit variablen SOAs dargeboten. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, daß wichtige Kritikpunkte, die die unklare Befundlage der bisherigen Studien verursacht haben könnten, ausgeschlossen werden.

Das erste Experiment sollte eine grundlegende Frage klären: Gibt es einen Zusammenhang zwischen Doppelaufgaben-Verarbeitung und dem LPFC? Wie in Kapitel 2 dargestellt, ist diese Frage noch unbeantwortet. Das PRP-Paradigma ermöglicht hier bei Verwendung kurzer SOAs mittels des PRP-Effekts das Auftreten zusätzlicher kognitiver Anforderungen an Gedächtnis, geteilte Aufmerksamkeit und Koordination der Aufgaben-Verarbeitung begründen zu können. Wie in Kapitel 3 erläutert, stellen solche zusätzlichen Anforderungen eine Voraussetzung zur Identifikation neuroanatomischer Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung dar.

Neben der *Identifikation* doppelaufgaben-relatierter Areale sollte auch deren *Lokalisation* untersucht werden. Somit war eine weitere Frage des ersten Experiments, in welchem Bereich des LPFC doppelaufgaben-relatierte Areale lokalisiert sind.

Nach dieser Identifikation und Lokalisation sollte die Funktionalität der doppelaufgaben-relatierten Areale eingegrenzt werden: Sind die doppelaufgaben-relatierten Aktivierungen auf die Anforderungen nach Gedächtnis, geteilter Aufmerksamkeit oder Koordination der Aufgaben-Verarbeitung zurückzuführen? Diese Frage sollte mittels parametrischer Manipulationen in den Experimenten 2 und 3 untersucht werden.

Die letzte Frage dieser Arbeit bezieht sich auf die Arbeitsweise dieser Areale: Arbeiten sie graduell abgestuft oder binär, d. h. nach einem „Alles-oder-Nichts“-Prinzip? Diese Frage sollte mittels einer Manipulation der Aufgaben-Überlappung, also des SOAs, im vierten Experiment untersucht werden.

## Kapitel 5

# Allgemeine Methode: Funktionelle Magnetresonanztomographie

Bildgebende Verfahren zur Lokalisation kognitiver Vorgänge im menschlichen Gehirn haben in den letzten Jahren einen großen Aufschwung erlebt (Cabeza & Nyberg, 2000), wobei die Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) besonders attraktiv ist. Diese Attraktivität begründet sich aus verschiedenen Vorteilen der fMRT gegenüber bisherigen Verfahren, wie z. B. nicht-invasive Messung, hohe räumliche Auflösung und die Nutzbarkeit schon vorhandener Magnetresonanztomographie-Geräte. Grundsätzlich basieren bildgebende Methoden auf der Messung physiologischer Parameter, die mit neuronaler Aktivität korrelieren. So werden bei der fMRT regionale Änderungen der Blutoxygenierung gemessen und geschlossen, daß diese Änderungen neuronale Aktivitätsänderungen reflektieren. Somit ist es möglich, kognitive Vorgänge zu lokalisieren und eine „Kartierung“ des Gehirns vorzunehmen. Im Folgenden sollen die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der fMRT kurz dargestellt werden.

### 5.1 Magnetresonanztomographie

Der grundlegende Ablauf einer MRT-Messung besteht aus den folgenden Schritten: Zunächst wird ein Proband in ein statisches Magnetfeld gebracht. Daraufhin wird kurzzeitig ein hochfrequentes Signal eingestrahlt. Dieses Signal regt Atomkerne im Gewebe des Probanden an, so daß nach Ende der Einstrahlung der Proband wiederum ein Signal abstrahlt, welches gemessen wird und zur Bildrekonstruktion dient. Im Folgenden sollen nun die Grundlagen für diesen Effekt erklärt werden.

Alle Verfahren der Magnetresonanztomographie basieren auf dem physikalischen Phänomen der magnetischen Kernresonanz (*nuclear magnetic resonance*, NMR). Alle

Atomkerne besitzen eine Eigenrotation, den sogenannten Kernspin. Da Atomkerne eine elektrische Ladung tragen und eine bewegte elektrische Ladung zur Ausbildung eines Magnetfelds führt, besitzt jeder Atomkern ein Magnetfeld entlang seiner Rotationsachse. Wird nun ein externes Magnetfeld angelegt, richten sich die Magnetfelder der Kerne an diesem externen Feld aus.

Für die MRT-Messung ist ein weiterer Effekt von Bedeutung. Wenn ein Objekt um die eigene Achse rotiert, bleibt die Rotationsachse nicht stabil, sondern präzessiert. Diese Präzession ist mit den „torkelnden“ Bewegungen eines Kreisels zu vergleichen, der angestoßen wurde. Die Rotationsachse bewegt sich also kegelförmig.

Die bisherige Ausführung beschreibt den Zustand in einem konstanten externen Magnetfeld. In diesem Zustand ist kein Signal meßbar, da sich die Magnetfelder der präzessierenden Kerne außer Phase bewegen und somit gegenseitig aufheben. Um ein Signal zu messen, wird ein kurzer Hochfrequenz (HF) Puls mit der Präzessionsfrequenz in das Gewebe eingestrahlt. Da die Frequenz des HF-Pulses und die Präzessionsfrequenz identisch sind, nehmen die Atomkerne einen Teil der Energie des HF-Pulses auf, was auch als Resonanz bezeichnet wird. Diese Energieaufnahme bewirkt, daß sich die Präzessionsbewegungen synchronisieren. Wenn sich nun ein Großteil der Kerne mit ihrem Magnetfeld synchron bewegt, summiert sich das Feld auf und wird mit Hilfe einer Antenne extern meßbar. Dies ist das entscheidende Signal, welches bei der MRT gemessen wird.

Wenn der HF-Puls abgeschaltet wird, desynchronisieren die Präzessionsbewegungen der Atomkerne wieder, d. h. sie geraten immer stärker außer Phase und das meßbare Signal wird zunehmend schwächer. Die Änderungsrate des Signals, als Parameter  $T_2$  und  $T_2^*$  bezeichnet,<sup>1</sup> hängt von magnetischen Inhomogenitäten des umliegenden Magnetfelds ab. Dieser Parameter ist für die funktionelle MRT entscheidend.

## 5.2 Funktionelle Magnetresonanztomographie

### 5.2.1 Physiologische Grundlagen

Wenn Neurone aktiv sind, steigt ihr Metabolismus, was sich z. B. im Verbrauch von Glukose und Sauerstoff äußert (für einen Überblick siehe Jueptner & Weiller, 1995). Um die Neurone zu versorgen, wird der Durchmesser der Blutgefäße vergrößert, was

---

<sup>1</sup>Für den  $T_2$ -Parameter werden weitere HF-Pulse eingestrahlt, so daß die Desynchronisation langsamer verläuft. Der  $T_2^*$ -Parameter beschreibt hingegen die sehr schnell verlaufende Desynchronisation nach einem einzigen HF-Puls. Aus diesem Grund beruhen schnelle Messungen, wie z. B. die in diesen Studien verwendete EPI-Sequenz, auf dem  $T_2^*$ -Parameter.

zu Änderungen im regionalen cerebralen Blutvolumen (rCBV) und im regionalen cerebralen Blutfluß (rCBF) führt. Dieser Mechanismus ist als neurovaskuläre Kopplung (Roland, 1993) bezeichnet und durch Befunde an Primaten bestätigt worden (z. B. Logothetis et al., 2001).

### 5.2.2 Der BOLD-Effekt

Im Blut enthaltener Sauerstoff ist vor allem an Hämoglobin gebunden. Wenn das Hämoglobin Sauerstoffmoleküle an die Umgebung abgibt, wird es desoxygeniert. Desoxygeniertes Hämoglobin ist im Gegensatz zu oxygeniertem Hämoglobin paramagnetisch. Die Präsenz eines paramagnetischen Stoffes im Gewebe führt zu lokalen Inhomogenitäten des Magnetfelds. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, führt eine solche Inhomogenität zu einer Änderung des  $T_2$  Parameters. Wenn also Neurone aktiv sind und daraufhin der Blutfluß – und entsprechend der Anteil an oxygeniertem Hämoglobin – ansteigt, ändert sich das Verhältnis zwischen oxygeniertem und desoxygeniertem Hämoglobin, was direkt in einer Änderung des  $T_2$  Parameters resultiert.

Somit dient eine Änderung des Anteils an desoxygeniertem Blut als Hinweis auf eine Änderung des Blutflusses, was wiederum als Indikator für neuronale Aktivität angesehen wird. Dieser Mechanismus wurde als *Blood Oxygen Level Dependent* (BOLD) Kontrast bezeichnet.

Die Signaländerung durch den BOLD-Effekt, auch als hämodynamische Reaktion bezeichnet, besitzt relativ konstante Grund-Eigenschaften (Aguirre et al., 1998; Buckner, 1998; Miezin et al., 2000; Rosen et al., 1998). So steigt das Signal bereits ca. 2s nach der Aktivität der Neurone an und erreicht das Maximum nach ca. 4 bis 6s. Innerhalb von 5 bis 12s nach der neuronalen Aktivität sinkt das Signal wieder auf ca. 10% des Ausgangsniveau zurück. Häufig sinkt das Signal später sogar noch unter den Ausgangswert (*undershoot*), bevor es wieder zu diesem zurückkehrt. Die einzelnen Parameter können allerdings eine erhebliche Varianz aufweisen. So beobachteten z. B. Aguirre et al., daß die Zeit zur maximalen Amplitude zwischen 2,7 und 6,2s variieren kann. Während die Parameter innerhalb eines kortikalen Areal innerhalb einer Sitzung relativ konstant sind, treten vor allem zwischen Personen, Sitzungen und Arealen größere Unterschiede auf (Aguirre et al., 1998; Kastrup et al., 1999).



### 5.3 Prozedur der fMRT-Messungen

Hier sollen kurz die technischen Daten der fMRT-Messungen aller Studien dieser Arbeit beschrieben werden. Alle Messungen wurden mit einem 3 Tesla Tomographen (Med-spec 30/100, Bruker, Ettlingen, Deutschland) am Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung, Leipzig, durchgeführt. Der Tomograph war mit einer *bird cage* Kopfgradientenspule (SGRAD MkIII 580/400/S, MAGNEX Scientific Ltd., Abingdon, UK) ausgestattet. Die Probanden lagen rücklings auf der Tomographen-Liege. Um Bewegungen zu reduzieren, wurde der Kopf mit Schaumstoffkissen und die Arme und Tastaturen mit Vakuumkissen fixiert. Durch eine Spiegelbrille konnten die Probanden eine Mattscheibe, die zur visuellen Stimulation benutzt wurde, sehen. Zur Antwortregistrierung wurden zwei MRT-taugliche Tastboxen mit jeweils 4 Tasten verwendet. Des weiteren trugen die Probanden Gehörschutzstopfen und einen schalldämpfenden Kopfhörer, über den auditorische Reize dargeboten wurden. In allen Experimenten wurden 14 axiale Schichten (19.2 cm FOV, 64x64 Matrix, 5 mm Schichtdicke, 2 mm Schichtabstand)<sup>2</sup> parallel zur AC-PC-Ebene gemessen. Dazu wurde eine *single shot, gradient recalled* EPI-Sequenz (TR = 2 s in Experiment 1 und 2, TR = 1 s in Experiment 3 und 4; TE = 30 ms; 90° flip angle)<sup>3</sup> benutzt. Je nach Experiment wurden 1 oder 2 funktionelle Durchläufe (*runs*) ausgeführt. Vor den funktionellen Durchläufen wurden 16 anatomische MDEFT und EPI-T1 Schichten<sup>4</sup> aufgenommen. In einer separaten Sitzung wurde von jedem Probanden eine hochauflösende anatomische Aufnahme mit Hilfe einer T1-gewichteten dreidimensionalen MDEFT-Sequenz angefertigt. Diese Aufnahmen wurden durch lineare Rotation und Verschiebung in den stereotaktischen Raum nach Talairach & Tournoux (1988) transformiert.

<sup>2</sup>Das FOV (*field of view*) beschreibt die Kantenlänge der gemessenen Schicht. Die Matrix beschreibt, mit welcher Auflösung innerhalb einer Schicht gemessen wird (in den Studien dieser Arbeit mit 3x3 mm<sup>2</sup>). Um Artefakte zu vermeiden, werden die verschiedenen Schichten mit einem kleinen Abstand ausgelesen. In allen Experimenten ergibt sich somit eine effektive Voxel-Größe von 3x3x7 mm<sup>3</sup> (*voxel = volume element*).

<sup>3</sup>EPI steht für *echo planar imaging*, eine gebräuchliche Methode, um die BOLD-Antwort zu erfassen. TR (*time to repeat*) gibt an, in welchem Abstand sich die Messungen wiederholen, TE (*time to echo*) die Zeit zwischen HF-Impuls und Spin-Echo (dem Resonanzsignal synchroner Präzession) und der flip angle, um wieviel Grad das Magnetfeld der Atomkerne durch den HF-Impuls aus seiner Grundrichtung ausgelenkt wird. Diese Auslenkung ist nur für den  $T_1$ -Parameter, nicht jedoch für den  $T_2$ -Parameter relevant. Der  $T_1$ -Parameter beschreibt die Rate, mit der sich die ausgelenkten Magnetfelder wieder am externen Magnetfeld orientieren. Da diese Rate von den Gewebeeigenschaften abhängt, wird der  $T_1$ -Parameter für anatomische Messungen verwendet.

<sup>4</sup>Beide Aufnahmen dienen der anatomischen Registrierung. Sie unterscheiden sich bezüglich Bildqualität und Artefakte.

## 5.4 Logik der fMRT-Experimente

In den fMRT-Experimenten dieser Arbeit sind zwei gebräuchliche methodische Ansätze verwendet worden, das Block- und das ereigniskorrelierte (*event-related* oder *single-trial*) Design. In einem Experiment mit ereigniskorreliertem Design basiert die Analyse auf einzelnen Durchgängen (*Trials*). Die Vorteile eines solchen Designs sind, daß verschiedene Bedingungen randomisiert dargeboten werden können und daß einzelne Durchgänge, wie z. B. Fehler, aus der Analyse ausgeschlossen werden können. Aufgrund der Trägheit der hämodynamischen Reaktion müssen zwischen zwei Durchgängen jedoch relativ lange Pausen eingefügt werden, was experimental-psychologischen Paradigmen zuwider laufen kann und zu weniger Wiederholungen und somit auch geringerer statistischer Power führt.

Bei Block-Designs werden dagegen die Bedingungen blockweise dargeboten, so daß innerhalb eines Blocks die Durchgänge mit schneller Abfolge präsentiert werden können. Durch die Trägheit der BOLD-Reaktion summiert sich das BOLD-Signal der einzelnen Durchgänge auf, so daß in Block-Designs große Signaländerungen beobachtet werden. Friston et al. (1999) konnten so zeigen, daß Block-Designs eine sehr hohe statistische Power besitzen und die effizientesten Designs darstellen. Allerdings können die hämodynamischen Reaktionen der einzelnen Durchgänge nicht separiert werden, so daß alle Durchgänge eines Blocks in die Auswertung einbezogen werden müssen. Entsprechend können z. B. Fehler-Durchgänge nicht ausgeschlossen werden.

## 5.5 Auswertung der fMRT-Daten

FMRT-Messungen liefern eine Reihe von Bildern des Gehirns. Jedes Bild besteht dabei aus mehreren Schichten, die in Spalten und Zeilen unterteilt sind, so daß ein Bild als ein Volumen verstanden werden kann, welches aus dreidimensionalen Voxeln besteht. Jedem Voxel ist pro Bild ein Signalwert zugeordnet, so daß ein fMRT-Datensatz aus einer Menge von Voxeln besteht und für jeden Voxel ein Signalverlauf über die Zeit vorhanden ist. Die grundlegende Analyselogik besteht darin, einen Zusammenhang zwischen dem Signalverlauf eines Voxels und dem experimentellen Design herzustellen. Ergeben sich solche Zusammenhänge in einigen Voxeln, so kann man daraus schließen, daß das anatomische Areal, welches in diesen Voxeln lokalisiert ist, mit der experimentellen Manipulation verknüpft ist. Im Folgenden sollen die in dieser Arbeit verwendeten Analysemethoden beschrieben werden.<sup>5</sup> Die gesamte Auswertung erfolgte mit dem Software-Paket LIPSIA (Lohmann et al., 2001).

<sup>5</sup>Diese Beschreibung der Auswertung orientiert sich, z. B. in Bezug auf die Reihenfolge der Verarbeitungsschritte, an den in diesen Studien tatsächlich ausgeführten Auswertungen. In der Beschreibung

### 5.5.1 Vorverarbeitung

Um ein möglichst gutes Signal-Rausch-Verhältnis der fMRT-Daten zu erreichen, ist es notwendig, unvermeidbar auftretende Artefakte zu korrigieren. In den Studien dieser Arbeit wurde dabei wie folgt vorgegangen: Zunächst wurden Artefakte an *run*-Grenzen<sup>6</sup> entfernt und eine schichtweise Bewegungskorrektur in der axialen Ebene durchgeführt (Friston et al., 1996). Zur räumlichen Glättung wurden die Daten mit einem Gauß-Filter gefaltet (FWHM 5.65 mm in Experiment 1 & 2; 7 mm in Experiment 3 & 4).<sup>7</sup> Die zeitlichen Unterschiede zwischen den Aufnahmezeitpunkten der verschiedenen Schichten eines Bildes wurden mittels linearer (Experiment 1 und 2) oder sinc- (Experiment 3 und 4) Interpolation korrigiert.

### 5.5.2 Registrierung

Die statistischen Auswertungen in den Studien dieser Arbeit beruhen ausschließlich auf Gruppenanalysen. Damit solche Gruppenanalysen möglich sind, müssen die individuellen Gehirne die gleiche Lage im Raum und die gleiche Größe haben. Die dafür notwendigen räumlichen Transformationen werden in der Registrierung durchgeführt. Zunächst wurden die vor der funktionellen Messung aufgenommenen MDEFT und EPI-T1 Schichten, deren Lage im Raum identisch zu den funktionellen Schichten ist, mit den in einer separaten Sitzung aufgenommenen hoch aufgelösten 3D-Referenz Datensätzen registriert. Dazu werden die MDEFT und EPI-T1 Schichten verschoben und rotiert, bis die Korrelation der Grauwerte dieser Schichten mit den Grauwerten des 3D-Referenz Datensatzes maximal ist. Die dabei berechneten Parameter wurden in individuellen Matrizen gespeichert.<sup>8</sup> Im nächsten Schritt wurde die Größe der Matrizen durch lineare Skalierung in eine standardisierte Gehirn-Größe transformiert (Talairach & Tournoux, 1988). Schließlich wurden die Matrizen auf die funktionellen Datensätze angewandt. Somit besitzen alle Datensätze die gleiche Lage im Raum und haben die

der einzelnen Studien wird dann nur noch auf die Unterschiede und genauen Parameter der Auswertung eingegangen. Das bedeutet, daß alternative Auswertungsmöglichkeiten, obwohl oft möglich, meist nicht genannt sind.

<sup>6</sup>Ein *run* bezeichnet die durchgängige Messung von Bildern. fMRT-Experimente werden häufig in mehrere *runs* unterteilt, damit die Datensätze nicht zu groß werden und eventuell auftretende technische Störungen des Tomographen nicht zu einem vollständigen Datenverlust eines Probanden führen. Da der Tomograph für jeden *run* neu gestartet werden muß, entstehen zwischen zwei *runs* kurze Pausen.

<sup>7</sup>FWHM (*full width at half maximum*) gibt die Breite der Gauß-Funktion bei halber Amplitude an.

<sup>8</sup>Die Güte der Registrierung wurde folgendermaßen kontrolliert: Zunächst wurden die Matrizen auf die MDEFT Schichten angewandt. Dann wurde anhand anatomischer Referenzpunkte visuell überprüft, ob sich MDEFT und 3D-Referenzdaten tatsächlich im Raum überlagern.

gleiche räumliche Ausdehnung. Mit Hilfe einer trilinearen Interpolation wurde dann die räumliche Auflösung der funktionellen Daten auf  $3\text{ mm}^3$  erhöht.

### 5.5.3 Statistische Auswertung

Das Ziel der Auswertungen dieser Arbeit war die Erstellung einer *statistical parametric map* (SPM). Solch eine SPM zeigt für jeden Voxel die statistische Signifikanz des Effekts der experimentellen Manipulation an.<sup>9</sup>

Die Auswertung bestand aus zwei Schritten, einer individuellen Analyse und der anschließenden Gruppenstatistik. Die individuelle Analyse beruhte auf einem allgemeinen linearen Modell (*general linear model*, GLM) für seriell auto-korrelierte Beobachtungen (Friston et al., 1995b). Zunächst wurden für dieses Modell die experimentellen Bedingungen und eventuelle Kovariate als Regressoren spezifiziert. Weiterhin wurde für jede Bedingung eine Hypothese über den zu erwartenden Signalverlauf aufgestellt, die sogenannte Modell-Funktion. Diese Modell-Funktion unterschied sich zwischen den experimentellen Designs: Für geblockte Designs (Experiment 1, 2 und 4) wurde eine Rechteck- (*boxcar*)-Funktion angenommen, da durch die schnelle Darbietung der Durchgänge die hämodynamische Reaktion in einem Block auf einem konstant hohem Niveau bleiben sollte. Im ereigniskorrelierten Design (Experiment 3) wurde dagegen erwartet, daß in jedem Durchgang separierbare einzelne hämodynamische Reaktionen wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben auftreten. Deshalb wurde hierfür eine synthetische hämodynamische Funktion angenommen, die aus der Summe mehrerer Gamma-Funktionen generiert wurde. In einem Blockdesign mit parametrischer Manipulation (Experiment 4) wurde ein zusätzlicher Regressor in das Modell eingefügt, der die Parameter-Stufen reflektierte.

Um die Effekte der einzelnen Regressoren des Modells abzuschätzen, wurden die Modell-Funktionen mit Parametern versehen. Diese Parameter reflektierten bei *boxcar*-Funktionen die Amplitude, bei der synthetischen hämodynamischen Funktion die Amplitude der Funktion und die Zeit bis zum Erreichen der Amplitude (*time-to-peak*). Die Funktionen wurden dann gemäß der Präsentationszeiten der Bedingungen gefaltet, so daß für jeden Regressor ein Zeitverlauf von der Länge des Experiments vorhanden war. Die zweidimensionale Matrix aus Regressoren (hiermit sind auch die Kovariaten gemeint) und erwartetem Regressorwert pro Zeitschritt wird Design-Matrix genannt. Vor der tatsächlichen Parameter-Schätzung wurden noch zwei zeitliche Filterungen durchgeführt: Um langsame zeitliche Schwankungen des Signals (z. B. aufgrund von

<sup>9</sup>Häufig wird noch weiter spezifiziert, welche statistischen Kennwerte die Voxel besitzen. Üblich sind hier  $z$ -Werte (SPM{z}) und  $t$ -Werte (SPM{t}), je nach zugrunde liegendem Verteilungstyp. In dieser Arbeit wurden nur SPM{z} verwendet.

Instabilitäten des Tomographen) zu kontrollieren, wurde ein zeitlicher Hochpass-Filter mit einer vom Design abhängigen Grenzfrequenz auf die fMRT-Daten angewandt. Des Weiteren wurden die Design-Matrix und die fMRT-Daten linear geglättet (Gauß-Kernel, FWHM 4 s). Die durch die Filterung und Glättung entstehende Autokorrelation aufeinander folgender Meßpunkte wurde in der statistischen Analyse durch eine Reduktion der Freiheitsgrade korrigiert. Im nächsten Schritt wurden gemäß des oben genannten GLM die Funktions-Parameter so geschätzt, daß die quadrierten Abweichungen zum gemessenen fMRT-Signal möglichst gering waren (*least squares estimation*). Nachdem für jeden Regressor die Parameter berechnet wurden, konnte mittels der Berechnung von Kontrasten statistisch geprüft werden, ob sich die Parameter (und somit die Effekte der experimentellen Bedingungen) signifikant voneinander unterscheiden haben.

Um Kontraste zu berechnen, wurden innerhalb eines Probanden die geschätzten Modell-Parameter der zu vergleichenden Bedingungen mittels eines  $t$ -Tests miteinander verglichen. Die resultierenden  $t$ -Werte wurden dann in  $z$ -Werte transformiert.<sup>10</sup> Somit lag für jeden Probanden eine individuelle SPM $\{z\}$  vor, wobei die Höhe der  $z$ -Werte die statistische Signifikanz des Unterschiedes der kontrastierten Bedingungen reflektierte. Die Gruppenstatistik beruhte auf einem Gauß-Test für jeden Voxel (Bosch, 2000). Die voxelweise Gruppenstatistik war möglich, da sich durch die Registrierung alle individuellen Datensätze im gleichen Referenz-Raum befanden. Für alle SPM $\{z\}$ -Analysen wurde ein Signifikanz-Niveau von  $z > 3.3$  ( $p < 0.0005$ , unkorrigiert für multiple Vergleiche) verwendet.

#### 5.5.4 Visualisierung

Aus der statistischen Auswertung gingen SPMs $\{z\}$  hervor, die für jeden Voxel anzeigen, wie sich die kontrastierten Bedingungen voneinander unterscheiden. Die  $z$ -Werte wurden zur Visualisierung farbkodiert und einem für alle Experimente identischen, hochaufgelösten anatomischen Datensatz überlagert. Dieser anatomische Datensatz, dargestellt in Abb. 2.1 (S. 6), beruht auf einem individuellen Gehirn, welches relativ prototypische Verläufe von Sulci und Gyri aufweist. Zu Darstellungszwecken wurden die SPMs mit einem Schwellwert versehen, so daß nur Voxel gezeigt werden, die einen bestimmten  $z$ -Wert überschritten. Dieser Schwellwert konnte aus Darstellungsgründen von der *a priori* definierten Schwelle ( $z > 3.3$ ) zur Annahme eines statistisch signifikanten Unterschiedes abweichen (in den Experimenten zwischen  $z > 3.1$  bis  $z > 7.1$ ). Dieses Vorgehen ermöglichte die anatomische Lokalisation der stärksten Aktivierungen.

<sup>10</sup>Diese Transformation enthielt die Korrektur der Autokorrelation über eine Anpassung der Freiheitsgrade.

Die räumliche Auflösung der funktionellen SPMs wurde zu Darstellungszwecken durch Interpolation auf  $1\text{ mm}^3$  erhöht.

Aus den überlagerten funktionellen und anatomischen Datensätzen wurden verschiedene Ansichten generiert. In den Experimenten 1, 3 und 4 wurden Schnittbilder dargestellt. Diese beruhen auf den tatsächlichen Grauwerten der Anatomie und den überlagerten farbkodierten SPMs. Für Experiment 3 wurden dreidimensionale Ansichten erstellt. Dazu wurde das Gehirn im Raum als dreidimensionales Objekt aufgefaßt und eine Ansicht in einem bestimmten Blickwinkel von einem Punkt außerhalb des Gehirns generiert. Damit auch Aktivierungen unterhalb der Cortex-Oberfläche sichtbar sind, wurde die graue Substanz des Gehirns entfernt (*white-matter segmentation*).



# Kapitel 6

## Experiment 1

### 6.1 Einleitung

Das erste Experiment hatte zum Ziel, die Frage zu überprüfen, ob der lateral-präfrontale Cortex eine Funktionalität für die Verarbeitung von Doppelaufgaben besitzt. Diese Frage ist in der Literatur heftig umstritten (vgl. Abschnitt 2.4; S. 14): Einige Autoren konnten erfolgreich einen Zusammenhang zwischen Doppelaufgaben-Verarbeitung und dem LPFC nachweisen (D'Esposito et al., 1995; Goldberg et al., 1998; Herath et al., 2001; Koechlin et al., 1999). Sie schlossen aus ihren Befunden, daß in Arealen des LPFC exekutive Prozesse implementiert sind, die speziell für die Verarbeitung der Doppelaufgabe benötigt werden, nicht jedoch für die Verarbeitung der Einzelaufgaben. Dieser Interpretation widersprechen Studien, die keinen Zusammenhang zwischen Doppelaufgaben-Verarbeitung und LPFC nachweisen konnten (Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000; Just et al., 2001; Klingberg, 1998; Smith et al., 2001). Just et al., Klingberg und Smith et al. schließen, daß die Verarbeitung einer Doppelaufgabe keine zusätzlichen neuronalen Ressourcen benötigt, die über die für die Einzelaufgaben-Verarbeitung benötigten hinaus gehen. Adcock et al. und Bunge et al. schließen sich dieser Interpretation nur teilweise an. Sie postulieren weiter, daß es kein cortikales Areal gibt, welches für die Verarbeitung einer Doppelaufgabe zuständig ist, aber nicht bei den Einzelaufgaben involviert ist. Sie schließen stattdessen, daß zusätzliche neuronale Ressourcen durch verstärkte Aktivierung einzelaufgaben-relatierter Areale reflektiert werden. Die Aussagen der Studien, die einen Zusammenhang gefunden haben, werden dabei vor allem auf Basis methodischer Kritiken in Frage gestellt (Bunge et al., 2000).

Zusammenfassend sind in dieser kontroversen Diskussion zwei Fragen enthalten: (1) Führt die Verarbeitung einer Doppelaufgabe zur Rekrutierung zusätzlicher neuronaler Ressourcen im LPFC? (2) Wenn das der Fall ist, äußert sich diese Rekrutierung in



einer Aktivierung fest zugeordneter, dedizierter Areale oder als veränderte Aktivierung in einzelaufgaben-relatierten Arealen?

Dieses Experiment sollte beide Fragen untersuchen. Wie bereits dargelegt (Abschnitte 2.4.3, S. 20 und 3.4, S. 31) muß eine Voraussetzung erfüllt sein, damit Doppelaufgaben-relatierte Areale identifiziert werden können: Die Verarbeitung einer Doppelaufgabe muß zusätzlichen Aufwand verursachen. Durch die Verwendung komplexer Paradigmen und relativ großer SOAs ist dieser Punkt jedoch bei den Studien, die keine Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung identifizieren konnten, nicht sichergestellt. Um dieses Problem zu umgehen, wurde in diesem Experiment das PRP-Paradigma mit kurzen SOAs verwendet.

Wie in der theoretischen Einleitung erläutert, wird angenommen, daß die Ausführung von PRP-Doppelaufgaben zusätzliche Anforderungen an Gedächtnis, geteilte Aufmerksamkeit und Aufgaben-Koordination stellt (De Jong, 1995; Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997). Die Anforderungen an die Aufgaben-Koordination entstehen durch die Interferenz der Aufgaben an einem limitierten Verarbeitungs-Mechanismus (Flaschenhals). Bei kurzen SOAs konkurrieren die Aufgaben um die Verarbeitung durch den Flaschenhals, was zu Interferenz führt. Um diese Interferenz aufzulösen, sind zusätzliche Prozesse notwendig, die koordinieren, wann welche Aufgabe vom Flaschenhals-Mechanismus verarbeitet wird.

Geteilte Aufmerksamkeit und Aufgaben-Koordination sind jedoch nur dann gefordert, wenn die Aufgaben zeitlich überlappend verarbeitet werden und die Probanden keine interferenz-vermeidenden Strategien anwenden (z. B. Broadbent, 1982). Der behaviorale PRP-Effekt dient hier als Nachweis, daß sich die Aufgaben-Verarbeitung überlappt hat.

Somit läßt sich in diesem Experiment mittels der behavioralen Befunde nachweisen, daß zusätzliche kognitive Anforderungen in der Doppelaufgabe vorlagen. Es wird erwartet, daß diese zusätzlichen Anforderungen zur Rekrutierung zusätzlicher neuronaler Ressourcen führen, die mittels fMRT abbildbar sind.

Um die Identifizierung doppelaufgaben-relatierter Areale zu erleichtern, wurden zwei verhältnismäßig einfache Aufgaben (visuelle und auditorische 3-fach Wahl-Reaktionsaufgaben) für die Doppelaufgabe kombiniert. Das sollte sicherstellen, daß der lateral-präfrontale Cortex nicht schon durch einzelaufgaben-relatierte Prozesse hochgradig aktiviert wird und somit unter Umständen zusätzliche Aktivierungen aufgrund doppelaufgaben-relatierter Prozesse verdeckt werden (vgl. Abschnitt 2.4.3, S. 20).

Jedoch können auch schon relativ einfache Aufgaben den lateral-präfrontalen Cortex aktivieren (z. B. D'Esposito et al., 1998b). Des weiteren ist noch ungeklärt, ob sich

doppelaufgaben-relatierte Prozesse als veränderte Verarbeitung von einzelaufgaben-relatierten Arealen äußern, oder ob sie in anatomisch distinkten Arealen lokalisiert sind (s. o., Untersuchungsfrage 2). Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit doppelaufgaben-relatierte Aktivierung als über-additive Aktivierung (Friston et al., 1995b, 1996) im Vergleich zur Summe der Einzelaufgaben-Aktivierungen definiert. Dieses Vorgehen berücksichtigt somit sowohl Neu-Aktivierungen von Arealen in der Doppelaufgabe, als auch über-proportional gestiegene Aktivierungen in Arealen, die mit der Verarbeitung der Einzelaufgaben assoziiert sind. Die genaue Analyselogik ist im Abschnitt 6.2.2 dargestellt.

Weiterhin wurde in diesem Experiment die Hypothese geprüft, daß doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen unabhängig von einzelaufgaben-relatierten Aktivierungen zu beobachten sind. Da alle bisherigen bildgebenden Studien, die doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen beobachtet haben, diese in dorsolateral-präfrontalen Arealen lokalisiert haben, wurde dieses Areal auch in dieser Studie als doppelaufgaben-relatiert erwartet.

Zusammenfassend sollte dieses Experiment prüfen, ob bei kontrollierter zeitlicher Überlappung der Verarbeitung der Aufgaben zusätzliche Aktivierungen in dorsolateral-präfrontalen Cortices zu beobachten sind, die dann als Korrelat exekutiver Prozesse bei der Bearbeitung von Doppelaufgaben interpretiert werden können.

## 6.2 Methode

### 6.2.1 Probanden

12 neurologisch gesunde Probanden<sup>1</sup> nahmen an dem Experiment teil. Das Experiment bestand aus einer Übungssitzung in einem Laborraum und einer Experimentalsitzung im MRT. Ihre Teilnahme wurde mit 13,50 DM pro Stunde für die Übungssitzung und 15,- DM pro Stunde für die MRT-Sitzung entlohnt. Aufgrund technischer Probleme konnten die Daten eines Probanden nicht ausgewertet werden. Die verbleibenden 11 Probanden (5 weiblich) waren zwischen 21 und 27 Jahre alt (Mittel 24 Jahre). Alle Probanden waren rechtshändig (Oldfield, 1971) und wiesen eine normale Sehstärke auf.

Alle Probanden, die an den Studien dieser Dissertation teilnahmen, wurden über die Risiken und Gefahren der fMRT aufgeklärt und gaben ihr schriftliches Einverständnis zu den Untersuchungen. Die durchgeführten Studien waren von der Ethikkommission der Universität Leipzig genehmigt.

---

<sup>1</sup>Im Folgenden werden nur maskuline Personenbezeichnungen verwendet. Diese schließen selbstverständlich männliche und weibliche Personen gleichermaßen ein.

### 6.2.2 Versuchsplan

Diesem Experiment lag ein 2-faktorieller Versuchsplan mit Meßwiederholung auf beiden Faktoren zugrunde. Die Faktoren bildeten die beiden Einzelaufgaben, wobei beide Faktoren die Abstufungen *Aufgabe Präsent* und *Aufgabe Nicht-Präsent* einnehmen konnten. Entsprechend war das Experiment aus vier Bedingungen aufgebaut: Beide Aufgaben Nicht-Präsent (Baseline-Bedingung), Aufgabe 1 Präsent und Aufgabe 2 Nicht-Präsent (Einzelaufgabe 1), Aufgabe 2 Präsent und Aufgabe 1 Nicht-Präsent (Einzelaufgabe 2) und schließlich beide Aufgaben Präsent (Doppelaufgabe). Dieses Design erlaubt es, mittels eines Interaktions-Kontrastes über-additive Aktivierungen in der Doppelaufgabe zu erfassen. Die Faktoren wurden geblockt variiert. Alle weiteren Variablen, wie z. B. das SOA, wurden zusammengefaßt und nicht als Faktoren betrachtet.

Reaktionszeiten und Fehlerraten, in der fMRT-Sitzung zusätzlich das fMRT-Signal, wurden als abhängige Variablen erfaßt.

### 6.2.3 Material

Die Übungssitzung fand in einem Laborraum des Max-Planck-Instituts für neuropsychologische Forschung, Leipzig, statt. Der Raum war abgedunkelt und indirekt beleuchtet. Zur Steuerung des Experiments wurde ein handelsüblicher PC benutzt. Das Experiment wurde mit Hilfe des EXPERIMENTAL RUN TIME SYSTEM (ERTS) (Beringer, 1995) programmiert und durchgeführt. Für die Übungssitzung im Labor galten folgende Bedingungen (die Bedingungen der MRT-Sitzung sind in Abschnitt 5.3 auf S. 46 beschrieben): Die visuellen Reize wurden auf einem 17-Zoll großen PC-VGA-Monitor mit einer Bildwiederholfrequenz von 70 Hz dargeboten, die auditorischen Reize mittels zweier Lautsprecher, die neben dem Monitor standen. Der Abstand der Probanden zum Monitor und den Lautsprechern betrug circa 105 cm. Zur Eingabe wurden zwei Tast-Boxen, die zum ERTS-System gehören, benutzt. Diese Tastboxen garantieren eine zeitliche Auflösung von unter 5 ms.

### 6.2.4 Aufgaben

Die Probanden mußten eine auditorische und eine visuelle dreifach Wahlreaktionsaufgabe bearbeiten. Diese Aufgaben mußten entweder separat (Einzelaufgaben-Bedingungen) oder gemeinsam (Doppelaufgaben-Bedingung) blockweise bearbeitet werden (Abb. 6.1). Folgende Angaben gelten für alle Aufgaben. Alle visuellen Reize wurden schwarz auf grünem Bildschirm-Hintergrund dargeboten. Jeder Durchgang begann mit der Präsentation eines leeren Bildschirms für 150 ms, worauf eine Fixationsperiode von 850 ms folgte. Während dieser Fixationsperiode wurden drei schwarze Quadrate (jedes

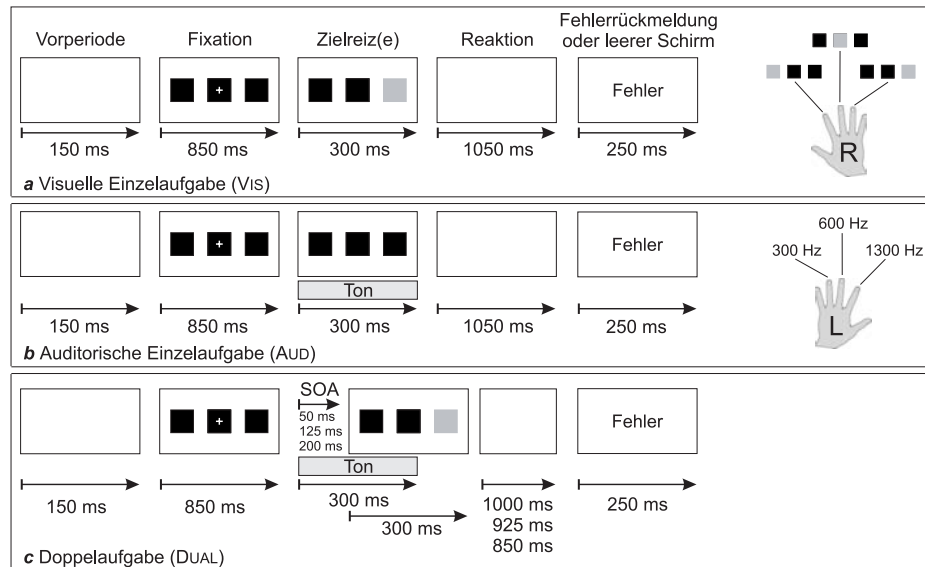


Abbildung 6.1: *Verwendete Aufgaben in Experiment 1. Links sind die Zeitverläufe und rechts die Reiz-Reaktions-Verknüpfungen dargestellt. In der Doppelaufgabe mußten die Reiz-Reaktions-Verknüpfungen kombiniert werden. Der graue Balken signalisiert die Darbietung des auditorischen Reizes. Jeder Durchgang dauerte 2600 ms. (a) Visuelle Einzelaufgabe (b) Auditorische Einzelaufgabe (c) Doppelaufgabe. In diesem Beispiel mußte zuerst auf den auditorischen, danach auf den visuellen Reiz reagiert werden. SOA Stimulus-Onset-Asynchrony.*

hatte eine Größe von  $1.6^\circ \times 1.6^\circ$  Sehwinkel)<sup>2</sup> dargeboten, wobei das mittlere Quadrat ein Fixationskreuz ( $0.38^\circ \times 0.38^\circ$ ) in der Hintergrundfarbe grün enthielt. Das mittlere Quadrat war in der Mitte des Bildschirms plazierte. Die beiden anderen Quadrate waren horizontal rechts und links davon mit einem Abstand von jeweils  $0.44^\circ$  positioniert. Nach dieser Fixationsperiode begann die Darbietung der Zielreize, die sich zwischen den Aufgaben unterschieden hat.

### Visuelle Einzel-Aufgabe (Vis)

Als visueller Zielreiz wechselte für 300 ms eins der drei Quadrate aus der Fixationsperiode seine Helligkeit von schwarz zu hellgrau. Während dieser Zeit wurden die anderen beiden Quadrate weiterhin dargeboten. Nach den 300 ms wurde für 1050 ms ein leerer Bildschirm dargeboten. Die Probanden konnten während der Stimuluspräsentation und der Präsentation des leeren Bildschirms reagieren, so daß 1350 ms zur Reaktion

<sup>2</sup>Alle Größenangaben beziehen sich auf die MRT-Sitzung.

zur Verfügung standen. Die Probanden mußten mit dem rechten Zeigefinger auf das linke Quadrat, mit dem rechten Mittelfinger auf das mittlere Quadrat und dem rechten Ringfinger auf das rechte Quadrat reagieren. Nach den 1050 ms wurde für 250 ms entweder eine visuelle Fehler-Rückmeldung oder ein leerer Bildschirm präsentiert.

### **Auditorische Einzelaufgabe (Aud)**

Nach der Fixationsperiode verschwand nur das Fixationskreuz und es wurde für 300 ms ein Ton mit einer Frequenz von entweder 300, 600 oder 1300 Hz dargeboten.<sup>3</sup> Nach diesem Zielreiz wurde der Bildschirm gelöscht. Die Probanden mußten mit dem linken Ringfinger auf den tiefen Ton, mit dem linken Mittelfinger auf den mittleren Ton und mit dem linken Zeigefinger auf den hohen Ton reagieren. Sonstige Eigenschaften des Ablaufs waren mit der Bedingung VIS identisch.

