

# **Struktur und neurophysiologische Grundlagen des visuellen Arbeitsgedächtnisses**

---

Dissertation zur Erlangung  
des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich 05, Psychologie  
und Sportwissenschaften  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
in Frankfurt am Main

von Harald Mohr  
aus Landau

Frankfurt am Main, 2006  
(D30)

Vom Fachbereich 5 Psychologie und Sportwissenschaften der Johann der Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan: Prof. Dr. H. Moosbrugger

Erstgutachterin: Prof. Dr. R. Ruxantra Sireteanu

Zweitgutachter: PD Dr. Dr. D. Linden

Datum der Disputation: 17. 01. 2007

## ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit, dass ich mich bisher keiner Doktorprüfung unterzogen habe.

Harald Mohr

## Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorgelegte Dissertation über "Struktur und neurophysiologische Grundlagen des visuellen Arbeitsgedächtnisses" selbständig angefertigt und mich anderer Hilfsmittel als der in ihr angegebenen nicht bedient habe, insbesondere, dass aus Schriften Entlehnungen, soweit sie in der Dissertation nicht ausdrücklich als solche mit Angabe der betreffenden Schrift bezeichnet sind, nicht stattgefunden haben.

Harald Mohr

<b>VORWORT.....</b>	<b>5</b>
<b>1. EINLEITUNG: DAS ARBEITSGEDÄCHTNIS UND SEINE NEUROPHYSIOLOGISCHEN GRUNDLAGEN.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Das Arbeitsgedächtnis .....</b>	<b>6</b>
1.1.1.    Komponenten des Arbeitsgedächtnisses.....	9
1.1.2.    Die zentrale Exekutive.....	9
1.1.3.    Struktur des visuellen Arbeitsgedächtnisses.....	12
1.1.4.    Zusammenfassung und Fragestellung der ersten Studie.....	23
<b>1.2. Neurophysiologische Basis des visuellen Arbeitsgedächtnisses .....</b>	<b>25</b>
1.2.1.    Anatomie des Frontallappens.....	25
1.2.2.    Visuelles Arbeitsgedächtnis und praefrontaler Kortex.....	26
1.2.3.    Ergebnisse bildgebender Studien.....	28
1.2.4.    Zusammenfassung und vorläufige Fragestellung der zweiten Studie .....	35
<b>2. STUDIE 1: FRAGESTELLUNG UND THESEN.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1. Materialspezifische Trennung Zentral-Exekutiver Prozesse? .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2. Thesen .....</b>	<b>40</b>
<b>3. STUDIE 1: METHODE .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1. Stichprobe.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2. Operationalisierung .....</b>	<b>41</b>
3.2.1.    Materialspezifische Ressourcenverteilung: Experimente 1-4.....	41
3.2.2.    Ressourcen des Haltens und Manipulierens: Experimente 5-6 .....	43
3.2.3.    Kontrollvariable: Ishihara-Test.....	44
<b>3.3. Versuchsaufbau und Ablauf .....</b>	<b>45</b>
3.3.1.    „Farbe & Orientierung“: Experiment 1 .....	45
3.3.2.    „Farbe & Orientierung“: Experiment 2 .....	46
3.3.3.    „Farbe & Orientierung“: Experiment 3 .....	46
3.3.4.    „Orientierung & Distanz“: Experiment 4 .....	47
3.3.5.    Ressourcen der Manipulation: Experiment 5.....	48
3.3.6.    Ressourcen des Haltens: Experiment 6.....	48
<b>3.4. Material und Stimuluskonstruktion.....</b>	<b>49</b>
3.4.1.    Konstruktion der Halbkreise.....	49
3.4.2.    Konstruktion der mittleren Distanz.....	50
3.4.3.    Konstruktion der Mischfarben .....	50
<b>3.5. Datensammlung .....</b>	<b>52</b>
<b>3.6. Hypothesen .....</b>	<b>53</b>
3.6.1.    Getrennte Ressourcen von „Farbe & Orientierung“ .....	53
3.6.2.    Gemeinsame Ressourcen von „Orientierung & Distanz“ .....	53
3.6.3.    “Halten vs. Manipulieren“ .....	53