### **Doppelaufgabe (Dual)**

In der Doppelaufgaben-Bedingung mußten die Probanden beide Aufgaben AUD und VIS zusammen bearbeiten. Dafür wurden der auditorische und der visuelle Zielreiz schnell aufeinanderfolgend dargeboten. Der Abstand der beiden Reize, die *Stimulus-Onset-Asynchrony* (SOA), betrug randomisiert 50, 125 oder 200 ms. Die Reihenfolge der Aufgabendarbietung war innerhalb eines Blocks konstant. Die Probanden bearbeiteten sieben Doppelaufgaben-Blöcke, wobei in vier Blöcken die visuelle Aufgabe und in drei Blöcken die auditorische Aufgabe zuerst präsentiert wurde. Die Probanden waren instruiert, in der Reihenfolge der Aufgabendarbietung zu reagieren. Damit die Länge eines Durchgangs in jeder Bedingung konstant war, wurde die zur Verfügung stehende Antwortzeit relativ zum ersten Reiz konstant gehalten. Somit verkürzt sich die Antwortzeit für die zweite Aufgabe um das SOA, so daß bei einem SOA von 200 ms 1150 ms zur zweiten Reaktion verblieben. Der weitere Ablauf war mit den Einzelaufgaben Bedingungen identisch.

### **Fixation (Base)**

In dieser Bedingung wurde nur ein leerer Bildschirm mit einem Fixationskreuz präsentiert. Die Probanden wurden instruiert, das Fixationskreuz entspannt zu fixieren, eine weitere motorische oder kognitive Aufgabe war nicht gefordert. Diese Bedingung diente zur Abschätzung des Basis-fMRT-Signals unter Ruhe, sie stellt also eine *Baseline* dar.

---

<sup>3</sup>Die Töne wurden so ausgewählt, daß trotz der Störgeräusche des Tomographen eine einfache Diskrimination möglich war.

### 6.2.5 Übungssitzung

Ein bis drei Tage vor der MRT-Sitzung übten die Probanden die Aufgaben in einem Laborraum. Diese Sitzung bestand aus zwei Teilen. Im ersten Teil, der aus sechs Einzel- und vier Doppelaufgaben Blöcken bestand, hatten die Probanden in den Doppelaufgaben 1000ms mehr Zeit zu reagieren als in den experimentellen Durchgängen. Der zweite Teil bestand aus acht Wiederholungen aller Bedingungen (nur BASE wurde fünf Mal wiederholt) und fand wie in Abschnitt 6.2.4 auf S. 56 beschrieben statt. Da die Probanden in der gleichen MRT-Sitzung auch das zweite Experiment dieser Dissertation bearbeiteten, übten sie zusätzlich acht Blöcke einer weiteren Doppelaufgabe, die in Experiment 2 beschrieben ist.

### 6.2.6 Versuchsdurchführung

Es wurde ein Block-Design verwendet, wobei ein Block aus 10 Durchgängen bestand und 26s dauerte. Die Blöcke waren durch ein 10s langes Inter-Block-Intervall (IBI) getrennt, während dessen eine Kurzinstruktion über die folgende Aufgabe präsentiert wurde. Die Kurzinstruktion für die Doppelaufgabe enthielt auch die Reihenfolge, in der die Aufgaben dargeboten wurden, so daß die Probanden die Präsentations-Reihenfolge nicht zwingend wahrnehmen mußten, um in der geforderten Reihenfolge zu reagieren. Die Sitzung bestand aus einem funktionellen Durchgang (*run*). Jede Bedingung wurde sieben Mal wiederholt, womit das gesamte Experiment 16 min., 48s dauerte. Die Blöcke wurden pseudo-randomisiert dargeboten, mit der Einschränkung, daß sich Bedingungen nicht direkt wiederholen durften. Alle Probanden erhielten das gleiche Stimulations-Protokoll. Während der anatomischen MRT-Vormessungen wurden den Probanden nochmals die drei vorkommenden Töne vorgespielt und auf dem Bildschirm angezeigt, um welchen Ton es sich handelte. Das diente dazu, daß sich die Probanden an die im Vergleich zur Übungssitzung geänderten akustischen Bedingungen im MRT einstellen konnten.

### 6.2.7 MRT Daten-Erfassung

Die MRT-Prozedur verlief wie in Abschnitt 5.3 auf S. 46 beschrieben. Deshalb werden hier nur die speziellen Parameter genannt. Es wurde eine EPI-Sequenz ( $TR = 2s$ ,  $TE = 30ms$ ,  $90^\circ$  flip angle) benutzt. Ein funktioneller Durchgang mit 504 Bildern wurde durchgeführt, wobei jedes Bild aus 14 Schichten bestand.

### 6.2.8 MRT-Auswertung

Die MRT-Daten wurden wie in Abschnitt 5.5 auf S. 47 beschrieben ausgewertet, hier wird nur auf die speziellen Parameter eingegangen. Niederfrequente Schwingungen, bzw. Signal-Drifts wurden durch einen zeitlichen Hochpass-Filter mit einer Grenzfrequenz von 0.0036 Hz entfernt. Für die Modellierung im GLM wurde eine *boxcar*-Funktion mit einer zeitlichen Verschiebung von 6 s angenommen. Diese Verschiebung dient dazu, die in Abschnitt 5.2.2, S. 45, beschriebene Trägheit der BOLD-Reaktion auszugleichen.

Wie in der Einleitung beschrieben, wird in diesem Experiment Aktivierung als doppeleaufgaben-relatiert aufgefaßt, wenn sie nicht durch die Summe der einzelaufgaben-relatierten Aktivierungen erklärt werden kann, d. h. sie ist über-additiv. Auf Basis des faktoriellen Designs dieses Experiments (vgl. Abschnitt 6.2.2) wird aus diesem Grund getestet, ob die beiden Faktoren (Aufgabe VIS und Aufgabe AUD) miteinander interagieren. Entsprechend wurde der Interaktions-Kontrast  $((\text{DUAL} - \text{AUD}) - (\text{VIS} - \text{BASE}))$  berechnet.<sup>4</sup> Falls sich in diesem Kontrast Aktivierungen zeigen, können sie somit nicht durch Effekte der Einzelaufgaben erklärt werden. Um die Effekte der Einzelaufgaben zu erfassen, wurden diese mit der Baseline-Bedingung verglichen (Kontraste  $(\text{AUD} - \text{BASE})$  und  $(\text{VIS} - \text{BASE})$ ).

## 6.3 Ergebnisse

### 6.3.1 Behaviorale Ergebnisse

Wenn nicht anders genannt, basieren alle folgenden behavioralen Analysen entweder auf Varianzanalysen (*Analysis of Variance*, ANOVA) mit Meßwiederholung oder *t*-Tests für gepaarte Stichproben. Fehlerdurchgänge wurden aus den Reaktionszeitanalysen ausgeschlossen. Für die Analyse der Fehlerraten wurden *arcsin*-transformierte relative Fehlerhäufigkeiten benutzt. Für alle behavioralen Analysen dieses und der folgenden Experimente wurde das Signifikanz-Niveau auf  $\alpha = 0.05$  (zweiseitig) festgelegt.

Als wichtigstes Resultat zeigte sich, daß die Reaktionszeiten (RZen) der zweiten Aufgabe mit kürzerem SOA anstiegen (einfaktorielle ANOVA:  $F_{(2,20)} = 71.49$ ;  $p <$

<sup>4</sup>Von einem anderen Standpunkt aus betrachtet, werden in diesem Kontrast beide Einzelaufgaben von der Doppelaufgabe abgezogen. Entsprechend sollte dieser Kontrast ausschließlich Aktivierungen zeigen, die nicht durch die Summe der Einzelaufgaben-Aktivierungen erklärt werden können. Da die Aktivierung einer Aufgabe in einen allgemeinen Grundanteil, der in jeder Aufgabe vorkommt, und in einen aufgaben-spezifischen Anteil zerlegt werden kann, würde der reine Kontrast  $(\text{DUAL} - \text{AUD} - \text{VIS})$  dazu führen, daß von der Doppelaufgabe der Grundanteil zweimal abgezogen wird, obwohl er nur einmal vorkommt. Um das auszugleichen, wird zuvor noch von einer Einzelaufgabe der Grundanteil, der durch die Baseline-Bedingung abgeschätzt wird, abgezogen.

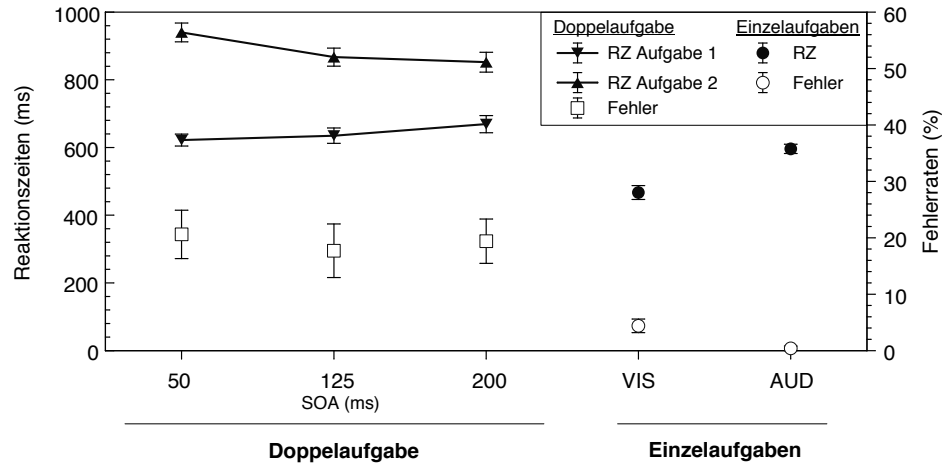


Abbildung 6.2: Behaviorale Ergebnisse Experiment 1. Links ist die Doppelaufgabe (eckige Symbole), getrennt nach SOAs, rechts sind die Einzelaufgaben (Kreise) dargestellt. Linke Achse und gefüllte Symbole zeigen die Reaktionszeiten, rechte Achse und ungefüllte Symbole die Fehlerraten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardmeßfehler.

0.001), womit der PRP-Effekt repliziert wurde (Abb. 6.2). Das zeigt, daß die Aufgaben von den Probanden zeitlich überlappend bearbeitet wurden und in der Verarbeitung der zweiten Aufgabe eine psychologische Refraktärperiode auftrat (vgl. Abb. 3.1, S. 29). Die RZen der ersten Aufgabe zeigten das entgegengesetzte Muster, allerdings in abgeschwächter Form: Die RZen nahmen mit steigendem SOA zu (Einfaktorielle ANOVA:  $F_{(2,20)} = 15$ ;  $p < 0.001$ ). Eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *Aufgabe* und *SOA* zeigte eine signifikante Interaktion ( $F_{(2,20)} = 166.12$ ;  $p < 0.001$ ). Der Anstieg der RZen der ersten Aufgabe kann als Gruppierungseffekt angesehen werden, d.h. die Probanden verzögern die Reaktion auf die erste Aufgabe. Solch ein Gruppierungseffekt wird in PRP-Doppelaufgaben häufig beobachtet und beeinflußt nicht die Interpretation des PRP-Effektes, der hauptsächlich auf einer RZ-Veränderung der zweiten Aufgabe beruht (z. B. Pashler & Johnston, 1989).

Des weiteren zeigte sich, daß die jeweiligen Aufgaben in der Doppelaufgabe langsamer bearbeitet wurden als in der Einzelaufgabe. So waren die RZen in der auditorischen Aufgabe in der DUAL-Bedingung 180 ms langsamer als in der Einzelaufgaben-Bedingung AUD ( $t_{(10)} = 10.37$ ;  $p < 0.001$ ). Für die visuelle Aufgabe betrug dieser Unterschied 287 ms ( $t_{(10)} = 11.91$ ;  $p < 0.001$ ). Mit den RZen stiegen auch die Fehlerraten in der Doppelaufgabe. So traten in den gemittelten Einzelaufgaben 2,4% und in der Doppelaufgabe 19,35% Fehler auf ( $t_{(10)} = 4.644$ ;  $p < 0.001$ ).



Bezüglich der Einzelaufgaben zeigte sich, daß die auditorische Aufgabe signifikant langsamer bearbeitet wurde als die visuelle ( $(t_{(10)} = 9.67; p < 0.001)$ ). Im Gegensatz dazu wurden in der visuellen Aufgabe mehr Fehler gemacht, was auf eine Geschwindigkeits-Genauigkeits-Verschiebung (*speed-accuracy tradeoff*) hindeuten könnte ( $(t_{(10)} = 3.44; p < 0.01)$ ).

### 6.3.2 FMRT Ergebnisse

#### Einzelaufgaben

Areale, die für die Verarbeitung der Einzelaufgaben zuständig sind, wurden durch Kontraste zwischen Aufgabenbedingung und der Kontrollbedingung ermittelt ((AUD – BASE) und (VIS – BASE)). Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Abbildung 6.3 und Tabelle 6.1 dargestellt. Es zeigte sich, daß in beiden Aufgaben cortikale Areale im anterior-superioren dorsolateral-präfrontalen Cortex (DLPFC) bilateral aktiviert waren (Gyrus frontalis medius, GFM; Brodmann Areal (BA) 9). Prämotorische Aktivierungen zeigten sich für AUD und VIS bilateral entlang des Sulcus präcentralis (BA 6, 9, 44) und medial entlang des Gyrus frontalis superior (GFS; BA 6m). Motorische Areale entlang des Sulcus centralis (BA 4) waren aufgabenspezifisch in Abhängigkeit der Antwort-Hand kontralateral aktiviert (VIS: links, AUD: rechts).

Aktivierte parietale Areale waren bilateral im aufsteigenden und horizontalen Segment des Sulcus intraparietalis (SIP; BA 7, 40; AUD und VIS) und medial im Präcuneus (BA 7; nur VIS) lokalisiert. Zusätzlich zeigten sich Aktivierungen in Arealen, die mit der modalitätsspezifischen Reizverarbeitung assoziiert sind. Während primär visuelle Areale (Sulcus calcarinus bilateral; BA 17) in beiden Aufgaben aktiviert waren, waren cortikale Areale des Gyrus temporalis superior (GTS, Heschlscher Gyrus; BA 41, 42) nur in der auditorischen Aufgabe aktiviert.

#### Doppelaufgabe

Die kritische Frage dieses Experiments war, ob sich durch die Bearbeitung der Doppelaufgabe Aktivierungen identifizieren lassen, die nicht durch Effekte der Einzelaufgaben erklärt werden können und wo diese Areale lokalisiert sind. Um diese Frage zu testen, wurde der Interaktionskontrast ((DUAL – AUD) – (VIS – BASE)) berechnet. Durch diesen Kontrast wird von der Doppelaufgaben-Bedingung die Aktivierung, die durch die Einzelaufgaben hervorgerufen wird, abgezogen. Somit lassen sich Aktivierungen dieses Kontrastes nicht durch die Effekte der Einzelaufgaben erklären.

Diese Analyse (Abb. 6.3, Tab. 6.2) zeigte ausgedehnte bilaterale Aktivierungen des lateralen PFC. Diese Aktivierungen waren bilateral entlang des GFM lokalisiert und

Tabelle 6.1: Stereotaktische Koordinaten (Talairach &amp; Tournoux, 1988) und anatomische Lokalisation der Aktivationsmaxima in den Einzelaufgaben.

Areal	H	BA	Vis				Aud			
			x	y	z	Z	x	y	z	Z
<b>frontal</b>										
<i>G frontalis medius</i>	L	9	-29	41	30	9.96	-32	41	33	13
<i>G frontalis medius</i>	R	9	25	40	27	7.47	25	43	27	13.4
<i>S präcentralis</i>	L	6/44	-50	7	29	13.5	-50	7	29	15
<i>S präcentralis</i>	L	6/44					-32	-6	49	22.1
<i>S präcentralis</i>	R	6/9	49	3	38	12	31	9	28	13.7
<i>S präcentralis</i>	R	6	28	-7	46	14.7				
<i>G frontalis superior</i>	L	6m	-5	2	47	18.7	-2	2	50	22
<i>S centralis</i>	L	4	-35	-20	55	22.5				
<i>S centralis</i>	R	4					34	-20	55	25.1
<b>parietal</b>										
<i>S intraparietalis</i>	L	7/40	-17	-70	54	14.8	-35	-46	49	18.1
<i>S intraparietalis</i>	L	7/40	-44	-30	51	21.3				
<i>S intraparietalis</i>	R	7/40	25	-52	50	12.5	34	-44	57	17.2
<i>Präcuneus</i>	R	7					10	-67	5	15.2
<b>sonstige</b>										
<i>G temporalis superior</i>	L	41/42					-47	-25	7	19.9
<i>G temporalis superior</i>	R	41/42					46	-22	9	22.6
<i>G temporalis medius</i>	L	37	-47	-58	11	9.21				
<i>G temporalis medius</i>	R	39	43	-64	12	10.6				
<i>G okzipitalis medius</i>	L	18/19	-26	-88	14	15.2				
<i>S calcarinus</i>	L	17	-20	-91	1	17.3	-20	91	1	13.4
<i>S calcarinus</i>	R	17	16	-88	0	22.3	16	-88	0	17.7

Abkürzungen: AUD: auditorische Einzelaufgabe; VIS: visuelle Einzelaufgabe H: Hemisphäre (R: rechte, L: linke); BA: Brodmann Areal; x, y, z entsprechen den Koordinatenachsen nach Talairach & Tournoux (1988); Z: z-Wert des Voxels (z > 3.3 entspricht p < 0.0005); G: Gyrus; S: Sulcus.

erstreckten sich vom anterioren Pol bis zum Sulcus präcentralis und umfaßten auch Teile des Sulcus frontalis inferior (SFI) und des GFS (BA 6, 9, 46). Obwohl diese Aktivierungen im Vergleich zu den lateral-präfrontalen Aktivierungen der Einzelaufgaben weiter inferior und posterior lokalisiert waren, überlappten sie sich teilweise. Weitere frontale Aktivierungen fanden sich bilateral im prämotorischen Cortex, in den Cortices der vorderen Insel und in der Medianebene. Die Aktivierungen der Medianebene waren im anterioren cingulären Cortex (ACC) und im prä-Supplementär-Motorischen-Areal

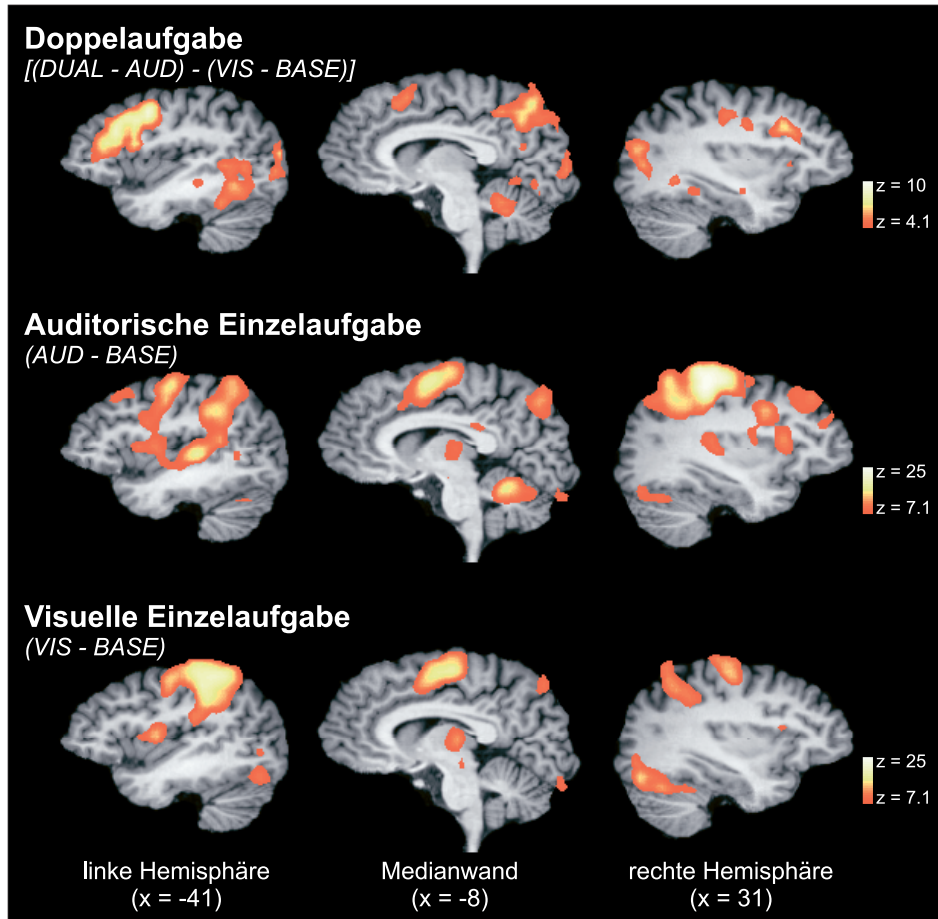


Abbildung 6.3: Bildgebende Ergebnisse Experiment 1. Die obere Reihe zeigt über-additive Aktivierungen in der Doppelaufgabe gemäß des Interaktions-Kontrasts. In der mittleren Reihe sind die Aktivierungen der auditorischen, in der unteren der visuellen Aufgabe, jeweils im Vergleich zur Kontrollbedingung, dargestellt. Linke Spalte zeigt die linke Hemisphäre, mittlere Spalte die Medianebene und die rechte Spalte die rechte Hemisphäre. In Klammern ist die  $x$ -Koordinate nach Talairach & Tournoux (1988) angegeben.

(präSMA, siehe Picard & Strick, 1996) lokalisiert, wobei sich letztere Aktivierung auch in den cingulären Cortex erstreckte.

Parietale Aktivierungen wurden bilateral im Gyrus postcentralis (BA 7) und Prä-cuneus (BA 7m) identifiziert. Weiterhin fanden sich aktivierte Areale in okzipitalen und temporalen Cortices (für Details, siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Stereotaktische Koordinaten (Talairach &amp; Tournoux, 1988) und anatomische Lokalisation der Aktivationsmaxima in der Doppelaufgabe.

Areal	H	BA	x	y	z	Z
<b>frontal</b>						
<i>G frontalis medius/ S präcentralis</i>	L	6/9	-41	8	34	9,46
<i>S frontalis inferior</i>	L	9/46	-41	26	19	8,83
<i>S frontalis superior</i>	L	6	-20	2	50	10,2
<i>S frontalis inferior/ G frontalis medius</i>	R	9/46	31	24	22	7,23
<i>S/G präcentralis</i>	R	6	34	-2	28	5,73
<i>G präcentralis</i>	R	6	34	-9	38	5,64
<i>S frontalis superior</i>	R	6	19	-1	45	6,45
<i>anteriore Insel</i>	L	47	-38	18	0	4,91
<i>anteriore Insel</i>	R	47	31	21	-2	4,26
<i>G frontalis superior medial</i>		8m/6m/32	-8	19	41	5,79
<i>anteriöer cingulärer Cortex</i>		24	-2	20	20	3,51
<b>parietal</b>						
<i>G postcentralis</i>	L	7	-23	-36	55	8,01
<i>G postcentralis</i>	R	7	19	-33	54	6,77
<i>Präcuneus</i>	L	7m	-8	-61	52	7,37
<i>Präcuneus</i>	R	7m	7	-58	51	6,4
<b>sonstige</b>						
<i>G temporalis medius</i>	L	21/37	-50	-46	-2	8,36
<i>G temporalis inferior</i>	R	37	46	-62	-5	6,01
<i>G parahippocampalis</i>	L	19/30	-29	-43	-3	7,73
<i>G parahippocampalis</i>	R	19/30	22	-43	-3	6,56
<i>G okzipitalis medius</i>	L	19	-38	-82	27	8,12
<i>G okzipitalis medius</i>	R	19	34	-74	23	7,17
<i>G lingualis</i>	L	18	-14	-73	0	5,68

Abkürzungen: *H*: Hemisphäre (*R*: rechte, *L*: linke); *BA*: Brodmann Areal; *x*, *y*, *z* entsprechen den Koordinatenachsen nach Talairach & Tournoux (1988); *Z*: *z*-Wert des Voxels ( $z > 3.3$  entspricht  $p < 0.0005$ ); *G*: Gyrus; *S*: Sulcus.

Somit konnte gezeigt werden, daß die Bearbeitung der Doppelaufgabe zu Aktivierungen in verschiedenen Arealen führte, die nicht durch die Einzelaufgaben erklärbar sind.

## 6.4 Diskussion

Die gleichzeitige Bearbeitung von zwei Wahlreaktions-Aufgaben führte im Vergleich zur separaten Bearbeitung der Aufgaben zu erheblichen behavioralen Leistungseinbrüchen, die sich in erhöhten Fehlerraten und verlängerten Reaktionszeiten äußerten. Besonders wichtig kann hier das Auftreten des PRP-Effektes angesehen werden, der in vielen Studien mit vergleichbaren Paradigmen nachgewiesen worden ist (De Jong, 1995; Pashler, 1994a; Schubert, 1999; Welford, 1952). Der PRP-Effekt diente dabei dem Nachweis, daß die Verarbeitung der Aufgaben zeitlich überlappte. Damit konnte, im Gegensatz zu einer Reihe früherer Studien (z. B. Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000), sichergestellt werden, daß die Aufgaben-Verarbeitung durch die zeitliche Überlappung interferierte.

Die bildgebenden Ergebnisse zeigten, daß die Bearbeitung der Doppelaufgabe zu zusätzlichen Aktivierungen in präfrontalen, temporalen, parietalen und okzipitalen Arealen führte. Diese über-additiven Aktivierungen können nicht durch die summierten Effekte der Einzelaufgaben erklärt werden. Somit hat dieses Experiment erfolgreich cortikale Areale nachweisen können, die mit der Verarbeitung von Doppelaufgaben assoziiert sind.

### 6.4.1 Lateral-präfrontale Areale

Die Bearbeitung der Doppelaufgabe führte zu ausgedehnten Aktivierungen des lateral-präfrontalen Cortex. Diese waren in ihrem Schwerpunkt entlang des GFM lokalisiert und erstreckten sich vom anterioren Pol bis zum Sulcus präcentralis und umfaßten auch Teile des SFI und GFS. Somit sind diese Aktivierungen hauptsächlich im dorsolateral-präfrontalen Cortex lokalisiert, wobei sich die Aktivierung auch in ventrolaterale und prämotorische Areale erstreckt (vgl. Owen et al., 1999; Petrides & Pandya, 1994).

In der Einleitung ist dargelegt worden, daß eine Doppelaufgabe erhöhte Anforderungen an Aufgaben-Koordination, Gedächtnis und geteilte Aufmerksamkeit stellt. Im Folgenden soll diskutiert werden, inwiefern diese Prozesse mit den beobachteten lateral-präfrontalen Aktivierungen assoziiert werden können.

#### LPFC und Aufgaben-Koordination

Die Beobachtung des behavioralen PRP-Effektes gibt Aufschluß über die Art der zusätzlichen aufgaben-koordinierenden Prozesse. Wie in der Einleitung ausgeführt, führt die Präsenz eines limitierten Flaschenhals-Mechanismus dazu, daß die Aufgaben-Verarbeitung koordiniert werden muß (De Jong, 1995; Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997, vgl. Abschnitt 3.4, S. 31). Im Detail muß bei der hier verwendeten Doppelaufgabe mit konstanter Präsentations-Reihenfolge der Flaschenhals auf die zweite

Aufgabe umgestellt werden, wenn die erste Aufgabe von ihm verarbeitet wurde. Meyer & Kieras nehmen an, daß dieser Umschaltvorgang in die Teilprozesse Anhalten, Umschalten und Wiederaufnehmen der Aufgaben-Verarbeitung unterteilt werden kann.

Diese Interpretation konvergiert mit Befunden bildgebender Studien, die ähnliche Prozesse mit anderen Paradigmen untersucht haben. Zum Beispiel wurde gezeigt, daß lateral-präfrontale Areale mit dem Unterbinden der Aufgabenverarbeitung in einem Go-/NoGo-Paradigma assoziiert sind, was mit dem Unterbrechen der Aufgaben-Verarbeitung im PRP-Paradigma vergleichbar ist (Garavan et al., 1999; Kawashima et al., 1996; Rubia et al., 2001). Der Wechsel der Aufgabenverarbeitung durch die Flaschenhals-Stufe kann mit dem Aufgabenwechsel-Paradigma verglichen werden, für welches ebenfalls lateral-präfrontale Areale identifiziert wurden (Dove et al., 2000; Sohn et al., 2000). Des weiteren wurden vergleichbare Aktivierungen für das Aufnehmen der Verarbeitung von nicht-dominanten Aufgaben gezeigt (Zysset et al., 2001), eine Situation, die im PRP-Paradigma mit der Wiederaufnahme der Verarbeitung der zweiten Aufgabe nach der Refraktärperiode vergleichbar ist. Diese Konvergenz verschiedener Studien mit verschiedenen Paradigmen legt nahe, daß die in dieser Studie als doppelaufgaben-relativ identifizierten Areale im lateral-präfrontalen Cortex mit dem Prozeß der Aufgaben-Koordination assoziiert sind.

Gleichzeitig erweitert das aktuelle Experiment die Ergebnisse dieser Studien. In den genannten Paradigmen entstand die Interferenz meist aus zwei konkurrierenden Handlungen, die von einem Reiz initiiert wurden. So muß im Aufgabenwechsel-Paradigma eine Überlappung der Reiz- oder Reaktionsdimensionen vorliegen, z. B. indem ein Stimulus mit zwei Reaktionen assoziiert ist, damit Interferenz beobachtbar und entsprechend Aufgaben-Koordination erfordert ist (Gilbert & Shallice, 2002; Jersild, 1927). Das aktuelle Experiment hat gezeigt, daß aus funktionell-neuroanatomischer Sicht die gleichen kortikalen Areale zur Aufgaben-Koordination gefordert sind, wenn die Interferenz nicht aufgrund eines mehrdeutigen Reizes entsteht, sondern aufgrund der zeitlichen Koinzidenz zweier behavioral unabhängiger Aufgaben.

Die Beobachtung doppelaufgaben-relativer Aktivierungen in Arealen des GFM wird durch eine Reihe bisheriger Doppelaufgaben-Studien gestützt, die in vergleichbare Areale mit der Verarbeitung von Doppelaufgaben assoziiert haben (D'Esposito et al., 1995; Goldberg et al., 1998; Koechlin et al., 1999). Die Konvergenz unterschiedlicher Doppelaufgaben-Studien spricht für die Annahme, daß die zur Doppelaufgaben-Verarbeitung benötigten exekutiven Prozesse durch ein spezifisches Areal realisiert werden, und nicht ausschließlich durch eine veränderte Verarbeitung in einzelaufgaben-relativen Arealen. Die Daten dieser Arbeit stützen diese Annahme, da sich die Aktivationsmaxima der Doppelaufgabe räumlich von denen der Einzelaufgaben unterscheiden. Sie

können diese Annahme jedoch nicht zweifelsfrei belegen, da sich einzel- und doppelaufgaben-relatierte Areale teilweise räumlich überlappten.

In einer Studie von Herath et al. (2001) wurde ebenfalls zusätzliche Aktivierung in einer Variante der PRP-Doppelaufgabe nachgewiesen. Doppelaufgaben-relatierte Aktivierung wurde in dieser Studie jedoch im rechten Gyrus frontalis inferior (GFI) identifiziert, einem Areal, welches zuvor noch nicht mit Doppelaufgaben-Verarbeitung assoziiert wurde. In der aktuellen Studie wurde zwar ebenfalls rechts-hemisphärische lateral-präfrontale Aktivierung beobachtet, diese war jedoch entlang des SFI/GFM und bedeutend weiter anterior lokalisiert. Die Unterschiede dieser und der aktuellen Studie sind nicht eindeutig, könnten aber in den verwendeten Aufgaben begründet sein. Obwohl die aktuelle und die Herath et al. -Studie einige wichtige Eigenschaften teilen, wie z. B. die kontrollierte zeitliche Überlappung der Aufgaben, unterscheiden sie sich substantiell bezüglich der verwendeten Aufgaben. So benutzten Herath et al. eine visuelle und eine somatosensorische Einfach-Reaktionsaufgabe, während in der aktuellen Studie eine visuelle und eine auditorische Wahl-Reaktionsaufgabe verwendet wurde. Es wurde jedoch gezeigt, daß Einfach- und Wahl-Reaktionsaufgaben unterschiedlich verarbeitet werden (Frith & Done, 1986; Pashler, 1994a; Schubert, 1999). Unterschiedliche Verarbeitung der Aufgaben, oder alternativ die unterschiedliche Kombination der Aufgaben-Modalitäten, könnte in Unterschieden in der Art der Interferenz – und somit auch Art der exekutiven Prozesse – resultieren, was wiederum zur Beteiligung anderer kortikaler Areale führen könnte. Die Implikationen der divergierenden Lokalisation in der Herath et al. und der aktuellen Studie werden in der Allgemeinen Diskussion (Kapitel 10, S. 127) ausführlich diskutiert.

Die aktuellen Befunde stehen im Widerspruch zu den Studien von Adcock et al. (2000), Bunge et al. (2000), Just et al. (2001) und Klingberg (1998), die keine zusätzlichen Aktivierungen beobachten konnten. An diesen Studien ist jedoch zu kritisieren, daß sie eher komplexe Aufgaben verwendet haben, die keine Rückschlüsse zuließen, ob tatsächlich Interferenz auftrat, oder ob sie durch geeignete Strategien vermieden werden konnte. Durch den Nachweis des PRP-Effektes kann dieser Punkt für das vorliegende Experiment ausgeschlossen werden. Die zuvor verwendeten Paradigmen führten weiterhin dazu, daß der lateral-präfrontale Cortex bereits durch die Bearbeitung der Einzelaufgaben extensiv aktiviert wurde, so daß möglicherweise Decken- oder Sättigungseffekte auftraten (vgl. Abschnitt 2.4.3 für eine detaillierte Diskussion). Zwar wurden in der aktuellen Studie auch präfrontale Aktivierungen in den Einzelaufgaben beobachtet, aber einerseits waren sie unterschiedlich lokalisiert und andererseits ist es unplausibel anzunehmen, daß einfache Wahlreaktionsaufgaben den präfrontalen Cortex bis zu seiner Kapazitätsgrenze aktivieren.

Die bisherigen Ausführungen haben die Aktivierungen vor allem in Hinblick auf zusätzliche Prozesse diskutiert, die mit der Koordination der Verarbeitung assoziiert sind. Die Beobachtung des PRP-Effektes und die Konvergenz mit anderen Studien zeigt, daß diese Interpretation höchst-plausibel ist. Es sind jedoch noch weitere Anforderungen in der Doppelaufgabe postuliert worden: Erhöhte Gedächtnisanforderungen und geteilte Aufmerksamkeit.

### **LPFC und Gedächtnis**

Wie in der Einleitung (Abschnitt 3.2, S. 26) beschrieben, steigt in einer Doppelaufgabe auch die Anforderung an das Aufrechterhalten von Informationen, da zwei Aufgaben aktiv gehalten werden müssen, anstatt nur einer. Diese Anforderung des Aufrechterhaltens von Information ist ebenfalls konsistent mit lateral-präfrontalen Arealen in Verbindung gebracht worden. Die Aktivierungen waren dabei allerdings tendenziell eher in ventrolateralen Anteilen des lateral-präfrontalen Cortex im GFI (Broca-Areal) und entlang des SFI, z. T. auch im GFM, lokalisiert (Awh et al., 1996; Barch et al., 1997; Fiez et al., 1996; Jonides et al., 1993; Paulesu et al., 1993).

Das Aufrechterhalten der doppelten Informations-Menge allein kann die aktuellen Befunde allerdings nicht erklären, da es sich nur um einen additiven Effekt handelt, der durch den auf Über-Additivität testenden Interaktions-Kontrast nicht als doppel-aufgaben-relatiert identifiziert werden würde. Die Verdopplung der Information müßte dagegen dazu geführt haben, daß die Gedächtnisspanne überschritten ist. In diesem Fall haben Rypma et al. (1999) beobachtet, daß zusätzliche Areale im GFM und GFS in die Aufgaben-Verarbeitung involviert waren, die zuvor nicht mit der Aufrechterhaltung von Informationen assoziiert waren. Rypma et al. interpretieren die Funktion dieser Areale als strategische exekutive Prozesse, die für die Aufrechterhaltung von Informationen trotz überschrittener Gedächtnisspanne sorgen. Wenn im aktuellen Experiment also die Kombination zweier 3-fach Wahlreaktionsaufgaben dazu geführt hat, daß die Gedächtnisspanne überschritten wurde, können die beobachteten lateral-präfrontalen Aktivierungen auf diese Prozesse zurückzuführen sein. Obwohl diese Möglichkeit im aktuellen Experiment nicht ausgeschlossen werden kann, erscheint sie durch die Verwendung trainierter Wahlreaktionsaufgaben eher unwahrscheinlich (vgl. z. B. Baddeley, 1990; Brown & Carr, 1989; Pashler & Baylis, 1991).

### **LPFC und geteilte Aufmerksamkeit**

Verschiedene Typen geteilter Aufmerksamkeit sind mit lateral-präfrontalen Arealen in Verbindung gebracht worden (vgl. Cabeza & Nyberg, 2000). So zeigten Corbetta et al.



(1991), daß die Aufteilung der Aufmerksamkeit auf verschiedene Eigenschaften visueller Objekte, wie Form und Farbe, zu Aktivierungen im dorsolateralen präfrontalen Cortex führten (vgl. auch Pugh et al., 1996; Vandenberghe et al., 1997). In einer Studie von Burton et al. (1999) wurde hingegen der anteriore fronto-orbitale Cortex mit geteilter Aufmerksamkeit assoziiert. Hier mußten die Probanden ihre Aufmerksamkeit zwischen zwei Eigenschaften taktiler Stimulation (Dauer und Rauheit) teilen. Shaywitz et al. (2001) untersuchten geteilte Aufmerksamkeit, wie sie auch im aktuellen Experiment gefordert war. Sie zeigten, daß die geteilte Aufmerksamkeit zwischen visueller und auditorischer Modalität mit erhöhter Aktivierung in anterior-inferioren Anteilen des GFM assoziiert sind. Diese Aktivierung war jedoch deutlich weiter anterior und inferior im Vergleich zur doppelaufgaben-relatierten Aktivierung im aktuellen Experiment lokalisiert. Dieser spezifische Befund zeigt, daß eine Erklärung der aktuellen Aktivierungen durch die Anforderung nach geteilter Aufmerksamkeit unwahrscheinlich ist.

### Zusammenfassung

Die über-additive Aktivierung in der Doppelaufgaben-Bedingung zeigt, daß die neuroanatomischen Korrelate eines zusätzlichen kognitiven Aufwands der Doppelaufgaben-Verarbeitung identifizierbar sind. Welcher Natur ist jedoch dieser kognitive Aufwand? Am Wahrscheinlichsten erscheint hier nach den bisherigen Ausführungen die Anforderung nach Aufgaben-Koordination.

Dieses Experiment kann diese Schlußfolgerung jedoch nicht zweifelsfrei belegen, so daß letztendlich unklar ist, welche Anforderung mit der doppelaufgaben-relatierten Aktivierung assoziiert ist. Auf Basis der eben geführten Diskussion soll deshalb im nächsten Experiment explizit getestet werden, ob die doppelaufgaben-relatierten Areale im GFM und entlang des SFI mit der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung assoziiert sind.

### 6.4.2 Frontomediane Areale

Durch die Bearbeitung der Doppelaufgabe wurden auch mediale Anteile des präfrontalen Cortex aktiviert. Es zeigte sich eine extensive Aktivierung, welche vor allem entlang des medialen GFS, in Anteilen aber auch im ACC lokalisiert war und der präSMA zugeordnet werden kann (Paus et al., 1993; Picard & Strick, 1996). Eine zweite, eng umgrenzte Aktivierung war inferior zu dieser Aktivierung im ACC (Gyrus cinguli) lokalisiert.

Bisherige Befunde über die Funktionalität dieser Areale legen nahe, daß sie nicht an

der Realisation oben diskutierter Doppelaufgaben-Anforderungen beteiligt sind, sondern weitere Anforderungen, die in der Doppelaufgabe auftraten, implementieren. So sind Areale des ACC und der präSMA häufig mit Fehlerverarbeitung (Carter et al., 1998) und Antwort-Konflikt (*response competition*) (Ullsperger & von Cramon, 2001) in Verbindung gebracht worden, wobei ersteres in eher dorsalen Anteilen des ACC bzw. der präSMA und letzteres in eher ventralen Anteilen des ACC lokalisiert ist (Braver et al., 2001; Ullsperger & von Cramon, 2001). Verschiedene Studien konnten des weiteren zeigen, daß diese medialen Anteile eher mit der *Entdeckung* von Antwort-Konflikten assoziiert sind, während die *Auflösung* dieser Konflikte durch exekutive Kontrollprozesse eher durch dorsolateral-präfrontale Areale realisiert wird (Carter et al., 2000; Koechlin et al., 2000; MacDonald III et al., 2000).

Diese Interpretation ist im Einklang mit den aktuellen Befunden. In der Doppelaufgabe sind deutlich mehr Fehler gemacht worden, als in den Einzelaufgaben, so daß die inferiore ACC-Aktivierung als Korrelat der Fehlerverarbeitung angesehen werden kann.<sup>5</sup> Die dorsale Aktivierung könnte dagegen mit Antwort-Konflikten assoziiert werden, da solche Konflikte auch für PRP-Doppelaufgaben nachgewiesen wurden, bei denen die Probanden wie in der aktuellen Studie mit unterschiedlichen Händen reagieren mußten (De Jong, 1993; Meyer & Kieras, 1997).

### 6.4.3 Parietale Areale

Neben präfrontalen Aktivierungen wurden in der aktuellen Studie auch parietale Aktivierungen im Präcuneus und entlang des anterioren SIP beobachtet. Dieser Befund wird durch eine Vielzahl von Studien gestützt, die ebenfalls einen Zusammenhang zwischen exekutiven Prozessen und parietalen Aktivierungen nachweisen konnten (z. B. Cabeza & Nyberg, 2000; Callicott et al., 1999; Cohen et al., 1997; Koechlin et al., 2000; Rowe et al., 2000; Schubert et al., 1998). Hieraus läßt sich schließen, daß exekutive Prozesse möglicherweise durch ein Netzwerk frontaler und parietaler Areale implementiert sind (Baddeley, 1996, 1998; Bunge et al., 2000; Garavan et al., 2000).

Im Detail sind die hier gefundenen Areale entlang des SIP in früheren Studien mit eher globalen Aufmerksamkeitsfunktionen assoziiert worden, wie z. B. verschiedenen Arten visueller Aufmerksamkeit (Wojciulik & Kanwisher, 1999) oder Aufmerksamkeit bezüglich Zeitintervallen (Coull & Nobre, 1998). Anforderungen an solche Aufmerksamkeitsprozesse entstehen vor allem in der Verarbeitung der Doppelaufgabe, in der

---

<sup>5</sup>Daß auch die lateral-präfrontalen Aktivierungen mit Fehlerverarbeitung assoziiert sind, ist unwahrscheinlich (D'Esposito et al., 1995). Für eine ausführliche Diskussion möglicher konfundierender Effekte der Fehlerraten siehe Experimente 2 und 3.

die Aufmerksamkeit zwischen verschiedenen Modalitäten schnell in einer vordefinierten Reihenfolge gewechselt werden muß.

#### 6.4.4 Sonstige Areale

Die Aktivierungen in okzipitalen und temporalen Arealen wurden vor allem mit der Verarbeitung visueller Objekt- und Raum-Information in Verbindung gebracht (Bauer & Rubens, 1985; Haenny & Schiller, 1988; Ungerleider & Mishkin, 1982). Entsprechend der Ausführungen von Kastner und Mitarbeitern (1999) können diese Aktivierungen als Ausdruck erweiterter, d. h. intensiverer oder stärkerer, Verarbeitung angesehen werden, die in der Doppelaufgabe durch eine Aufmerksamkeits-Fokussierung auf die visuellen Stimuli ausgelöst wurde (vgl. auch Woodruff et al., 1996).

#### 6.4.5 LPFC und Einzelaufgaben-Verarbeitung

Die Verarbeitung der Einzelaufgaben aktivierte anterior-superiore Anteile des GFM. Es wird angenommen, daß diese Areale ein Projektionsziel für Informationen höherer Assoziationsareale sind (Miller, 2000; Petrides & Pandya, 1999; Romanski et al., 1999). Die Aktivierungsstärke dieser Areale blieb in allen Aufgaben konstant, so daß die Areale im Doppelaufgaben-Interaktionskontrast nicht aktiviert waren. Das ist im Einklang mit der Annahme, daß die Aktivierung dieser Areale ausschließlich den Eingang domänen-spezifischer Information in den lateral-präfrontalen Cortex darstellt, wohingegen die doppelaufgaben-relatierten Aktivierungen eher exekutive Prozesse reflektieren, die auf Basis dieser Informationen Interferenz auflösen, also die Aufgabenverarbeitung koordinieren.

#### 6.4.6 Limitationen der Interpretation

Die Auswertung in diesem Experiment beruhte wie in fast allen bisherigen Doppelaufgabenstudien auf einem Vergleich der Doppelaufgabe mit den Einzelaufgaben und entspricht somit der Logik der kognitiven Subtraktion (Friston et al., 1995a). Diese Methode hat jedoch die problematische Vorannahme der „reinen Einfügung“ (*pure insertion*; Donders, 1868/1969), welche besagt, daß das Einfügen eines zusätzlichen Prozesses in eine Aufgabe die übrigen Prozesse nicht verändert. Die Validität dieser Annahme ist von einer Reihe von Forschern in Frage gestellt worden (Braver et al., 1997; Friston et al., 1996; Sartori & Umiltà, 2000; Siddis et al., 1999; Sternberg, 1969). So ist es denkbar, daß die Kombination zweier Aufgaben zu einer Doppelaufgabe nicht nur dazu führt, daß zusätzliche exekutive Prozesse zur Koordination der Verarbeitung

benötigt werden, sondern daß sich auch die grundlegende Verarbeitung der Einzelaufgaben, z. B. an perzeptuellen oder motorischen Verarbeitungs-Stufen, verändert. Da die doppelaufgaben-relatierte Aktivierung somit entweder aufgrund zusätzlicher Prozesse oder aufgrund veränderter Verarbeitung der Einzelaufgaben entstanden sein kann, ist sie nicht eindeutig interpretierbar. Diese Alternativinterpretation soll im nächsten Experiment ausgeschlossen werden, indem der methodische Ansatz der parametrischen Manipulation verwendet wird, der nicht auf die Annahme der *pure insertion* angewiesen ist.

#### 6.4.7 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Experiments, doppelaufgaben-relatierte cortikale Areale nachzuweisen und zu lokalisieren, ist erreicht worden. Durch die Bearbeitung der Doppelaufgabe wurden Areale in dorsolateral-präfrontalen, medial-präfrontalen und parietalen Cortices aktiviert, wobei die Aktivierungen nicht durch die Effekte der Einzelaufgaben-Bearbeitung erklärt werden können. Dies zeigt, daß die neuroanatomischen Korrelate doppelaufgaben-relatierter Prozesse identifiziert und lokalisiert werden können. Diese Prozesse können auf zusätzliche Anforderungen an Gedächtnis, geteilte Aufmerksamkeit und Koordination der Verarbeitung zurückzuführen sein, wobei letztere Möglichkeit am Wahrscheinlichsten ist. Im nächsten Experiment soll deshalb untersucht werden, ob die beobachteten Aktivierungen spezifisch der Aufgaben-Koordination zugeordnet werden können. Gleichzeitig soll die methodische Kritik der kognitiven Subtraktion ausgeschlossen werden.



# Kapitel 7

## Experiment 2

### 7.1 Einleitung

Im ersten Experiment konnten cortikale Areale identifiziert werden, die mit der Verarbeitung von Doppelaufgaben in Verbindung stehen. Spezifischer wurde gezeigt, daß der LPFC eine Funktionalität für die Doppelaufgaben-Verarbeitung besitzt. Zwei Fragen konnten jedoch noch nicht eindeutig beantwortet werden. Zunächst konnte nicht bestimmt werden, welcher der postulierten Prozesse Gedächtnis, geteilte Aufmerksamkeit oder Koordination der Verarbeitung durch den LPFC realisiert wird. Des Weiteren konnte aufgrund der verwendeten Analyselogik nicht ausgeschlossen werden, daß die Aktivierungen nicht Ausdruck zusätzlicher Prozesse waren, sondern durch eine veränderte Verarbeitung der Einzelaufgaben hervorgerufen wurden.

In diesem zweiten Experiment sollten beide Punkte mittels der Methode der parametrischen Manipulation untersucht werden. Basierend auf der Beobachtung, daß die hämodynamische Reaktion mit dem Ausmaß kortikaler Verarbeitung variiert (Buckner, 1998; Logothetis et al., 2001), erlaubt die Methode der parametrischen Manipulation in fMRT-Experimenten, eine Assoziation zwischen manipulierter Anforderung und der hervorgerufenen hämodynamischen Reaktion herzustellen (Büchel et al., 1996, 1998; Friston et al., 1995b; Lange, 1999). Übertragen auf das aktuelle Experiment war die grundlegende Idee, einen doppelaufgaben-spezifischen Prozeß parametrisch in seiner Schwierigkeit zu manipulieren, und zu überprüfen, ob die Manipulation einen Einfluß auf die Aktivierungsstärke hat. Wenn sich die Aktivierungsstärke mit der Manipulation ändert, können diese Areale als mit dem manipulierten Prozeß assoziiert beschrieben werden (z.B. Braver et al., 1997; Büchel et al., 1996; Cohen et al., 1997). Durch die parametrische Manipulation kann der Kritikpunkt der kognitiven Subtraktion ausgeschlossen werden, da ein Prozeß nur in seiner Schwierigkeit manipuliert wird,

aber nicht neu hinzukommt. Entsprechend benötigt die parametrische Manipulation die kritische Vorannahme der *pure insertion* nicht mehr.

Entscheidender jedoch ist, daß die parametrische Manipulation eine genauere Identifikation der den aktivierten Arealen zugrunde liegenden Prozesse ermöglicht. Da die Befunde des ersten Experiments darauf hinwiesen, daß die doppelaufgaben-relatierten Aktivierungen mit dem Prozeß der Aufgaben-Koordination assoziiert sind, wurde dieser Prozeß parametrisch in seiner Schwierigkeit manipuliert. Anforderungen an Gedächtnis und geteilte Aufmerksamkeit sollten dagegen konstant bleiben.

Die Manipulation erfolgte auf Basis der Überlegungen von De Jong (1995) (vgl. Abschnitt 3.4, S. 31). Er konnte zeigen, daß die Koordinations-Anforderungen steigen, wenn die Verarbeitungs-Reihenfolge der Reize von einem Durchgang zum nächsten umgestellt werden muß. Diese Anforderung entsteht, da im aktuellen Durchgang die gleiche Verarbeitungs-Reihenfolge vorbereitet wird, wie im vorigen. Entsprechend ist auch die Flaschenhals-Stufe wieder auf die Aufgabe eingestellt, die im letzten Durchgang zuerst bearbeitet werden mußte. Wechselt die Reihenfolge, so muß der Flaschenhals einmal zusätzlich umgeschaltet werden, damit die Aufgaben in der korrekten Reihenfolge verarbeitet werden. Nach den in der Einleitung diskutierten Theorien beansprucht dieses Umschalten die exekutiven Prozesse, die die Aufgaben-Verarbeitung koordinieren, weshalb diese Prozesse bei wechselnder Reihenfolge stärker gefordert sind als bei konstanter (De Jong, 1995; Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997). Im aktuellen Experiment wurde entsprechend durch Verwendung dieser Manipulation geprüft, ob die doppelaufgaben-relatierten Areale mit den aufgaben-koordinierenden Prozessen assoziiert sind.

Um sicherzustellen, daß die parametrische Manipulation die gleichen Areale als doppelaufgaben-relatiert identifiziert wie die Subtraktionsmethode, wurde ein experimentelles Design benutzt, welches eine Auswertung gemäß beider Methoden erlaubt. Konvergierende Ergebnisse beider Methoden steigern die Validität der Interpretation erheblich.

So wurden alle Bedingungen des ersten Experiments (BASE, AUD, VIS, DUAL) auch in diesem Experiment benutzt. Zusätzlich zur Doppelaufgabe mit konstanter Präsentations-Reihenfolge (DUAL in Experiment 1, im Folgenden zur Unterscheidung als DA-FIX bezeichnet), wurde eine zweite Doppelaufgabe mit randomisiert wechselnder Präsentations-Reihenfolge eingeführt (DA-RAND). Da in DA-RAND die Verarbeitungs-Reihenfolge ständig neu arrangiert werden muß, während sie in DA-FIX konstant ist, wurde erwartet, daß kortikale Areale, die den Prozeß der Aufgaben-Koordination realisieren, in DA-RAND stärker aktiviert sind als in DA-FIX. Dieses Design ermöglichte

es, den Effekt der parametrischen Manipulation über den Vergleich der beiden Doppelaufgaben zu testen, während es weiterhin möglich war, wie in Experiment 1 über-additive Aktivierungen gemäß der Subtraktionsmethode zu erfassen.

In diesem Experiment sollte als zusätzlicher methodischer Aspekt auch überprüft werden, ob die Ergebnisse der SPMs mit der BOLD-Signaländerung konvergieren. Diese Konvergenz ist nicht selbstverständlich, da die SPMs die *Güte* der Anpassung der Modellfunktion an die funktionellen Daten reflektieren und somit unabhängig von der tatsächlichen Änderungsrate des BOLD-Signals, also der Effektstärke, sind. Aus diesem Grund wurden zusätzlich die lateral-präfrontalen Areale mittels *Regions-Of-Interest* (ROI) Analysen auf Basis der prozentualen Signaländerung des BOLD-Signals genauer untersucht und geprüft, ob die Signaländerungen in den Doppelaufgaben größer als in den Einzelaufgaben und in DA-RAND größer als in DA-FIX sind.

## 7.2 Methode

Dieses Experiment wurde mit Experiment 1 in der gleichen Sitzung durchgeführt, wobei alle Probanden zuerst Experiment 1 bearbeiteten. Aufgrund der hohen Ähnlichkeit der Experimente wird im Folgenden nur auf die Unterschiede zu Experiment 1 eingegangen. Für weitere Details siehe Abschnitt 6.2 auf S. 55.

### 7.2.1 Aufgaben

Die Aufgaben (Abb. 7.1) unterschieden sich im Vergleich zu Experiment 1 in Bezug auf zwei Aspekte. Zum einen wurde eine zusätzliche Doppelaufgabe dargeboten. Da diese Doppelaufgabe schwieriger war als die in Experiment 1 verwendete, wurde zum anderen die zur Verfügung stehende Antwortzeit um 700 ms verlängert. Damit die Durchgänge in allen Bedingungen die gleiche Länge hatten, wurde die Antwortzeit in allen Aufgaben erhöht. So hatten die Probanden ab der Reizpräsentation in den Einzelaufgaben 2050 ms Zeit zu reagieren (1350 ms in Experiment 1), bis gegebenenfalls eine Fehlerrückmeldung erschien. In den Doppelaufgaben hatten die Probanden für die erste Reaktion ebenfalls 2050 ms zur Verfügung, während sich diese Zeit für die zweite Aufgabe um das SOA verkürzte. Entsprechend hatten die Probanden für die zweite Aufgabe bei SOA 200 ms 1850 ms, bei SOA 125 ms 1925 ms und bei SOA 50 ms 2000 ms Zeit, um zu reagieren. Die restlichen Eigenschaften der Bedingungen AUD, VIS und BASE waren zu Experiment 1 identisch.



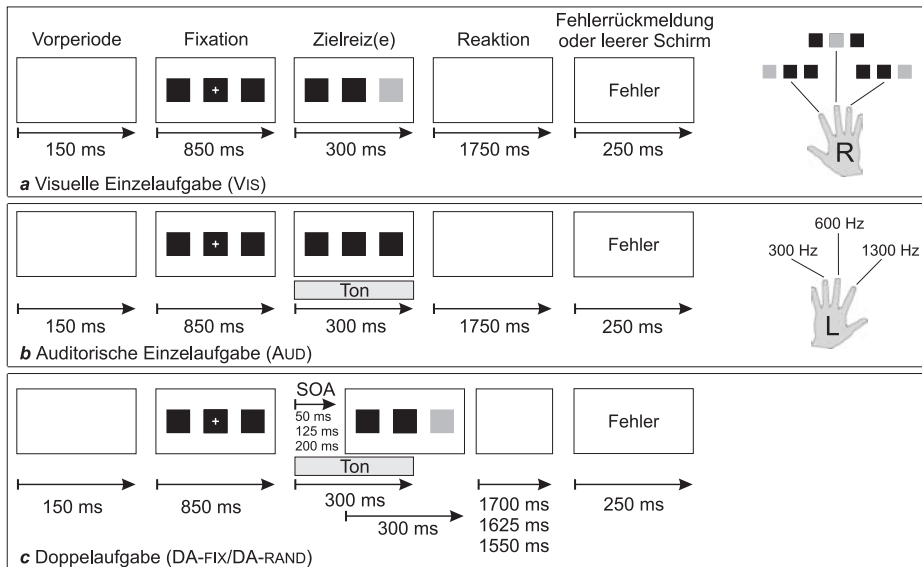


Abbildung 7.1: *Verwendete Aufgaben in Experiment 2. Jeder Durchgang dauerte 3300 ms. (a) Visuelle Einzelaufgabe (b) Auditorische Einzelaufgabe (c) Doppelaufgabe. In DA-RAND betrug das SOA konstant 200 ms. Vergleiche auch Abb. 6.1, S. 57. SOA Stimulus-Onset-Asynchrony.*

## Doppelaufgaben

In diesem Experiment mußten die Probanden zwei Doppelaufgaben bearbeiten. In der ersten Doppelaufgabe (DA-FIX) war die Präsentations-Reihenfolge der Aufgaben innerhalb eines Blocks konstant, aber zwischen Blöcken ausbalanciert. Das SOA variierte randomisiert zwischen 50, 125 und 200 ms. Bis auf die verlängerte Antwortzeit war DA-FIX somit identisch zur Bedingung DUAL aus Experiment 1. In der zweiten Doppelaufgabe (DA-RAND) war die Reihenfolge der Aufgaben dagegen randomisiert. Die Probanden erhielten keine Informationen über die Reihenfolge im nächsten Durchgang. In der Kurzinstruktion während des IBIs vor jedem Block wurde nur auf eine wechselnde Reihenfolge hingewiesen. Da die Probanden instruiert waren, in der Reihenfolge der Aufgaben-Präsentation zu antworten, mußten sie in jedem Durchgang die Reihenfolge, in der die Reize präsentiert wurden, wahrnehmen und ihre Antwort-Reihenfolge entsprechend anpassen. Um die Wahrnehmung der Reihenfolge zu erleichtern, wurde hier nur ein SOA von 200 ms verwendet, welches sich in behavioralen Vortests als angemessen erwiesen hat.

### 7.2.2 Übungssitzung

Ein bis drei Tage vor der MRT-Sitzung übten die Probanden die Aufgaben in einem Laborraum. Neben der Übung für Experiment 1 (siehe Abschnitt 6.2.5, S. 59) bearbeiteten die Probanden nochmals von jeder Aufgabe (bis auf BASE) vier Blöcke mit jeweils 9 Durchgängen.

### 7.2.3 Versuchsdurchführung

Es wurde ein Block-Design verwendet, wobei ein Block aus 9 Durchgängen bestand und 29,7 s dauerte. Die Blöcke waren durch ein 10,3 s langes IBI getrennt. Die Sitzung bestand aus zwei funktionellen Durchgängen, die jeweils mit der Bedingung BASE begannen und endeten. Während die Bedingung BASE somit nur viermal wiederholt wurde, wurden alle anderen Bedingungen achtmal präsentiert, womit das gesamte Experiment 24 min. dauerte.

### 7.2.4 MRT Daten-Erfassung

Die MRT-Prozedur verlief wie in Abschnitt 5.3 auf S. 46, beschrieben. Deshalb werden hier nur die speziellen Parameter genannt. Es wurde eine EPI-Sequenz ( $TR = 2$  s,  $TE = 30$  ms,  $90^\circ$  flip angle) benutzt. Zwei funktionelle Durchgänge mit jeweils 360 Bildern wurden durchgeführt, wobei jedes Bild aus 14 Schichten bestand.

### 7.2.5 MRT-Auswertung

Die zwei funktionellen Durchgänge wurden vor jeglicher Vorverarbeitung zu einem Datensatz zusammengefügt. Die restlichen Auswertungsparameter entsprechen Experiment 1 (siehe Abschnitt 6.2.8, S. 60).

Um die Befunde bezüglich doppelaufgaben-relatierter Areale aus Experiment 1 zu replizieren, wurde zunächst der gleiche Interaktionskontrast berechnet  $((DA-FIX - AUD) - (VIS - BASE))$ . Um zu überprüfen, ob DA-FIX und DA-RAND die gleichen kortikalen Areale aktivieren, wurde als zweites dieser Interaktionskontrast auch für DA-RAND berechnet  $((DA-RAND - AUD) - (VIS - BASE))$ . Für die eigentliche Fragestellung dieser Studie wurde dann der direkte Vergleich der beiden Doppelaufgaben-Bedingungen berechnet  $(DA-RAND - DA-FIX)$ . Um die Effekte der Einzelaufgaben zu erfassen, wurden diese wieder mit der Baseline-Bedingung verglichen (Kontraste  $(AUD - BASE)$  und  $(VIS - BASE)$ ).

Um die Ergebnisse der SPMs weiter zu überprüfen, wurden schließlich ROI-Analysen durchgeführt, wobei die ROIs anhand der SPMs der Gruppenstatistik bestimmt

wurden. Aus diesen ROIs wurde der Voxel mit dem höchsten  $z$ -Wert extrahiert. Dieser Voxel galt als Referenzvoxel. Um einen konsistenten Effekt zu erhalten, wurde eine Gruppe von Voxeln um diesen Referenzvoxel bestimmt, die einen anhand der Daten bestimmten  $z$ -Wert überschritten. Der Signalverlauf dieser Voxel wurde dann, getrennt für jeden Probanden und Bedingung, gemittelt. Die prozentuale Signaländerung wurde dann für die Bedingungen berechnet, indem der Signalverlauf dieser Bedingung in Relation zur Bedingung BASE gesetzt wurde. Um kurzzeitige Übergangseffekte, z. B. zu Beginn und Ende eines Blockes auszuschließen, wurden die ersten und letzten vier Zeitschritte des Signalverlaufs entfernt. Die verbleibenden sieben Zeitschritte wurden dann gemittelt, so daß pro Proband und Bedingung ein Wert resultierte. Dieser Wert reflektierte die mittlere prozentuale Signaländerung in den Voxeln des ROI im Verhältnis zur Bedingung BASE. Auf Basis dieser Werte wurden dann Varianzanalysen und  $t$ -Tests gerechnet. Da auf Basis der SPM-Ergebnisse gerichtete Hypothesen formuliert werden konnten, wurde ein einseitiges Signifikanz-Niveau von  $\alpha = 0.05$  verwendet.

## 7.3 Ergebnisse

### 7.3.1 Behaviorale Ergebnisse

Das erste wichtige Ergebnis war wiederum die Replikation des PRP-Effektes in der Bedingung DA-FIX (Abb. 7.2): So stiegen die RZen der zweiten Aufgabe mit Verkleinerung des SOAs an (einfaktorielle ANOVA:  $F_{(2,20)} = 29.49$ ;  $p < 0.001$ ), während die RZen der ersten Aufgabe über die SOAs konstant blieben (einfaktorielle ANOVA:  $F_{(2,20)} = 0.36$ ;  $p = 0.701$ ). Dieses Muster resultierte in einer signifikanten Interaktion der Faktoren *Aufgabe* (erste oder zweite) und *SOA* (zweifaktorielle ANOVA:  $F_{(2,20)} = 294.30$ ;  $p < 0.001$ ). Das ist ein deutlicher Indikator dafür, daß sich die beiden Aufgaben zeitlich überlappt haben und daß ein Flaschenhals präsent war (vgl. Pashler, 1994a).

Weitere Vergleiche (Abb. 7.3) zeigten, daß die RZen signifikant von VIS zu AUD, von AUD zu DA-FIX und von DA-FIX zu DA-RAND anstiegen (alle  $ps < 0.05$ ). Für diese Vergleiche wurden in den Doppelaufgaben nur die RZen der ersten Aufgabe, gemittelt über AUD und VIS, benutzt. Des weiteren waren in den Doppelaufgaben die Reaktionszeiten der zweiten Aufgabe im Vergleich zur ersten deutlich verlängert (DA-FIX:  $t_{(10)} = 10.07$ ;  $p < 0.001$ ; DA-RAND:  $t_{(10)} = 9.77$ ;  $p < 0.001$ ). Diese Befunde zeigen deutliche Kosten in der Bearbeitung der Doppelaufgaben, die bei DA-RAND größer als bei DA-FIX sind.

Um den Effekt der Reihenfolge-Manipulation auf die Reaktionszeiten genauer zu

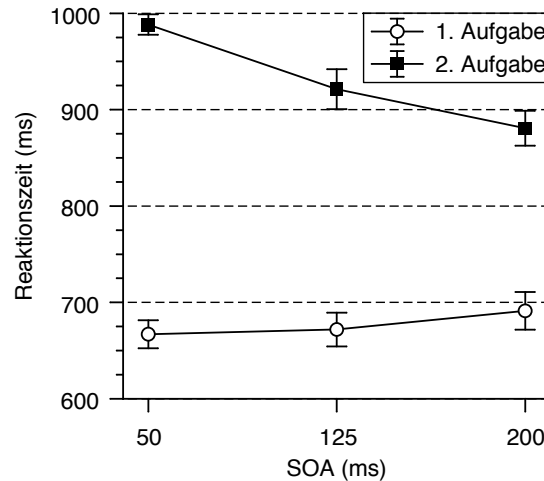


Abbildung 7.2: Der beobachtete PRP-Effekt. Reaktionszeiten (RZen) der ersten und zweiten Aufgabe in Abhängigkeit des SOAs. RZen über auditorische und visuelle Aufgabe gemittelt. Die RZen der zweiten Aufgabe steigen signifikant mit Verkürzung des SOAs, während die RZen der ersten Aufgabe vom SOA unabhängig sind. Fehlerbalken zeigen 95 %-Konfidenzintervalle (Loftus & Masson, 1994).

untersuchen, wurde im Folgenden DA-RAND (SOA konstant 200 ms) nur mit den Daten des SOA 200 ms aus DA-FIX verglichen. Hier zeigte sich, daß die Reaktionszeiten der ersten Aufgabe in DA-RAND 169 ms langsamer waren als in DA-FIX. Bemerkenswerterweise betrug der Reaktionszeitunterschied in der zweiten Aufgabe vergleichbare 167 ms. Entsprechend war die Interaktion zwischen Doppelaufgabe (DA-FIX oder DA-RAND) und Reaktion (erste oder zweite) nicht signifikant ( $F_{(1,10)} = 0.03$ ;  $p = 0.867$ ). Somit wirkt sich der Effekt der parametrischen Manipulation additiv auf die Verarbeitungszeiten beider Aufgaben aus (Sternberg, 1969).

Eine Analyse der Fehlerraten zeigt, daß die RZ-Kosten der Doppelaufgaben nicht auf eine Geschwindigkeits-Genauigkeits Verschiebung zurückzuführen sind. Die Probanden machten in der Bedingung DA-RAND mehr Fehler als in allen anderen Bedingungen (alle  $ps < 0.01$ ), während sich die Fehlerraten zwischen AUD, VIS und DA-FIX nicht signifikant unterschieden (größtes  $t_{(10)} = 2.02$ ; alle  $ps > 0.05$ ). Auch Durchgänge, in denen die Probanden zwar die korrekten Tasten drückten, aber in der falschen Reihenfolge, wurden als Fehler gewertet und sind entsprechend in den gerade genannten Analysen enthalten. In DA-RAND waren 7.59% aller Durchgänge solche Reihenfolge-Fehler, was zeigt, daß die Probanden in der Lage waren, die Aufgaben in der geforderten Reihenfolge zu verarbeiten.

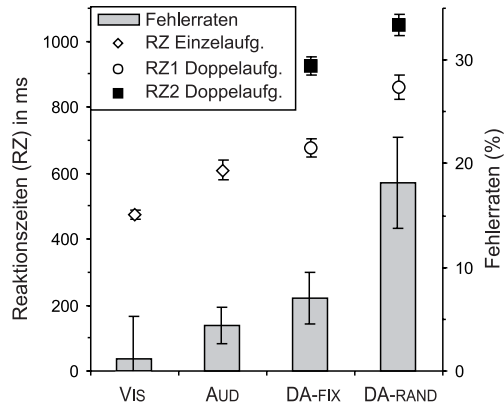


Abbildung 7.3: Behaviorale Daten der Bedingungen. Linke Achse und Symbole kennzeichnen die Reaktionszeiten, rechte Achse und Balken die Fehlerraten. In den Doppelaufgaben-Bedingungen wurde über auditorische und visuelle Aufgabe gemittelt. Fehlerbalken zeigen 95%-Konfidenzintervalle (Loftus & Masson, 1994). RZ1/RZ2 Reaktionszeiten der ersten/zweiten Aufgabe in den Doppelaufgaben.

### 7.3.2 FMRT Ergebnisse

#### Einzelaufgaben

Areale, die mit der Verarbeitung der Einzelaufgaben assoziiert sind, wurden durch Kontraste zwischen Aufgaben- und Kontrollbedingung ermittelt ((AUD – BASE) und (VIS – BASE)). Es zeigte sich eine Replikation der Ergebnisse aus Experiment 1, weshalb im Folgenden nur lateral-präfrontale Areale berichtet werden. Eine vollständige Liste der aktivierten Areale ist in Tabelle 7.1 auf S. 83 dargestellt.

Beide Bedingungen führten zu umschriebenen Aktivierungen im DLPFC (Abb. 7.4). In der Bedingung AUD waren die Aktivierungen bilateral im anterior-superioren Anteil des GFM lokalisiert (BA 8, 9). In der visuellen Einzelaufgabe zeigten sich Aktivierungen im linken anterioren GFM (BA 9) und rechten GFS (BA 8).

#### Doppelaufgabe DA-fix

Diese Analyse diente dazu, die in Experiment 1 gefundenen Daten zu replizieren. Dafür wurde wieder der Interaktionskontrast ((DA-FIX – AUD) – (VIS – BASE)) berechnet. Da sich in DA-FIX und in Experiment 1 ähnliche Areale als doppelaufgaben-relatiert zeigten, werden wiederum nur die lateral-präfrontalen Areale genannt (vollständige

Tabelle 7.1: *Stereotaktische Koordinaten (Talairach & Tournoux, 1988) und anatomische Lokalisation der Aktivationsmaxima in den Einzelaufgaben (AUD – BASE und VIS – BASE).*

Areal	H	Aud					Vis					
		BA	x	y	z	Z	BA	x	y	z	Z	
<b>frontal</b>												
<i>G frontalis medius</i>	R	8/9	28	42	32	7.30						
<i>G frontalis medius</i>	L	8/9	-32	40	36	7.40	9	-26	32	29	5.18	
<i>G frontalis superior</i>	R						8	13	41	42	4.25	
<i>G frontalis superior</i>	R/L	6m	1	5	56	10.61	6m	-7	-10	56	9.6	
<i>S präcentralis</i>	R						4/6	37	-4	52	7.4	
<i>S präcentralis</i>	R	9/6	46	4	41	7.65	6/9	46	4	41	7.68	
<i>S präcentralis</i>	L	6	-47	2	32	7.82	6	-47	2	32	5.73	
<i>G präcentralis</i>	L	4/6	-31	-10	53	10.89	4/6	-31	-10	56	11.51	
<i>S centralis</i>	R	4	34	-21	59	10.99						
<i>S centralis</i>	L						4	-35	-25	56	12.61	
<i>vordere Insel</i>	L	45	-26	23	13	5.60	40/42	-38	-3	15	5.6	
<i>vordere Insel</i>	R	44	43	12	6	7.63	44	43	12	6	5.21	
<b>parietal &amp; temporal</b>												
<i>S intraparietalis</i>	R	40	47	-41	39	9.00	22/40	50	-44	27	6.92	
<i>S intraparietalis</i>	L	40	-47	-42	36	9.74	41	-53	-26	23	8.3	
<i>Lobulus parietalis superior</i>	R	7	11	-64	59	6.10	5	34	-46	58	5.64	
<i>Präcuneus</i>	L	7	-13	-66	53	5.76	7	-16	-70	60	4.41	
<i>G temporalis superior</i>	L	41	-44	-26	11	13.25						
<i>G temporalis superior</i>	R	41/42	53	-30	18	13.38						
<i>S temporalis superior</i>	L	37/39	-47	-58	18	7.76						
<b>sonstige</b>												
<i>S calcarinus</i>	L	17	-16	-89	4	6.32	17	-20	-89	5	7.96	
<i>G okzipitalis</i>	R	18	14	-94	8	7.60	17	16	-89	4	10.85	
<i>Globus Pallidus</i>	L		-13	0	5	5.01						
<i>Globus Pallidus</i>	R		20	-4	10	4.74						
<i>Thalamus</i>	R		10	-16	12	5.85						
<i>Thalamus</i>	L		-11	-17	9	4.14		-14	-21	16	6.07	
<i>Cerebellum</i>	L		-14	-55	-9	9.46						
<i>Cerebellum</i>	R		26	-67	-9	6.04		23	-52	-12	8.74	

Abkürzungen: AUD auditorische Einzelaufgabe; Vis visuelle Einzelaufgabe H Hemisphäre (R rechte, L linke); BA Brodmann Areal; x, y, z entsprechen den Koordinatenachsen nach Talairach & Tournoux (1988); Z z-Wert des Voxels ( $z > 3.3$  entspricht  $p < 0.0005$ ); G Gyrus; S Sulcus.

Liste siehe Tabelle 7.2, S. 87). Die Bearbeitung der Doppelaufgabe führte bei einer Schwelle von  $z > 3.3$  in der linken Hemisphäre zu einer ausgedehnten Aktivierung kortikaler Areale entlang des SFI (BA 10, 45, 46), des GFM (BA 8, 9, 46) und des Sulcus frontalis superior (SFS; BA 6). Die Aktivierung erstreckte sich in der anterior-posterior Achse vom anterioren Pol bis zum Sulcus präcentralis und in der superior-inferior Achse vom SFS bis zum SFI (Abb. 7.4). Die Aktivierung bestand aus einer Reihe von

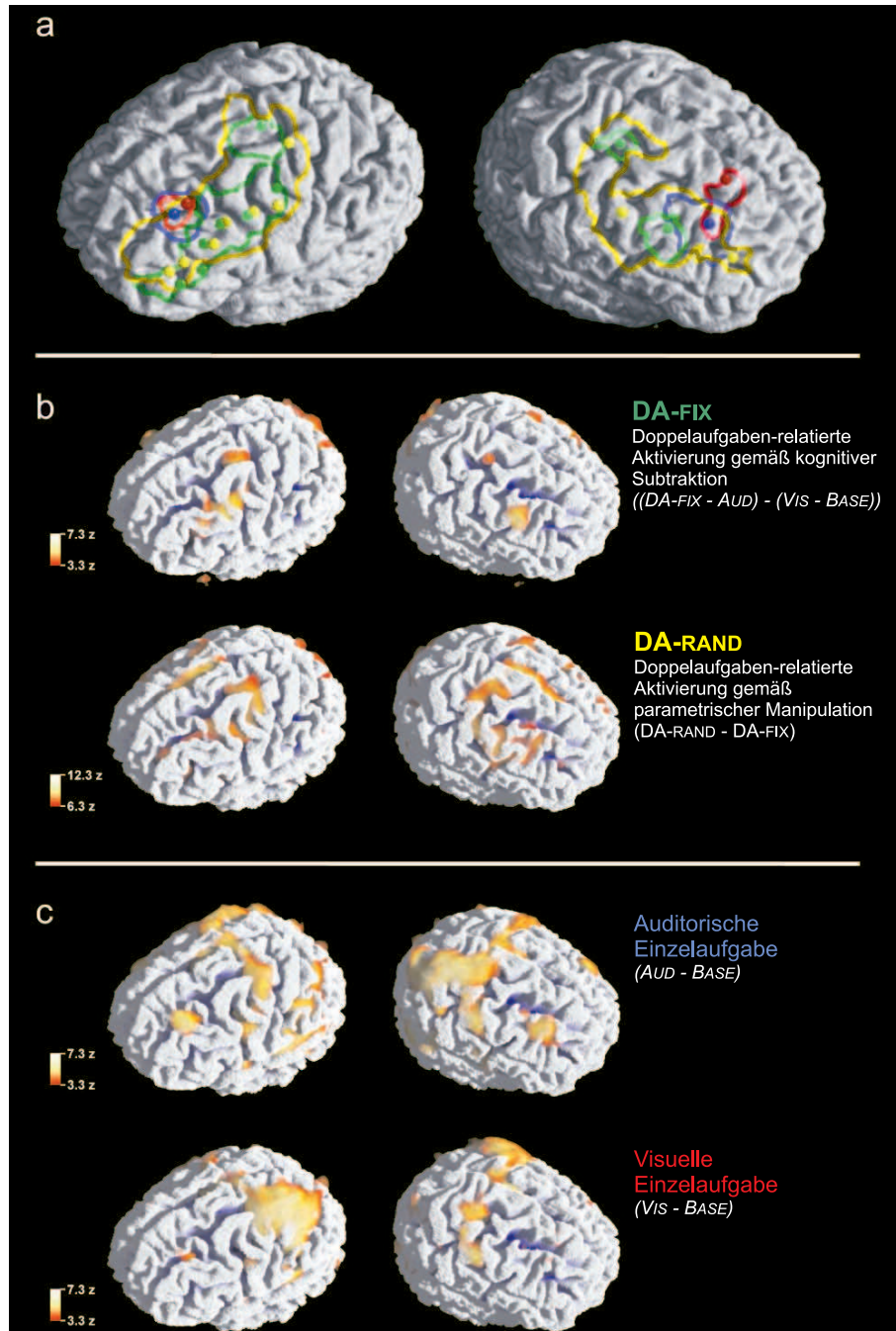
sechs (lokalen) Aktivationsmaxima entlang der anterior-posterior Achse, wobei das absolute Maximum (höchster  $z$ -Wert) im GFM lokalisiert war. In der rechten Hemisphäre zeigte sich eine Aktivierung in kortikalen Arealen des mittleren GFM (BA 46) und in einer Region entlang des SFS (BA 6). Diese Ergebnisse replizieren den Befund aus Experiment 1, daß die Bearbeitung einer Doppelaufgabe zu Aktivierungen im lateral-präfrontalen Cortex führt, die nicht durch die summierten Effekte der Einzelaufgaben erklärt werden können.

In einem zweiten Schritt wurde getestet, ob sich die Lokalisation der lateral-präfrontalen Aktivierungen der Einzelaufgaben von denen der Doppelaufgabe räumlich unterscheiden haben.<sup>1</sup> Zu diesem Zweck wurden die Positionen (Talairach-Koordinaten) der Voxel mit den höchsten  $z$ -Werten im DA-FIX Interaktionskontrast im linken und rechten GFM mit den korrespondierenden Positionen der maximal aktivierten Voxel der Einzelaufgaben verglichen (AUD: linker und rechter GFM; VIS: linker GFM und rechter GFS). Bezüglich der SPMs der Gruppenstatistiken zeigte sich hier, daß die Maxima der Einzelaufgaben und die der Doppelaufgabe mit einer Distanz von 17 bis 30 mm (Mittel 24 mm; Euklidische Distanzen) räumlich separiert waren. Dieser Hinweis auf eine unterschiedliche Lokalisation wurde dann statistisch überprüft, indem die Euklidischen Distanzen individuell für jeden Probanden berechnet wurden. Diese Analyse zeigte Distanzen von 22 bis 32 mm (Mittel 27 mm). Diese Distanzen wurden auf einen signifikanten Unterschied zu einer Distanz von 15 mm getestet, was als hinreichend großer Abstand betrachtet werden kann, um von separaten Aktivierungsorten auszugehen. Es zeigte sich, daß in beiden Hemisphären die Aktivierungen in AUD und VIS jeweils eine signifikant größere Distanz zu den Aktivierungen in DA-FIX als 15 mm aufwiesen (alle  $ps < 0.005$ ; einseitiges Signifikanzniveau, da die Euklidische Distanz nur positiv werden kann). Weitere Analysen zeigten, daß die Maxima der Einzelaufgaben weiter anterior ( $y$ -Achse nach Talairach-Koordinaten; Mittel 19 mm) und medial ( $x$ -Achse,

<sup>1</sup>Diese Analyse wurde aufgrund der ausgeprägteren Überlappung der Aktivierungen nicht in Experiment 1 durchgeführt.

---

Abbildung 7.4 (gegenüberliegende Seite): *Bildgebende Ergebnisse Experiment 2. (a) Umrisse, lokale und absolute Aktivierungsmaxima der Bedingungen. Farben und  $z$ -Schwellen entsprechen den Bezeichnungen bzw. Skalen in b und c. (b) Obere Reihe zeigt doppelaufgaben-relatierte Areale in der Bedingung DA-FIX, die mittels Interaktionskontrast ermittelt wurden. Untere Reihe zeigt doppelaufgaben-relatierte Areale in DA-RAND, die mittels parametrischer Manipulation ermittelt wurden. Diese Areale sind insbesondere durch die höheren Anforderungen an die Reihenfolge-Koordination stärker gefordert. (c) Aktivierungen der auditorischen (oben) und visuellen (unten) Aufgabe, jeweils verglichen zur Bedingung BASE. Anmerkung: Die Abbildungen besitzen unterschiedliche  $z$ -Schwellen.*





Mittel 12 mm) lokalisiert waren als die Maxima der Doppelaufgabe (alle  $ps < 0.01$ ; zweiseitig). Somit konnte gezeigt werden, daß die Einzelaufgaben-Maxima anatomisch weiter anterior und superior lokalisiert waren als die Doppelaufgaben-Maxima.<sup>2</sup>

### Doppelaufgabe DA-rand

Die Hauptfrage dieses Experiments bestand in dem direkten Vergleich der beiden Doppelaufgaben. Eine stärkere Aktivierung des dorsolateral-präfrontalen Cortex in DA-RAND als in DA-FIX würde zeigen, daß dieses Areal mit dem Prozeß der Aufgaben-Koordination assoziiert ist. Weiterhin würde dieses Ergebnis die Befunde der Subtraktionsmethode validieren. Im Folgenden sind wieder nur lateral-präfrontale Areale genannt, eine vollständige Auflistung aktivierter Areale findet sich in Tabelle 7.2, S. 87.

Im ersten Schritt sollte geprüft werden, ob DA-RAND und DA-FIX die gleichen Areale aktivieren, weshalb zunächst der Interaktionskontrast ((DA-RAND – AUD) – (VIS – BASE)) berechnet wurde (Tabelle 7.2; ohne Abbildung). In der linken Hemisphäre erbrachte dieser Kontrast eine weit ausgedehnte Aktivierung, die cortikale Areale entlang des SFI (BA 10, 45, 46), des GFM (BA 8, 9, 46) und des SFS (BA 6) umfaßte. In der rechten Hemisphäre zeigten Areale im GFM (BA 10, 46) und Regionen entlang des SFS (BA 6) signifikante Aktivierung. Im Vergleich zu DA-FIX dehnte sich die Aktivierung, vor allem in der rechten Hemisphäre, stärker in Richtung anteriorer Pol aus (bei einer Schwelle von  $z > 6.3$ ). Trotz dieser Unterschiede bezüglich der Ausdehnung der Areale war eine außerordentlich hohe Übereinstimmung der (lokalen) Aktivierungs-Maxima zu beobachten (vgl. Tabelle 7.2). Somit konnte gezeigt werden, daß praktisch identische Areale des lateralen PFC an der Ausführung von DA-FIX und DA-RAND beteiligt sind.

Im zweiten Schritt wurde nun der direkte Vergleich beider Doppelaufgaben berechnet (DA-RAND – DA-FIX). Dieser Kontrast zeigte, daß fast alle cortikalen Areale, die durch DA-FIX aktiviert wurden, in DA-RAND stärker aktiviert waren (Abb. 7.4). Besonders hervorzuheben ist, daß die lateral-präfrontalen Areale (SFI, GFM und SFS) in beiden Hemisphären starke Aktivierungen zeigten. Somit führte eine parametrische Schwierigkeitserhöhung der Aufgaben-Koordination dazu, daß doppelaufgaben-relatierte Areale, wie sie in DA-FIX identifiziert wurden, in ihrer Aktivität zunahmen. Entsprechend kann geschlossen werden, daß Areale entlang des SFI und im GFM mit dem Prozeß der Aufgaben-Koordination assoziiert sind.

<sup>2</sup>Hier zeigt sich eine Dissoziation des Talairach-Koordinatensystems und der anatomischen Strukturen. Da die frontalen Gyri und Sulci zum frontalen Pol hin schräg verlaufen, sind die z-Koordinaten eines Gyri posterior größer als anterior. Wenn wie hier zwei Aktivierungen auf gleicher Höhe (z-Achse) liegen, aber eine davon weiter anterior lokalisiert ist, bedeutet dies im Umkehrschluß, daß diese Aktivierung anatomisch in weiter superior gelegenen Strukturen lokalisiert ist.