<b>3.7.</b>	<b>Statistische Auswertung .....</b>	<b>53</b>
3.7.1.	Signaldetektionstheorie.....	54
3.7.2.	Optimale Stichprobengröße .....	56
<b>4.</b>	<b>STUDIE 1: RESULTATE .....</b>	<b>62</b>
4.1.	„Farbe & Orientierung“: Experiment 1 .....	62
4.2.	„Farbe & Orientierung“: Experiment 2.....	63
4.3.	„Farbe & Orientierung“: Experiment 3.....	63
4.4.	„Orientierung & Distanz“: Experiment 4 .....	64
4.5.	Ressourcen der Manipulation: Experiment 5 .....	65
4.6.	Ressourcen des Haltens: Experiment 6.....	66
<b>5.</b>	<b>STUDIE 1: DISKUSSION.....</b>	<b>73</b>
5.1.	„Farbe & Orientierung“: Getrennte Ressourcen .....	74
5.2.	„Orientierung & Distanz“: Gemeinsame Grundlagen.....	75
5.3.	„Halten vs. Manipulieren“: Einfluß der ZE.....	76
5.4.	Aufteilung des visuellen AG .....	77
5.5.	Ausblick auf Studie 2: Aufbau des FK.....	78
<b>6.</b>	<b>STUDIE 2: FRAGESTELLUNG UND THESEN.....</b>	<b>81</b>
6.1.	Materialspezifische Organisation des FK? .....	81
6.2.	Thesen .....	82
<b>7.</b>	<b>STUDIE 2: METHODE .....</b>	<b>83</b>
7.1.	<b>Funktionelle Magnetresonanztomographie.....</b>	<b>83</b>
7.1.1.	Physikalische Grundlagen.....	83
7.1.2.	Physiologische Grundlagen des fMRT .....	85
7.2.	Stichprobe.....	86
7.3.	<b>Operationalisierung .....</b>	<b>86</b>
7.3.1.	Halten von „Farbe & Orientierung“: Experiment 1 .....	87
7.3.2.	Manipulieren von „Farbe & Orientierung“: Experiment 2 .....	87
7.3.3.	Ishihara-Test .....	87
7.3.4.	Verhaltensdaten .....	87
7.3.5.	Infrarot-Okulographie .....	87
7.4.	Versuchsaufbau und Ablauf .....	88

<b>7.5.</b>	<b>Material und Stimuluskonstruktion.....</b>	<b>89</b>
<b>7.6.</b>	<b>Hypothesen .....</b>	<b>89</b>
7.6.1.	Materialspezifische Organisation des FK für Halten.....	90
7.6.2.	Materialspezifische Organisation des FK für Manipulieren.....	90
<b>7.7.</b>	<b>Messung .....</b>	<b>91</b>
<b>7.8.</b>	<b>Aufbereitung und Auswertung der fMRT- Daten.....</b>	<b>92</b>
7.8.1.	Statistische Gruppenanalyse .....	93
7.8.2.	Abbildungen der relativen Prädiktorbeiträge.....	94
7.8.3.	Superpositionsbilder .....	96
<b>8.</b>	<b>STUDIE 2: RESULTATE .....</b>	<b>98</b>
<b>8.1.</b>	<b>Verhaltensdaten und Augenbewegungen .....</b>	<b>98</b>
<b>8.2.</b>	<b>FMRT- Daten, Experiment 1.....</b>	<b>99</b>
8.2.1.	Enkodieren .....	99
8.2.2.	Delay .....	99
8.2.3.	Abruf.....	100
8.2.4.	„Was vs. Wo“ .....	100
<b>8.3.</b>	<b>FMRT-Daten, Experiment 2.....</b>	<b>102</b>
8.3.1.	Enkodieren .....	102
8.3.2.	Delay .....	103
8.3.3.	Abruf.....	103
8.3.4.	„Was vs. Wo“ .....	103
<b>8.4.</b>	<b>FMRT-Daten, „Halten vs. Manipulieren“.....</b>	<b>105</b>
8.4.1.	„Halten vs. Manipulieren“: Farbe.....	105
8.4.2.	„Halten vs. Manipulieren“: Winkel .....	106
<b>8.5.</b>	<b>“Random-effect”- Analyse .....</b>	<b>107</b>
<b>8.6.</b>	<b>„Single vs. Dual“ .....</b>	<b>108</b>
8.6.1.	Halten.....	108
8.6.2.	Manipulieren.....	109
<b>9.</b>	<b>STUDIE 2: DISKUSSION.....</b>	<b>129</b>
<b>9.1.</b>	<b>Aufgabenphasen.....</b>	<b>130</b>
<b>9.2.</b>	<b>Halten: „Was vs. Wo“ .....</b>	<b>131</b>
9.2.1.	Dissoziationen im FK .....	131
9.2.2.	Dissoziation in posterioren Arealen:.....	134
<b>9.3.</b>	<b>Manipulieren: „Was vs. Wo“.....</b>	<b>136</b>
9.3.1.	Dissoziationen im FK .....	136
9.3.2.	Posteriore Regionen.....	137
9.3.3.	Hemisphären .....	137