Tabelle 7.2: Stereotaktische Koordinaten (Talairach & Tournoux, 1988) und anatomische Lokalisation der Aktivationsmaxima in den Doppelaufgaben. DA-FIX und DA-RAND entsprechen den Interaktionsanalysen, DA-RAND – DA-FIX dem direkten Vergleich der Doppelaufgaben und Diff dem  $z$ -Wert in der SPM (DA-RAND – DA-FIX) an der Position des Maximums in der SPM der DA-FIX Interaktionsanalyse. Lokale Maxima sind durch Einrückung und Kursivschrift gekennzeichnet.

Areal	H	BA	DA-fix		DA-rand		DA-rand – DA-fix		Diff Z
			x, y, z	Z	x, y, z	Z	x, y, z	Z	
<b>frontal</b>									
<i>G frontalis medius</i>	L	8/9	-44, 16, 38	6.66	-41, 14, 42	11.02	-34, 12, 33	10.38	7.25
<i>SFI/GFM</i>	L	10/46	-35, 41, 8	4.11	-37, 40, 9	8.36	-35, 45, 13	8.18	5.11
<i>S frontalis inferior</i>	L	45/46	-38, 33, 16	4.61	-38, 33, 16	7.77	-38, 40, 17	8.53	5.48
<i>G frontalis medius</i>	L	9/46	-41, 32, 24	5.09	-41, 32, 24	9.04	-41, 29, 25	8.39	6.88
<i>G frontalis medius</i>	L	9/46	-38, 24, 32	5.98	-38, 24, 32	10.70	-38, 24, 32	8.37	8.37
<i>S präcentralis</i>	L	6	-38, 2, 42	5.36	-38, 2, 42	10.51	-41, 5, 39	10.00	9.15
<i>S frontalis superior</i>	L	6	-20, -1, 54	6.71	-20, -1, 54	11.72	-29, -7, 53	11.00	8.36
<i>G frontalis medius</i>	R	9/46	41, 30, 32	5.99	40, 30, 32	10.04	35, 12, 33	12.31	7.18
<i>G frontalis medius</i>	R	10			31, 55, 18	5.93	25, 53, 20	6.76	
<i>S frontalis superior</i>	R	6	20, 0, 57	4.42	20, 2, 56	9.28	oben enth.		7.85
<i>G frontalis superior</i>	L	8			-4, 19, 50	8.73	-2, 19, 50	11.61	
<i>vordere Insel</i>	R	44/45			29, 19, 7	9.78	29, 21, 4	14.15	
<i>vordere Insel</i>	L	44/45			-26, 19, 7	8.40	-29, 16, 11	11.28	
<i>S/G cinguli</i>	L	32					-10, 22, 37	11.72	
<b>parietal &amp; temporal</b>									
<i>Präcuneus</i>	L	7	-10, -71, 64	6.07	-8, -71, 54	11.47	-8, -69, 51	10.21	9.13
<i>L par. superior</i>	L	7	-32, -55, 48	6.58	-31, -55, 48	10.56	oben enth.		6.39
<i>L par. superior</i>	R	7	28, -66, 50	4.80	28, -54, 51	8.85	20, -68, 44	9.92	5.40
<i>L par. inferior</i>	R	40/7					41, -47, 40	8.88	
<i>L par. inferior</i>	L	40					-50, -45, 36	8.29	
<i>G temp. mid/inf</i>	L	37	-49, -55, 3	5.94	-49, -55, 3	9.10	-46, -68, 0	10.52	5.63
<i>S temp. inferior</i>	R	37			46, -62, -1	6.72	44, -62, -1	9.18	
<i>S temp. superior</i>	R	22/21					58, -25, 2	6.71	
<b>sonstige</b>									
<i>G cinguli</i>	L	23/31			-11, -44, 24	6.01	-8, -45, 21	4.95	
<i>Cerebellum</i>	L		-13, -55, -9	4.22	1, -61, 10	8.71	1, -54, -6	10.99	3.89
<i>Thalamus</i>	L				-13, -7, 10	6.90	-8, -8, 7	9.33	
<i>Thalamus</i>	R				8, -18, 19	6.50	5, -8, 7	9.57	
<i>Colliculus superior</i>	R				7, -27, 3	6.19	5, -27, 3	10.03	
<i>Colliculus superior</i>	L				-5, -29, -5	6.74	-7, -27, 3	10.45	

Abkürzungen: *H* Hemisphäre (*R* rechte, *L* linke); *BA* Brodmann Areal; *x, y, z* entsprechen den Koordinatenachsen nach Talairach & Tournoux (1988); *Z*  $z$ -Wert des Voxels ( $z > 3.3$  entspricht  $p < 0.0005$ ); *G* Gyrus; *S* Sulcus; *L* Lobulus; *par.* parietalis; *temp.* temporalis; *oben enth.* Aktivierung ist in der eine Zeile darüber stehenden enthalten.

## ROI-Analysen

Um zu überprüfen, ob die in den SPMs beobachteten Aufgaben-Effekte auch durch die Signaländerung der BOLD-Reaktion reflektiert sind, wurden ROI-Analysen durchgeführt. Diese Analysen beruhen auf einer Gruppe von Voxeln um die lateral-präfrontalen Aktivierungs-Maxima im linken und rechten GFM, die anhand der DA-FIX Gruppenstatistik (Interaktionsanalyse) bestimmt wurde. Als Referenzvoxel dienten die Voxel mit den Koordinaten -44, 16, 38 (x, y, z) und 41, 30, 32 (vgl. Tabelle 7.2). Zusätzlich wurden alle kontinuierlich benachbarten Voxel, die einen  $z$ -Wert von 5 überschritten, mit einbezogen. Die prozentuale Signaländerung wurde relativ zur Bedingung BASE ermittelt.

Die Analysen zeigten (Abb. 7.5) einen signifikanten prozentualen Signalanstieg in beiden Doppelaufgaben (alle  $ps < 0.05$ ), nicht jedoch in den Einzelaufgaben (kleinstes  $p = 0.19$ ).<sup>3</sup> Weiterhin war die Signaländerung in den Doppelaufgaben stärker als in den getrennten Einzelaufgaben (alle  $ps < 0.05$ ) und DA-RAND zeigte eine stärkere Signaländerung als DA-FIX (beide  $ps < 0.01$ ). Schließlich wurde geprüft, ob die Signaländerung der Doppelaufgaben durch die Summe der Signaländerungen der Einzelaufgaben erklärt werden kann. Diese Analyse zeigte, daß die Signaländerung in den Doppelaufgaben über-additiv im Vergleich zu den Einzelaufgaben anstieg (alle  $ps < 0.05$ ).<sup>4</sup>

Diese Analysen zeigen, daß die Bearbeitung der Einzelaufgaben in doppelaufgabenrelatierten Arealen nur zu geringen, nicht signifikanten, Signaländerungen führte. Die Bearbeitung der Doppelaufgaben resultierte dagegen in einer deutlichen Signaländerung, die in DA-RAND stärker ausgeprägt war als in DA-FIX. Der Nachweis, daß sich die Signaländerungen in den Doppelaufgaben über-additiv zu denen der Einzelaufgaben verhält, bestätigt die Befunde der SPMs vollständig.

<sup>3</sup>Getestet mittels Ein-Stichproben T-Tests gegen Null, was äquivalent zu einem Test auf Basis der Roh-Signalwerte der Bedingungen gegen die Baseline BASE ist.

<sup>4</sup>Statistische Details der eben genannten Analysen für das ROI im linken GFM: DA-FIX vs. BASE:  $t_{(10)} = 1.82$ ;  $p < 0.05$ ; DA-RAND vs. BASE  $t_{(10)} = 3.10$ ;  $p < 0.01$ ; AUD vs. BASE:  $t_{(10)} = 0.92$ ;  $p = 0.189$ ; VIS vs. BASE:  $t_{(10)} = 0.03$ ;  $p = 0.489$ ; DA-FIX vs. AUD:  $t_{(10)} = 2.68$ ;  $p < 0.05$ ; DA-FIX vs. VIS:  $t_{(10)} = 3.56$ ;  $p < 0.005$ ; DA-RAND vs. DA-FIX:  $t_{(10)} = 9.45$ ;  $p < 0.001$ ; Interaktion der Faktoren Visuelle Aufgabe und Auditorische Aufgabe (vgl. Abb. 7.5; Test auf über-additiven Signalanstieg in der Doppelaufgabe) für DA-FIX:  $F_{(1,10)} = 6.33$ ;  $p < 0.05$  (zweiseitig); Interaktion für DA-RAND:  $F_{(1,10)} = 38.75$ ;  $p < 0.001$  (zweiseitig).

Statistische Details der eben genannten Analysen für das ROI im rechten GFM: DA-FIX vs. BASE:  $t_{(10)} = 1.92$ ;  $p < 0.05$ ; DA-RAND vs. BASE  $t_{(10)} = 3.32$ ;  $p < 0.005$ ; AUD vs. BASE:  $t_{(10)} = 0.95$ ;  $p = 0.182$ ; VIS vs. BASE:  $t_{(10)} = 0.8$ ;  $p = 0.223$ ; DA-FIX vs. AUD:  $t_{(10)} = 1.94$ ;  $p < 0.05$ ; DA-FIX vs. VIS:  $t_{(10)} = 5.71$ ;  $p < 0.001$ ; DA-RAND vs. DA-FIX:  $t_{(10)} = 3.54$ ;  $p < 0.01$ ; Interaktion für DA-FIX:  $F_{(1,10)} = 9.3$ ;  $p < 0.05$  (zweiseitig); Interaktion für DA-RAND:  $F_{(1,10)} = 53.33$ ;  $p < 0.001$  (zweiseitig).

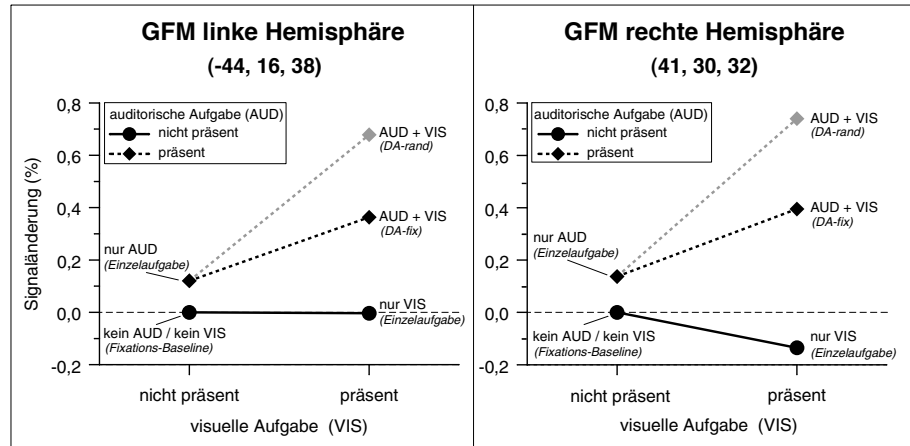


Abbildung 7.5: *Region-Of-Interest-Analysen für die lateral-präfrontalen Cortices. In den Doppelaufgaben steigt die prozentuale Signaländerung über-additiv im Vergleich zu den Einzelaufgaben an (DA-RAND hellgraue, DA-FIX schwarze gestrichelte Linie). So kann die Signaländerung in den Doppelaufgaben („AUD + VIS“) nicht durch die Summe der Signaländerungen in den Einzelaufgaben („nur AUD“ + „nur VIS“) erklärt werden. Des Weiteren ist der Signalanstieg in DA-RAND signifikant größer als in DA-FIX.*

## 7.4 Diskussion

Dieses Experiment sollte überprüfen, ob zwischen der Aktivierungsstärke lateral-präfrontaler Areale und einer parametrischen Schwierigkeitsmanipulation der Aufgaben-Koordination ein Zusammenhang besteht. Es zeigte sich, daß doppelaufgaben-relatierte cortikale Areale durch die parametrische Schwierigkeitserhöhung stärker aktiviert wurden. Das impliziert, daß die beobachteten Areale mit der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung assoziiert sind.

Darüber hinaus konnten die Befunde aus dem ersten Experiment repliziert werden. Alle lateral-präfrontalen und parietalen Areale, die in Experiment 1 als doppelaufgaben-relatiert identifiziert wurden, zeigten auch in diesem Experiment über-additive Aktivierungen in den Doppelaufgaben. Auch konnte wieder der behaviorale PRP-Effekt als Nachweis sich überlappender und interferierender Aufgaben-Verarbeitung beobachtet werden. Der Beobachtung, daß die Doppelaufgaben-Verarbeitung in DA-RAND größere behaviorale Kosten produzierte als in DA-FIX, zeigt, daß die Schwierigkeitsmanipulation behavioral erfolgreich war.

Somit konnten doppelaufgaben-relatierte Areale mit zwei experimentellen Methoden, der kognitiven Subtraktion und der parametrischen Manipulation, nachgewiesen

werden. Diese Konvergenz verifiziert die Ergebnisse aus Experiment 1, da im aktuellen Experiment die Kritik der kognitiven Subtraktion nicht mehr gültig ist. Daher kann die in diesem Experiment beobachtete Aktivierung eindeutig auf zusätzliche Anforderungen in der Verarbeitung von Doppelaufgaben zurückgeführt werden.

Ein weiterer wichtiger Befund betrifft die Lokalisation der doppelaufgaben-relatierten lateral-präfrontalen Aktivierungen im Vergleich zu den einzelaufgaben-relatierten: Es konnte eine deutliche räumliche Trennung dieser Aktivierungen festgestellt werden. Das bedeutet, daß exekutive Prozesse in der Verarbeitung von Doppelaufgaben in separaten anatomischen Arealen lokalisiert sind, die unabhängig von den Einzelaufgaben-Arealen sind. Das widerspricht der Annahme von Adcock et al. (2000) und Bunge et al. (2000), die postulierten, daß exekutive Prozesse nicht in einem separaten anatomischen Areal lokalisiert sind, sondern ausschließlich aus dem Zusammenspiel aufgaben-relatierter Areale, sozusagen als „emergente Eigenschaft“ (Goldman-Rakic, 1996), entstehen.

#### 7.4.1 Spezifikation der Prozesse

In einer PRP-Doppelaufgabe muß die Verarbeitung zweier überlappender Aufgaben koordiniert werden, um die Interferenz aufzulösen, die durch einen Flaschenhals-Mechanismus entsteht (z. B. De Jong, 1995). Experiment 1 und die DA-FIX-Bedingung dieses zweiten Experiments deuten darauf hin, daß die neuroanatomischen Korrelate dieser aufgaben-koordinierenden Prozesse in lateral-präfrontalen Cortices im GFM und entlang des SFI identifizierbar und lokalisierbar sind.

Um die Aufgaben-Verarbeitung trotz Flaschenhals möglichst effektiv zu gestalten, bereiten Probanden die zuletzt ausgeführte Reihenfolge automatisch wieder vor (De Jong, 1995). Diese Vorbereitung ist in beiden Bedingungen, DA-FIX und DA-RAND, präsent, so daß sie nicht mit der höheren Aktivierung in DA-RAND assoziiert werden kann. In DA-RAND kommt jedoch durch die falsche Vorbereitung eine weitere Anforderung hinzu: Der Flaschenhals muß vor der Aufgaben-Verarbeitung einmal zusätzlich umgeschaltet werden, damit die korrekte Aufgabe zuerst verarbeitet wird.<sup>5</sup>

Wie bereits dargelegt, ist dieses zusätzliche Umschalten aufgrund falscher Reihenfolge-Vorbereitung weder konzeptionell noch empirisch von dem üblichen Umschalten des Flaschenhalses auf die zweite Aufgabe, nachdem die erste verarbeitet wurde, zu trennen (De Jong, 1995; Meyer & Kieras, 1997). Somit ist es plausibel anzunehmen, daß das Umschalten durch die gleichen aufgaben-koordinierenden Prozesse realisiert wird.

---

<sup>5</sup>Daß ein zusätzliches Umschalten vor der Aufgaben-Verarbeitung stattgefunden hat, wird durch den additiven Effekt des Reihenfolge-Wechsels auf die Reaktionszeiten der ersten und zweiten Aufgabe belegt (Schweickert, 1983).

Diese Interpretation wird dadurch gestützt, daß die Verarbeitung beider Doppelaufgaben, DA-FIX und DA-RAND, mit praktisch identischen cortikalen Arealen assoziiert ist (vgl. auch Humphreys & Price, 2001).

Die Gedächtnis-Anforderungen haben sich zwischen DA-FIX und DA-RAND nicht unterschieden. In beiden Doppelaufgaben mußten zwei Aufgaben mit ihren Instruktionen und Reiz-Reaktions-Verknüpfungen aufrecht erhalten werden. Auch erforderten beide Doppelaufgaben geteilte Aufmerksamkeit, da zwei Reize verschiedener Modalität zeitlich überlappend bearbeitet werden mußten. Entsprechend kann die höhere Aktivierung in DA-RAND im Vergleich zu DA-FIX weder auf erhöhte Gedächtnis-Anforderungen noch auf Anforderungen nach geteilter Aufmerksamkeit zurückzuführen sein.

Somit haben die aktuellen Befunde gezeigt, daß der LPFC an der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung beteiligt ist. Wie die geringe Anzahl an Reihenfolge-Fehlern gezeigt hat, ermöglicht die Koordination eine adaptive und schnelle Implementation wechselnder Handlungsziele. Dies erfordert Prozesse, die auf der Ebene von Aufgaben die Informations-Verarbeitung umstellen.

Durch die Verwendung eines Block-Designs können jedoch einige Alternativ-Erklärungen nicht endgültig ausgeschlossen werden. So konnten Fehlerdurchgänge nicht aus der Analyse entfernt werden. Entsprechend wäre es denkbar, daß die stärkere Aktivierung in DA-RAND im Vergleich zu DA-FIX auf die höheren Fehlerraten und damit einhergehende Prozesse, wie z. B. Strategieanpassungen durch negative Rückmeldung (Rabbitt, 1966, 1967), zurückzuführen ist. Des weiteren ist es möglich, daß durch die parametrische Manipulation neben der Aufgaben-Koordination weitere Anforderungen variierten. So war es z. B. nur in DA-RAND notwendig, die Präsentations-Reihenfolge wahrzunehmen, nicht jedoch in DA-FIX. Diese Anforderung könnte die Unterschiede in den Aktivierungsmustern der beiden Doppelaufgaben erklären. Unterschiede zeigten sich vor allem in lateralen und medialen prämotorische Areale, die nur in DA-RAND aktiviert waren. Diese Vermutung wird durch Befunde gestützt, daß prämotorische Areale sowohl bei Menschen als auch bei Primaten eng mit der Perzeption und Programmierung von Sequenzen verknüpft sind (Schubotz & von Cramon, 2001; Schubotz et al., 2000; Shima & Tanji, 1998, 2000). Des weiteren ist es vorstellbar, daß sich die Anforderungen an die geteilte Aufmerksamkeit leicht zwischen den Doppelaufgaben unterschieden hat. So ermöglichte die konstante Präsentations-Reihenfolge in DA-FIX den Probanden, die Aufmerksamkeit zu Beginn eines Durchgang auf die zuerst präsentierte Modalität zu richten, während die in DA-RAND aufgrund der unvorhersehbaren Reihenfolge nicht möglich war. Diese Konfundierungen entstanden ausschließlich durch

die Verwendung eines Block-Designs. Sie sollten im nächsten Experiment durch die Verwendung eines ereigniskorrelierten Designs ausgeschlossen werden.

### 7.4.2 Zusammenfassung

Das aktuelle Experiment konnte die Befunde des ersten Experiments replizieren. Des Weiteren wurde die Interpretation, daß die Verarbeitung von Doppelaufgaben zusätzliche neuronale Ressourcen rekrutiert, durch die konvergierenden Befunde zweier experimenteller Methodiken, der kognitiven Subtraktion und der parametrischen Manipulation, verifiziert. Schließlich ermöglichte die parametrische Manipulation eine Eingrenzung der möglichen Prozesse, die mit der doppelaufgaben-relatierten Aktivierung im lateral-präfrontalen Cortex entlang des SFI und im GFM assoziiert sind. Das aktuelle Experiment ist der erste Nachweis, daß eine Funktionalität lateral-präfrontaler Areale für die Doppelaufgaben-Verarbeitung in der Aufgaben-Koordination besteht. Alle bisherigen Studien konnten diese Anforderung nicht von Gedächtnis- und Aufmerksamkeits-Prozessen unterscheiden (D'Esposito et al., 1995; Goldberg et al., 1998; Herath et al., 2001; Koechlin et al., 1999).

Somit zeigt sich, daß lateral-präfrontale Areale mit komplexem Verhalten assoziiert sind. Sie sind daran beteiligt, zwei interferierende Informations-Ströme zu koordinieren und unvorhersehbar wechselnde Handlungsziele schnell und adaptiv in zielführendes Verhalten umzusetzen.

Durch die Verwendung eines Block-Designs entstanden jedoch einige Konfundierungen, die die Interpretation der Befunde einschränken. So könnte der Effekt der parametrischen Manipulation auf die Aktivierungsstärke auch auf unterschiedliche Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit, Fehlerverarbeitung oder die Wahrnehmung der Präsentations-Reihenfolge zurückzuführen sein. Diese Alternativ-Erklärungen sollten im nächsten Experiment durch die Verwendung eines ereigniskorrelierten Designs ausgeschlossen werden, so daß die Funktionalität des LPFC für die Aufgaben-Koordination eindeutig nachgewiesen werden kann.

# Kapitel 8

## Experiment 3

### 8.1 Einleitung

In den ersten beiden Experimenten konnte gezeigt werden, daß cortikale Areale im GFM und entlang des SFI eine Funktionalität für die Doppelaufgaben-Verarbeitung besitzen. Das zweite Experiment zielte darauf ab, die Funktionalität dieser Areale für die Doppelaufgaben-Verarbeitung näher zu spezifizieren. Obwohl die Befunde deutlich für die Relevanz der Aufgaben-Koordination sprachen, konnten aufgrund der Verwendung eines Blockdesigns einige Alternativ-Interpretationen nicht ausgeschlossen werden. Im Detail konnten die Befunde auch durch erhöhte Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit, Fehlerverarbeitung oder die Wahrnehmung der Präsentations-Reihenfolge erklärt werden. Experiment 3 hatte zum Ziel, eindeutig nachzuweisen, daß eine Funktionalität des LPFC für die Doppelaufgaben-Verarbeitung in der Aufgaben-Koordination besteht.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde wieder die von De Jong (1995) vorgeschlagene Reihenfolge-Manipulation verwendet (vgl. auch Abschnitt 3.4, S. 31 und Experiment 2). De Jong konnte zeigen, daß in einer Folge von Doppelaufgaben-Durchgängen im aktuellen Durchgang automatisch die gleiche Verarbeitungs-Reihenfolge der Aufgaben vorbereitet wird, wie im vorigen Durchgang. Diese Vorbereitung kann als Einstellung der Flaschenhals-Stufe auf die Verarbeitung einer bestimmten Aufgabe angesehen werden. Wenn die Präsentations-Reihenfolge der Aufgaben wechselt, muß entsprechend der Flaschenhals zunächst auf die Verarbeitung der korrekten Aufgabe umgestellt werden. Somit kann durch den direkten Vergleich von Durchgängen, in denen die Reihenfolge wechselt (Wechsel-Durchgänge) mit solchen, in denen sie unverändert bleibt (Wiederholungs-Durchgänge), spezifisch die Anforderung des einmaligen Umschaltens der Flaschenhals-Verarbeitung isoliert werden.

In Experiment 2 wurde diese Anforderung indirekt erfaßt, indem eine Folge von



Wiederholungs-Durchgängen (DA-FIX) mit einer Folge von miteinander vermischten Wechsel- und Wiederholungs-Durchgängen (DA-RAND) verglichen wurde. Um den Effekt des einmaligen Umschaltens direkt zu erfassen, wurde in diesem Experiment die DA-RAND-Bedingung aus Experiment 2 in einem ereigniskorrelierten Design wiederholt. Dieses Design hat gegenüber den bislang durchgeführten Block-Designs den Vorteil, daß einzelne Durchgänge miteinander verglichen werden können. Entsprechend wurden in diesem Experiment Wechsel- und Wiederholungs-Durchgänge direkt miteinander verglichen. Aktivierungen dieses Vergleichs können dann mit der hoch-spezifischen Anforderung, die Aufgaben-Verarbeitung einmal zusätzlich umzustellen, assoziiert werden.

Mit dieser Vorgehensweise wird die Kritik des Block-Designs aus Experiment 2 ausgeschlossen. Grundsätzlich sind die Durchgänge der beiden Bedingungen, wechselnde und unveränderte Reihenfolge, vollständig identisch, der einzige Unterschied besteht in der Reihenfolge des *vorhergehenden* Durchgangs. Entsprechend muß, im Gegensatz zu DA-FIX und DA-RAND aus Experiment 2, in beiden Bedingungen die Präsentations-Reihenfolge wahrgenommen werden. Auch ist die Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit in beiden Bedingungen gleich, da vorher nicht bekannt ist, was für ein Durchgang folgt. Entsprechend muß die Aufmerksamkeit in allen Durchgängen auf beide Modalitäten gerichtet werden. Schließlich ermöglicht die Auswertung auf Basis einzelner Durchgänge, alle Fehler-Durchgänge aus der Analyse auszuschließen.

Für die Realisierung eines ereigniskorrelierten Designs ist es allerdings notwendig, die einzelnen Durchgänge für mehrere Sekunden zu trennen. De Jong (1995) hat zwar gezeigt, daß Probanden im aktuellen Durchgang die gleiche Reihenfolge vorbereiten, wie im zuletzt ausgeführten, doch waren in seinen Experimenten die einzelnen Durchgänge relativ schnell aufeinanderfolgend präsentiert. Um zu überprüfen, ob die automatische Einstellung des Flaschenhalses auf die zuletzt ausgeführte Reihenfolge auch einen längeren Zeitraum überdauert, dient ein im Anschluß kurz beschriebenes behaviorales Vorexperiment.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß dieses Experiment die bislang spezifischste Frage zu den in der Doppelaufgaben-Verarbeitung kritischen Prozessen darstellt. Es wurde geprüft, ob *genau ein* zusätzliches Umschalten der Flaschenhals-Stufe zu zusätzlichen Aktivierungen führt, und ob diese Aktivierungen mit den bislang als doppelaufgaben-relatiert identifizierten Arealen im LPFC übereinstimmen.

Tabelle 8.1: *Mittlere Wechselkosten der ersten (RZ1) und zweiten (RZ2) Aufgabe, getrennt nach Abständen zwischen Durchgängen (Inter-Trial-Interval, ITI). Die Wechselkosten stellen die Reaktionszeit-Differenz der Durchgänge mit wechselnder Reihenfolge und der Durchgänge mit wiederholter Reihenfolge dar.*

	ITI 3 s	ITI 6 s
RZ1	84	116
RZ2	107	110

## 8.2 Vorexperiment

In diesem Vorexperiment wurde geprüft, ob die von De Jong (1995) beobachtete Voreinstellung der Flaschenhals-Stufe auch längere Zeit überdauert. Dies muß getestet werden, da durch das geplante ereigniskorrelierte Design die Abstände zwischen Durchgängen (*inter-trial-interval*, ITI) verhältnismäßig lang sein müssen. Aus diesem Grund bearbeiteten sechs Probanden eine Folge von Doppelaufgaben, die bis auf wenige Änderungen der Bedingung DA-RAND aus Experiment 2 entsprach (vgl. folgenden Abschnitt 8.3). In dieser Doppelaufgabe konnte die Darbietungs-Reihenfolge zufällig variieren und die Probanden waren instruiert, in der Präsentations-Reihenfolge zu reagieren. Es wurden zwei ITIs, 3 und 6 s, getestet. Alle Probanden reagierten bei beiden ITIs in Durchgängen mit einem Reihenfolge-Wechsel signifikant langsamer als in Durchgängen mit einer Reihenfolge-Wiederholung (alle  $ps < 0.05$ ; Tabelle 8.1). Bei fünf der sechs Probanden stiegen die Kosten von ITI 3 s zu ITI 6 s sogar noch an. Daraus kann geschlossen werden, daß die Voreinstellung der Flaschenhals-Stufe ein für ein ereigniskorreliertes Design notwendiges ITI überdauert.

## 8.3 Methode

### 8.3.1 Probanden

15 neurologisch gesunde Probanden nahmen an dem Experiment teil. Das Experiment bestand aus einer Übungssitzung in einem Laborraum und einer Experimentalsitzung im MRT. Ihre Teilnahme wurde mit 13,50 DM pro Stunde für die Übungssitzung und 15,- DM pro Stunde für MRT-Sitzungen entlohnt. Die Probanden (8 weiblich) waren zwischen 22 und 29 Jahre alt (Mittel 24 Jahre). Alle Probanden waren rechtshändig (Oldfield, 1971) und hatten normale Sehkraft. Die gleichen Probanden nahmen auch an Experiment 4 teil.

### 8.3.2 Aufgaben

Die Aufgaben in Experiment 3 unterschieden sich leicht von den vorher verwendeten, basierten aber auf dem gleichen Grundprinzip. In diesem Experiment mußten die Probanden nur eine Doppelaufgabe bearbeiten, die ähnlich zur DA-RAND aus Experiment 2 war. Diese Doppelaufgabe basierte wieder auf den gleichen Teilaufgaben, einer auditorischen und visuellen 3-fach Wahlreaktionsaufgabe.

#### Doppelaufgabe

Ein Durchgang in der Doppelaufgabe (Abb. 8.1) begann mit einer 1100 ms langen Präsentation von drei Fixationskreuzen (jeweils  $1.6^\circ \times 1.6^\circ$  Sehwinkel) an den Positionen, an denen in den vorherigen Experimenten die Quadrate dargeboten wurden. Danach wurde der Bildschirm gelöscht und die Zielreize wurden mit einem SOA von 200 ms präsentiert. Wie in DA-RAND aus Experiment 2 variierte die Reihenfolge der Stimuli pseudo-randomisiert, so daß es Durchgänge gab, in denen sich die Reihenfolge im Vergleich zum vorherigen Durchgang wiederholte (Bedingung WDH) und Durchgänge, in denen sie wechselte (Bedingung WECHSEL). Die Probanden mußten in der Präsentations-Reihenfolge auf die Aufgaben reagieren. Als Zielreiz erschien entweder für 200 ms ein Quadrat an einer der durch die Fixationskreuze angezeigten Positionen oder es erklang für 200 ms ein Ton mit einer Frequenz von 200, 600 oder 1800 Hz.<sup>1</sup> 200 ms später, also mit Ende des ersten Zielreizes, wurde je nach Darbietungs-Reihenfolge der Zielreiz der anderen Modalität dargeboten. Danach wurde ein leerer Bildschirm für 2100 ms präsentiert, so daß die Probanden ab Präsentationsbeginn der ersten Aufgabe 2500 ms Zeit zum Reagieren hatten. Nach diesem Intervall wurde gegebenenfalls eine Fehlerrückmeldung für 300 ms visuell präsentiert. Somit dauerte ein Durchgang 3900 ms. Der Abstand zwischen zwei Durchgängen (ITI) betrug pseudo-randomisiert 2100, 4100 oder 6100 ms. Während des ITIs wurde nur ein einzelnes Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms dargeboten, welches die Probanden fixieren sollten.

---

<sup>1</sup>Die in diesem und im nächsten Experiment verwendete EPI-Sequenz unterschied sich zu der in den ersten beiden Experimenten verwendeten in der Hinsicht, daß 14 Schichten mit einem TR von 1 s gemessen werden konnten. Die neue Sequenz führte jedoch zu anderen Störgeräuschen des Tomographen. Aus diesem Grund wurden die Frequenzen der auditorischen Reize so geändert, daß die Diskrimination der verschiedenen Töne weiterhin leicht möglich war. Die unterschiedlichen Abstände zwischen den Frequenzen begründen sich aus den Störgeräuschen des Tomographen, die bei den verwendeten EPI-Sequenzen bei circa 800 – 1500 Hz maximal sind.

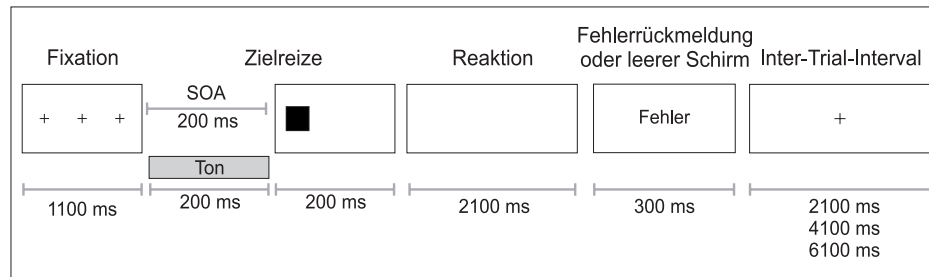


Abbildung 8.1: Ein Durchgang in der Doppelaufgabe. Das Inter-Trial-Interval variierte pseudo-randomisiert und betrug im Mittel 4100 ms. Ein Durchgang dauerte 8 s.

### Leer-Ereignisse

Zur Bestimmung der Baseline, also des fMRT-Signals unter Ruhe, wurden sogenannte Leer-Ereignisse (*null-events*; Friston et al., 1999; Josephs & Henson, 1999, ) in die Doppelaufgaben-Durchgänge zufällig eingemischt. Diese Leer-Ereignisse (Bedingung LE) wurden wie die Doppelaufgaben-Bedingungen behandelt. Sie dauerten ebenfalls 3900 ms, zuzüglich des variablen ITIs. Während dieser Zeit wurde nur ein Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms dargeboten. Da diese Präsentation identisch zur Präsentation während des ITIs war, war für die Probanden das Auftreten eines Leer-Ereignisses nicht direkt ersichtlich, sondern äußerte sich nur als verlängerte Pause zwischen zwei Durchgängen. Die Probanden wußten, daß die Pausen zwischen zwei Durchgängen stark variieren konnten und waren instruiert, während dieser Zeit das Fixationskreuz zu fokussieren.

### 8.3.3 Übungssitzung

Ein bis drei Tage vor der fMRT-Sitzung übten die Probanden die Aufgaben in einem Laborraum. Da dieses Experiment in der gleichen fMRT-Sitzung durchgeführt wurde wie Experiment 4, wurden im ersten Teil der Übungssitzung Aufgaben aus Experiment 4 geübt (vgl. Abschnitt 9.3.2, S. 109). Die Probanden übten die Doppelaufgabe zunächst in zwei Blöcken mit je 30 Durchgängen unter vereinfachten Bedingungen; d. h., die zur Verfügung stehende Antwortzeit wurde ab Präsentation der Reize auf 5400 ms erhöht, wobei der Durchgang unmittelbar nach der Reaktion fortgesetzt wurde, und das ITI betrug konstant 500 ms. Danach folgte ein Block von 150 Durchgängen unter den gleichen Bedingungen wie in der fMRT-Sitzung (vgl. folgende Abschnitte).

### 8.3.4 Versuchsdurchführung und -design

Es wurde ein ereigniskorreliertes Design verwendet. Das Experiment bestand aus jeweils 60 Durchgängen der Bedingungen WDH und WECHSEL und 36 Leer-Ereignissen. Da es fraglich ist, ob die behavioralen Vorbereitungseffekte ein Leer-Ereignis überdauern, wurde nach jedem Leer-Ereignis ein Doppelaufgaben-Durchgang dargeboten, der nicht ausgewertet wurde. Da sich Leer-Ereignisse wiederholen konnten, kamen so 24 nicht auswertbare Doppelaufgaben-Durchgänge hinzu, so daß die Gesamtzahl aller Durchgänge 180 betrug. Daraus resultierte eine Experimentaldauer von 24 min, 13 s.

Die Verwendung relativ kurzer ITIs, wie in diesem Experiment, erschwert die Auswertung der bildgebenden Daten. Die Auswertung beruht darauf, daß das gemessene fMRT-Signal mit der erwarteten Signal-Veränderung durch die Bedingungs-Präsentation (repräsentiert durch die Design-Matrix, vgl. Abschnitt 5.5.3, S. 49) korreliert. Entsprechend muß vermieden werden, daß sich das Signal durch die Trägheit der BOLD-Reaktion auf einem mittleren Niveau einpendelt und die Bedingungs-Präsentationen das Signal kaum verändern.

Um eine bessere Modellierung der BOLD-Reaktion zu ermöglichen, wurden deshalb Methoden eingesetzt, die die Varianz des Signals erhöhen. Zunächst resultiert der Einsatz von Leer-Ereignissen in einer Varianzerhöhung. Sie führen dazu, daß das fMRT-Signal wieder auf das Ruheniveau zurückkehren kann, womit einerseits die Varianz im Signal erhöht wird und andererseits eine Abschätzung des Ruhesignal-Niveaus möglich ist (Friston et al., 1999; Josephs & Henson, 1999).

Die zweite Methode basierte auf dem variablen ITI. Dieses *Jittering* genannte Verfahren bewirkt, daß sich die BOLD-Reaktionen der einzelnen Durchgänge je nach ITI unterschiedlich aufsummieren. Das wiederum führt zu einer größeren Varianz im Signalverlauf, was die Modellierung begünstigt (Burock et al., 1998; Friston et al., 1999).

Schließlich wurde die Abtastrate des fMRT-Signals durch *Oversampling* verdoppelt (Josephs et al., 1997; Miezin et al., 2000). Dies wurde erreicht, indem in circa der Hälfte der Durchgänge der Beginn eines Durchgangs um 500 ms relativ zur Bildaufnahme ( $TR = 1$  s) verschoben wurde. Diese Verschiebung wurde durch eine Verkürzung des ITI kompensiert, so daß dieses in Durchgängen mit 500 ms Versatz 1,6, 3,6 oder 5,6 s betrug. Somit bewirkt das *Oversampling* ebenfalls ein *Jittering*.

Bei ereigniskorrelierten Designs mit verhältnismäßig schneller Darbietungsfolge, wie in diesem Fall, sind aufgrund der Trägheit der BOLD-Reaktion trotz der eben genannten Maßnahmen Übergangseffekte eines Durchgangs auf den folgenden zu erwarten. Deshalb ist es notwendig, die Abfolge der Bedingungen vollständig zu randomisieren und zu kontrollieren. Entsprechend wurden bei der Erstellung der Durchgangsfolgen

die Übergangswahrscheinlichkeiten, Wiederholungen und die Verteilung der Bedingungen über das Experiment möglichst gut ausbalanciert. Diese Randomisierung betraf die Faktoren Oversampling, Jittering, auditorischer Stimulus, visueller Stimulus, die Kombination aus auditorischem und visuellem Stimulus und die Experimental-Bedingungen (WECHSEL, WDH, LE). Die Randomisierung wurde für jeden Probanden getrennt durchgeführt, was zu individuell unterschiedlichen Folgen von Bedingungen führte.

### 8.3.5 MRT Daten-Erfassung

Die MRT-Prozedur verlief wie in Abschnitt 5.3 auf S. 46 beschrieben. Deshalb werden hier nur die speziellen Parameter genannt. Es wurde eine EPI-Sequenz ( $TR = 1$  s,  $TE = 30$  ms,  $90^\circ$  flip angle) benutzt. Ein funktioneller *run* mit 1453 Bildern wurde durchgeführt, wobei jedes Bild aus 14 Schichten bestand.

### 8.3.6 MRT-Auswertung

Niederfrequente Schwingungen bzw. Signal-Drifts wurden mittels eines zeitlichen Hochpass-Filters mit einer Grenzfrequenz von 0.02 Hz ausgeschlossen. Als Modellfunktion wurde eine *Hemodynamic Response Function* (HRF) mit Parametern für Amplitude und *time-to-peak* (entspricht der 1. Ableitung des Amplitudenparameters) angenommen, wobei sich die Auswertungen auf den Amplituden-Parameter stützen. Dagegen wurde der *time-to-peak*-Parameter nur als Kovariate in die Modellierung einbezogen. Die restlichen Auswertungsparameter entsprechen Experiment 1 (siehe Abschnitt 6.2.8, S. 60).

## 8.4 Ergebnisse

### 8.4.1 Behaviorale Ergebnisse

Durchgänge mit wechselnder Reihenfolge waren deutlich schwieriger als Durchgänge mit konstanter Reihenfolge (Abb. 8.2). So waren die RZen in der WECHSEL-Bedingung allgemein größer als in der Bedingung WDH. Im Detail betrug dieser Unterschied, also die Wechselkosten, in der ersten Aufgabe 66 ms ( $t_{(14)} = 7.27$ ;  $p < 0.001$ ) und in der zweiten Aufgabe 72 ms ( $t_{(14)} = 7.54$ ;  $p < 0.001$ ). Wie in Experiment 2 unterschieden sich die Wechselkosten nicht zwischen der ersten und zweiten Aufgabe ( $t_{(14)} = 0.86$ ;  $p = 0.406$ ), d. h. die Reihenfolge-Manipulation hatte einen additiven Effekt auf die Reaktionszeiten der Aufgaben. Die höhere Schwierigkeit der WECHSEL-Bedingung war auch

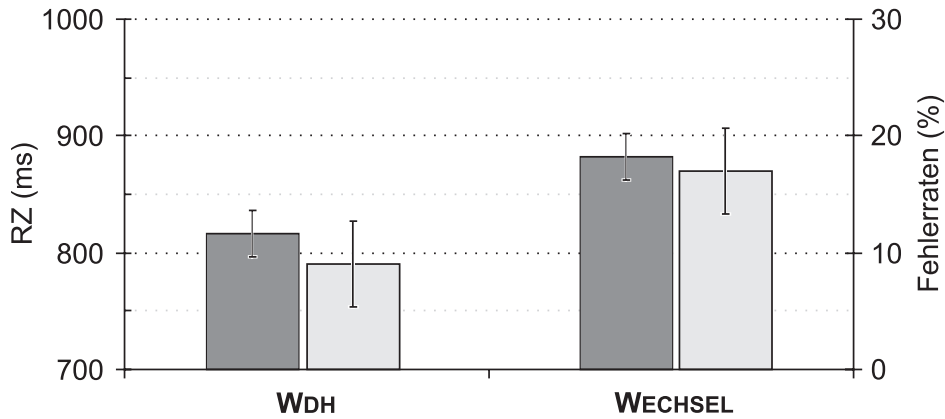


Abbildung 8.2: *Behaviorale Daten Experiment 3. Linke Achse und linke Balken (dunkelgrau) zeigen Reaktionszeiten der ersten Aufgabe, rechte Achse und rechte Balken (hellgrau) Fehlerraten. Durchgänge, in denen die Reihenfolge wechselte (WECHSEL) waren schwieriger als Durchgänge mit konstanter Reihenfolge (WDH). Fehlerbalken zeigen 95 %-Konfidenzintervalle (Loftus & Masson, 1994).*

in den Fehlerraten zu beobachten, die in der WECHSEL-Bedingung 8% höher war als in der WDH-Bedingung ( $t_{(14)} = 5.56$ ;  $p < 0.001$ ).

#### 8.4.2 FMRT Ergebnisse

Dieses Experiment sollte die Frage beantworten, ob spezifisch das Umstellen der Bearbeitungs-Reihenfolge zu stärkeren Aktivierungen im lateralen PFC führt. Deshalb wurden die beiden zentralen Bedingungen direkt miteinander verglichen: (WECHSEL – WDH). Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 8.3 und Tabelle 8.2 dargestellt. Ein Umstellen der Reihenfolge führte zu bilateralen Aktivierungen in kortikalen Arealen des GFM (BA 46) und entlang des SFI (BA 44, 45, 8, 9). Zusätzlich zeigten sich Aktivierungen entlang des linken Sulcus frontalis superior (SFS; BA 6), des linken Sulcus präcentralis (BA 6) und in medialen Arealen des GFS (BA 8m). Im parietalen Cortex fanden sich Aktivierungen entlang des SIP (BA 7, 40; bilateral) und im linken Präcuneus (BA 7m).

Um zu überprüfen, ob es sich bei diesen Arealen um relative Signaländerungen oder um Neu-Aktivierungen in WECHSEL im Vergleich zu WDH handelte, wurden beide Bedingungen getrennt mit der Kontrollbedingung verglichen ((WECHSEL – LE) und (WDH – LE)). Diese Analyse zeigte, daß die genannten Areale auch ohne Umstellen der Reihenfolge aktiviert waren (nicht dargestellt). Das bedeutet, in Einklang mit den

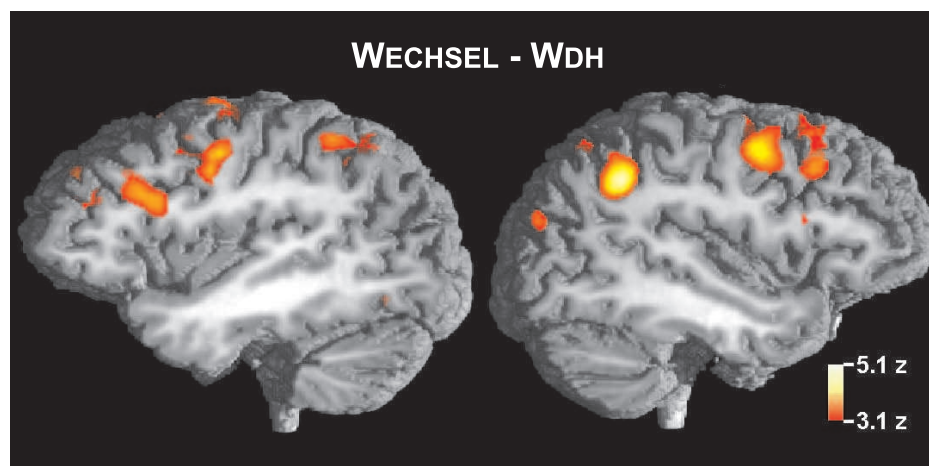


Abbildung 8.3: Bildgebende Ergebnisse Experiment 3. Aktivierungen entsprechen stärkerer Aktivierung in der WECHSEL-Bedingung. Die linke Hemisphäre ist links dargestellt.

ersten Experimenten, daß der laterale PFC auch bei Doppelaufgaben mit gleichbleibender Reihenfolge gefordert ist und daß die Anforderungen durch ein Umstellen der Reihenfolge erhöht sind.

## 8.5 Diskussion

Dieses Experiment sollte eindeutig nachweisen, daß lateral-präfrontale Areale mit dem Prozeß der Aufgaben-Koordination assoziiert sind. Hierfür wurde geprüft, ob in einem ereigniskorrelierten Design ein Zusammenhang zwischen der Aktivierungsstärke lateral-präfrontaler Areale und einer parametrischen Schwierigkeitsmanipulation der Aufgaben-Koordination zu beobachten ist. Als wichtigstes Ergebnis zeigte sich, daß die gestiegenen Koordinations-Anforderung durch einen Reihenfolge-Wechsel in der WECHSEL-Bedingung zu stärkeren Aktivierungen in lateral-präfrontalen Arealen führte als die WDH-Bedingung. Reihenfolge-Wechsel resultierten des weiteren in behavioralen Kosten, die sich als verlängerte Reaktionszeiten und erhöhte Fehlerraten in der WECHSEL-Bedingung im Vergleich zur WDH-Bedingung äußerten.

Durch den direkten Vergleich von WECHSEL- und WDH-Durchgängen im Rahmen des ereignis-korrelierten Designs konnte die hoch-spezifische Anforderung, die Flaschenhals-Stufe ein zusätzliches Mal umzustellen, isoliert werden. Sowohl Anforderungen an



Tabelle 8.2: Stereotaktische Koordinaten (Talairach &amp; Tournoux, 1988) und anatomische Lokalisation der Aktivationsmaxima im Kontrast WECHSEL – WDH.

Areal	H	BA	x	y	z	Z
<b>frontal</b>						
<i>G frontalis medius</i>	L	46	-37	48	21	3.73
<i>G frontalis medius</i>	R	46	38	28	28	3.82
<i>G frontalis superior (medial)</i>	R	8m	4	26	48	3.96
<i>S frontalis inferior</i>	L	9/45	-43	22	17	3.79
<i>S frontalis inferior</i>	R	8/44	43	8	35	4.19
<i>G frontalis superior</i>	L	6	-28	6	53	5.17
<i>S präcentralis</i>	L	6	-41	-1	37	3.95
<b>parietal</b>						
<i>S intraparietalis</i>	L	40/7	-49	-38	47	4.07
<i>S intraparietalis</i>	R	40/7	43	-41	36	5.13
<i>S intraparietalis</i>	L	7	-28	-73	32	3.58
<i>S intraparietalis</i>	R	7	29	-51	47	3.51
<i>Präcuneus</i>	L	7	-5	-58	43	4.16

Abkürzungen: *H* Hemisphäre (*R* rechte, *L* linke); *BA* Brodmann Areal; *x*, *y*, *z* entsprechen den Koordinatenachsen nach Talairach & Tournoux (1988); *Z* *z*-Wert des Voxels (*z* > 3.3 entspricht  $p < 0.0005$ ); *G* Gyrus; *S* Sulcus.

Gedächtnis und Fehlerverarbeitung, als auch an geteilte Aufmerksamkeit waren in beiden Bedingungen identisch. Des weiteren konnte ausgeschlossen werden, daß konfundierende Anforderungen der experimentellen Manipulation, wie sie möglicherweise in Experiment 2 auftraten, mit lateral-präfrontalen Arealen assoziiert sind. Somit konnte eindeutig nachgewiesen werden, daß die lateral-präfrontalen Areale im Rahmen der Doppelaufgaben-Verarbeitung mit der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung assoziiert sind.

Keine Doppelaufgaben-Studie konnte bislang die Funktionalität lateral-präfrontaler Areale für die Verarbeitung von Doppelaufgaben so detailliert charakterisieren wie das aktuelle Experiment. Entsprechend sind doppelaufgaben-relatierte Areale bisher häufig mit unspezifischen Anforderungen assoziiert worden, wie z. B. der „Zentralen Exekutive des Arbeitsgedächtnisses“ (D’Esposito et al., 1995; Goldberg et al., 1998), „Kognitiver

Arbeitsbelastung“ (*cognitive workload*; Goldberg et al., 1998, ) oder „Doppelaufgaben-Interferenz“ (Herath et al., 2001). Darüber hinaus ist selbst diese unspezifische Charakterisierung fragwürdig, da andere Anforderungen, wie z. B. Aufrechterhaltung von Gedächtnisinhalten oder geteilte Aufmerksamkeit, nicht ausgeschlossen werden konnten.<sup>2</sup>

Somit kann zusammengefaßt werden, daß nach den Befunden der vorliegenden Experimente eine Funktionalität der beschriebenen lateral-präfrontalen Areale für die Verarbeitung von Doppelaufgaben in der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung besteht. Diese Schlußfolgerung beruht vor allem auf der Beobachtung, daß ein *Umorganisieren* der Aufgaben-Verarbeitung zu erhöhtem Aufwand führt, der in stärkeren Aktivierungen reflektiert ist.

Die Bedingungen mit sich wiederholender Präsentations-Reihenfolge aller bisherigen Experimente haben aber gezeigt, daß lateral-präfrontale Areale auch in die Doppelaufgaben-Verarbeitung involviert sind, wenn keine Umorganisation gefordert ist. Somit muß die Verarbeitung auch bei perfekter Vorbereitung auf die zu verarbeitende Doppelaufgabe koordiniert werden. Eine Ursache dieser Koordinations-Anforderungen ist bereits genannt worden: Der Flaschenhals muß auf die zweite Aufgabe umgeschaltet werden, wenn er die erste Aufgabe verarbeitet hat. Wie in der Einleitung (Abschnitt 3.4, S. 31) dargelegt, kann dieses Umschalten momentan nicht vom Umschalten unterschieden werden, wie es durch einen Reihenfolge-Wechsel gefordert ist. Somit kann argumentiert werden, daß die bislang als doppelaufgaben-relativ identifizierten Areale allgemein, d. h. sowohl bei konstanter als auch bei wechselnder Reihenfolge, auf die Anforderung zurückzuführen ist, die Verarbeitung am Flaschenhals umzuschalten.

In Abschnitt 3.4.4 auf S. 37 ist jedoch neben dem Umschalten noch eine weitere Anforderung genannt: Auflösung der Interferenz, die entsteht, weil beide Aufgaben durch ihre zeitliche Nähe um die Verarbeitung durch den Flaschenhals konkurrieren. Diese zweite Anforderung soll im letzten Experiment untersucht werden.

---

<sup>2</sup>In der Herath et al. -Studie (2001) sollten die neuroanatomischen Korrelate geteilter Aufmerksamkeit von denen der Doppelaufgaben-Interferenz unterschieden werden. Jedoch ist der Kontrast, der geteilte Aufmerksamkeit erfassen sollte, nicht eindeutig interpretierbar, da die Möglichkeit additiver Einzelaufgaben-Effekte nicht ausgeschlossen werden konnte (vgl. Abschnitt 2.4.1, S. 15).



# Kapitel 9

## Experiment 4

### 9.1 Einleitung

Die ersten drei Experimente dieser Arbeit konnten zeigen, daß die Funktionalität lateral-präfrontaler Areale für die Doppelaufgaben-Verarbeitung in der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung besteht. Spezifischer wurden diese Areale mit der Anforderung assoziiert, die Verarbeitung der Aufgaben an einer limitierten Flaschenhals-Stufe umzustellen. Dieses Umstellen ist nach der Flaschenhals-Verarbeitung der ersten Aufgabe gefordert, um die zweite Aufgabe zu verarbeiten, und wenn die falsche Verarbeitungs-Reihenfolge vorbereitet wurde. In Abschnitt 3.4.4 auf S. 37 ist allerdings ausgeführt worden, daß die aufgaben-koordinierenden Prozesse noch eine weitere Aufgabe haben: Das Sicherstellen der korrekten Verarbeitungs-Reihenfolge. Die neuroanatomischen Korrelate dieser Anforderung sollten im aktuellen Experiment untersucht werden.

Anforderungen an die Sicherstellung der korrekten Verarbeitungs-Reihenfolge können selbst dann bestehen, wenn die korrekte Reihenfolge vorbereitet wurde und die Reize in der richtigen Reihenfolge präsentiert wurden (z. B. Logan & Gordon, 2001). Diese Anforderung entsteht aufgrund der zeitlich nahen Präsentation der Aufgaben. Für diesen Fall postulieren Norman & Shallice (1986), daß Aufgaben um die Auswahl durch den *Contention Scheduling* Mechanismus konkurrieren. Diese Konkurrenz hat mehrere Konsequenzen. So ist es zunächst möglich, daß die falsche Aufgabe zuerst ausgewählt wird und entsprechend die geforderte Antwort-Reihenfolge nicht eingehalten wird (für eine ausführliche Diskussion dieser Möglichkeit durch stochastische Unterschiede in der Verarbeitungszeit der Reize siehe die Diskussion auf S. 118). Des Weiteren ist es möglich, daß die sekundäre Aufgabe mit der Verarbeitung der primären interferiert und die Verarbeitung der primären Aufgabe zu Gunsten der sekundären unterbrochen wird (Hein & Schubert, eingereicht). Schließlich führt die Konkurrenz

der Aufgaben zu einer verzögerten Auswahl durch das *Contention Scheduling* (Norman & Shallice, 1986). Diese Interferenzen können nach Norman & Shallice durch das SAS aufgelöst werden, indem die sekundäre Aufgabe inhibiert und/oder die primäre Aufgabe aktiviert wird (vgl. auch De Jong, 1995, für einen vergleichbaren Mechanismus von Aufgaben-Inhibition bei der Doppelaufgaben-Koordination).

Das Ausmaß der Interferenz hängt von der zeitlichen Überlappung der Aufgaben, also vom SOA, ab: Wenn das SOA sehr groß ist, entsteht gar keine Interferenz, da die zweite Aufgabe die Flaschenhals-Stufe erreicht, wenn die erste Aufgabe bereits verarbeitet wurde. Bei einem mittleren SOA tritt eine mittlere Interferenz auf, da die erste Aufgabe bereits teilweise von der Flaschenhals-Stufe verarbeitet wurde und die zweite Aufgabe die Verarbeitung der ersten kaum noch stören kann. Bei sehr kurzen SOAs tritt dagegen eine starke Interferenz auf, da die Aufgaben den Flaschenhals fast gleichzeitig erreichen und somit in voller Konkurrenz um die Verarbeitung durch den Flaschenhals stehen. Auf Basis unterschiedlich starker Interferenzen kann argumentiert werden, daß auch die interferenz-auflösenden Prozesse unterschiedlich stark gefordert sind. Bezogen auf den o. g. Vorschlag, daß die sekundäre Aufgabe inhibiert werden muß, würde dies bedeuten, daß diese Inhibition um so stärker, bzw. länger ausgeübt werden muß, je kürzer das SOA ist. Wie aber verhalten sich die neuroanatomischen Korrelate dieser aufgaben-koordinierenden Prozesse in Abhängigkeit der Interferenz-Unterschiede?

Ein Aspekt dieser Frage ist bereits von Herath et al. (2001) untersucht worden. In dieser Studie konnte gezeigt werden, daß bestimmte lateral-präfrontale Areale, die mit der Interferenz-Auflösung assoziiert wurden, nur dann aktiviert sind, wenn sich die Aufgaben überlappen (kurze SOAs), nicht aber, wenn sich die Aufgaben nicht überlappen (lange SOAs). Somit haben Herath et al. *absolute* Unterschiede im Ausmaß der Interferenz untersucht. Ungeklärt ist jedoch, ob und wie diese Areale *graduell* unterschiedliche Ausmaße an Interferenz reflektieren. Sind die doppelaufgaben-relatierten Areale bei einer sehr großen Aufgabenüberlappung stärker aktiviert als bei einer mittleren?

Diese Frage stellt das zentrale Untersuchungsthema dieses Experiments dar. Sie soll untersucht werden, indem die Aufgaben-Überlappung graduell durch eine Variation des SOAs manipuliert und der Einfluß dieser Manipulation auf die Aktivierungs-Stärke kortikaler Areale erfaßt wird. Im Detail soll geprüft werden, ob die bislang als doppelaufgaben-relatiert identifizierte Areale bei einem sehr kurzen SOA unterschiedlich starke Aktivierungen aufweisen, als bei einem mittleren SOA. Zusätzlich sollen die Aktivierungs-Stärken dieser Bedingungen mit der eines langen SOAs verglichen werden, um die Daten von Herath et al. zu replizieren.

Die Untersuchung der neuroanatomischen Korrelate gradueller Überlappungsunterschiede betrifft die Arbeitsweise dieser Areale. Sind sie immer gleich aktiv, solange sich die Aufgaben überlappen und es zu Interferenz kommt oder hängt die Aktivität vom Ausmaß der Interferenz ab? Diese Frage ist ungeklärt, da sich cortikale Areale unterschiedlich verhalten können, wenn die Anforderungen an durch sie realisierte Prozesse ansteigen (Callicott et al., 1999; Cohen et al., 1997). So führt ein Anstieg der Anforderungen häufig auch zu einem entsprechenden Anstieg der Aktivierung (Braver et al., 1997; Garavan et al., 2000; Postle et al., 1999; Rypma et al., 1999). Andererseits ist aber auch beobachtet worden, daß Areale zwar durch eine bestimmte Anforderung an sich aktiviert wurden, aber diese Aktivierung unabhängig vom Ausmaß der Anforderung war (Callicott et al., 1999; Cohen et al., 1997; Garavan et al., 2000; Postle et al., 1999). Schließlich wurden Fälle berichtet, in denen die Aktivierungs-Stärke bei einem Anstieg der Anforderungen *abnahm* (Callicott et al., 1999; Goldberg et al., 1998). Da in diesem Experiment einerseits die koordinativen Anforderungen mit Verkürzung des SOAs zunehmen und andererseits in Experiment 3 bereits gezeigt werden konnte, daß doppel-aufgaben-relatierte Areale bei verwandten Manipulationen in ihrer Aktivität zunehmen können, wurde in diesem Experiment entsprechend erwartet, daß mit Verkürzung des SOAs die Aktivierungen ansteigen.

Somit sollte dieses Experiment prüfen, ob doppelaufgaben-relatierte Areale im lateral-präfrontalen Cortex bei hoher Aufgabenüberlappung eine stärkere Aktivierung aufweisen als bei mittlerer Aufgabenüberlappung (graduelle Überlappungsunterschiede). Ein weiteres Ziel bestand darin, die Befunde von Herath et al. (2001) zu replizieren, daß ohne Aufgabenüberlappung keine doppelaufgaben-relatierten Aktivierungen zu beobachten sind (absolute Überlappungsunterschiede).

## 9.2 Vorexperiment

Dieses Vorexperiment diente zur Bestimmung der optimalen SOAs, um die Überlappung der Aufgaben in den gewünschten Abstufungen (hoch, mittel, keine) zu variieren. Dazu bearbeiteten sechs Probanden in zwei Sitzungen die Doppelaufgaben, wie sie im MRT-Experiment durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 9.3.1). Zur genauen Bestimmung des PRP-Effekts wurde das SOA über einen großen Bereich fein abgestuft variiert; es wurden SOAs von 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 und 1200 ms getestet. Nach einer kurzen Übung mußten die Probanden von jedem SOA acht Blöcke mit jeweils zehn Durchgängen bearbeiten. Wie in Tabelle 9.1 dargestellt, steigt der PRP-Effekt, berechnet als RZ2-Differenz relativ zu SOA 1200 ms, mit Verkürzung des SOAs

Tabelle 9.1: *Mittlere Reaktionszeiten (RZen) der einzelnen SOAs. PRP bezeichnet die Verlängerung von RZ2 relativ zum SOA 1200 ms. RZ1 (RZ2) Reaktionszeit der ersten (zweiten) Aufgabe.*

		SOA (ms)								
		100	200	300	400	500	600	700	800	1200
<i>RZ1</i>	<i>(ms)</i>	678	641	626	602	604	597	587	590	608
<i>RZ2</i>	<i>(ms)</i>	971	845	761	655	298	578	533	526	484
<i>PRP</i>	<i>(ms)</i>	487	361	276	170	114	93	49	42	0

an. Für die Bedingung mit maximaler Aufgabenüberlappung erwies sich naheliegenderweise das SOA 100 ms als geeignet. Der PRP-Effekt war im Vergleich zu SOA 100 ms bei SOA 300 ms circa um die Hälfte reduziert, weshalb dieses SOA für die Bedingung der mittleren Überlappung ausgewählt wurde. Für die Bedingung ohne Überlappung wurde das SOA 800 ms gewählt, da sich hier der PRP-Effekt kaum noch verändert und die Probanden vor der Präsentation des zweiten Zielreizes reagieren konnten. Dies sollte sicherstellen, daß sich die Aufgaben nicht mehr überlappen.

## 9.3 Methode

### 9.3.1 Aufgaben

Die Aufgaben in Experiment 4 waren bis auf wenige Änderungen identisch zu den Aufgaben aus Experiment 3, weshalb hier nur auf die Unterschiede eingegangen wird. Alle Aufgaben wurden geblockt dargeboten.

#### **Einzelaufgaben**

Ein Durchgang in der Einzelaufgabe startete mit einer 1100 ms langen Präsentation von drei Fixationskreuzen. Daraufhin wurde der Bildschirm gelöscht und der Zielreiz für 200 ms präsentiert. Der Zielreiz war in der auditorischen Aufgabe (Bedingung AUD) ein Ton mit einer Frequenz von 200, 600, oder 1800 Hz und in der visuellen Aufgabe (Bedingung VIS) ein Quadrat, welches an einer durch die Fixationskreuze angezeigten Positionen dargeboten wurde. Nach den Zielreizen wurde der Bildschirm gelöscht. Ab Präsentationsbeginn des Zielreizes standen den Probanden 1700 ms zur Reaktion zur Verfügung. Danach wurde für 300 ms entweder ein Fixationskreuz oder eine Fehlerrückmeldung präsentiert. Somit dauerte ein Durchgang 3100 ms.

### **Doppelaufgaben**

Die Doppelaufgaben bestanden wieder aus einer Kombination der Einzelaufgaben, wobei der visuelle Reiz immer zuerst präsentiert wurde. Das SOA betrug 100, 300 oder 800 ms (Bedingungen entsprechend DA100, DA300 und DA800) und war in einem Block konstant. Damit die Dauer eines Durchgangs für alle Bedingungen konstant blieb, wurde die zur Verfügung stehende Zeit relativ zum Erscheinen des ersten Reizes konstant bei 1700 ms fixiert. Dadurch verkürzte sich die mögliche Reaktionszeit auf den zweiten Reiz bei DA100 auf 1600 ms, bei DA300 auf 1400 ms und bei DA800 auf 900 ms.

### **Fixation**

Diese Bedingung (BASE) diente wie in Experiment 1 und 2 der Abschätzung des fMRT-Ruhesignals. Bis auf die geänderte Dauer (27,9 s; vgl. Abschnitt 9.3.3) war sie identisch zu den vorherigen Experimenten.

### **9.3.2 Übungssitzung**

Ein bis drei Tage vor der fMRT-Sitzung übten die Probanden die Aufgaben in einem Laborraum. Da dieses Experiment in der gleichen fMRT-Sitzung durchgeführt wurde wie Experiment 3, wurden im zweiten Teil der Übungssitzung Aufgaben aus Experiment 3 geübt (vgl. Abschnitt 8.3.3, S. 97). Die Probanden übten zunächst die Einzelaufgaben und 90 Durchgänge der Doppelaufgaben (30 pro SOA) unter vereinfachten Bedingungen, d. h. sie hatten ab der Präsentation des ersten Reizes 3100 ms Zeit zu reagieren. Danach übten die Probanden von jeder der fünf Bedingungen (ohne BASE) drei Blöcke von je 9 Durchgängen unter gleichen Bedingungen wie in der fMRT-Sitzung.

### **9.3.3 Versuchsdurchführung**

Es wurde ein Blockdesign verwendet. Ein Block bestand aus neun Durchgängen und hatte eine Dauer von 27,9 s. Die Blöcke waren durch 7,1 s lange IBIs getrennt, in denen eine Kurzinstruktion die nächste Aufgabe ankündigte. Jede Bedingung wurde sieben Mal wiederholt (BASE nur viermal), woraus sich eine Experimentaldauer von 22 min, 45 s ergab. Bei der Abfolge der Bedingungen wurde darauf geachtet, daß sich Blöcke gleicher Bedingungen nicht wiederholten und daß keine Doppelaufgaben-Blöcke aufeinander folgten. Jeder Proband erhielt eine individuell randomisierte Abfolge von Blöcken und Durchgängen.

Dieses Experiment wurde gemeinsam mit Experiment 3 durchgeführt. Die ersten sieben Probanden bearbeiteten beide Experimente in der gleichen MRT-Sitzung, wobei



dieses Experiment immer nach Experiment 3 bearbeitet wurde. Da eine Rückmeldung dieser ersten Probanden ergeben hat, daß die Experimentaldauer zu lang sei, bearbeiteten die restlichen acht Probanden die Experimente an aufeinander folgenden Tagen in getrennten Sitzungen, wobei dieses Experiment immer am zweiten Meßtag durchgeführt wurde.

### 9.3.4 MRT Daten-Erfassung

Die MRT-Prozedur war identisch zu der in Abschnitt 5.3 auf S. 46 beschriebenen. Deshalb werden hier nur die speziellen Parameter genannt. Es wurde eine EPI-Sequenz ( $TR = 1\text{ s}$ ,  $TE = 30\text{ ms}$ ,  $90^\circ$  flip angle) benutzt. Ein funktioneller Durchgang mit 1365 Bildern wurde durchgeführt, wobei jedes Bild aus 14 Schichten bestand.

### 9.3.5 MRT-Auswertung

Niederfrequente Schwingungen bzw. Signal-Drifts wurden mittels eines zeitlichen Hochpass-Filters mit einer Grenzfrequenz von  $0.005\text{ Hz}$  ausgeschlossen. Zur Modellierung wurde eine Boxcar-Funktion angenommen. Der Effekt der graduellen Überlappungsunterschiede wurde durch den Kontrast  $DA100 - DA300$  geprüft. Um den Effekt der absoluten Überlappungsunterschiede zu erfassen, wurden die Doppelaufgaben mit Überlappung zusammengefaßt und mit der Doppelaufgabe ohne Überlappung verglichen (Kontrast  $[(DA100 + DA300)/2 - DA800]$ ). Die restlichen Auswertungsparameter entsprechen Experiment 1 (siehe Abschnitt 6.2.8, S. 60).

## 9.4 Ergebnisse

### 9.4.1 Behaviorale Ergebnisse

Es zeigte sich ein substantieller PRP-Effekt (Abb. 9.1): Die RZen der zweiten Aufgabe wurden mit zunehmendem SOA deutlich kleiner ( $F_{(2,28)} = 121.64$ ;  $p < 0.001$ ; paarweise Vergleiche zwischen den SOAs: alle  $ps < 0.001$ ), während die RZen der ersten Aufgabe nahezu konstant blieben ( $F_{(2,28)} = 3.48$ ;  $p < 0.05$ ). Das resultierte in einer signifikanten Interaktion der Faktoren *SOA* und *Aufgabe* ( $F_{(2,28)} = 108.66$ ;  $p < 0.001$ ). Der signifikante Effekt des SOAs auf die erste Reaktion begründete sich allein auf einen Unterschied zwischen den SOAs  $100\text{ ms}$  und  $300\text{ ms}$  ( $t_{(14)} = 3.92$ ;  $p < 0.01$ ) und könnte darauf hindeuten, daß die Probanden die Antworten leicht gruppiert haben, d. h. die Abgabe der ersten Reaktion etwas verzögert haben (Pashler & Johnston, 1989, vgl. auch Abschnitt 6.3.1, S. 60).

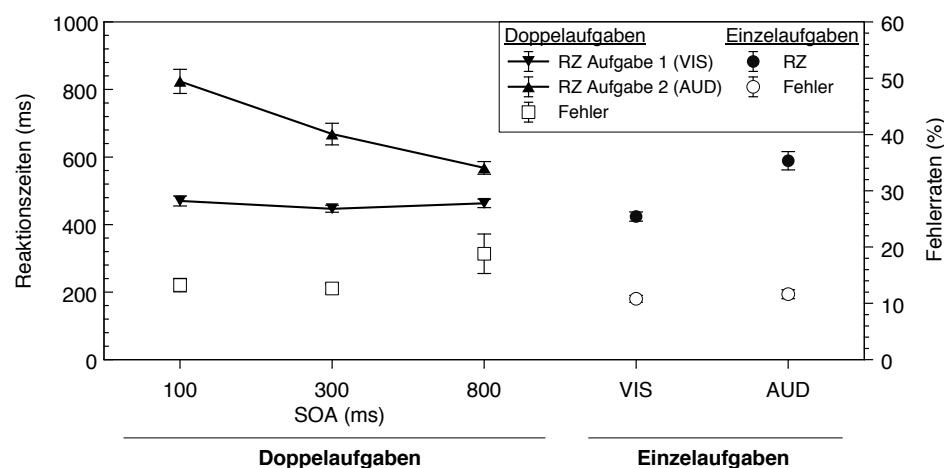


Abbildung 9.1: Behaviorale Ergebnisse Experiment 4. Links sind die Doppelaufgaben (eckige Symbole), getrennt nach SOAs, rechts die Einzelaufgaben (Kreise) dargestellt. Linke Achse und gefüllte Symbole zeigen die Reaktionszeiten, rechte Achse und un-gefüllte Symbole die Fehlerraten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardmeßfehler.

Eine Analyse der Fehlerraten ergab, daß die Probanden in DA800 signifikant mehr Fehler machten als in DA300 ( $t_{(14)} = 2.68$ ;  $p < 0.05$ ) und als in DA100 ( $t_{(14)} = 2.91$ ;  $p < 0.05$ ), während sie DA100 und DA300 ähnlich korrekt bearbeiteten ( $t_{(14)} = 0.37$ ;  $p = 0.721$ ).

### 9.4.2 FMRT Ergebnisse

Die Hauptfrage dieses Experiments war, ob eine graduelle Variation der Aufgabenüberlappung zu Veränderungen in den Aktivierungen doppelaufgaben-relatierter Areale führt. Für diese Frage wurden das mittlere und das kurze SOA miteinander verglichen (DA100 – DA300). Eine Reihe von präfrontalen, parietalen und temporalen Arealen zeigten eine stärkere Aktivität bei kürzerem SOA (Abb. 9.2; oben). Im Detail waren lateral-präfrontale Areale der linken Hemisphäre entlang des anterioren SFI und posterioren GFM in DA100 stärker aktiviert als in DA300. Diese Aktivierung erstreckte sich vom anterioren Pol bis zum Sulcus präcentralis. In der rechten Hemisphäre waren eher umschriebene Areale des mittleren GFM und des Kreuzungspunktes von SFI und Sulcus präcentralis aktiviert. Zusätzlich fanden sich medial-präfrontale Aktivierungen im cingulären Cortex und im medialen GFS. Weiterhin fanden sich ausgedehnte Aktivierungen im Parietallappen, die sowohl superiore und inferiore Anteile des lateralen Cortex, als auch mediale Anteile umfaßten. Diese Ergebnisse demonstrieren, daß die

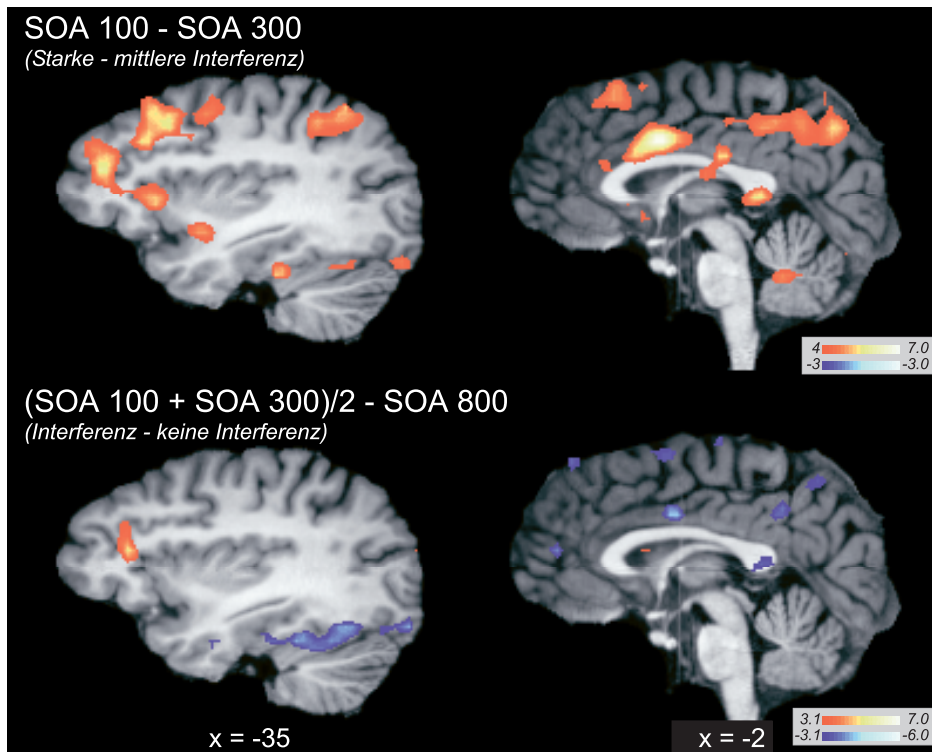


Abbildung 9.2: fMRT-Ergebnisse Experiment 4. Dargestellt sind die Effekte graduel-  
ler ( $DA_{100} - DA_{300}$ ; oben) und absoluter ( $(DA_{100} + DA_{300})/2 - DA_{800}$ ; unten)  
Überlappungsunterschiede. Auf der linken Seite ist ein lateraler Schnitt ( $x = -35$  nach  
Talairach & Tournoux, 1988) der linken Hemisphäre gezeigt, rechts die Medianebene  
( $x = -2$ ).

Aktivität doppelaufgaben-relatierter Areale von dem graduellen Ausmaß der Aufgaben-  
Überlappung beeinflusst wird.

Die zweite Frage dieses Experiments bestand darin, ob doppelaufgaben-relatierte  
Areale ohne Aufgabenüberlappung keine Aktivierung mehr zeigen. Um diese Frage zu  
prüfen, wurden die Bedingungen mit Aufgabenüberlappung ( $DA_{100}$  und  $DA_{300}$ ) zu-  
sammengefaßt und mit der Bedingung ohne Aufgabenüberlappung verglichen (Kontrast  
[[ $DA_{100} + DA_{300}$ ]/2 -  $DA_{800}$ ]). Auf Basis der Ergebnisse der graduellen Überlap-  
pungsunterschiede kann erwartet werden, daß alle doppelaufgaben-relatierten Areale  
bei Aufgaben-Überlappung eine stärkere Aktivierung zeigen, als ohne Überlappung.  
Jedoch zeigten nur wenige, umgrenzte Areale in  $DA_{800}$  schwächere Aktivierungen als

im Mittel aus DA100 und DA300 (Abb. 9.2; unten). Diese Areale waren im linken anterioren SFI und in bilateralen parietalen Arealen lokalisiert. Lateral-präfrontale Areale im posterioren GFM, die bisher zu den durch die Doppelaufgaben-Bearbeitung am stärksten aktivierten Arealen zählten, zeigten keine Aktivierung. Mit anderen Worten, diese Areale waren mit Aufgabenüberlappung genauso stark aktiviert wie ohne.

Dieses Ergebnis steht offensichtlich im Widerspruch zu den Ergebnissen der graduellen Überlappungsunterschiede. In weiteren Analysen (Interaktions-Kontraste für die einzelnen SOAs [(DA – AUD) – (VIS – BASE)] und Einzel-Vergleiche der SOAs mit der Bedingung BASE (DA – BASE); nicht dargestellt) konnte der Grund für dieses Ergebnis identifiziert werden: In vielen Arealen nahm die doppelaufgaben-relatierte Aktivierung zwar von DA100 zu DA300 ab, aber in DA800 wieder zu. Die DA800-Bedingung wies ein Signalniveau auf, welches in etwa zwischen den Niveaus der DA100- und DA300-Bedingungen lag. Entsprechend zeigten die gemittelten DA100- und DA300-Bedingungen in Arealen des posterioren GFM das gleiche Aktivierungsniveau wie die DA800-Bedingung.

Um dieses Ergebnis einer systematischen Analyse zugänglich zu machen, wurden Regressionsanalysen berechnet, die den Aktivierungsverlauf über alle drei SOAs testeten. Aus oben genannten Ausführungen ergeben sich dabei zwei zugrundeliegende Abhängigkeiten. Zum einen konnten Areale gezeigt werden, deren Aktivierung stetig mit größer werdendem SOA abnahm. Die Aktivierung dieser Areale wurde mit einem Regressor erfaßt, der eine solche Abhängigkeit modelliert (im Folgenden als *lineare Funktion* bezeichnet).<sup>1</sup> Zum anderen konnten Areale gezeigt werden, deren Aktivierung von DA100 zu DA300 zwar wie erwartet abnahm, aber in DA800 wieder anstieg. Diese Abhängigkeit wurde durch einen Regressor modelliert, der eine *U-Funktion* beschrieb (Parameterwerte: SOA 100 ms = 2; SOA 300 ms = 1; SOA 800 ms = 2; vgl. Fußnote 1).

Die Effekte der Regressoren wurden in getrennten Analysen bestimmt.<sup>2</sup> Zunächst

---

<sup>1</sup>Für diese Auswertung wurden DA100, DA300 und DA800 zu einer Bedingung zusammengefaßt. Diese Bedingung reflektiert den globalen Effekt der Doppelaufgaben auf das Signal. Um die unterschiedlichen Signal-Niveaus zu modellieren, wurde ein zusätzlicher Regressor in die Design-Matrix eingefügt. Dieser Regressor reflektiert die relativen Signaländerungen, die – unabhängig vom globalen Doppelaufgaben-Effekt – durch die unterschiedlichen SOAs verursacht wurden. Im Fall der linearen Funktion wurden folgende Parameterstufen verwendet: SOA 100 ms = 3; SOA 300 ms = 2; SOA 800 ms = 1. Somit reflektiert dieser Regressor, daß bei SOA 100 das höchste, bei SOA 300 eine mittlere und bei SOA 800 eine geringe Signal-Stärke vorliegt. Die im folgenden präsentierten SPMs reflektieren die Signifikanz solcher Regressoren.

<sup>2</sup>Beide Regressoren in einem Modell zu spezifizieren ist aufgrund der hohen Abhängigkeit (Multikollinearität) nicht sinnvoll. Daher war es auch nicht möglich, beide Regressoren direkt miteinander zu vergleichen, bzw. zu testen, welcher Regressor eine höherer Varianzaufklärung erbringt (abgesehen davon, daß die Analysesoftware keinen F-Test zur Abschätzung der Modellgüte bietet). Dieser Schluß ist nur indirekt möglich, indem man die resultierenden SPMs{z} augenscheinlich miteinander

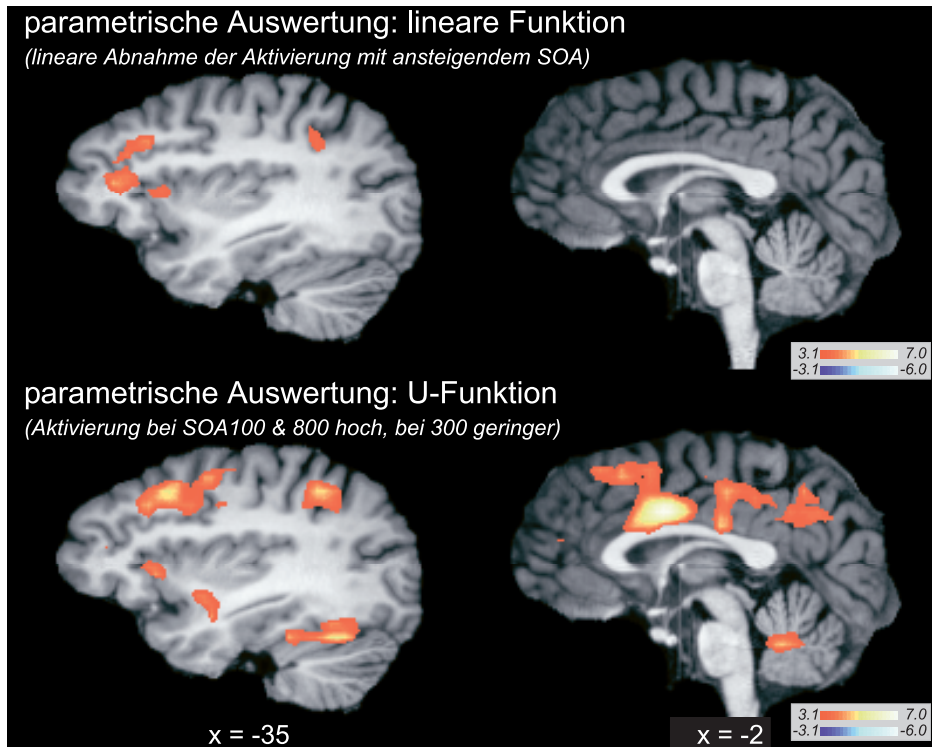


Abbildung 9.3: fMRT-Ergebnisse Experiment 4. Dargestellt sind die Areale deren Aktivierungsstärke mit größer werdendem SOA konstant abnehmen (lineare Funktion, oben), und die deren Aktivierung bei SOA 800 ms wieder zunimmt (U-Funktion, unten). Auf der linken Seite ist ein lateraler Schnitt ( $x = -35$  nach Talairach & Tournoux, 1988) der linken Hemisphäre gezeigt, rechts die Medianebene ( $x = -2$ ).

wurde der Effekt des linearen Regressors geprüft. Diese Analyse (Abb. 9.3, oben; Tabelle 9.2) zeigte in Einklang mit den obigen Analysen, daß der linke lateral-präfrontale Cortex vor allem in anterioren Arealen (GFI und SFI; BA 9, 44, 45, 46) eine linear abnehmende Aktivierungsstärke in Abhängigkeit abnehmender Aufgabenüberlappung aufwies. Weitere cortikale Areale, die in ihrer Aktivität mit längerem SOA abnahmen, waren bilateral in der vorderen Insel, entlang des Sulcus intraparietalis und im linken Gyrus supramarginalis lokalisiert. Somit konnten lateral-präfrontale und parietale Areale nachgewiesen werden, die hypothesenkonform mit abnehmender Aufgabenüberlappung auch linear abnehmende Aktivierungsstärken zeigen.

vergleicht. Somit ist es aber möglich, daß manche Voxel in beiden Analysen signifikante Aktivierung zeigen.

Tabelle 9.2: *Stereotaktische Koordinaten (Talairach & Tournoux, 1988) und anatomische Lokalisation der Aktivationsmaxima, deren Signalverlauf einer linearen Funktion entspricht.*

Areal	H	BA	x	y	z	Z
<i>G frontalis inferior</i>	L	44/45	-35	37	2	4,54
<i>S frontalis inferior</i>	L	9/46/45	-38	26	22	4,51
<i>vordere Insel</i>	L	45/47	-35	16	4	3,66
<i>vordere Insel</i>	R	45/47	31	19	3	4,55
<i>G supramarginalis</i>	L	40	-47	-47	32	4,33
<i>S intraparietalis</i>	L	40/7	-29	-50	32	4,77
<i>S intraparietalis</i>	R	40/7	31	-41	30	4,45

Abkürzungen: *H* Hemisphäre (*R* rechte, *L* linke); *BA* Brodmann Areal; *x*, *y*, *z* entsprechen den Koordinatenachsen nach Talairach & Tournoux (1988); *Z* *z*-Wert des Voxels ( $z > 3.3$  entspricht  $p < 0.0005$ ); *G* Gyrus; *S* Sulcus.