<b>9.4.</b>	<b>„Halten vs. Manipulieren“ .....</b>	<b>138</b>
<b>9.5.</b>	<b>„Single vs. Dual“ .....</b>	<b>140</b>
<b>9.6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>141</b>
<b>10.</b>	<b>ZUSAMMENFÜHRENDE DISKUSSION.....</b>	<b>145</b>
	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>148</b>
	<b>LITERATUR.....</b>	<b>153</b>
	<b>ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>164</b>
	<b>LEBENS LAUF.....</b>	<b>168</b>

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im neurophysiologischen Labor der Klinik für Psychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie des Frankfurter Universitätsklinikums.

Ohne die tatkräftige Unterstützung einer Reihe von Personen wäre die erfolgreiche Durchführung der Untersuchungen nicht möglich gewesen.

Danken möchte ich zunächst Frau Prof. Dr. Ruxandra Sireteanu. Sie hat nicht nur Materialien aus dem Institut für Psychophysik des Max-Planck-Institutes für die Untersuchung bereit gestellt und wertvolle Hinweise für die Erstellung der Arbeit gegeben, sondern auch mehrfach die Möglichkeit geboten, die Daten in einem größerem Kreis von Doktoranden vorzustellen und zu diskutieren.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. Dr. David Linden, der es durch seinen persönlichen Einsatz überhaupt erst möglich gemacht hatte, dass die notwendigen Ressourcen bereit gestellt und Freiräume gewährt wurden, die für das Gelingen der vorliegenden Arbeit absolut notwendig waren. Darüber hinaus hat er mich in allen Phasen der Untersuchung durch sein umfassendes Fachwissen unterstützt und beraten.

Ebenfalls danke ich den anderen Mitarbeitern im neurophysiologischen Labor, welche bei Schwierigkeiten und offenen Fragen geholfen haben, insbesondere Robert Bittner, Christoph Bledowski, Dr. Corinna Hänschel, Katrin Dallmann, Michael Lindner, Jutta Mayer, Viola Örtel, Dr. David Provulovic, Anna Rotarska-Jagiela, Ralf Schönmayr und Dr. Peter Uhlhaas.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Probanden bedanken. Sie durchstanden motiviert und konzentriert anstrengende und manchmal auch eintönige Testungen, die sich oft wiederholten und gaben mir oft noch im Anschluss daran wertvolle Hinweise zur Verbesserung des Designs.

## **1. Einleitung: Das Arbeitsgedächtnis und seine neurophysiologischen Grundlagen**

Die Organisation des visuellen Arbeitsgedächtnisses (AG) und dessen kortikalen Korrelate werden in der Forschungsgemeinde widersprüchlich diskutiert. Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, die Vorhersagen gegensätzlicher Theorien, welche sich in diesem Feld etabliert haben, zu überprüfen. Dazu war es notwendig, zwei getrennte Studien durchzuführen. Die erste basiert auf Verhaltensdaten, die zweite auf bildgebenden Verfahren.

In einem ersten Teil dieses Kapitels werden die allgemeinen Grundlagen des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley (1998) dargestellt, vor allem die Entwicklung des Konzeptes und der Aufbau des AG. In einem anschließenden Abschnitt werden Befunde zur Struktur des visuellen AG erläutert und die Fragestellung für Studie 1 abgeleitet. Abschließend werden Ergebnisse über die neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG dargestellt und die Fragestellung für Studie 2 begründet.

### **1.1. Das Arbeitsgedächtnis**

Die Dreiteilung des Gedächtnisses in ein sensorisches Register, ein Kurz- und ein Langzeitgedächtnis ist eine in der Psychologie übliche Gliederung, die durch das Gedächtnismodell von Atkinson und Shiffrin (1971) populär wurde. Diesem Modell zufolge werden Informationen zunächst parallel in einer Reihe von sensorischen Registern visueller, akustischer und haptischer Art (usw.) verarbeitet. Von dort wird das Material in einen Kurzzeitspeicher mit begrenzter Kapazität, ähnlich einem Flaschenhals, überführt. Der Kurzzeitspeicher stellt ein einheitliches System dar, in dem die Information per

Wiederholung („rehearsal“) gehalten werden kann. Er fasst nur die Information, die gerade (bewusst) genutzt wird.

Die Leistungen des KZG wurden häufig mit Testungen der einfachen Gedächtnisspanne überprüft. Dazu werden initial Stimuli dargeboten, z.B. Wörter, welche enkodiert werden (Enkodierphase). In einer Zeitspanne ohne weiteren Input erfolgt das Halten der Stimuli (Delay). Danach sollen die enkodierten Stimuli wieder reproduziert werden (Abrufphase). Als Gedächtnisspanne gilt die Itemzahl der längsten Folge, die nach einmaliger Darbietung noch reproduziert werden kann.

Der Kurzzeitspeicher steht in Verbindung mit einem permanenten Speicher, dem Langzeitgedächtnis (LZG). Seine unbegrenzte Kapazität und die hohe Speicherdauer stellen den Hauptunterschied zum Kurzzeitgedächtnis dar. Das LZG wird gegenwärtig grob in einen expliziten (bewusste Erfahrungen) und einen impliziten (unbewusste Erfahrungen) Speicher unterteilt.

Im expliziten Langzeitspeicher werden sowohl spezifische, persönliche Erfahrungen (episodisches Gedächtnis) als auch allgemeines, semantisches Wissen für lange Zeit behalten. Beim impliziten Gedächtnis handelt es sich um automatische Verhaltensänderungen wie z.B. klassisches Konditionieren.

Hinweise für eine Trennung des LZG und des KZG wurden durch verschiedene Studien erbracht. Zu den stärksten Argumenten gehören die Befunde zum so genannten „recency-effect“. Die Probanden haben die Aufgabe, eine Liste mit unzusammenhängenden Wörtern zu lernen, um sie anschließend frei wiederzugeben. Beim unmittelbaren Reproduzieren zeigt sich, dass die letzten Items, welche präsentiert wurden, besonders gut reproduziert werden. Dieses Phänomen wird „recency-effect“ genannt. Wenn allerdings die Reproduktion um 10-15 Sekunden verzögert wird und man den Probanden am Wiederholen des Wortmaterials hindert, dann tritt der „recency-effect“ nicht auf. Früher präsentierte Items können aber ohne Einbuße reproduziert werden. Die letzten Items der

Wortliste scheinen in einer Art Kurzzeitspeicher behalten zu werden, die anderen Items in einem Langzeitspeicher (Glanzer und Cunitz, 1966). Auch neuropsychologische Fallstudien erbrachten schon früh Hinweise auf eine KZG-LZG Trennung. Zangwill (1946) berichtete von einem amnestischen Patienten, welcher normale Leistungen für das kurzfristige Speichern von Information aufwies, aber deutliche Beeinträchtigungen im längerfristigen Behalten von Information besaß.

Allerdings wurden Befunde von Dual-Aufgaben bekannt, welche gegen das Konzept eines einheitlichen KZG sprachen (Baddeley, 1990). Bei Dual-Aufgaben wird eine primäre Gedächtnisaufgabe simultan mit einer zweiten Aufgabe bearbeitet. Eine deutliche Leistungsver schlechterung beim gleichzeitigen Bearbeiten der Aufgaben gegenüber den Einzelbedingungen (Interferenz) ist ein Hinweis darauf, dass die Lösung der beiden Aufgaben die gleichen Ressourcen beansprucht. Beim Ausbleiben von Interferenz werden getrennte Ressourcen postuliert.

In einer Dual-Studie von Baddeley (1990) wurden Probanden mit Kurzzeitgedächtnis-belastenden und -ausfüllenden Gedächtnisspannenversuchen und gleichzeitig mit einer Entscheidungsaufgabe konfrontiert. Der Versuch führte keineswegs zu starken Leistungseinbußen bei mindestens einer dieser Aufgaben wie es nach dem Gedächtnismodell von Atkinson und Shiffrin zu erwarten gewesen wäre. Zwar stieg die Bearbeitungszeit deutlich in Abhängigkeit von der in der Gedächtnisspannenaufgabe verwendeten Anzahl von Items, die Fehlerquote blieb jedoch konstant gering. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass das Kurzzeitgedächtnis nicht auf Basis einer einheitlichen Ressource operiert, sondern dass es aus unabhängigen Subsystemen mit getrennten Ressourcen besteht.