Als zweites wurde der Effekt des U-förmigen Regressors geprüft. Hier zeigten eher posteriore Areale im linken lateralen PFC einen entsprechenden Zusammenhang zwischen Aufgabenüberlappung und Aktivierungsstärke (Abb. 9.3, unten; Tabelle 9.3). Diese Areale, die den Arealen entsprachen, die in den vorigen Experimenten die stärksten Aktivierungen zeigten, waren somit bei DA100 stark, bei DA300 schwächer und bei DA800 wieder stärker aktiviert. Im Detail waren Aktivierungen in der linken Hemisphäre in kortikalen Arealen des GFM (BA 8, 9) und entlang des Sulcus präcentralis (BA 6) lokalisiert. In der rechten Hemisphäre war eine Aktivierung entlang des anterioren SFI (BA 10, 46) zu beobachten. Neben einer Reihe parietaler und temporaler Areale waren auch kortikale Areale der Medianebene aktiviert. Diese Areale waren im Gyrus cinguli (BA 32, 24) und GFS (BA 8m, 10m) lokalisiert. Somit zeigten diese Areale nur bezüglich der Hypothese der graduellen Überlappungsveränderung den erwarteten Effekt, d. h. nur von SOA 100 ms zu SOA 300 ms nahm die Aktivierungsstärke linear mit der Aufgabenüberlappung ab.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, daß alle doppelaufgaben-relatierten Areale bei gradueller Abnahme der Überlappung geringere Aktivierungen aufwiesen. Ein Teil dieser Areale war allerdings auch ohne Überlappung der Aufgaben aktiviert, was den Befunden von Herath et al. (2001) widerspricht.

Tabelle 9.3: Stereotaktische Koordinaten (Talairach & Tournoux, 1988) und anatomische Lokalisation der Aktivationsmaxima, deren Signalverlauf einer **U-förmigen Funktion** entspricht.

Areal	H	BA	x	y	z	Z
<b>lateral frontal</b>						
<i>G frontalis medius</i>	L	8/9	-35	20	32	5.17
<i>S präcentralis</i>	L	6	-38	6	38	4.64
<i>S frontalis superior</i>	L	6	-29	-2	42	4.00
<i>S frontalis inferior</i>	R	10/46	31	40	13	4.27
<i>vordere Insel</i>	L	45/47	-26	18	-2	4.99
<i>vordere Insel</i>	R	45/47	25	15	1	4.00
<b>parietal &amp; temporal</b>						
<i>S intraparietalis</i>	L	7	-35	-44	45	4.94
<i>G supramarginalis/ G angularis</i>	L	40	-44	-55	36	5.35
<i>G supramarginalis</i>	R	40	46	-41	30	5.38
<i>G temporalis medius</i>	L	21	-35	-9	-13	4.27
<i>G temporalis medius</i>	R	21	43	-25	-4	4.21
<i>S temporalis superior</i>	L	39	-47	-64	24	4.94
<i>G fusiformis</i>	L	19	-35	-63	-10	5.35
<b>medial</b>						
<i>G frontalis superior</i>	R	10m	7	47	17	4.06
<i>G frontalis superior</i>	R	8m	1	27	39	4.57
<i>G cinguli</i>	L	32	-11	36	8	4.27
<i>G cinguli</i>	L	24	-2	6	26	7.09
<i>G cinguli</i>	L	23	-2	-18	25	4.81
<i>S cinguli</i>	R	24/31	1	-18	40	4.62
<i>G cinguli</i>	L	39	-11	-39	39	5.02
<i>Präcuneus</i>	L	7m	-11	-59	48	4.81
<b>sonstige</b>						
<i>Cerebellum</i>	R		10	-46	-14	5.02
<i>Nucleus caudatus</i>	L		-17	0	16	4.23
<i>Nucleus caudatus</i>	R		13	9	14	4.16

Lokale Maxima eingerückt und in kursiver Schrift.

Abkürzungen: *H* Hemisphäre (*R* rechte, *L* linke); *BA* Brodmann Areal; *x*, *y*, *z* entsprechen den Koordinatenachsen nach Talairach & Tournoux (1988); *Z* *z*-Wert des Voxels ( $z > 3.3$  entspricht  $p < 0.0005$ ); *G* Gyrus; *S* Sulcus.

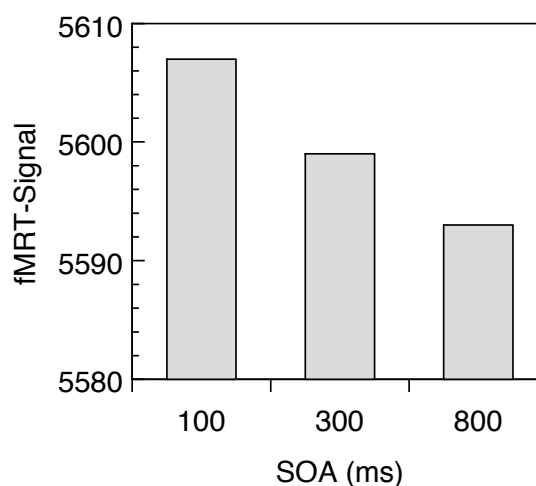


Abbildung 9.4: ROI-Analyse des linken anterioren Sulcus frontalis inferior (Talairach-Koordinaten des maximal aktivierten Voxel  $x = -35, y = 37, z = 2$ ).

### 9.4.3 ROI-Analysen

Um zu überprüfen, ob das unterschiedliche Aktivitätsmuster in Abhängigkeit der Überlappung auch durch die hämodynamischen Signal-Änderungen reflektiert wird, wurden exemplarisch ROI-Analysen des anterioren SFI (lineare Funktion) und des GFM der linken Hemisphäre berechnet. Die genaue Analyselogik ist in Experiment 2 beschrieben (Abschnitt 7.2.5, S. 79). Der einzige Unterschied zur Auswertung von Experiment 2 bestand in der Zusammenstellung der Gruppe von Voxeln, die ein ROI bildeten. Während in Experiment 2 ein ROI anhand von Voxeln, die einen bestimmten  $z$ -Wert überschritten, gebildet wurde, bestand ein ROI in diesem Experiment aus dem maximal aktivierten Voxel und den räumlich direkt angrenzenden, also insgesamt 27, Voxeln.

Die Beobachtung des unterschiedlichen Verhaltens der anterioren und posterioren lateral-präfrontalen Areale wurde durch ROI-Analysen bestätigt (Abb. 9.4 und 9.5). So nahm die Aktivierungsstärke im anterioren SFI mit zunehmendem SOA ab ( $F_{(2,28)} = 3,43$ ;  $p < 0.05$ ), während sie im GFM eine U-Funktion beschrieb ( $F_{(2,28)} = 6,59$ ;  $p < 0.05$ ).



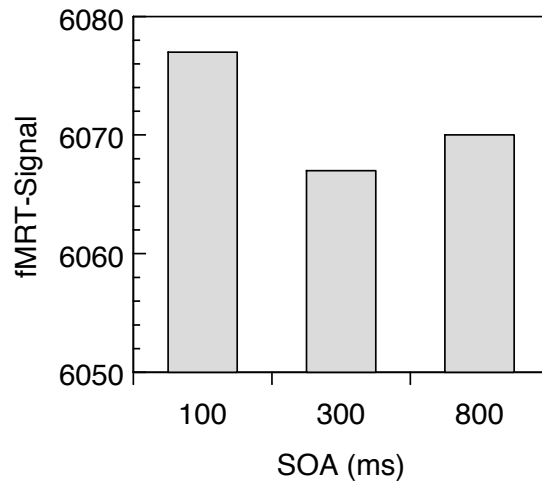


Abbildung 9.5: ROI-Analyse des linken Gyrus frontalis medius (Talairach-Koordinaten des maximal aktivierten Voxel  $x = -35$ ,  $y = 20$ ,  $z = 32$ ).

## 9.5 Diskussion

Das vierte Experiment sollte zwei Fragen untersuchen. Die Hauptfrage war, ob die Stärke der Aktivierungen vom graduellen Ausmaß der Aufgaben-Überlappung abhängt (mittlere vs. starke Überlappung). Weiterhin sollten die Befunde von Herath et al. (2001) repliziert werden, die zeigten, daß Aktivierungen nur bei überlappenden Aufgabenverarbeitung beobachtbar sind, und nicht, wenn sich die Aufgaben nicht überlappen (absolute Überlappungsunterschiede). Im Folgenden werden beide Fragestellungen getrennt diskutiert.

### 9.5.1 Graduelle Überlappungsunterschiede: SOA 100 ms und SOA 300 ms

Das aktuelle Experiment ist die erste bildgebende Studie, die die neuroanatomischen Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung mittels einer graduellen Manipulation der Aufgabenüberlappung untersucht hat, welche eine der klassischsten Manipulationen im PRP-Paradigma darstellt. Es konnte gezeigt werden, daß sich die Aktivierungs-Stärke der Areale vergleichbar zum PRP-Effekt verhält: Je stärker die Aufgabenüberlappung, desto stärker die Aktivierung und desto größer der behaviorale PRP-Effekt.

Dieser Befund ist im Einklang mit der Annahme, daß der PRP-Effekt Ausdruck von Interferenz zwischen den Aufgaben ist (z. B. Logan & Gordon, 2001; Pashler, 1994a).

Diese Interferenz entsteht durch die Präsenz eines limitierten Verarbeitungs-Mechanismus (Flaschenhals), der nur eine Aufgabe zur Zeit verarbeiten kann. Werden beide Aufgaben zeitlich nah beieinander präsentiert, konkurrieren sie um die Verarbeitung durch den Flaschenhals. Zusätzliche exekutive Prozesse, die die Aufgaben-Verarbeitung koordinieren, müssen diese Interferenz auflösen, und sicherstellen, daß die Aufgabe, auf die zuerst reagiert werden soll, auch zuerst verarbeitet wird (Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997; Norman & Shallice, 1986). Da die Konkurrenz der Aufgaben zunimmt, je zeitlich näher sie präsentiert werden, steigen auch die Anforderungen an die koordinierenden Prozesse mit zunehmender Aufgabenüberlappung. Somit kann geschlossen werden, daß die kortikalen Areale im GFM und entlang des SFI, die mit zunehmender Überlappung eine stärkere Aktivierung zeigten, eng mit diesen aufgabenkoordinierenden Prozessen assoziiert sind.

Das Flaschenhals-Modell, wie es vor allem von Pashler und Kollegen (z. B. Pashler, 1984; Pashler & Johnston, 1989; Pashler, 1994a, vgl. Abschnitt 3.3.1, S. 28) postuliert wurde, kann die aktuellen Befunde nicht erklären. In diesem Modell wird angenommen, daß die Aufgaben-Verarbeitung durch die Ankunftszeiten der Aufgaben am Flaschenhals determiniert wird (*first-come first-served* Prinzip, vgl. Abschnitt 3.4, S. 31). Entsprechend ist nach diesem Modell der PRP-Effekt nur Ausdruck unterschiedlich langer Unterbrechungen der Aufgabenverarbeitung (Refraktärperioden), nicht jedoch unterschiedlich starker Interferenz. Obwohl auch für dieses Modell angedeutet wurde (Pashler, 1994a), daß aufgabenkoordinierende Prozesse in die Verarbeitung von PRP-Doppelaufgaben involviert sein könnten, würden diese Prozesse durch eine unterschiedliche Aufgabenüberlappung nicht unterschiedlich stark gefordert sein, da in diesem Fall die Interferenz konstant bleibt.

Die Anforderung an die Interferenz-Auflösung, die in diesem Experiment untersucht wurde, bestand auch schon in den ersten Experimenten. Auch dort wurden die Aufgaben mit kurzen SOAs präsentiert, so daß die korrekte Verarbeitungs-Folge sichergestellt werden mußte. In Experiment 3 wurde dieser Faktor jedoch konstant gehalten, da in den kontrastierten Bedingungen das SOA identisch war. Somit sind die Befunde aus Experiment 3 eindeutig auf das Umorganisieren der Aufgaben-Verarbeitung zurückzuführen und nicht auf die Auflösung der Konkurrenz der Aufgaben um die Verarbeitung durch den Flaschenhals-Mechanismus.<sup>3</sup> Insofern sind in den Experimenten 2 & 3 und im aktuellen Experiment unterschiedliche Ansätze verwendet worden,

---

<sup>3</sup>Auch die Aussage von Experiment 2, daß lateral-präfrontale Areale mit der Umorganisation der Aufgaben-Verarbeitung assoziiert sind, wird durch die aktuellen Befunde nicht beeinträchtigt. Da in DA-FIX kürzere SOAs verwendet wurden als in DA-RAND, ist der Effekt der Reihenfolge-Manipulation, der in DA-RAND zu stärkerer Aktivierung führte, eher unterschätzt worden.

doppelaufgaben-relatierte Areale durch Manipulation doppelaufgaben-relatierter Anforderungen zu lokalisieren. Somit stellt dieses Experiment eine weitere Validierung der Aussage dar, daß die beobachteten Areale des GFM und entlang des SFI mit der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung assoziiert sind. Inwiefern diese beiden Manipulationen die gleichen Prozesse betrafen, wird in der Abschlußdiskussion behandelt (Kapitel 10, S. 127).

In der Einleitung ist ausgeführt worden, daß auch in Bedingungen mit konstanter Präsentations-Reihenfolge der Aufgaben Anforderungen an die Sicherstellung der korrekten Verarbeitungs-Reihenfolge bestehen. Wie bereits kurz angedeutet, kann diese Anforderung durch stochastische Unterschiede in der Verarbeitungszeit der Aufgaben verursacht werden. So ist mehrfach vorgeschlagen worden, daß die Verarbeitungszeit von Prozessen, wie z. B. der Perzeption, nicht als deterministisch, sondern als stochastisch verteilt aufzufassen ist (z. B. McGill, 1963; Vorberg & Schulze, 2002). Diese Annahme ist auch auf die Verarbeitung im PRP-Paradigma übertragen worden (z. B. Luce, 1986; Schwarz & Ischebeck, 2001, vgl. auch Schweickert, 1993 und Schubert, 1999). Durch diese Unterschiede in der Verarbeitungszeit kann es speziell bei kurzen SOAs vorkommen, daß der als zweites präsentierte Reiz die Flaschenhals-Stufe zuerst erreicht. Wie De Jong (1995, Experiment 1) zeigen konnte, hat die Ankunftszeit der Reize am Flaschenhals einen Einfluß auf die Verarbeitungs-Reihenfolge der Aufgaben, solange keine gesonderte Verarbeitungs-Reihenfolge gefordert ist.<sup>4</sup> Wie die geringe Anzahl an Reihenfolge-Fehlern in den Experimenten, in denen eine Verarbeitungs-Reihenfolge vorgegeben war, gezeigt haben, sind die Probanden jedoch in der Lage, die korrekte Verarbeitungs-Reihenfolge trotz der Laufzeitunterschiede zu garantieren. Die Sicherstellung der korrekten Verarbeitungs-Reihenfolge kann durch die bereits diskutierten exekutiven Prozesse, wie z. B. das SAS, realisiert werden, die die als zweites zu verarbeitende Aufgabe inhibieren, bis die Verarbeitung der ersten Aufgabe aufgenommen wurde (Norman & Shallice, 1986).

Auch unter dieser Annahme nehmen die Anforderungen an die Sicherstellung der korrekten Verarbeitungs-Reihenfolge mit Verkleinerung des SOAs zu. Wenn das SOA sehr groß ist, muß die Reihenfolge überhaupt nicht sichergestellt werden, da die zweite Aufgabe den Flaschenhals nicht vor der ersten Aufgabe erreichen kann. Bei einem mittleren SOA besteht dagegen die Möglichkeit, daß die als zweites präsentierte Aufgabe

---

<sup>4</sup>In De Jongs Experiment bereiteten die Probanden auf Basis eines Hinweisreizes eine bestimmte Verarbeitungs-Reihenfolge vor. Die Reize wurden dann aber in der entgegengesetzten Reihenfolge präsentiert. Die Probanden reagierten in 59 % solch invalider Durchgänge in der vorbereiteten Reihenfolge, was De Jong schließen ließ, daß die Verarbeitungs-Reihenfolge bewußt kontrolliert werden kann. Jedoch reagierten die Probanden in 41 % der Durchgänge trotz Vorbereitung in der Reihenfolge der Reizpräsentation. Dieser Befund zeigt somit, daß auch die Ankunftszeiten der Reize am Flaschenhals einen Einfluß auf die Verarbeitungs-Reihenfolge der Aufgaben haben.

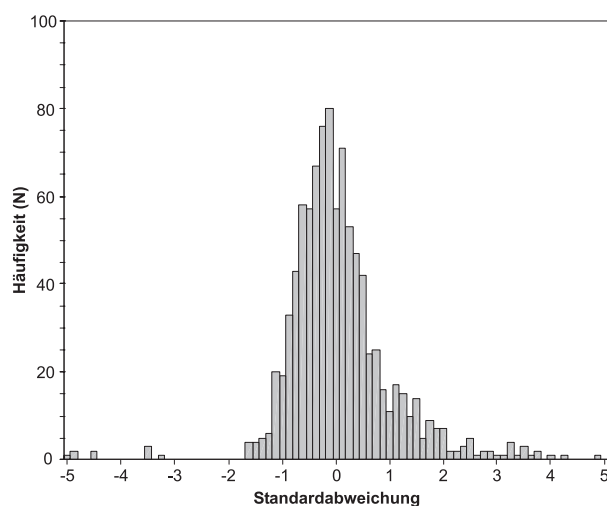


Abbildung 9.6: *Reaktionszeit-Verteilung (Histogramm) der Bedingung SOA 300 ms. Die Verteilung basiert auf allen Durchgängen der DA300-Bedingung (63 pro Proband; 945 insgesamt), die zuvor individuell normalisiert wurden. Aufgrund der Normalisierung repräsentiert eine Standardabweichung von 0 die mittlere Reaktionszeit. Die Intervallbreite beträgt 0,125 Standardabweichungen.*

die Flaschenhals-Stufe zuerst erreicht. Allerdings sollte aufgrund des zeitlichen Vorsprungs der ersten Aufgabe einerseits dieser Fall eher selten auftreten und andererseits die zweite Aufgabe keinen großen zeitlichen Vorsprung vor der ersten besitzen. Ist das SOA jedoch sehr kurz, steigt die Wahrscheinlichkeit, daß die als zweites präsentierte Aufgabe zuerst den Flaschenhals erreicht. Darüber hinaus kann die zweite Aufgabe einen größeren zeitlichen Vorsprung vor der ersten Aufgabe besitzen. Da die sekundäre Aufgabe inhibiert werden muß, bis die primäre Aufgabe hinreichend weit verarbeitet wurde, muß diese Inhibition um so stärker, bzw. länger ausgeübt werden, je kürzer das SOA ist. Entsprechend steigen die Anforderungen an die aufgaben-koordinierenden Prozesse mit Verkürzung des SOAs.

Im Rahmen der Annahme stochastischer Laufzeitunterschiede muß eine Alternativ-Interpretation des Befundes, daß in DA300 geringere Aktivierungen beobachtet wurden als in DA100, ausgeschlossen werden. Bislang wurde argumentiert, daß das Ausmaß der Konkurrenz, und somit auch das der Interferenz, graduell unterschiedlich stark war. Es ist jedoch auch denkbar, daß das *Ausmaß* der Konkurrenz immer gleich ist, sobald eine Aufgaben-Überlappung auftritt, daß aber die *Häufigkeit* der Durchgänge, in denen eine Konkurrenz auftritt, vom SOA abhängt. So könnte es durch stochastische Unterschiede in der Verarbeitungs-Zeit der Aufgaben vorkommen, daß auch schon bei

einem SOA von 300 ms die zweite Aufgabe den Flaschenhals so spät erreicht, daß die erste Aufgabe schon verarbeitet wurde, und somit keine Konkurrenz auftritt. Wenn dieser Fall eintreten kann, ist es plausibel anzunehmen, daß solche „interferenzfreien“ Durchgänge in DA300 häufiger vorkommen als in DA100. In diesem Fall wäre der Aktivierungs-Unterschied zwischen den Bedingungen nicht auf graduell unterschiedliche Ausmaße der Überlappung zurückzuführen, sondern auf eine unterschiedliche Anzahl von Durchgängen, in denen eine Überlappung überhaupt auftritt. Wenn das der Fall ist, wäre die eben getroffene Interpretation der Daten falsch. Um diesen Einwand auszuräumen, wurde die Reaktionszeit-Verteilung der DA300-Bedingung erstellt. Wenn die geringere Aktivierung in DA300 tatsächlich aufgrund einer Mixtur von Durchgängen mit Überlappung und solchen ohne Überlappung entstanden ist, sollte sich eine bimodale Verteilung zeigen: Ein Gipfel für schnelle Reaktionen ohne Überlappung und ein Gipfel für langsame Reaktionen, die aufgrund der Überlappung und der dann entstehenden PRP verzögert wurden. Wie in Abbildung 9.6 dargestellt, läßt sich aus der Reaktionszeit-Verteilung kein Hinweis auf eine bimodale Verteilung finden.<sup>5</sup> Entsprechend kann diese Alternativinterpretation ausgeschlossen werden.

### 9.5.2 Absolute Überlappungsunterschiede: SOA 800 ms

Durch einen Vergleich der Interferenzbedingungen (DA100 und DA300) mit der interferenzfreien Bedingung (DA800) sollte geprüft werden, ob die Befunde von Herath et al. (2001) repliziert werden können, daß absolute Überlappungsunterschiede zu absoluten Aktivierungsunterschieden führen. Entsprechend wurde erwartet, daß doppelaufgabenrelatierte Aktivierungen in den Interferenzbedingungen zu beobachten sind und in der interferenzfreien Bedingung nicht. Diese Erwartung wurde nur teilweise bestätigt.

So wurde nur der anteriore Anteil des SFI durch die Interferenzbedingungen aktiviert, während die übrigen, zuvor als doppelaufgabenrelatiert identifizierten Areale, auch ohne Doppelaufgaben-Interferenz aktiviert waren. Der anteriore SFI ist zwar auch in den vorigen Studien als doppelaufgabenrelatiert identifiziert worden, dennoch ist das Gesamtergebnis der DA800-Bedingung unerwartet.

Eine Interpretation dieser Befunde in Bezug auf Interferenz am Flaschenhals ist kaum möglich. Die Reaktionszeiten zeigten, daß die Probanden in dieser Bedingung

---

<sup>5</sup>Um individuell unterschiedliche Reaktionszeit-Charakteristika zu kontrollieren, wurden die Daten jedes Probanden vor der Mittelung normalisiert. Diese Normalisierung nach der Formel  $\frac{x-\mu}{\sigma}$  ( $x$  = Datenpunkt;  $\mu$  = Mittelwert;  $\sigma$  = Streuung) überführte die Daten in eine Standard-Normalverteilung ( $\mu = 0$ ;  $\sigma = 1$ ). Auch eine visuelle Inspektion der individuellen Reaktionszeit-Verteilungen erbrachte keinen Hinweis auf das Vorkommen bimodaler Verteilungen bzw. bedeutsamer Abweichungen von Normalverteilungen.

auf die erste Aufgabe antworteten, bevor der zweite Reiz überhaupt präsentiert wurde. Das bedeutet, daß kein Flaschenhals vorhanden gewesen sein konnte. Nach allen Theorien des PRP-Modells dürfte hier keine Interferenz auftreten, weshalb auch keine doppelaufgaben-relatierten Aktivierungen erwartet wurden. Die Probanden reagierten in dieser Aufgabe am schnellsten, was die Interpretation unterstützt, daß es sich um die leichteste Doppelaufgabe handelte.

Die naheliegendste Erklärung der Befunde ist, daß bei einem SOA von 800 ms ein zusätzlicher Prozeß gefordert war, der bei SOAs von 100 und 300 ms nicht gefordert war. Zum Beispiel ist es aufgrund der Verwendung eines Block-Designs möglich, daß die Probanden in DA800 eine andere Verarbeitungs-Strategie gewählt haben. Demnach könnte man spekulieren, daß die Beteiligung aller doppelaufgaben-relatierter Areale an der Auflösung der Flaschenhals-Interferenz tatsächlich von DA100 zu DA800 abgenommen hat, nur daß dieser Effekt durch einen neuen, zusätzlichen Prozeß in der Bedingung DA800 verdeckt worden ist. Ein Hinweis auf die Existenz zweier separater Prozesse ist, daß *alle* doppelaufgaben-relatierten Areale bei DA300 geringere Aktivierungen aufwiesen als in DA100, aber nur *ein Teil* der Areale in DA800 wieder eine stärkere Aktivierung zeigten. Somit zeigte sich eine Dissoziation im Verhalten des anterioren SFI und des posterioren SFI/GFM. Dieser zusätzliche Prozeß scheint dabei durch einen Teil der doppelaufgaben-relatierten Areale realisiert zu werden.

Die Alternativhypothese, daß die Aktivierungen in allen drei Bedingungen den gleichen Prozeß widerspiegeln, ist schwer zu erklären. In keinem Modell zur Verarbeitung von PRP-Doppelaufgaben ist ein Prozeß beschrieben worden, der bei großer Aufgabenüberlappung stark, bei mittlerer Überlappung weniger stark und bei gar keiner Überlappung wieder stärker gefordert ist. Selbst unspezifischere Prozesse, wie z. B. die Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit oder Gedächtnisbelastung, sagen dieses Muster nicht voraus.

Wenn also die Vermutung besteht, daß in DA800 eine qualitativ andere Verarbeitung besteht bzw. zusätzliche Prozesse benötigt werden, stellt sich die Frage, ob sich dies in behavioralen Maßen belegen läßt. Eine Auffälligkeit war in den Fehlerraten zu beobachten, welche in DA800 signifikant anstiegen. Eine genauere Analyse ergab (Abb. 9.7), daß dieser Effekt ausschließlich auf Fehler in der zweiten Aufgabe zurückzuführen war ( $F_{(2,28)} = 5.95$ ;  $p < 0.01$ ). Die Fehlerraten der ersten Aufgabe waren dagegen konstant ( $F_{(2,28)} = 0.95$ ;  $p = 0.398$ ), womit sich eine Interaktion aus Aufgabe und SOA ergab ( $F_{(2,28)} = 4.24$ ;  $p < 0.05$ ). Paarvergleiche zwischen den SOAs der zweiten Aufgabe zeigten, daß die Fehlerraten spezifisch in DA800 anstiegen (Vergleiche DA100 vs. DA800 und DA300 vs. DA800 beide  $ps < 0.05$ ), während sich DA100 und DA300 nicht unterschieden ( $t_{(14)} = 0.66$ ;  $p = 0.521$ ). Dieses behaviorale Muster

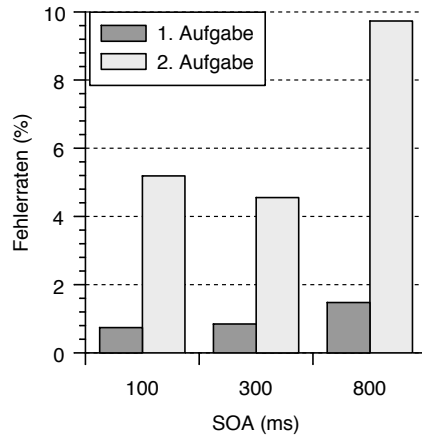


Abbildung 9.7: Fehlerraten in Abhängigkeit des SOAs und der Reaktion. Die Fehlerraten steigen in der zweiten Aufgabe bei einem SOA von 800 ms signifikant an.

stützt die Annahme, daß DA800 qualitativ anders verarbeitet wurde als DA100 und DA300. Nun stellt sich allerdings die Frage, worin der Unterschied bestand.

Eine Analyse der Fehlerart erbrachte ein interessantes Ergebnis: Die hohe Fehlerrate von 9,74 % in der zweiten Reaktion in DA800 ließ sich darauf zurückführen, daß die Probanden in 5,93 % aller Durchgänge gar keine Reaktion auf die zweite Aufgabe abgaben ( $t_{(14)} = 3.17$ ;  $p < 0.01$ ; Einstichproben T-Test gegen Null). Somit reagierten sie nur in 3,81 % aller Durchgänge mit der falschen Taste auf die Reize, was zu den Fehlerraten in DA100 und DA300 vergleichbar war. In DA100 und DA300 wurden dagegen kaum Auslassungs-Fehler begangen (DA100: 0,64 %, DA300: 0,85 %). Somit waren in DA800 signifikant mehr Auslassungsfehler zu beobachten, als in DA100 ( $t_{(14)} = 2.88$ ;  $p < 0.05$ ) und DA300 ( $t_{(14)} = 3.06$ ;  $p < 0.01$ ).

Eine mögliche Ursache der Auslassungsfehler ist, daß das zur Reaktion vorgegebene Zeitfenster von 900 ms zu kurz war. Diese Interpretation wird noch dadurch gestützt, daß die mittleren Reaktionszeiten der DA800-Bedingung (568 ms) in der fMRT-Sitzung 42 ms länger waren als im Vorexperiment (526 ms). Auch ließ die Reaktionszeit-Verteilung der DA800-Bedingung (nicht dargestellt) vermuten, daß die Probanden nicht genügend Zeit zum Reagieren hatten. Somit ließe sich annehmen, daß die Probanden in der DA800-Bedingung einem unverhältnismäßig großen Zeitdruck ausgesetzt waren und daß dieser Zeitdruck zu einer erhöhten Zahl an Fehlern geführt hat. Was genau könnte aber die verstärkte Aktivierung der lateral-präfrontalen Areale verursacht haben?

Zunächst könnte der Anstieg durch Anstrengung (*effort*) verursacht worden sein,

was auf Basis bisheriger Befunde jedoch unwahrscheinlich erscheint (Barch et al., 1997; D'Esposito et al., 1995; Garavan et al., 2000; Marois et al., 2002, vgl. auch Abschnitt 10.3, S. 131). Alternativ könnten die gestiegenen Aktivierungen mit der Fehlerverarbeitung assoziiert sein, bzw. mit der Verarbeitung der Fehler-Rückmeldung, da aufgrund des Block-Designs Fehler-Durchgänge nicht aus der Analyse ausgeschlossen werden konnten (Gehring & Knight, 2000; Kiehl et al., 2000). Schließlich sind die Befunde möglicherweise durch die Verwendung einer anderen Verarbeitungs-Strategie in DA800 zu erklären (vgl. z. B. Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997, für verschiedene Verarbeitungs-Strategien). Worauf die gestiegenen Aktivierungen in DA800 zurückzuführen sind, kann auf Basis der vorliegenden Daten jedoch nicht entschieden werden. Folge-Experimente, die in dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt wurden, müssen diesen Punkt klären, z. B. durch weitere Manipulationen des SOAs (randomisierte Darbietung, feiner abgestuft, größerer Bereich) und der zur Verfügung stehenden Antwortzeit (weniger Zeit bei kurzen SOAs, mehr Zeit bei langen).

### 9.5.3 Zusammenfassung

Die Hauptfrage dieses Experiments war, ob graduelle Überlappungsunterschiede zu einer Veränderung der Aktivität doppelaufgaben-relatierter Areale führen. Areale entlang des SFI und des GFM zeigten bei einem SOA von 300 ms geringere Aktivierungen als bei einem SOA von 100 ms. Dieser Befund zeigt, daß die Aktivität der neuroanatomischen Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung eng mit dem durch den PRP-Effekt postulierten Ausmaß an Interferenz zusammenhängt.

Die Ergebnisse der zweiten Fragestellung, wie sich diese Areale ohne Doppelaufgaben-Interferenz verhalten, erbrachte unerwartete Ergebnisse. Nur cortikale Areale entlang des anterioren SFI waren bei einem SOA von 800 ms nicht mehr aktiviert, während Areale des posterioren SFI und GFM ein Aktivierungs-Niveau zeigten, welches zwischen dem der SOAs 100 und 300 ms lag. Das Muster der Befunde und die behavioralen Daten sprechen dafür, daß dieser Effekt durch einen zusätzlichen Prozeß verursacht wurde, der nur bei einem SOA von 800 ms auftrat. Welcher Natur dieser Prozeß ist, kann durch die Daten dieses Experiments nicht entschieden werden und erfordert weitere Forschung.





# Kapitel 10

## Allgemeine Diskussion

Im Folgenden sollen die Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend und integrierend diskutiert werden. Diese Diskussion orientiert sich dabei an den in der Einleitung aufgestellten Fragen, wobei der anatomische Fokus nun auch andere Areale außer dem LPFC umfassen soll: (1) Lassen sich cortikale Areale – insbesondere im LPFC – identifizieren, die eine Funktionalität für die Verarbeitung von Doppelaufgaben besitzen? (2) Wenn das der Fall ist, welche kortikalen Areale sind mit der Doppelaufgaben-Verarbeitung assoziiert? (3) Welche spezifische Funktionalität besitzen diese Areale für die Verarbeitung von Doppelaufgaben? (4) Wie ist die Arbeitsweise dieser Areale, d. h., wie reagieren sie auf graduell unterschiedliche Ausmaße von Doppelaufgaben-Interferenz? Im Anschluß an die Diskussion der Fragestellungen werden weitere allgemeine Aspekte diskutiert, wie die Übereinstimmung mit dem Modell von Norman & Shallice (1986) und der Bezug zu bisherigen bildgebenden und neuropsychologischen Studien. Das Kapitel schließt mit einem Resümee und Ausblick auf zukünftige Forschung.

### 10.1 Identifikation doppelaufgabenrelativer Areale

Alle vier Experimente erbrachten Evidenz, daß die Verarbeitung einer PRP-Doppelaufgabe mit zusätzlicher BOLD-Aktivierung assoziiert ist, welche als Ausdruck gesteigerter neuronaler Verarbeitung angesehen werden kann. Diese Assoziation ist mit verschiedenen Probanden-Stichproben, leicht veränderten experimentellen Designs und verschiedenen experimentellen Methodiken nachgewiesen worden. Somit kann festgehalten werden, daß die zeitlich überlappende Verarbeitung zweier einfacher Wahlreaktions-Aufgaben zusätzliche neuronale Verarbeitung erfordert. Diese zusätzliche Anforderung ist

nicht vorhanden, wenn die gleichen Aufgaben zeitlich getrennt als Einzelaufgaben ausgeführt werden.

Im Detail ist dabei auch nachgewiesen worden, daß der LPFC eine Funktionalität für die Doppelaufgaben-Verarbeitung besitzt. Dieser Nachweis ist auf drei Wegen geführt worden: Zunächst zeigte der LPFC Doppelaufgaben-Aktivierung, die über-additiv stärker war, als die Summe der Einzelaufgaben-Aktivierungen (Experimente 1 und 2). Somit ist die doppelaufgaben-relatierte Aktivierung mittels eines Vergleichs zu den Einzelaufgaben nachgewiesen worden. Die nächsten zwei Wege bestanden in der parametrischen Manipulation doppelaufgaben-relatierter Anforderungen. So wurde die Funktionalität des LPFC für die Doppelaufgaben-Verarbeitung in Experimenten 2 und 3 über eine Manipulation der doppelaufgaben-spezifischen Anforderung, die Verarbeitungs-Reihenfolge zweier sich zeitlich überlappender Aufgaben *umzuorganisieren*, nachgewiesen. Experiment 4 erbrachte diesen Nachweis schließlich über die Manipulation der Anforderung, die Aufgaben-Verarbeitung zu *organisieren*, d. h., die Verarbeitungs-Reihenfolge sicherzustellen. Somit konnte die Funktionalität des LPFC für die Doppelaufgaben-Verarbeitung mittels substantiell unterschiedlicher Untersuchungs-Ansätze nachgewiesen werden.

Die Schlußfolgerung, daß es cortikale Areale gibt, die eine Funktionalität für die Verarbeitung von Doppelaufgaben besitzen, widerspricht Studien, die keine zusätzliche Aktivierung bei der Doppelaufgaben-Verarbeitung beobachten konnten (z. B. Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000; Klingberg, 1998). Dabei konnten die Kritikpunkte, die z. B. von Adcock et al., Bunge et al. und Klingberg an früheren Studien mit positivem Befund (vor allem D'Esposito et al., 1995) angebracht haben, durch die verwendeten Analysemethoden ausgeschlossen werden.

Die aktuellen positiven Befunde sind vermutlich auf das verwendete PRP-Paradigma zurückzuführen, da es die unter Abschnitt 2.4.3 (S. 20) diskutierten Schwächen früherer Studien nicht aufweist. So bietet das PRP-Paradigma die Vorteile, daß zwei relative einfache Wahlreaktionsaufgaben zu einer anspruchsvollen Doppelaufgabe kombiniert werden können und daß zeitlich überlappende Aufgabenverarbeitung sichergestellt werden kann. Speziell die Befunde des vierten Experiments zeigen, daß die zeitliche Koinzidenz der Aufgaben ein kritischer Faktor ist, um doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen nachzuweisen (vgl. auch Herath et al., 2001). Somit zeigen die aktuellen Experimente, daß mit der Verwendung eines geeigneten Paradigmas doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen konsistent identifizierbar sind.

## 10.2 Lokalisation doppelaufgaben-relatierter Areale

Doppelaufgaben-relatierte Areale wurden in einer Reihe von cortikalen Arealen lokalisiert, wie den lateral- und medial-präfrontalen, parietalen, temporalen und okzipitalen Cortices. Über die verschiedenen Experimente hinweg zeigten sich jedoch nur zwei Areale als konsistent mit der Doppelaufgaben-Verarbeitung assoziiert: der lateral-präfrontale und der superior-parietale Cortex.

### 10.2.1 Lateral-präfrontaler Cortex

Für die lateral-präfrontalen Aktivierungen sind einige grobe Muster identifizierbar. So kann auf einer deskriptiven Ebene zunächst festgehalten werden, daß fast durchgängig die linke Hemisphäre stärker aktiviert wurde, als die rechte, was sich vor allem in räumlich ausgedehnteren Aktivierungen, jedoch weniger in der Intensität ( $z$ -Wert, prozentuale Signaländerung) der Aktivierungen äußerte.

In beiden Hemisphären waren die lateral-präfrontalen Aktivierungen in zumindest zwei Gruppen unterteilbar. Zum einen zeigten sich Aktivierungen in superioren Arealen entlang des SFS und des GFS. Die ausgedehntesten Aktivierungen waren jedoch in cortikalen Arealen entlang des SFI und des GFM lokalisiert. Somit können die Aktivierungen dem dorsolateralen präfrontalen Cortex zugeordnet werden (Owen et al., 1999; Petrides & Pandya, 1994).

Diese Aktivierungen erstreckten sich in der linken Hemisphäre vom Sulcus präcentralis z. T. bis zum anterioren Pol. Hier zeigte sich ein leichter Trend einer Untergruppierung in eine posteriore Gruppe mit Aktivierungen am Schnittpunkt von SFI und Sulcus präcentralis, einer mittleren Gruppe mit Aktivierungen vor allem in den Brodmann Arealen 9 und 46 und schließlich einer anterioren Gruppe, bei der die Aktivierungen vor allem im Brodmann Areal 10 lokalisiert waren. Da die Abgrenzung des präfrontalen Cortex zum prämotorischen Cortex anhand der Landmarke des Sulcus präcentralis nicht eindeutig ist, kann auf Basis der aktuellen Daten nicht entschieden werden, ob die posteriore Gruppe Aktivierung des LPFC oder des LPMC reflektiert (Fink et al., 1997; Grèzes & Decety, 2001, siehe auch Abschnitt 2.1, S. 5). Die umschriebeneren rechts-hemisphärischen Aktivierungen waren bezüglich der anterior-posterior-Achse meist mit der mittleren Gruppe vergleichbar.

Experiment 2 erbrachte den bedeutsamen Nachweis, daß die lateral-präfrontalen Areale entlang des SFI und des GFM von den einzelaufgaben-relatierten Arealen räumlich differenzierbar sind. Somit können doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen einem

bestimmten cortikalen Areal zugeordnet werden. Diese Zuordnung wird durch eine Reihe von Studien gestützt, die ähnliche Areale als doppelaufgaben-relatiert identifiziert haben (D'Esposito et al., 1995; Goldberg et al., 1998; Koechlin et al., 1999). Die Dissoziation doppel- und einzelaufgaben-relatierter Areale widerlegt somit den Vorschlag verschiedener Autoren, daß sich doppelaufgaben-relatierte Aktivierung ausschließlich durch stärkere Aktivierung einzelaufgaben-relatierter Areale äußert (Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000, vgl. auch Goldman-Rakic, 1996).

Diese Interpretation bedeutet nicht, daß sich doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen nicht auch als höhere Aktivierungen einzelaufgaben-relatierter Areale zeigen können. Das ist aber nur dann der Fall, wenn schon die Verarbeitung der Einzelaufgaben auf cortikalen Arealen beruht, die auch für die Verarbeitung der Doppelaufgaben benötigt werden. Entsprechend ist eine Überlappung einzel- und doppelaufgaben-relatierter Areale vor allem in den Studien beobachtet worden, bei denen die alleinige Ausführung der Einzelaufgaben bereits den LPFC aktivierte (Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000; Klingberg, 1998).

### 10.2.2 Parietaler Cortex

Im parietalen Cortex zeigten sich konsistente Aktivierungen entlang des Sulcus intraparietalis. Die Aktivierungen waren dabei vor allem in anterioren (aufsteigendes Segment; mit Übergängen zum Gyrus postcentralis) und mittleren Anteilen (horizontales Segment; mit Übergängen zum Gyrus supramarginalis) lokalisiert. Weitere konsistente Aktivierungen zeigten sich medial im Präcuneus.

Diese Beobachtung stützt die Annahme, daß die Verarbeitung von Doppelaufgaben ein Netzwerk von cortikalen Arealen benötigt. Wie im nächsten Abschnitt ausführlicher dargelegt wird, ist anzunehmen, daß die Komponenten des Netzwerks unterschiedliche Funktionen übernehmen können. Hier ist vorgeschlagen worden, daß der lateral-präfrontale Cortex eine höhere koordinierende Funktion einnimmt und vor allem parietale, kontextabhängig aber auch temporale und okzipitale Areale eine eher unterstützende Funktion ausüben bzw. ihre Verarbeitung durch den präfrontalen Cortex beeinflusst wird.

### 10.2.3 Resümee

Zusammenfassend zeigte sich, daß die Verarbeitung von Doppelaufgaben auf einem Netzwerk von Arealen beruht. Dieses Netzwerk besteht konsistent aus dorsolateral-präfrontalen und superior-parietalen Arealen, kann aber gelegentlich auch Areale der medial-präfrontalen, prämotorischen, inferior-parietalen, temporalen und okzipitalen

Cortices enthalten. Die lateral-präfrontalen Areale sind räumlich unabhängig von den einzelaufgaben-relatierten Arealen lokalisiert.

### **10.3 Funktionalität doppelaufgaben-relatierter Areale**

Um den beobachteten Arealen detaillierte Funktionen zuzuordnen, ist es notwendig zunächst zu definieren, welche Anforderungen in der Doppelaufgabe vorkommen. Prinzipiell sind drei Anforderungen postulierbar: Geteilte Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Aufgaben-Koordination. Bisherige Doppelaufgaben-Studien konnten diese Prozesse nicht weiter differenzieren, wodurch den identifizierten Arealen eher globale Konstrukte, wie z. B. „Zentrale Exekutive des Arbeitsgedächtnisses“ zugeordnet worden sind (D’Esposito et al., 1995).

#### **10.3.1 Allgemeine Funktionalität**

Für eine genauere Charakterisierung der Anforderungen bietet sich die Methode der parametrischen Manipulation an (vgl. auch Herath et al., 2001). Mit Hilfe dieser Methode konnte in den Experimenten 2, 3 und 4 die Funktionalität der hier beobachteten Areale im Rahmen der Doppelaufgaben-Verarbeitung eingeschränkt werden. So zeigte sich, daß die doppelaufgaben-relatierten Aktivierungen mit der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung assoziiert sind. Im Detail konnte gezeigt werden, daß die beobachteten Areale sowohl an der Umorganisation (Experimente 2 und 3), als auch an der Sicherstellung (Experiment 4) der Verarbeitungs-Reihenfolge beteiligt sind.

Somit läßt sich festhalten, daß die beobachteten Areale auf der Ebene von Aufgaben koordinieren. Diese Aufgabenkoordination impliziert Auswirkungen auf weitere Prozesse, obwohl diese noch nicht endgültig geklärt sind. So könnte die Koordination auf der Ebene von Aufgaben durch ein Ungewichten (Inhibieren und/oder Aktivieren) von Reiz-Reaktions-Verknüpfungen, Stimulus-Gruppen (z. B. aller auditorischen Reize) oder Reaktions-Gruppen (z. B. alle Reaktionen der rechten Hand) realisiert sein (De Jong, 1995; Norman & Shallice, 1986).

#### **10.3.2 Lateral-präfrontaler Cortex**

Bisherige Erkenntnisse über die allgemeine Funktionalität der beobachteten Areale stützen einerseits die Interpretation, daß die Areale mit der Aufgaben-Koordination

assoziiert sind und ermöglichen andererseits eine genauere Funktionsaufteilung innerhalb des fronto-parietalen Netzwerks doppelaufgaben-relatierter Areale. So ist der lateral-präfrontale Cortex vielfach mit der Koordination auf der Ebene von Aufgaben assoziiert worden, z. B. in Go-/NoGo-Paradigmen (Garavan et al., 1999; Kawashima et al., 1996; Rubia et al., 2001), Aufgaben-Wechsel-Paradigmen (Dove et al., 2000; Sohn et al., 2000) und Stroop-Aufgaben (Zysset et al., 2001). Des weiteren zeigen vor allem Patienten mit frontalen Läsionen erhebliche Leistungseinbrüche in neuropsychologischen Tests, die die Koordination mehrerer (Unter-)Aufgaben erfordern (Burgess et al., 1998, 2000; Dell'Acqua et al., 2001; Shallice & Burgess, 1991). Diese Befunde sind im Einklang mit der neuronalen Konnektivität dieser Areale. So wurde bei Primaten gezeigt, daß die hier beobachteten Areale reziproke Verbindungen zu allen höheren Assoziationscortices im Parietal- und Temporal-Lappen besitzen. Entsprechend hat der lateral-präfrontale Cortex Zugriff auf bereits hoch abstrahierte Information und kann gleichzeitig den Vorgang der Informations-Abstraktion beeinflussen (siehe z. B. Miller, 2000; Weinberger, 1993, für Überblicksartikel).

Dem lateral-präfrontalen Cortex wird eine weitere Eigenschaft zugeschrieben, die für komplexes und zielgerichtetes Handeln von großer Bedeutung ist: Die schnelle Adaption an wechselnde Handlungsziele (z. B. Duncan, 2001; Fuster, 2000). Diese Annahme konnte durch die Experimente 2 und 3 bestätigt werden. Hier zeigte sich, daß Probanden in der Lage sind, Handlungsziele – operationalisiert als Verarbeitungs-Reihenfolge der Aufgaben – schnell den externen Erfordernissen anzupassen. Die Anforderung dieser Adaption ging mit erhöhten Aktivierungen im lateral-präfrontalen Cortex einher.

Die Darlegungen der letzten beiden Absätze lassen eine weiterführende Schlußfolgerung zu. So deuten die konvergierenden Befunde verschiedener Studien darauf hin, daß lateral-präfrontale Areale entlang des SFI und GFM sehr allgemeine und grundlegende Mechanismen zur Koordination der Aufgabenverarbeitung implementieren (vgl. auch Duncan, 2001; Grafman, 1995; Zysset et al., 2001). Daraus läßt sich weiter schlußfolgern, daß die in dieser Studie identifizierten Areale offensichtlich nicht *exklusiv* mit der Bearbeitung von Doppelaufgaben assoziiert sind, sondern stattdessen allgemeine Prozesse realisieren, die *unter anderem* auch für die Verarbeitung von Doppelaufgaben benötigt werden.

Wie bereits erwähnt (Abschnitt 10.2), können die posterioren Anteile der lateral-präfrontalen Aktivierungen prinzipiell auch dem prämotorischen Cortex zugeordnet werden. Aktivierungen des prämotorischen Cortex können in der Doppelaufgabe aufgrund einer *top-down*-Beeinflussung durch den präfrontalen Cortex verursacht worden sein (Duncan, 2001; Fuster, 2000; Miller & Cohen, 2001; Weinberger, 1993). Wie bereits mehrfach dargestellt, kann der LPFC nicht nur Kontrolle auf die Reizverarbeitung in

posterioren Arealen ausüben (vgl. auch nächsten Abschnitt 10.3.3), sondern auch auf die motorische Verarbeitung. So besitzt der DLPFC (v. a. BA 46) Verbindungen zum prämotorischen Cortex (BA 6), die eine Beeinflussung ermöglichen (für einen Überblick siehe z. B. Luria, 1980; Miller, 2000).

Der prämotorische Cortex ist sowohl bei Primaten als auch bei Menschen vielfach mit der Anforderung, Handlungen zu sequenzieren, in Verbindung gebracht worden (Halsband et al., 1993; Harrington et al., 2000; Mushiaki et al., 1991). Diese Anforderung tritt speziell in der Doppelaufgabe auf, nicht jedoch in den Einzelaufgaben. Entsprechend läßt sich argumentieren, daß der LPFC Verhalten auf einer abstrakten Ebene *koordiniert*, während prämotorische Areale eher an der *Umsetzung* des Verhaltens beteiligt sind. Mit anderen Worten, der Abstraktionsgrad der Verhaltenssteuerung nimmt von präfrontalen über prämotorische bis zu motorischen Cortices hin ab (Fuster, 2000; Grafman, 1995).

Grundsätzlich wird angenommen, daß der lateral-präfrontale Cortex eine wichtige Funktionalität für das Arbeitsgedächtnis besitzt. In diesem Rahmen ist weiter postuliert worden, daß der ventrolaterale PFC vom dorsolateralen PFC funktionell dissoziiert werden kann. Eine Annahme besteht darin, daß das Unterscheidungsmerkmal in der Informations-Art liegt, wobei ventrolaterale Areale Objekt-Informationen repräsentieren und dorsolaterale Areale räumliche Informationen (Courtney et al., 1998; Goldman-Rakic, 1987, 1995). Eine alternative Sichtweise besteht darin, daß sich die Areale nicht durch die Art der Information unterscheiden, sondern durch die Natur der Informations-Verarbeitung. Hier wird angenommen, daß der ventrale LPFC für das Aufrechterhalten (*maintenance*) von Informationen zuständig ist und der dorsale LPFC für die Manipulation der Information (Owen et al., 1999; Petrides, 1994; Smith & Jonides, 1999; Wagner et al., 2001). Obwohl es für beide Unterteilungen Evidenzen gibt, legt eine Meta-Studie von D'Esposito und Mitarbeitern (1998a) nahe, daß der LPFC nach der Art der Informations-Verarbeitung unterteilt ist. So zeigte sich bei einer Analyse von 19 Studien der Trend ab, daß die reine Aufrechterhaltung von Informationen in ventralen Arealen (GFI) und die Manipulation von Informationen in dorsalen Arealen (GFM) des lateral-präfrontalen Cortex lokalisiert ist.

Diese Interpretation ist im Einklang mit den aktuellen Befunden. Wie gezeigt wurde, reflektieren die Aktivierungen im GFM und entlang des SFI die Anforderung, die Aufgaben-Verarbeitung zu koordinieren. Solch eine Aufgaben-Koordination kann z. B. darin bestehen, daß die Repräsentationen von abstrakter Aufgaben-Information umgewichtet, d. h. manipuliert werden (Miller, 2000; Norman & Shallice, 1986; Weinberger, 1993). Entsprechend kann das aktuelle Konzept der Doppelaufgaben-Koordination



durchaus mit dem Konzept der Manipulation von Gedächtnisinhalten verglichen werden. In Einklang mit dieser Annahme wurden beide Anforderungen mit exekutiven Prozessen assoziiert (Baddeley, 1996; Collette & Van der Linden, 2002; D'Esposito et al., 1998a). Somit können die aktuellen Aktivierungen auf einer allgemeineren Ebene auch als Ausdruck der Anforderung an Manipulation von Gedächtnisinhalten interpretiert werden.

Die aktuellen Befunde zeigen somit, daß Areale entlang des SFI und im GFM eng mit der Aufgaben-Koordination assoziiert sind. Diese Schlußfolgerung bedeutet nicht, daß nicht auch andere Anforderungen der Doppelaufgaben-Verarbeitung, wie geteilte Aufmerksamkeit oder Gedächtnis, ebenfalls durch diese Areale realisiert werden. Um diese Annahme zu prüfen, müssen weitere Experimente durchgeführt werden, in denen die Anforderungen an die Aufgaben-Koordination konstant gehalten werden und die Anforderungen an die zu prüfenden Prozesse systematisch manipuliert werden. So könnten Gedächtnisanforderungen durch die Anzahl der Reiz-Reaktions-Verknüpfungen getestet werden (z. B. Zweifach- vs. Vierfach-Wahlreaktionsaufgabe) und die Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit über die Aufgaben-Stimuli (z. B. indem beide Aufgaben auf verschiedenen oder sogar gleichen Attributen eines Stimulus beruhen; Fagot & Pashler, 1992). Somit haben die aktuellen Experimente *eine* Funktion des lateral-präfrontalen Cortex für die Doppelaufgaben-Verarbeitung nachgewiesen, ohne die Möglichkeit weiterer Funktionen auszuschließen.

### 10.3.3 Superior-parietaler Cortex

Parietale Areale scheinen dagegen eher mit den „sekundären“ Prozessen der Aufgaben-Koordination assoziiert zu sein, wie z. B. dem Umgewichten von Repräsentationen (Clark et al., 2000; Corbetta & Shulman, 2002; Duncan, 2001; Hopfinger et al., 2000). So ist mehrfach vorgeschlagen worden, daß der präfrontale Cortex die Funktion hat, Aufmerksamkeits-Prozesse zu initiieren und zu koordinieren, während der parietale Cortex diese Aufmerksamkeits-Prozesse an sich implementiert (Clark et al., 2000; Corbetta & Shulman, 2002; Hopfinger et al., 2000; Norman & Shallice, 1986), indem er z. B. eine effektivere Verarbeitung in primären und sekundären sensorischen Arealen auslöst (vgl. Kastner et al., 1999). Mit anderen Worten, die *top-down*-Kontrolle des präfrontalen Cortex beeinflusst die Informations-Verarbeitung in parietalen Assoziations-Cortices (Cohen et al., 1996; Desimone, 1996; Miller, 2000; Smith & Jonides, 1999). Diese Vorstellung entspricht einem hierarchischem Modell, indem der präfrontale Cortex am höchsten steht und via parietalem Cortex Einfluß auf die Reiz-Verarbeitung in eher primären oder sekundären sensorischen Cortices nehmen kann (vgl. z. B. auch

Goebel et al., 1998, für eine Demonstration solch einer Kaskade bei visueller Vorstellung). Somit scheint die Aufgaben-Koordination durch den präfrontalen Cortex durch eine Beeinflussung der Verarbeitung in parietalen Arealen realisiert zu werden (Cohen et al., 1996; Duncan, 2001; Miller, 2000; Smith & Jonides, 1999).

Insofern kann der parietale Cortex zwar als notwendige Voraussetzung für komplexe Verhaltens-Steuerung, wie sie in der Doppelaufgabe gefordert ist, angesehen werden, nicht aber als oberste Instanz.<sup>1</sup> Diese läßt sich eher dem lateral-präfrontalen Cortex zuschreiben, der Handlungs-Konflikte erkennen und auflösen kann.

## 10.4 Arbeitsweise doppelaufgaben-relatierter Areale

Im letzten Experiment konnte schließlich gezeigt werden, daß die mit der Aufgaben-Koordination assoziierten Areale graduell unterschiedlich stark aktiviert werden können. In diesem Experiment wurde die Koordinations-Anforderung durch eine variable zeitliche Überlappung manipuliert, wobei eine prinzipielle Überlappung sichergestellt war. Diese Manipulation bewirkt, daß in beiden Bedingungen (starke und mittlere Überlappung) qualitativ identische Prozesse gefordert sind. Hier zeigte sich, daß mit geringerer, aber noch vorhandener, Überlappung auch die Aktivierungsstärke geringer wurde. Dieser Befund zeigt, daß die kortikalen Areale des GFM und entlang des SFI, die die Aufgaben-Verarbeitung koordinieren, mit ihrer Aktivitäts-Stärke graduelle Interferenz-Ausmaße reflektieren, wie sie durch den PRP-Effekt prädiziert werden.

Dieser Befund hat einen erheblichen Einfluß auf die Bewertung bisheriger bildgebender Doppelaufgaben-Studien. Wie bereits diskutiert (vgl. Abschnitt 2.4.3, S. 20), ist ein Kritikpunkt der Studien, die keine doppelaufgaben-relatierten Areale identifizieren konnten, daß eventuell die Aufgabenüberlappung nicht hinreichend war. So haben Adcock et al. (2000) und Klingberg (1998) SOAs von über 500 bis 1000 ms benutzt, während Bunge et al. (2000) und Just et al. (2001) so komplexe Paradigmen verwendet haben, daß eine Abschätzung der Überlappung kaum möglich ist. Natürlich ist der Bereich der Überlappung von den Aufgaben abhängig, so daß auch größere SOAs noch zur Überlappung kritischer Verarbeitungsstufen führen können. Allerdings zeigen die aktuellen Befunde, daß die zeitliche Koinzidenz der Aufgaben einen Einfluß auf das Aktivierungs-Niveau der doppelaufgaben-relatierten Areale haben kann. Somit stellen Unterschiede in der zeitlichen Überlappung, d. h. des SOAs, eine plausible Ursache der negativen Befunde eben genannter Studien dar.

<sup>1</sup>Die gleiche Schlußfolgerung gilt für die prämotorischen Areale.

## 10.5 Das Modell von Norman & Shallice

Die aktuellen Befunde und Interpretationen stützen die Annahmen zum Modell von Norman & Shallice (1986). Wie in der Einleitung ausführlich dargelegt (Abschnitt 3.4.3, S. 36), wird nach diesem Modell angenommen, daß die beiden Einzelaufgaben als Schemata repräsentiert sind, die aufgrund der gemeinsamen Forderung nach der gleichen Verarbeitungs-Ressource (dem Flaschenhals-Mechanismus) um die Auswahl durch das *Contention Scheduling* konkurrieren. Die Konkurrenz der Aufgaben äußert sich darin, daß sich die zugehörigen Schemata gegenseitig inhibieren (Norman & Shallice, 1986). Um eine möglichst schnelle und fehlerfreie Handlung sicherzustellen, löst das SAS diese Konkurrenz auf, indem die Aufgaben entsprechend der aktuellen Handlungsziele umgewichtet, d. h. inhibiert und/oder aktiviert, werden (Norman & Shallice, 1986).

Diese Anforderung an die Auflösung der Interferenz besteht nur in der Doppelaufgabe, nicht jedoch in den Einzelaufgaben. Entsprechend kann die doppelaufgabenrelatierte Aktivierung, die durch den Vergleich der Doppelaufgaben- zur Einzelaufgaben-Verarbeitung gewonnen wurde (Interaktionskontraste Experimente 1 und 2), als Ausdruck des SAS angesehen werden. Somit bestätigen die aktuellen Befunde die Annahme von Norman & Shallice (1986), daß das SAS in frontalen Cortices lokalisiert ist.

Wie De Jong (1995) gezeigt hat, bereiten sich die Probanden auf eine bestimmte Verarbeitungs-Reihenfolge vor. Wenn angenommen wird, daß diese Vorbereitung als Voraktivierung der Aufgaben-Schemata reflektiert ist, ist bei einem Reihenfolge-Wechsel die sekundäre Aufgabe stärker aktiviert als die primäre. Damit die Probanden trotzdem in der richtigen Reihenfolge antworten, muß das SAS eingreifen und die Aufgaben so umgewichten, daß die initial schwächer aktivierte Aufgabe die Konkurrenz gewinnt und vom *Contention Scheduling* zuerst ausgewählt wird. Gelingt das nicht, kommt es zu einem Reihenfolge-Fehler. Bei konstanter Reihenfolge ist dieser zusätzliche Aufwand des Umgewichtens nicht vorhanden. Entsprechend können die doppelaufgabenrelatierten Aktivierungen, die in den Experimenten 2 und 3 durch die parametrische Manipulation identifiziert wurden, ebenfalls als Ausdruck des SAS angesehen werden.<sup>2</sup>

Schließlich sind auch die Befunde zu den graduellen Aktivierungs-Unterschieden von Experiment 4 im Einklang mit dem Modell. Mit kürzerem SOA nimmt auch die

---

<sup>2</sup>An sich ist es möglich, daß eine PRP-Doppelaufgabe auch ohne SAS-Einfluß ausgeführt werden kann, z. B. wenn die korrekte Reihenfolge vorbereitet wurde. Norman & Shallice (1986) argumentierten in diesem Fall auf der Basis behavioraler Befunde, daß das SAS vor allem deshalb eingreift, um eine möglichst schnelle Aufgaben-Verarbeitung zu garantieren. Der Befund aus Experiment 2, daß bei konstanter Reihenfolge, in der das SAS nicht unbedingt benötigt wird, und bei wechselnder Reihenfolge, in der das SAS definitiv benötigt wird, die identischen Areale an der Doppelaufgaben-Verarbeitung beteiligt sind, spricht für die Annahme von Norman & Shallice, daß auch bei konstanter Reihenfolge das SAS koordinierend eingreift.

Konkurrenz zwischen den Schemata der Aufgaben zu, womit auch die koordinativen Anforderungen an das SAS ansteigen. Somit können die identifizierten Areale wiederum als mit dem SAS assoziiert interpretiert werden. Die unerwarteten Befunde der DA800-Bedingung in Experiment 4 vermag allerdings auch das Modell von Norman & Shallice nicht zu erklären.

Somit stellen die aktuellen Befunde eine deutliche Verifikation der Annahmen von Norman & Shallice dar. In einer Reihe von spezifischen Manipulationen konnte gezeigt werden, daß cortikale Areale identifizierbar sind, die durch ihre Aktivierungs-Stärke exakt die postulierten Anforderungen an das SAS reflektieren.

## 10.6 Bezug zu bisherigen Studien

### 10.6.1 Bildgebende Studien

Der Befund dieser Arbeit, daß lateral-präfrontale Areale mit der Verarbeitung von Doppelaufgaben assoziiert sind, ist im Einklang mit bisherigen Doppelaufgaben-Studien, die in ähnlichen Arealen Aktivierungen beobachtet haben (D'Esposito et al., 1995; Goldberg et al., 1998; Koechlin et al., 1999). Interessanterweise konvergieren die Befunde, obwohl in diesen Studien fundamental andere Einzelaufgaben verwendet wurden. So kombinierten D'Esposito et al. eine semantische Kategorisierungs- und eine räumlich Rotations-Aufgabe, Goldberg et al. den Wisconsin-Card-Sorting-Test und eine *shadowing*-Aufgabe und Koechlin et al. eine Wahlreaktions-Aufgabe mit einer komplexen Entscheidungs-Aufgabe zu einer Doppelaufgabe, während in dieser Studie zwei Wahlreaktions-Aufgaben kombiniert wurden. Trotz dieser Unterschiede wurden in allen Studien vergleichbare Areale des GFM als doppelaufgaben-relatiert identifiziert. Das deutet darauf hin, daß diese Areale nicht ausschließlich an der Verarbeitung von PRP-Doppelaufgaben beteiligt sind, sondern auch an der Verarbeitung anderer Doppelaufgaben-Situationen beteiligt sein können.

Die Konvergenz unterschiedlicher Doppelaufgaben-Studien spricht auch für die Annahme, daß die zur Doppelaufgaben-Verarbeitung benötigten exekutiven Prozesse durch ein spezifisches Areal realisiert werden, und nicht ausschließlich durch eine veränderte Verarbeitung in einzelaufgaben-relatierten Arealen. Die Daten dieser Arbeit stützen diese Annahme, da sich die Aktivationsmaxima der Doppelaufgabe räumlich von denen der Einzelaufgaben dissoziieren ließen.

Die Studie von Herath et al. (2001) ist von besonderem Interesse, da in ihr auch das PRP-Paradigma verwendet wurde. In dieser Studie wurde jedoch im Gegensatz

zur vorliegenden Arbeit der rechte posteriore Gyrus frontalis inferior als doppelaufgaben-relatiert identifiziert. Wie bereits in der Diskussion von Experiment 1 angedeutet (Abschnitt 6.4.1, S. 66), ist dieser Unterschied möglicherweise auf die Verwendung unterschiedlicher Einzelaufgaben zurückzuführen (Einfach-Reaktionsaufgaben bei Herath et al., Wahl-Reaktionsaufgaben in dieser Arbeit).

Dieser Gedankengang läßt sich im Rahmen des PRP-Paradigmas noch weiter spezifizieren, indem die beiden Studien im Hinblick darauf verglichen werden, welche Verarbeitungsstufe den Flaschenhals konstituiert. Die in dieser Studie verwendeten Wahl-Reaktionsaufgaben benötigen eine Antwortauswahl-Stufe für ihre Verarbeitung. Kombiniert mit der reichhaltigen Evidenz, daß die Antwortauswahl nicht parallel, sondern ausschließlich seriell arbeiten kann, ist es wahrscheinlich, daß in der aktuellen Studie die Antwortauswahl den Flaschenhals konstituiert hat (z. B. Pashler, 1994a). Herath et al. (2001) haben dagegen Einfach-Reaktionsaufgaben verwendet, von denen bekannt ist, daß sie zu ihrer Verarbeitung keine Antwortauswahl-Stufe benötigen (Donders, 1969; Gottsdanker & Shragg, 1985). Entsprechend kann der Flaschenhals auch nicht durch die Antwortauswahl-Stufe entstanden sein. Dagegen ist bekannt, daß zwei Reaktionen, die mit der gleichen Hand ausgeführt werden müssen, wie es bei Herath et al. der Fall war, zu peripherer Interferenz an der Stufe der motorischen Ausführung kommen kann (Schubert, 1999; De Jong, 1993), womit wahrscheinlich diese Stufe den Flaschenhals konstituiert hat (vgl. Herath et al., 2001, für eine vergleichbare Schlußfolgerung). Diese Argumentation ist im Einklang mit der Lokalisation doppelaufgaben-relatierter Aktivierung im rechten GFI in der Studie von Herath et al., da räumlich eng angrenzende Areale mit der Sequenzierung und zeitlichen Koordination einfacher, aufeinanderfolgender Fingerbewegungen assoziiert worden sind (Boecker et al., 1998; Sadato et al., 1996).

Somit unterscheiden sich die Herath et al. -Studie und die aktuelle in Bezug auf die Verarbeitungs-Stufe, die den Flaschenhals konstituiert. Die unterschiedliche Lokalisation doppelaufgaben-relatierter Areale deutet darauf hin, daß es nicht nur unterschiedliche Arten von Doppelaufgaben-Interferenz gibt, sondern daß sich möglicherweise auch die Prozesse, die diese Interferenz auflösen, qualitativ voneinander unterscheiden. Obwohl alle theoretischen Modelle zum PRP-Paradigma anerkennen, daß sich Interferenzen unterscheiden können, ist bislang keine Unterscheidung in Hinblick auf die interferenz-auflösenden Prozesse vorgenommen worden (vgl. De Jong, 1995; Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997; Pashler, 1994a). Da jedoch ein Vergleich von Resultaten über verschiedene Studien hinweg gerade in der bildgebenden Forschung problematisch ist, kann diese Unterscheidung nicht als strikt bewiesen gelten. Dennoch erfordert diese Beobachtung, daß zukünftige Studien zur Doppelaufgaben-Verarbeitung die Art der

auftretenden Interferenz genau charakterisieren sollten, da sonst mit divergierenden und unvereinbaren Befunden zu rechnen ist, die die Erstellung eines kohärenten Bildes der Doppelaufgaben-Verarbeitung erschweren.

### 10.6.2 Patientenstudien

Die aktuellen Befunde werden durch eine Reihe neuropsychologischer Studien gestützt, die nachweisen konnten, daß die Verarbeitung von Doppelaufgaben bei Patienten mit frontalen Läsionen beeinträchtigt ist (Azouvi et al., 1996; Dell'Acqua et al., 2001; McDowell et al., 1997). Die Studie von Dell'Acqua et al. (2001) unterstützt insbesondere auch die der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegten theoretischen Annahmen zur Doppelaufgaben-Verarbeitung, da sie zeigen konnten, daß die Doppelaufgaben-Defizite speziell auf eine Beeinträchtigung zentraler Verarbeitungsstufen wie die Antwort-Auswahl zurückzuführen ist, nicht jedoch auf eine Beeinträchtigung peripherer Stufen wie Perzeption oder Motorik.

Wie in Abschnitt 10.3 (S. 131) ausgeführt, kann argumentiert werden, daß die Aufgaben-Koordination durch den präfrontalen Cortex durch eine Beeinflussung der Verarbeitung in parietalen Arealen realisiert wird und daß der parietale Cortex somit zwar als notwendige Voraussetzung für komplexe Verhaltens-Steuerung angesehen werden kann, nicht aber als oberste Instanz. Diese läßt sich eher dem lateral-präfrontalen Cortex zuschreiben, der Handlungs-Konflikte erkennen und auflösen kann. Auf Basis dieser Argumentation müßte eine Läsion in frontalen Arealen zu vergleichbaren Defiziten führen, wie eine Läsion in parietalen Arealen. Im letzteren Fall ist der frontale Cortex zwar noch intakt und kann somit Handlungs-Konflikte in einer Doppelaufgabe erkennen, jedoch kann er durch die parietale Läsion keine Kontrolle mehr auf die Aufgabenverarbeitung ausüben. Entsprechend sollte die Koordination der Doppelaufgaben-Verarbeitung beeinträchtigt sein, sobald ein Teil des Netzwerkes ausfällt. Diese Interpretation wird perfekt durch die Befunde von Vilkki et al. (2002) gestützt, die zeigen konnten, daß frontale und parietale Läsionen zu vergleichbaren Doppelaufgaben-Defiziten führen.

Schließlich besitzen die Befunde von Experiment 4 nicht nur für bildgebende Studien Implikationen, sondern auch für neuropsychologische Studien. So ist an den Studien, die keinen Zusammenhang zwischen frontalen Läsionen und Doppelaufgaben-Defiziten herstellen konnten, ebenfalls kritisierbar, daß sehr komplexe Paradigmen verwendet wurden, die nicht zwangsläufig zu Interferenz führen müssen. So benutzten Andres &

Van der Linden (2002) eine *operation span* Aufgabe und Vilkki et al. (1996) kombinierten eine Rückwärts-Zähl-Aufgabe und eine Ausstreich-Aufgabe.<sup>3</sup> In beiden Aufgaben konnte nicht sichergestellt werden, daß sich kritische Verarbeitungsstufen zeitlich überlagern. Entsprechend sind die Befunde dieser Studien möglicherweise dadurch zu erklären, daß die verwendete Doppelaufgabe gar keine spezifischen Koordinations-Anforderungen gestellt hat. In diesem Fall sollte sich eine frontale Läsion auch nicht zwangsläufig auf die behaviorale Performanz auswirken.

## 10.7 Aufgabenschwierigkeit

Eine Alternativerklärung der aktuellen Befunde könnte die unterschiedliche globale Schwierigkeit der Aufgaben sein. Wie aus den behavioralen Daten (Fehlerraten und/oder Reaktionszeiten) ersichtlich ist, waren die Doppelaufgaben schwerer als die Einzelaufgaben. Des weiteren wurde auch die Schwierigkeit der Doppelaufgaben durch die parametrischen Manipulationen verändert. Wenn die globale Schwierigkeit, vielleicht operationalisiert als „Anstrengung“ (*effort*), einen Effekt hat, würde dieser Effekt zu den gleichen Ergebnissen wie den hier beobachteten führen. Gegen diese Interpretation sprechen jedoch die Befunde von Barch et al. (1997), D’Esposito et al. (1995) und Marois et al. (2002). Barch et al. konnten zeigen, daß dorsolateral-präfrontale Aktivierung zwar mit der Zeitspanne einer Arbeitsgedächtnisaufgabe korreliert, nicht jedoch mit einer unabhängig variierten Schwierigkeitsmanipulation. Des weiteren haben D’Esposito et al. in ihrer Doppelaufgaben-Studie eine Einzelaufgabe nochmals unter schwierigeren Bedingungen getestet. Obwohl die behaviorale Performanz unter das Niveau der Doppelaufgabe sank, konnte keine präfrontale Aktivierung beobachtet werden. Marois et al. benutzten das PRP-Paradigma und konnten im Einklang mit den aktuellen Befunden zeigen, daß die Verarbeitung einer PRP-Doppelaufgabe mit erhöhter Aktivierung in kortikalen Arealen entlang des SFI und im GFM assoziiert ist. Eine Erhöhung der Schwierigkeit der Antwort-Auswahl (2 vs. 4 Reiz-Reaktions-Verknüpfungen einer Aufgabe) führte zu einer höheren Aktivierung lateral-präfrontaler Areale. Größere perzeptuelle Interferenz zwischen den Aufgaben führte jedoch zu keiner Aktivierungsänderung. Dieser Befund zeigt, daß nur spezifische Schwierigkeitsmanipulationen, die die Aufgaben-Koordination betreffen, Einfluß auf die Aktivierungs-Stärke

<sup>3</sup>In der *operation span* Aufgabe mußten die Probanden Zahlen addieren oder subtrahieren und gleichzeitig memorieren. In der Rückwärts-Zähl-Aufgabe (*counting backwards*) mußten die Probanden ab einer bestimmten Zahl laut rückwärts zählen, und in der Ausstreich-Aufgabe (*cancellation task*) mußten sie bestimmte Punktmuster aus einer Fülle verschiedener Punktmuster identifizieren und mit einem Stift austreichen.

der lateral-präfrontalen Areale haben, nicht jedoch generelle Schwierigkeitsmanipulationen, z. B. peripherer Verarbeitungs-Stufen (vgl. auch Dell'Acqua et al., 2001). Diese Studien zeigen somit, daß der lateral-präfrontale Cortex nicht auf globale Schwierigkeitsanforderungen, wie z. B. Anstrengung, reagiert. Entsprechend ist die Interpretation, daß die aktuellen Befunde auf eine unspezifische Anforderung nach Anstrengung zurückzuführen sind, sehr unwahrscheinlich.

## 10.8 Resümee und Ausblick

Die aktuellen Befunde erweitern den bisherigen Kenntnisstand bezüglich der Funktionalität lateral-präfrontaler Areale für die Doppelaufgaben-Verarbeitung erheblich. Bisherige Studien konzentrierten sich vor allem auf den Versuch, doppelaufgaben-relatierte Areale überhaupt zu identifizieren. Aufgrund methodischer und konzeptueller Schwächen ist das aber nur einem Teil der Studien gelungen, so daß eine große Kontroverse entstand, ob doppelaufgaben-relatierte Areale überhaupt nachweisbar sind. Die Studien dieser Arbeit haben gezeigt, daß bei Umgehung der Schwächen bisheriger Studien doppelaufgaben-relatierte Areale konsistent nachweisbar sind.

Darüber hinaus konnte auch eine mögliche Ursache der divergierenden Befunde bisheriger Studien identifiziert werden. So scheint ein fundamentales Problem der Studien, die keine doppelaufgaben-relatierten Areale beobachtet haben, darin begründet zu sein, daß die zeitliche Überlappung der Aufgaben nicht hinreichend kontrolliert war (vgl. Abschnitt 2.4.3, S. 20 und Experiment 4). Die aktuellen Befunde können somit dazu beitragen, daß in Zukunft angemessenere Paradigmen gewählt werden, um die funktionell-neuroanatomischen Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung zu untersuchen.

Schließlich konnte in dieser Arbeit zum ersten Mal die Funktionalität und Arbeitsweise lateral-präfrontaler Areale im Rahmen der Doppelaufgaben-Verarbeitung im Detail spezifiziert werden. Es zeigte sich, daß Areale entlang des SFI und GFM eng mit der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung assoziiert sind und daß die Aktivität dieser Areale graduell unterschiedliche Ausmaße an Doppelaufgaben-Interferenz reflektieren. Alle bisherigen Studien konnten doppelaufgaben-relatierte Aktivierungen letztendlich nur mit „zusätzlichen Anforderungen“ in der Doppelaufgaben-Verarbeitung in Verbindung bringen, ohne diese Anforderungen näher zu spezifizieren.

In der Erforschung funktionell-neuroanatomischer Korrelate der Doppelaufgaben-Verarbeitung sind jedoch noch eine Reihe von Fragen unbeantwortet. Bezüglich der aktuellen Studie stellt sich zunächst die Frage, wie die unerwarteten Befunde der SOA800-Bedingung des letzten Experiments erklärt werden können. Hier bietet sich vor allem



an, die verschiedenen SOAs in einem ereigniskorrelierten Design randomisiert darzubieten, um mögliche Strategieeffekte ausschließen zu können.

Darüber hinaus bietet sich eine weitergehende Untersuchung der neuroanatomischen Korrelate anderer doppelaufgaben-spezifischer kognitiver Anforderungen an. Zunächst stellt sich hier die Frage, ob auch die postulierten Anforderungen an geteilte Aufmerksamkeit und Gedächtnis lokalisierbar sind und wenn das der Fall ist, wo sie lokalisiert sind. Wenn diese Anforderungen auch schon in Experiment 1 vorhanden waren und durch die Aktivierungs-Muster reflektiert wurden, dann sind aufgrund der Befunde vergleichbare Areale zu erwarten, wie sie für die Aufgaben-Koordination identifiziert worden sind.

Des weiteren ist ungeklärt, ob die Aufgaben-Koordination in Unterfunktionen differenzierbar ist und ob diese Unterfunktionen funktionell-neuroanatomisch separierbar sind. So haben Meyer & Kieras (1997) vorgeschlagen, daß die Aufgaben-Koordination in die Prozesse Anhalten, Wechseln und Wiederaufnehmen der Aufgaben-Verarbeitung unterteilt ist. Das könnte einerseits durch weitere experimentelle Manipulationen erforscht werden, z. B. durch eine parametrische Manipulation einzelner Prozesse, oder aber durch den Vergleich mit anderen Paradigmen, die die zu untersuchenden Prozesse besser identifizieren können, wobei letzteres aufgrund methodischer Aspekte in Meßwiederholungs-Designs durchgeführt werden sollte.

Allgemein scheint die weitere Differenzierung vielversprechend, da die lateral-präfrontalen Areale häufig eine recht vergleichbare Aufteilung in verschiedene (lokale) Maxima aufwiesen. Diese (lokalen) Maxima könnten Ausdruck verschiedener Prozesse sein.

Allgemeiner betrachtet kann heute festgehalten werden, daß Doppelaufgaben zu zusätzlichen Aktivierungen führen können. Ein entscheidender Faktor scheint hierbei die zeitliche Überlappung der Aufgaben zu sein, wie das aktuelle Experiment 4 zeigt (vgl. auch Herath et al., 2001). Jedoch ist noch ungeklärt, *was* gleichzeitig gefordert sein muß, Perzeption, Antwort-Auswahl oder Reaktion (Dell'Acqua et al., 2001, legt allerdings nahe, daß es sich um die Antwort-Auswahl handelt). Auch ist offen, ob nicht weitere Parameter die Identifikation doppelaufgaben-relatierter Areale beeinflussen.

Somit ist ein Grundstein der Doppelaufgaben-Forschung gesetzt: doppelaufgaben-relatierte Areale sind konsistent nachweisbar. Nun gilt es, am besten durch experimentelle Manipulationen innerhalb einer Studie, die genauen Charakteristika dieser Areale zu spezifizieren. Die vorliegenden Studien stellen die erste umfassende Arbeit dar, die diesen Ansatz der Spezifikation erfolgreich umgesetzt hat.

# Literatur

- Adcock, R. A., Constable, R. T., Gore, J. C. & Goldman-Rakic, P. S. (2000). Functional neuroanatomy of executive processes involved in dual-task performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *97*(7), 3567–3572.
- Aguirre, G. K., Zarahn, E. & D’Esposito, M. (1998). The variability of human, BOLD hemodynamic responses. *NeuroImage*, *8*(4), 360–369.
- Andres, P. & Van der Linden, M. (2002). Are central executive functions working in patients with focal frontal lesions? *Neuropsychologia*, *40*(7), 835–845.
- Arnell, K. M. & Duncan, J. (2002). Separate and shared sources of dual-task cost in stimulus identification and response selection. *Cognitive Psychology*, *44*(2), 105–147.
- Awh, E., Jonides, J., Smith, E. E., Schumacher, E. H., Koeppel, R. A. & Katz, S. (1996). Dissociation of storage and rehearsal in verbal working memory: Evidence from positron emission tomography. *Psychological Science*, *7*(1), 25–31.
- Azouvi, P., Jokic, C., Van der Linden, M., Marlier, N. & Bussel, B. (1996). Working memory and supervisory control after severe closed-head injury. A study of dual task performance and random generation. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *18*(3), 317–337.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Clarendon Press.
- Baddeley, A. D. (1990). *Human Memory: Theory and practice*. Hove (UK): Lawrence Erlbaum Associates.
- Baddeley, A. D. (1996). The fractionation of working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *93*(24), 13468–13472.

- Baddeley, A. D. (1998). The central executive: A concept and some misconceptions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 4(5), 523–526.
- Baddeley, A. D., Bressi, S., Della Sala, S., Logie, R. & Spinnler, H. (1991). The decline of working memory in Alzheimer's disease. A longitudinal study. *Brain*, 114(6), 2521–2542.
- Baddeley, A. D. & Della Sala, S. (1996). Working memory and executive control. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 351(1346), 1397–403.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. Bower (Ed.), *Recent Advances in Learning and Motivation*, Volume 8 (pp. 47–89). New York: Academic Press.
- Barbas, H. & Pandya, D. N. (1991). Patterns of connections of the prefrontal cortex in the rhesus monkey associated with cortical architecture. In H. S. Levin, H. M. Eisenberg & A. L. Benton (Eds.), *Frontal Lobe Function and Dysfunction* (pp. 35–58). New York: Oxford University Press.
- Barch, D. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Forman, S. D., Noll, D. C. & Cohen, J. D. (1997). Dissociating working memory from task difficulty in human prefrontal cortex. *Neuropsychologia*, 35(10), 1373–1380.
- Bauer, R. M. & Rubens (1985). Agnosia. In K. M. Heilman & E. Valenstein (Eds.), *Clinical Neuropsychology* (pp. 187–241). New York: Oxford UP.
- Beringer, J. (1995). *ERTS: Experimental Run Time System*. BeriSoft Corporation.
- Boecker, H., Dagher, A., Ceballos-Baumann, A. O., Passingham, R. E., Samuel, M., Friston, K. J., Poline, J., Dettmers, C., Conrad, B. & Brooks, D. J. (1998). Role of the human rostral supplementary motor area and the basal ganglia in motor sequence control: Investigations with H<sub>2</sub><sup>15</sup>O PET. *Journal of Neurophysiology*, 79(2), 1070–1080.
- Bosch, V. (2000). Statistical analysis of multi-subject fMRI data: Assessment of focal activations. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 11(1), 61–64.
- Braun, J. (1998). Divided attention: Narrowing the gap between brain and behavior. In R. Parasuraman (Ed.), *The attentive brain* (pp. 327–351). Cambridge, MA, US: The MIT Press.

- Braver, T. S., Barch, D. M., Gray, J. R., Molfese, D. L. & Snyder, A. (2001). Anterior cingulate cortex and response conflict: Effects of frequency, inhibition and errors. *Cerebral Cortex*, *11*(9), 825–836.
- 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*(1), 49–62.
- Broadbent, D. E. (1957). A mechanical model for human attention and immediate memory. *Psychological Review*, *64*, 205–215.
- Broadbent, D. E. (1982). Task combination and selective intake of information. *Acta Psychologica, Amsterdam*, *50*(3), 253–290.
- Brodmann, K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues*. Leipzig: Barth.
- Brown, T. L. & Carr, T. H. (1989). Automaticity in skill acquisition: Mechanisms for reducing interference in concurrent performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *15*(4), 686–700.
- Büchel, C., Holmes, A. P., Rees, G. & Friston, K. J. (1998). Characterizing stimulus-response functions using nonlinear regressors in parametric fMRI experiments. *NeuroImage*, *8*(2), 140–148.
- Büchel, C., Wise, R. J., Mummery, C. J., Poline, J. B. & Friston, K. J. (1996). Nonlinear regression in parametric activation studies. *NeuroImage*, *4*(1), 60–66.
- Buckner, R. L. (1998). Event-related fMRI and the hemodynamic response. *Human Brain Mapping*, *6*(5-6), 373–377.
- Bunge, S. A., Klingberg, T., Jacobsen, R. B. & Gabrieli, J. D. (2000). A resource model of the neural basis of executive working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *97*(7), 3573–3578.
- Burgess, P. W., Alderman, N., Evans, J., Emslie, H. & Wilson, B. A. (1998). The ecological validity of tests of executive function. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *4*(6), 547–558.
- Burgess, P. W., Veitch, E., de Lacy Costello, A. & Shallice, T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multitasking. *Neuropsychologia*, *38*(6), 848–863.