### **1.1.1. Komponenten des Arbeitsgedächtnisses**

Baddeley (1992) definierte das Arbeitsgedächtnis als ein System für das kurzfristige Halten und Manipulieren von Information, welche für weitere komplexe kognitive Prozesse wie Verstehen, Lernen und Schlussfolgern benötigt wird (Baddeley, 1992). Auf Basis oben genannter Befunde und weiterer Untersuchungen entwickelten Baddeley und Hitch (1974) ein Konzept des Arbeitsgedächtnisses das aus drei separaten Subsystemen besteht: Einer zentralen Exekutive (ZE), welche als Aufmerksamkeitskontrollsystem arbeitet und zweier Sklavensysteme, nämlich der phonologischen Schleife und dem visuell-räumlichen Notizblock. Die phonologische Schleife hält und manipuliert phonologisch basierte Informationen und der visuell-räumliche Notizblock hält und manipuliert visuelle Bilder. Die Unabhängigkeit dieser Subsysteme wurde meist per Dual-Aufgaben und Interferenz-Studien dokumentiert (Baddeley, 1998).

### **1.1.2. Die zentrale Exekutive**

Die zentrale Exekutive überwacht und kontrolliert die Aktivität beider Sklavensysteme und ist involviert, wenn Informationen manipuliert werden (Baddeley und Hitch, 1974). Ursprünglich wurde sie als ein einheitliches System konzipiert (Baddeley und Hitch, 1974). Allerdings war dieses Konzept zu vage und global, so dass es notwendig war, Subprozesse zu identifizieren. In einem ersten Versuch adaptierte Baddeley (1986) das „supervisory attentional system“ (SAS) von Norman und Shallice (1986). Nach Norman und Shallice lassen sich zwei Modi der Handlungskontrolle unterscheiden:

1. Durch die Umgebung gesteuerte, automatisch ablaufende Handlungsschemata („contention scheduling“, CS) und
2. Das SAS. Dieses System ist bewusst kontrollierbar, aber auch wesentlich langsamer als das CS. Es ist immer dann gefordert, wenn für bestimmte Situationen keine Handlungsschemata zur Verfügung stehen.

Es war jedoch bald notwendig, die Prozesse der bewussten Handlungskontrolle weiter zu unterteilen. Baddeley (1996) unterscheidet vier Prozesse:

1. Die Koordination zweier Aufgaben, welche synchron bearbeitet und durch Dual-Aufgaben erfasst werden.
2. Das Verändern von Abrufstrategien („shifting“), wie sie bei dem zufälligen Generieren von Buchstaben- oder Zahlenreihen („random generation“) verlangt werden.
3. Die Inhibition von störender oder nutzloser Information, wie sie z.B. im Farbe-Wort-Interferenztest (Stroop-Test) benötigt wird, und
4. Die Fähigkeit, Informationen aus dem Langzeitgedächtnis zu halten und zu manipulieren.

Eine zusätzliche Funktion, welche häufig mit der ZE in Verbindung gebracht wird ist das „updating processing“. Dies beschreibt, dass Informationen im Arbeitsgedächtnis im Hinblick auf die externe Umwelt oder interne LZG-Repräsentationen kontinuierlich erneuert werden (Morris und Jones, 1990). Eine Aufgabe, welche in Zusammenhang damit stehen soll, ist die „n-back-Aufgabe“.

Empirische Hinweise für eine Trennung von ZE-Prozessen erbrachten Miyake et al. (2000). Sie berechneten eine konfirmatorische Faktorenanalyse über verschiedene ZE-Aufgaben (Turm von Hanoi, Wisconsin Cardsorting Test WCST, Dual-Aufgaben, „random generation“, etc.). Es wurden drei Faktoren gefunden, welche nur mäßig miteinander korrelierten. Die Autoren ordneten den drei Faktoren unterschiedliche ZE-Prozesse zu („shifting“, „updating“ und Inhibition). Es konnte z.B. dokumentiert werden, dass der WCST vor allem mit „shifting“ in Zusammenhang stand.

Weitere Autoren versuchten mit Hilfe bildgebender Verfahren die neuronalen Grundlagen von ZE-Prozesse zu identifizieren (siehe Überblicksartikel Collette und Linden, 2002). Collette und Linden kamen zu dem Schluss, dass zentral-exekutive Prozesse ein Netzwerk aus präfrontalen und parietalen Regionen benötigen, wobei einige Areale fast immer bei

unterschiedlichsten ZE-Prozessen aktiviert werden (Brodmannsches Areal (BA) 46/9, 10 und Abschnitte des anterioren Cingulum), wohingegen andere Areale nur mit spezifischen ZE-Prozessen in Verbindung stehen. Diese Ergebnisse sprechen sowohl für gemeinsame als auch für getrennte kortikale Ressourcen von ZE-Prozessen. Eine ausführliche Darstellung der neurophysiologischen Grundlagen der ZE findet sich im zweiten Teil der Einleitung (neurophysiologische Grundlagen des AG).