- Burock, M. A., Buckner, R. L., Woldorff, M. G., Rosen, B. R. & Dale, A. M. (1998). Randomized event-related experimental designs allow for extremely rapid presentation rates using functional MRI. *Neuroreport*, *9*(16), 3735–3739.
- Burton, H., Abend, N. S., MacLeod, A. M., Sinclair, R. J., Snyder, A. Z. & Raichle, M. E. (1999). Tactile attention tasks enhance activation in somatosensory regions of parietal cortex: A positron emission tomography study. *Cerebral Cortex*, *9*(7), 662–674.
- Cabeza, R. & Nyberg, L. (2000). Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(1), 1–47.
- Callicott, J. H., Mattay, V. S., Bertolino, A., Finn, K., Coppola, R., Frank, J. A., Goldberg, T. E. & Weinberger, D. R. (1999). Physiological characteristics of capacity constraints in working memory as revealed by functional MRI. *Cerebral Cortex*, *9*(1), 20–26.
- Carpenter, P. A., Just, M. A. & Reichle, E. D. (2000). Working memory and executive function: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, *10*(2), 195–199.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D. & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, *280*(5364), 747–749.
- Carter, C. S., MacDonald, A. M., Botvinick, M., Ross, L. L., Stenger, V. A., Noll, D. & Cohen, J. D. (2000). Parsing executive processes: Strategic vs. evaluative functions of the anterior cingulate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *97*(4), 1944–1948.
- Cicerone, K. D. (1996). Attention deficits and dual task demands after mild traumatic brain injury. *Brain Injury*, *10*(2), 79–89.
- Clark, C. R., Egan, G. F., McFarlane, A. C., Morris, P., Weber, D., Sonkilla, C., Marcina, J. & Tochon-Danguy, H. J. (2000). Updating working memory for words: A PET activation study. *Human Brain Mapping*, *9*(1), 42–54.
- Cohen, J. D., Braver, T. S. & O'Reilly, R. C. (1996). A computational approach to prefrontal cortex, cognitive control and schizophrenia: Recent developments and current challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *351*(1346), 1515–1527.

- Cohen, J. D., Perlstein, W. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Noll, D. C., Jonides, J. & Smith, E. E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, *386*(6625), 604–608.
- Collette, F. & Van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *26*(2), 105–125.
- 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. *The Journal of Neuroscience*, *11*(8), 2383–2402.
- Corbetta, M. & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(3), 201–215.
- Cortina, J. M. & Folger, R. G. (1998). When is it acceptable to accept a null hypothesis: No way, Jose? *Organizational Research Methods*, *1*(3), 334–350.
- Coull, J. T. & Nobre, A. C. (1998). Where and when to pay attention: The neural systems for directing attention to spatial locations and to time intervals as revealed by both PET and fMRI. *The Journal of Neuroscience*, *18*(18), 7426–7435.
- Courtney, S. M., Petit, L., Maisog, J. M., Ungerleider, L. G. & Haxby, J. V. (1998). An area specialized for spatial working memory in human frontal cortex. *Science*, *279*(5355), 1347–1351.
- Craik, K. J. W. (1947). Theory of the human operator in control systems. I. The operator as an engineering system. *British Journal of Psychology*, *38*, 56–61.
- Craik, K. J. W. (1948). Theory of the human operator in control systems. II. Man as an element in a control system. *British Journal of Psychology*, *38*, 142–147.
- De Jong, R. (1993). Multiple bottlenecks in overlapping task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *19*(5), 965–980.
- De Jong, R. (1995). The role of preparation in overlapping-task performance. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, *48*(1), 2–25.
- Dell'Acqua, R., Stablum, F., Galbiati, S., Spannocchi, G. & Cerri, C. (2001). Selective effect of closed-head injury on central resource allocation: Evidence from dual-task performance. *Experimental Brain Research*, *136*(3), 364–378.

- Desimone, R. (1996). Neural mechanisms for visual memory and their role in attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *93*(24), 13494–13499.
- D'Esposito, M., Aguirre, G. K., Zarahn, E., Ballard, D., Shin, R. K. & Lease, J. (1998a). Functional MRI studies of spatial and nonspatial working memory. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *7*(1), 1–13.
- D'Esposito, M., Ballard, D., Aguirre, G. K. & Zarahn, E. (1998b). Human prefrontal cortex is not specific for working memory: A functional MRI study. *NeuroImage*, *8*(3), 274–282.
- D'Esposito, M., Detre, J. A., Alsop, D. C., Shin, R. K., Atlas, S. & Grossman, M. (1995). The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, *378*(6554), 279–281.
- Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica, Amsterdam*, *30*, 412–431.
- Dove, A., Pollmann, S., Schubert, T., Wiggins, C. J. & von Cramon, D. Y. (2000). Prefrontal cortex activation in task switching: An event-related fMRI study. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *9*(1), 103–109.
- Duncan, J. (1979). Divided attention: The whole is more than the sum of its parts. Dual-task interference as an indicator of on-line programming in simple movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *5*(2), 216–228.
- Duncan, J. (2001). An adaptive coding model of neural function in prefrontal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(11), 820–829.
- Ebeling, U. & von Cramon, D. (1992). Topography of the Uncinate Fascicle and adjacent temporal fiber tracts. *Acta Neurochirurgica (Wien)*, *115*, 143–148.
- Fagot, C. & Pashler, H. (1992). Making two responses to a single object: Implications for the central attentional bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *18*(4), 1058–1079.
- Fiez, J. A., Raife, E. A., Balota, D. A., Schwarz, J. P., Raichle, M. E. & Petersen, S. E. (1996). A positron emission tomography study of the short-term maintenance of verbal information. *The Journal of Neuroscience*, *16*(2), 808–822.

- Fink, G. R., Frackowiak, R. S., Pietrzyk, U. & Passingham, R. E. (1997). Multiple nonprimary motor areas in the human cortex. *Journal of Neurophysiology*, *77*(4), 2164–2174.
- Friston, K. J., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. & Turner, R. (1995a). Characterizing dynamic brain responses with fMRI: A multivariate approach. *NeuroImage*, *2*(2), 166–172.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J.-P., Frith, C. D. & Frackowiak, R. S. J. (1995b). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, *2*, 189–210.
- Friston, K. J., Price, C. J., Fletcher, P., Moore, C., Frackowiak, R. S. & Dolan, R. J. (1996). The trouble with cognitive subtraction. *NeuroImage*, *4*(2), 97–104.
- Friston, K. J., Zarahn, E., Josephs, O., Henson, R. N. & Dale, A. M. (1999). Stochastic designs in event-related fMRI. *NeuroImage*, *10*(5), 607–619.
- Frith, C. D. & Done, D. J. (1986). Routes to action in reaction time tasks. *Psychological Research*, *48*(3), 169–177.
- Fuster, J. M. (1989). *The Prefrontal Cortex* (2 Ed.). New York: Raven.
- Fuster, J. M. (2000). Executive frontal functions. *Experimental Brain Research*, *133*(1), 66–70.
- 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.
- Garavan, H., Ross, T. J. & Stein, E. A. (1999). Right hemispheric dominance of inhibitory control: An event-related functional MRI study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *96*(14), 8301–8306.
- Gehring, W. J. & Knight, R. T. (2000). Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nature Neuroscience*, *3*(5), 516–520.
- Gilbert, S. J. & Shallice, T. (2002). Task switching: A PDP model. *Cognitive Psychology*, *44*(3), 297–337.
- Goebel, R., Khorram-Sefat, D., Muckli, L., Hacker, H. & Singer, W. (1998). The constructive nature of vision: Direct evidence from functional magnetic resonance imaging studies of apparent motion and motion imagery. *European Journal of Neuroscience*, *10*(5), 1563–1573.



- Goldberg, T. E., Berman, K. F., Fleming, K., Ostrem, J., Horn, J. D. V., Esposito, G., Mattay, V. S., Gold, J. M. & Weinberger, D. R. (1998). Uncoupling cognitive workload and prefrontal cortical physiology: A PET rCBF study. *NeuroImage*, 7(4), 296–303.
- Goldman-Rakic, P. S. (1987). Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational knowledge. In F. Plum, V. Mountcastle & S. R. Geiger (Eds.), *Handbook of physiology*, Volume 5 (pp. 373–417). Bethesda, MD: American Physiological Society.
- Goldman-Rakic, P. S. (1995). Architecture of the prefrontal cortex and the central executive. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 769, 71–83.
- Goldman-Rakic, P. S. (1996). The prefrontal landscape: Implications of functional architecture for understanding human mentation and the central executive. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 351(1346), 1445–1453.
- Gottsdanker, R. & Shragg, G. P. (1985). Verification of Donders' subtraction method. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 11(6), 765–776.
- Grafman, J. (1995). Similarities and distinctions among current models of prefrontal cortical functions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 769, 337–368.
- Grèzes, J. & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis. *Human Brain Mapping*, 12(1), 1–19.
- Haenny, P. E. & Schiller, P. H. (1988). State dependent activity in monkey visual cortex. I. Single cell activity in V1 and V4 on visual tasks. *Experimental Brain Research*, 69(2), 225–244.
- Halsband, U., Ito, N., Tanji, J. & Freund, H. J. (1993). The role of premotor cortex and the supplementary motor area in the temporal control of movement in man. *Brain*, 116(1), 243–266.
- Harrington, D. L., Rao, S. M., Haaland, K. Y., Bobholz, J. A., Mayer, A. R., Binder, J. R. & Cox, R. W. (2000). Specialized neural systems underlying representations of sequential movements. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 56–77.

- Hawkins, H. L., Rodriguez, E. & Reicher, G. M. (1979). Is time-sharing a general ability? Technical report, University of Oregon, Eugene, USA. (ONR Tech. Rep. No. 3); zitiert nach Meyer & Kieras, 1997.
- Hein, G. & Schubert, T. (eingereicht). Aging and input processing in dual-task situations. *Psychology and Aging*.
- Herath, P., Klingberg, T., Young, J., Amunts, K. & Roland, P. (2001). Neural correlates of dual task interference can be dissociated from those of divided attention: An fMRI study. *Cerebral Cortex*, *11*(9), 796–805.
- Hirst, W., Spelke, E. S., Reavers, C. C., Caharack, G. & Neisser, U. (1980). Dividing attention without alternation or automaticity. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*, 98–117.
- Hopfinger, J. B., Buonocore, M. H. & Mangun, G. R. (2000). The neural mechanisms of top-down attentional control. *Nature Neuroscience*, *3*(3), 284–291.
- Humphreys, G. W. & Price, C. J. (2001). Cognitive neuropsychology and functional brain imaging: Implications for functional and anatomical models of cognition. *Acta Psychologica*, *107*(1-3), 119–153.
- James, W. (1890). *Principles of Psychology*, Volume 1. New York: Holt.
- Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of Psychology*, *14*(Whole No. 89).
- Jonides, J., Smith, E. E., Koeppe, R. A., Awh, E., Minoshima, S. & Mintun, M. A. (1993). Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature*, *363*(6430), 623–625.
- Josephs, O. & Henson, R. N. (1999). Event-related functional magnetic resonance imaging: Modelling, inference and optimization. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *354*(1387), 1215–1228.
- Josephs, O., Turner, R. & Friston, K. J. (1997). Event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, *5*, 243–248.
- Jueptner, M. & Weiller, C. (1995). Review: Does measurement of regional cerebral blood flow reflect synaptic activity? Implications for PET and fMRI. *NeuroImage*, *2*(2), 148–156.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., Keller, T. A., Emery, L., Zajac, H. & Thulborn, K. R. (2001). Interdependence of nonoverlapping cortical systems in dual cognitive tasks. *NeuroImage*, *14*(2), 417–426.

- Kahnemann, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kastner, S., Pinsk, M. A., Weerd, P. D., Desimone, R. & Ungerleider, L. G. (1999). Increased activity in human visual cortex during directed attention in the absence of visual stimulation. *Neuron*, *22*(4), 751–761.
- Kastrup, A., Krüger, G., Glover, G. H., Neumann-Haefelin, T. & Moseley, M. E. (1999). Regional variability of cerebral blood oxygenation response to hypercapnia. *NeuroImage*, *10*(6), 675–681.
- Kawashima, R., Satoh, K., Itoh, H., Ono, S., Furumoto, S., Gotoh, R., Koyama, M., Yoshioka, S., Takahashi, T., Takahashi, K., Yanagisawa, T. & Fukuda, H. (1996). Functional anatomy of GO/NO-GO discrimination and response selection – A PET study in man. *Brain Research*, *728*(1), 79–89.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F. & Hopfinger, J. B. (2000). Error processing and the rostral anterior cingulate: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, *37*(2), 216–223.
- Kimberg, D. Y., D’Esposito, M. & Farah, M. J. (1997). Cognitive functions in the prefrontal cortex – Working memory and executive control. *Current Directions in Psychological Science*, *6*(6), 185–192.
- Klingberg, T. (1998). Concurrent performance of two working memory tasks: Potential mechanisms of interference. *Cerebral Cortex*, *8*(7), 593–601.
- Kluger, A. N. & Tikochinsky, J. (2001). The error of accepting the "theoretical" null hypothesis: The rise, fall, and resurrection of commonsense hypotheses in psychology. *Psychological Bulletin*, *127*(3), 408–423.
- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S. & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, *399*(6732), 148–151.
- Koechlin, E., Corrado, G., Pietrini, P. & Grafman, J. (2000). Dissociating the role of the medial and lateral anterior prefrontal cortex in human planning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *97*(13), 7651–7656.
- Kolb, B. & Wishaw, I. Q. (1996). *Fundamentals of Human Neuropsychology* (4th Ed.). New York: Freeman.
- Kray, J. & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in task switching. *Psychology and Aging*, *15*(1), 126–147.

- Lange, N. (1999). Statistical procedures for functional MRI. In C. T. W. Moonen & P. A. Bandettini (Eds.), *Functional MRI* (1st Ed.) chapter 27, (pp. 301–335). Berlin: Springer.
- Levy, J. & Pashler, H. (2001). Is dual-task slowing instruction dependent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *27*(4), 862–869.
- Loftus, G. R. & Masson, M. E. J. (1994). Using confidence intervals in within-subject designs. *Psychonomic Bulletin & Review*, *1*(4), 476–490.
- Logan, G. D. & Gordon, R. D. (2001). Executive control of visual attention in dual-task situations. *Psychological Review*, *108*(2), 393–434.
- Logothetis, N. K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T. & Oeltermann, A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature*, *412*(6843), 150–157.
- Lohmann, G., Müller, K., Bosch, V., Mentzel, H., Hessler, S., Chen, L., Zysset, S. & von Cramon, D. Y. (2001). Lipsia - A new software system for the evaluation of functional magnetic resonance images of the human brain. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, *25*(6), 449–457.
- Luce, R. D. (1986). *Response times: Their role in inferring elementary mental organization*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Luria, A. R. (1980). *Higher cortical functions in man* (2nd Ed.). New York: Consultants Bureau.
- MacDonald III, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A. & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, *288*(5472), 1835–1838.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, *109*(2), 163–203.
- Marois, R., Larson, J., Chun, M. M. & Shima, D. (2002). The neural correlates of the response bottleneck. *Verfügbar auf CD-ROM in NeuroImage*, *16*(2). Präsentiert auf der „8<sup>th</sup> International Conference on Functional Mapping of the Human Brain“, June 2-6, 2002, Sendai, Japan. (Online verfügbar unter <http://www.academicpress.com/www/journal/hbm2002/15579.html#15579>).

- Matthes-von Cramon, G. & von Cramon, D. Y. (2000). Störungen exekutiver Funktionen. In W. Sturm, M. Herrmann & C. W. Wallesch (Eds.), *Lehrbuch Klinische Neuropsychologie* (pp. 392–410). Frankfurt: Swets & Zeitlinger.
- McCann, R. S. & Johnston, J. C. (1992). Locus of the single-channel bottleneck in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *18*(2), 471–484.
- McDowell, S., Whyte, J. & D'Esposito, M. (1997). Working memory impairments in traumatic brain injury: Evidence from a dual-task paradigm. *Neuropsychologia*, *35*(10), 1341–1353.
- McGill, W. (1963). Stochastic latency mechanisms. In R. D. Luce, Bush & E. Galanter (Eds.), *Handbook of mathematical psychology*, Volume 1 (pp. 309–360). New York: Wiley.
- Mecklinger, A., Bosch, V., Gruenewald, C., Bentin, S. & von Cramon, D. Y. (2000). What have Klingon letters and faces in common? An fMRI study on content-specific working memory systems. *Human Brain Mapping*, *11*(3), 146–161.
- Meyer, D. E. & Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 1. Basic mechanisms. *Psychological Review*, *104*(1), 3–65.
- Meyer, D. E., Kieras, D. E., Lauber, E., Schumacher, E. H., Glass, J., Zurbriggen, E., Gmeindl, L. & Apfelblat, D. (1995). Adaptive executive control: Flexible multiple-task performance without pervasive immutable response-selection bottlenecks. *Acta Psychologica*, *90*(1-3), 163–190.
- Miezin, F. M., Maccotta, L., Ollinger, J. M., Petersen, S. E. & Buckner, R. L. (2000). Characterizing the hemodynamic response: Effects of presentation rate, sampling procedure, and the possibility of ordering brain activity based on relative timing. *NeuroImage*, *11*(6 Pt 1), 735–759.
- Miller, E. K. (2000). The prefrontal cortex and cognitive control. *Nature Reviews Neuroscience*, *1*(1), 59–65.
- Miller, E. K. & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, *24*, 167–202.
- Mushiake, H., Inase, M. & Tanji, J. (1991). Neuronal activity in the primate premotor, supplementary, and precentral motor cortex during visually guided and internally determined sequential movements. *Journal of Neurophysiology*, *66*(3), 705–718.

- Nauta, W. J. H. (1971). The problem of the frontal lobe: A reinterpretation. *Journal of Psychiatric Research*, 8, 167–187.
- Navon, D. & Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3), 214–255.
- Navon, D. & Miller, J. (2002). Queuing or sharing? A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44(3), 193–251.
- Norman, D. A. & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory*, Volume 4 chapter 1, (pp. 1–18). New York: Plenum Press.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97–113.
- Owen, A. M. (2000). The role of the lateral frontal cortex in mnemonic processing: The contribution of functional neuroimaging. *Experimental Brain Research*, 133(1), 33–43.
- Owen, A. M., Herrod, N. J., Menon, D. K., Clark, J. C., Downey, S. P., Carpenter, T. A., Minhas, P. S., Turkheimer, F. E., Williams, E. J., Robbins, T. W., Sahakian, B. J., Petrides, M. & Pickard, J. D. (1999). Redefining the functional organization of working memory processes within human lateral prefrontal cortex. *European Journal of Neuroscience*, 11(2), 567–574.
- Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks: Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 10(3), 358–377.
- Pashler, H. (1994a). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220–244.
- Pashler, H. (1994b). Graded capacity-sharing in dual-task interference? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 20(2), 330–342.
- Pashler, H. & Baylis, G. C. (1991). Procedural learning: I. Locus of practice effects in speeded choice tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 17(1), 20–32.

- Pashler, H. & Johnston, J. C. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *41(1-A)*, 19–45.
- Passingham, R. E. (1996). Attention to action. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *351(1346)*, 1473–1479.
- Paulesu, E., Frith, C. D. & Frackowiak, R. S. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, *362(6418)*, 342–345.
- Paus, T., Petrides, M., Evans, A. C. & Meyer, E. (1993). Role of the human anterior cingulate cortex in the control of oculomotor, manual, and speech responses: A positron emission tomography study. *Journal of Neurophysiology*, *70(2)*, 453–469.
- Petrides, M. (1994). Frontal lobes and behaviour. *Current Opinion in Neurobiology*, *4(2)*, 207–211.
- Petrides, M. & Pandya, D. N. (1984). Projections to the frontal cortex from the posterior parietal region in the rhesus monkey. *The Journal of Comparative Neurology*, *228(1)*, 105–116.
- Petrides, M. & Pandya, D. N. (1994). Comparative architectonic analysis of the human and macaque frontal cortex. In F. Boller & J. Grafman (Eds.), *Handbook of Neuropsychology*, Volume 9 chapter 3, (pp. 17–58). Amsterdam: Elsevier Science Publishers BV.
- Petrides, M. & Pandya, D. N. (1999). Dorsolateral prefrontal cortex: Comparative cytoarchitectonic analysis in the human and the macaque brain and corticocortical connection patterns. *European Journal of Neuroscience*, *11(3)*, 1011–1036.
- Picard, N. & Strick, P. L. (1996). Motor areas of the medial wall: A review of their location and functional activation. *Cerebral Cortex*, *6(3)*, 342–353.
- Picard, N. & Strick, P. L. (2001). Imaging the premotor areas. *Current Opinion in Neurobiology*, *11(6)*, 663–672.
- Pollmann, S. & von Cramon, D. Y. (2000). Object working memory and visuospatial processing: Functional neuroanatomy analyzed by event-related fMRI. *Experimental Brain Research*, *133(1)*, 12–22.
- Postle, B. R., Berger, J. S. & D'Esposito, M. (1999). Functional neuroanatomical double dissociation of mnemonic and executive control processes contributing to

- working memory performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *96*(22), 12959–12964.
- Pugh, K. R., Offywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Fulbright, R. K., Byrd, D., Skudlarski, P., Shankweiler, D. P., Katz, L., Constable, R. T., Fletcher, J., Lacadie, C., Marchione, K. & Gore, J. C. (1996). Auditory selective attention: An fMRI investigation. *NeuroImage*, *4*(3 Pt 1), 159–173.
- Rabbitt, P. M. (1966). Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, *71*(2), 264–272.
- Rabbitt, P. M. (1967). Three kinds of error-signalling responses in a serial choice task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *22*, 179–188.
- Roland, P. E. (1993). *Brain activation*. New York: Wiley-Liss.
- Romanski, L. M., Bates, J. F. & Goldman-Rakic, P. S. (1999). Auditory belt and parabelt projections to the prefrontal cortex in the rhesus monkey. *The Journal of Comparative Neurology*, *403*(2), 141–157.
- Rosen, B. R., Buckner, R. L. & Dale, A. M. (1998). Event-related functional MRI: Past, present, and future. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*(3), 773–780.
- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, R. S. & Passingham, R. E. (2000). The prefrontal cortex: Response selection or maintenance within working memory? *Science*, *288*(5471), 1656–1660.
- Rubia, K., Russell, T., Overmeyer, S., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., Sharma, T., Simmons, A., Williams, S. C., Giampietro, V., Andrew, C. M. & Taylor, E. (2001). Mapping motor inhibition: Conjunctive brain activations across different versions of go/no-go and stop tasks. *NeuroImage*, *13*(2), 250–261.
- Rypma, B., Prabhakaran, V., Desmond, J. E., Glover, G. H. & Gabrieli, J. D. (1999). Load-dependent roles of frontal brain regions in the maintenance of working memory. *NeuroImage*, *9*(2), 216–226.
- Sadato, N., Ibanez, V., Deiber, M. P., Campbell, G., Leonardo, M. & Hallett, M. (1996). Frequency-dependent changes of regional cerebral blood flow during finger movements. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, *16*(1), 23–33.
- Sanders, A. F. (1990). Issues and trends in the debate on discrete vs. continuous processing of information. *Acta Psychologica*, *74*(2-3), 123–167.



- Sarter, M., Berntson, G. G. & Cacioppo, J. T. (1996). Brain imaging and cognitive neuroscience. Toward strong inference in attributing function to structure. *The American Psychologist*, *51*(1), 13–21.
- Sartori, G. & Umiltà, C. (2000). How to avoid the fallacies of cognitive subtraction in brain imaging. *Brain & Language*, *74*(2), 191–212.
- Schröger, E. (1996). A neural mechanism for involuntary attention shifts to changes in auditory stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*(6), 527–539.
- Schubert, T. (1999). Processing differences between simple and choice reactions affect bottleneck localization in overlapping tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *25*(2), 408–425.
- Schubert, T., von Cramon, D. Y., Niendorf, T., Pollmann, S. & Bublak, P. (1998). Cortical areas and the control of self-determined finger movements: An fMRI study. *Neuroreport*, *9*(14), 3171–3176.
- Schubotz, R. I. & von Cramon, D. Y. (2001). Interval and ordinal properties of sequences are associated with distinct premotor areas. *Cerebral Cortex*, *11*(3), 210–222.
- Schubotz, R. I., Friederici, A. D. & von Cramon, D. Y. (2000). Time perception and motor timing: A common cortical and subcortical basis revealed by fMRI. *NeuroImage*, *11*(1), 1–12.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E. & Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, *12*(2), 101–108.
- Schwarz, W. & Ischebeck, A. (2001). On the interpretation of response time vs onset asynchrony functions: Application to dual-task and precue-utilization paradigms. *Journal of Mathematical Psychology*, *45*(3), 452–479.
- Schweickert, R. (1983). Latent network theory: Scheduling of processes in sentence verification and the Stroop effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *9*(3), 353–383.
- Schweickert, R. (1993). Information, time, and the structure of mental events: A twenty-five-year review. In D. E. Meyer & S. Kornblum (Eds.), *Attention and performance 14: Synergies in experimental psychology, artificial intelligence, and cognitive neuroscience* (pp. 535–566). Cambridge, MA, US: The MIT Press.

- Shallice, T. & Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, *114* ( Pt 2), 727–741.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Mencl, W. E., Constable, R. T., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Klorman, R., Lacadie, C. & Gore, J. C. (2001). The functional neural architecture of components of attention in language-processing tasks. *NeuroImage*, *13*(4), 601–612.
- Shima, K. & Tanji, J. (1998). Both supplementary and presupplementary motor areas are crucial for the temporal organization of multiple movements. *Journal of Neurophysiology*, *80*(6), 3247–3260.
- Shima, K. & Tanji, J. (2000). Neuronal activity in the supplementary and presupplementary motor areas for temporal organization of multiple movements. *Journal of Neurophysiology*, *84*(4), 2148–2160.
- Sidtis, J. J., Strother, S. C., Anderson, J. R. & Rottenberg, D. A. (1999). Are brain functions really additive? *NeuroImage*, *9*(5), 490–496.
- Smith, E. E., Geva, A., Jonides, J., Miller, A., Reuter-Lorenz, P. & Koeppe, R. A. (2001). The neural basis of task-switching in working memory: Effects of performance and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*(4), 2095–2100.
- Smith, E. E. & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, *283*(5408), 1657–1661.
- Sohn, M. H., Ursu, S., Anderson, J. R., Stenger, V. A. & Carter, C. S. (2000). The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *97*(24), 13448–13453.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica, Amsterdam*, *30*, 276–315.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *18*, 643–662.
- Talairach, P. & Tournoux, J. (1988). *A Stereotactic Coplanar Atlas of the Human Brain*. Stuttgart: Thieme.
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative responses. *Journal of Experimental Psychology*, *14*, 1–36.

- Tryon, W. W. (2001). Evaluating statistical difference, equivalence, and indeterminacy using inferential confidence intervals: An integrated alternative method of conducting null hypothesis statistical tests. *Psychological methods*, *6*(4), 371–386.
- Ullsperger, M. & von Cramon, D. Y. (2001). Subprocesses of performance monitoring: A dissociation of error processing and response competition revealed by event-related fMRI and ERPs. *NeuroImage*, *14*(6), 1387–1401.
- Umiltà, C., Nicoletti, R., Simion, F., Tagliabue, M. E. & Bagnara, S. (1992). The cost of a strategy. *European Journal of Cognitive Psychology*, *4*(1), 21–40.
- Ungerleider, L. G. & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. Ingle & M. A. Goodale (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 2–19). Cambridge, MA: MIT Press.
- Van Selst, M., Ruthruff, E. & Johnston, J. C. (1999). Can practice eliminate the psychological refractory period effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *25*(5), 1268–1283.
- Vandenberghe, R., Duncan, J., Dupont, P., Ward, R., Poline, J. B., Bormans, G., Michiels, J., Mortelmans, L. & Orban, G. A. (1997). Attention to one or two features in left or right visual field: A positron emission tomography study. *The Journal of Neuroscience*, *17*(10), 3739–3750.
- Vilkki, J., Levanen, S. & Servo, A. (2002). Interference in dual-fluency tasks after anterior and posterior cerebral lesions. *Neuropsychologia*, *40*(3), 340–348.
- Vilkki, J., Virtanen, S., Surma-Aho, O. & Servo, A. (1996). Dual task performance after focal cerebral lesions and closed head injuries. *Neuropsychologia*, *34*(11), 1051–1056.
- Von Bonin, G. (1944). Architecture of the precentral motor cortex and some adjacent areas. In P. Bucy (Ed.), *The Precentral Motor Cortex* (pp. 7–82). Urbana: University of Illinois Press.
- Vorberg, D. & Schulze, H. H. (2002). Linear phase-correction in synchronization: Predictions, parameter estimation, and simulations. *Journal of Mathematical Psychology*, *46*(1), 56–87.
- Wagner, A. D., Maril, A., Bjork, R. A. & Schacter, D. L. (2001). Prefrontal contributions to executive control: fMRI evidence for functional distinctions within lateral prefrontal cortex. *NeuroImage*, *14*(6), 1337–1347.

- Weinberger, D. R. (1993). A connectionist approach to the prefrontal cortex. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 5(3), 241–253.
- Welford, A. T. (1952). The 'psychological refractory period' and the timing of high-speed performance – A review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43, 2–19.
- White, L. E., Andrews, T. J., Hulette, C., Richards, A., Groelle, M., Paydarfar, J. & Purves, D. (1997). Structure of the human sensorimotor system. I: Morphology and cytoarchitecture of the central sulcus. *Cerebral Cortex*, 7(1), 18–30.
- Wojciulik, E. & Kanwisher, N. (1999). The generality of parietal involvement in visual attention. *Neuron*, 23(4), 747–764.
- Woodruff, P. W., Benson, R. R., Bandettini, P. A., Kwong, K. K., Howard, R. J., Talavage, T., Belliveau, J. & Rosen, B. R. (1996). Modulation of auditory and visual cortex by selective attention is modality-dependent. *Neuroreport*, 7(12), 1909–1913.
- Zacks, J., Rypma, B., Gabrieli, J. D., Tversky, B. & Glover, G. H. (1999). Imagined transformations of bodies: An fMRI investigation. *Neuropsychologia*, 37(9), 1029–1040.
- Zysset, S., Müller, K., Lohmann, G. & von Cramon, D. Y. (2001). Color-word matching stroop task: Separating interference and response conflict. *NeuroImage*, 13(1), 29–36.



# Abkürzungen

## Anatomische Bezeichnungen

---

<b>GFI</b>	Gyrus frontalis inferior
<b>SFI</b>	Sulcus frontalis inferior
<b>GFM</b>	Gyrus frontalis medius
<b>GFS</b>	Gyrus frontalis superior
<b>SFS</b>	Sulcus frontalis superior
<b>GTS</b>	Gyrus temporalis superior
<b>LFC</b>	Lateral-frontaler Cortex
<b>LPMC</b>	lateral-prämotorischer Cortex
<b>PFC</b>	Präfrontaler Cortex
<b>LPFC</b>	Lateral-präfrontaler Cortex
<b>DLPFC</b>	Dorsolateral-präfrontaler Cortex
<b>präSMA</b>	Prä-Supplementär- Motorisches Areal
<b>ACC</b>	Anterior-cingulärer Cortex
<b>SIP</b>	Sulcus intraparietalis

*Fortsetzung nächste Seite*

## Sonstige Abkürzungen

---

<b>ANOVA</b>	Analysis Of Variance
<b>BA</b>	Brodmann Areal
<b>BOLD</b>	Blood-Oxygen-Level-Dependent
<b>EPI</b>	Echo-Planar-Imaging
<b>fMRT</b>	Funktionelle Magnetresonanz- Tomographie
<b>FOV</b>	Field Of View
<b>FWHM</b>	Full Width at Half Maximum
<b>GLM</b>	General Linear Model
<b>HF</b>	Hoch-Frequenz
<b>HRF</b>	Hemodynamic Response Function
<b>IBI</b>	Inter-Block-Interval
<b>ITI</b>	Inter-Trial-Interval
<b>NMR</b>	Nuclear Magnetic Resonance
<b>MRT</b>	Magnetresonanztomographie
<b>PET</b>	Positronen-Emissions-Tomographie
<b>rCBF</b>	Regionaler cerebraler Blutfluß
<b>rCBV</b>	Regionales cerebrales Blutvolumen
<b>ROI</b>	Region-Of-Interest
<b>RSB</b>	Response-Selection-Bottleneck
<b>SOA</b>	Stimulus-Onset-Asynchrony
<b>SPM</b>	Statistical Parametric Map
<b>TE</b>	Time to Echo
<b>TR</b>	Time to Repeat

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Anatomie des frontalen Cortex . . . . .	6
3.1	PRP-Modell . . . . .	29
6.1	Experiment 1: verwendete Aufgaben . . . . .	57
6.2	Experiment 1: Behaviorale Ergebnisse . . . . .	61
6.3	Experiment 1: fMRT-Ergebnisse . . . . .	64
7.1	Experiment 2: verwendete Aufgaben . . . . .	78
7.2	Experiment 2: PRP-Effekt . . . . .	81
7.3	Experiment 2: Behaviorale Ergebnisse . . . . .	82
7.4	Experiment 2: fMRT-Ergebnisse . . . . .	84
7.5	Experiment 2: ROI-Analysen . . . . .	89
8.1	Experiment 3: verwendete Aufgaben . . . . .	97
8.2	Experiment 3: Behaviorale Ergebnisse . . . . .	100
8.3	Experiment 3: fMRT-Ergebnisse . . . . .	101
9.1	Experiment 4: Behaviorale Ergebnisse . . . . .	111
9.2	Experiment 4: fMRT-Ergebnisse, Effekte gradueller und absoluter Überlappungsunterschiede . . . . .	112
9.3	Experiment 4: fMRT-Ergebnisse, Parametrische Auswertung . . . . .	114
9.4	Experiment 4: ROI-Analyse des anterioren SFI . . . . .	117
9.5	Experiment 4: ROI-Analyse des Gyrus frontalis medius . . . . .	118
9.6	Experiment 4: RZ-Histogramm SOA 300 ms . . . . .	121
9.7	Experiment 4: Fehlerraten in Abhängigkeit des SOAs und der Reaktion . . . . .	124



# Tabellenverzeichnis

6.1	Experiment 1: Talairach-Tabelle Einzelaufgaben . . . . .	63
6.2	Experiment 1: Talairach-Tabelle Doppelaufgabe . . . . .	65
7.1	Experiment 2: Talairach-Tabelle Einzelaufgaben . . . . .	83
7.2	Experiment 2: Talairach-Tabelle Doppelaufgaben . . . . .	87
8.1	Experiment 3: Reaktionszeiten Vorexperiment . . . . .	95
8.2	Experiment 3: Talairach-Tabelle . . . . .	102
9.1	Experiment 4: Reaktionszeiten Vorexperiment . . . . .	108
9.2	Experiment 4: Talairach-Tabelle lineare Funktion . . . . .	115
9.3	Experiment 4: Talairach-Tabelle U-Funktion . . . . .	116

## Curriculum Vitae

Name	André Jörg Szameitat
Geburtsdatum	17.04.1975
Geburtsort	Braunschweig
1981 – 1987	Grundschule und Orientierungsstufe, Isenbüttel
1987 – 1994	Otto-Hahn-Gymnasium, Gifhorn
Juni 1994	Allgemeine Hochschulreife
1994 – 1995	Wehrdienst
1995 – 1999	Diplomstudiengang Psychologie an der Technischen Universität Braunschweig
April 1997	Vordiplom im Studiengang Psychologie
Mai 1999	Diplom im Fach Psychologie an der Technischen Universität Braunschweig
1999 – 2002	Doktorand am Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung, Leipzig
Seit Mai 2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Selbständigen Nachwuchsgruppe Prosodie am Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung, Leipzig

## **Selbständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, daß die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde und daß die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht worden sind.

André Szameitat  
Leipzig, den 3. Februar 2003

# Dissertationsbezogene bibliographische Daten

Szameitat, André Jörg

DIE FUNKTIONALITÄT DES LATERAL-PRÄFRONTALEN CORTEX  
FÜR DIE VERARBEITUNG VON DOPPELAUFGABEN

Universität Leipzig, Dissertation

182 Seiten, 210 Literaturangaben, 20 Abbildungen, 9 Tabellen

## Referat

Allgemein wird der lateral-präfrontale Cortex (LPFC) mit höheren kognitiven Funktionen, wie z. B. der Koordination von Aufgaben, Aufmerksamkeits-Steuerung und Arbeitsgedächtnis, in Verbindung gebracht. Da erhebliche Anforderungen an diese Funktionen entstehen, wenn zwei Aufgaben gleichzeitig bearbeitet werden müssen (Doppelaufgabe), sollte sich ein konsistenter Zusammenhang zwischen dem LPFC und der Doppelaufgaben-Verarbeitung nachweisen lassen. Bisher konnte jedoch nur ein Teil bildgebender und neuropsychologischer Studien solch einen Zusammenhang zeigen, so daß diese Annahme in der Literatur heftig umstritten ist.

Auf Basis dieser Kontroverse hatte die vorliegende Arbeit zunächst zum Ziel, die Funktionalität des LPFC für die Doppelaufgaben-Verarbeitung nachzuweisen. Wenn dies gelingt, sollte im Anschluß die Funktionalität und Charakteristik doppelaufgaben-relatierter kortikaler Areale weiter spezifiziert werden. Diese Ziele wurden mit dem Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode und der Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie umgesetzt. Im Detail wurden zwei schnell aufeinanderfolgend dargebotene dreifach Wahlreaktionsaufgaben, eine auditorische und eine visuelle, zu einer Doppelaufgabe kombiniert.

In vier Experimenten konnte gezeigt werden, daß der LPFC eine Funktionalität für die Verarbeitung von Doppelaufgaben besitzt. Cortikale Areale im Gyrus frontalis medius und entlang des Sulcus frontalis inferior wurden konsistent durch die zeitlich überlappende Verarbeitung zweier unabhängiger Aufgaben aktiviert. Darüber hinaus wurde in drei Experimenten nachgewiesen, daß eine Funktion dieser Areale in der Koordination der Aufgaben-Verarbeitung an einer kapazitätslimitierten Verarbeitungsstufe besteht. Im Detail konnten diese Areale mit der *Sicherstellung* und der *Umorganisation* der Verarbeitungs-Reihenfolge der Aufgaben assoziiert werden. Dieser Befund ist in Einklang mit einer Reihe kognitionspsychologischer Theorien, in denen die Aufgabenkoordination eine zentrale Anforderung bei der Verarbeitung von Doppelaufgaben darstellt. Schließlich wurde gezeigt, daß die doppelaufgaben-relatierten Areale im LPFC

graduelle Interferenz-Unterschiede durch graduelle Unterschiede in der Aktivierungsstärke reflektieren. Im Detail zeigten die Areale eine geringere Aktivierung mit abnehmender zeitlicher Aufgaben-Überlappung.

Somit konnte diese Arbeit die Funktionalität des LPFC für die Doppelaufgaben-Verarbeitung konsistent nachweisen. Des weiteren bieten die aktuellen Befunde eine Erklärungsmöglichkeit der konträren bisherigen Evidenz, da sie zeigen konnten, daß die zeitliche Aufgaben-Überlappung eine kritische Variable für die Identifikation doppelaufgaben-relatierter Areale ist. Darüber hinaus konnte erstmals die Funktionalität dieser Areale für die Verarbeitung von Doppelaufgaben spezifiziert werden.

## MPI Series in Cognitive Neuroscience

1. Anja Hahne  
Charakteristika syntaktischer und semantischer Prozesse bei der auditiven Sprachverarbeitung: Evidenz aus ereigniskorrelierten Potentialstudien
2. Ricarda Schubotz  
Erinnern kurzer Zeitdauern: Behaviorale und neurophysiologische Korrelate einer Arbeitsgedächtnisfunktion
3. Volker Bosch  
Das Halten von Information im Arbeitsgedächtnis: Dissoziationen langsamer corticaler Potentiale
4. Jorge Jovicich  
An investigation of the use of Gradient- and Spin-Echo (GRASE) imaging for functional MRI of the human brain
5. Rosemary C. Dymond  
Spatial Specificity and Temporal Accuracy in Functional Magnetic Resonance Investigations
6. Stefan Zysset  
Eine experimentalpsychologische Studie zu Gedächtnisabrufprozessen unter Verwendung der funktionellen Magnetresonanztomographie
7. Ulrich Hartmann  
Ein mechanisches Finite-Elemente-Modell des menschlichen Kopfes
8. Bertram Opitz  
Funktionelle Neuroanatomie der Verarbeitung einfacher und komplexer akustischer Reize: Integration haemodynamischer und elektrophysiologischer Maße
9. Gisela Müller-Plath  
Formale Modellierung visueller Suchstrategien mit Anwendungen bei der Lokalisation von Hirnfunktionen und in der Diagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen
10. Thomas Jacobsen  
Characteristics of processing morphological structural and inherent case in language comprehension

11. Stefan Kölsch  
Brain and Music: A contribution to the investigation of central auditory processing with a new electrophysiological approach
12. Stefan Frisch  
Verb-Argument-Struktur, Kasus und thematische Interpretation beim Sprachverstehen
13. Markus Ullsperger  
The role of retrieval inhibition in directed forgetting - an event-related brain potential analysis
14. Martin Koch  
Measurement of the Self-Diffusion Tensor of Water in the Human Brain
15. Axel Hutt  
Methoden zur Untersuchung der Dynamik raumzeitlicher Signale
16. Frithjof Kruggel  
Detektion und Quantifizierung von Hirnaktivität mit der funktionellen Magnetresonanztomographie
17. Anja Dove  
Lokalisierung an internen Kontrollprozessen beteiligter Hirngebiete mithilfe des Aufgabenwechselparadigmas und der ereigniskorrelierten funktionellen Magnetresonanztomographie
18. Karsten Steinhauer  
Hirnphysiologische Korrelate prosodischer Satzverarbeitung bei gesprochener und geschriebener Sprache
19. Silke Urban  
Verbinformationen im Satzverstehen
20. Katja Werheid  
Implizites Sequenzlernen bei Morbus Parkinson
21. Doreen Nessler  
Is it Memory or Illusion? Electrophysiological Characteristics of True and False Recognition
22. Christoph Herrmann  
Die Bedeutung von 40-Hz-Oszillationen für kognitive Prozesse

23. Christian Fiebach  
Working Memory and Syntax during Sentence Processing. A neurocognitive investigation with event-related brain potentials and functional magnetic resonance imaging
24. Grit Hein  
Lokalisation von Doppelaufgabendefiziten bei gesunden älteren Personen und neurologischen Patienten
25. Monica de Filippis  
Die visuelle Verarbeitung unbeachteter Wörter. Ein elektrophysiologischer Ansatz.
26. Ulrich Müller  
Die katecholaminerge Modulation präfrontaler kognitiver Funktionen beim Menschen
27. Kristina Uhl  
Kontrollfunktion des Arbeitsgedächtnisses über interferierende Information
28. Ina Bornkessel  
The Argument Dependency Model: A Neurocognitive Approach to Incremental Interpretation
29. Sonja Lattner  
Neurophysiologische Untersuchungen zur auditorischen Verarbeitung von Stimminformationen
30. Christin Grünewald  
Die Rolle motorischer Schemata bei der Objektrepräsentation: Untersuchungen mit funktioneller Magnetresonanztomographie
31. Annett Schirmer  
Emotional Speech Perception: Electrophysiological Insights into the Processing of Emotional Prosody and Word Valence in Men and Women
32. André Szameitat  
Die Funktionalität des lateral-präfrontalen Cortex für die Verarbeitung von Doppelaufgaben