### *Die phonologische Schleife*

Die phonologische Schleife ist das System für das Halten und Manipulieren von sprachbasierter Information (Baddeley, 1998). Sie ist die bestuntersuchte Komponente des Arbeitsgedächtnisses. Es wird angenommen, dass sie aus zwei Subsystemen besteht:

-Einem zeitlicher Speicher, in dem akustische oder sprachbasierte Information für 2-3 Sekunden gehalten werden kann

-einem „rehearsal“-System, welches das längere Behalten von phonologischer Information über subvokale Artikulation ermöglicht (Baddeley, 1990). Evidenzen für ein phonologisches „rehearsal“-System konnten per phonologischen Ähnlichkeitseffekt, Wortlängeneffekt und artikulatorischer Suppression erbracht werden (Baddeley, 1990). Der phonologische Ähnlichkeitseffekt basiert beispielsweise auf der Beobachtung, dass eine Reihe von phonologisch ähnlichen Buchstaben (V, G, T, P, B, C) schlechter behalten werden als unähnliche Buchstaben (X, W, K, R, Y; Conrad, 1964).

Nach Baddeley, Gathercole und Papagno (1998) könnte die evolutionäre Funktion der phonologischen Schleife darin bestehen, dass sie den Spracherwerb erleichtert, indem die Repräsentation eines neuen Wortes aufrechterhalten wird und so das Lernen optimiert. So konnte bei Kindern ein Zusammenhang zwischen der Kapazität der phonologischen Schleife und der Fähigkeit eine Zweitsprache zu erlernen demonstriert werden (Gathercole und Baddeley, 1989). Untersuchungen mit fMRT lassen den Schluss zu, dass

sprachdominante temporale und parietale Areale für das phonologische Subsystem zuständig sind, inferiore frontale Gebiete entsprechen dagegen eher dem „rehearsal“-System (Paulesu et al., 1993).

#### *Der visuell-räumliche Notizblock*

Der visuell-räumliche Notizblock (VRN) hält und manipuliert visuelle, bildhafte und nonverbale Informationen für eine kurze Zeitspanne. Der VRN ist weit weniger gut erforscht als die phonologische Schleife (siehe auch Logie, 1995). Es ist unbekannt, wie die visuelle Information codiert wird (gibt es ein nonverbales Äquivalent zum phonologischen Speicher?) und wie die Information gehalten wird (gibt es ein nonverbales Äquivalent zum „rehearsal“-System?). Ursprünglich wurde der VRN als einheitliches System angesehen. Allerdings häuften sich mit der Zeit die Hinweise, dass auch das VRN in Subkomponenten zerlegt werden kann (Pickering, 2001).

Im Kommenden werden Studien vorgestellt, welche eine Aufteilung des visuellen AG anhand unterschiedlicher Kriterien nahe legen. Es gibt Hinweise, dass man den VRN anhand des zu merkenden Materials (Objekt und Raum) und nach den stattfindenden Prozessen (Halten und Manipulieren) unterteilen kann. Die Begriffe VRN und visuelles Arbeitsgedächtnis werden nun synonym verwendet.

#### **1.1.3. Struktur des visuellen Arbeitsgedächtnisses**

An dieser Stelle werden Befunde zum Aufbau des visuellen AG dargelegt, welche nahe legen, dass dieses kognitive System getrennte Ressourcen, basierend auf den perzeptuellen Verarbeitungsbahnen, besitzt.

Aus diesem Grunde werden in einem ersten Abschnitt die Grundlagen der perzeptuellen Analyse knapp erläutert und ihre Auswirkungen auf das visuelle AG anhand empirischer

Befunde dargelegt. Anschließend wird ein alternatives Konzept zur Aufteilung des visuellen Arbeitsgedächtnisses vorgestellt. Dieses postuliert getrennte Subsysteme auf der Basis passiver (Halten) oder aktiver (Manipulieren) Prozesse, letztere sollen Ressourcen der ZE benötigen. Abschließend wird die Befundlage zu beiden Konzepten integriert und eine vorläufige Fragestellung skizziert.

*Perzeptuelle Bahnen: „Was vs. Wo“*

Das Wahrnehmen visueller Information findet auf der Basis getrennter subkortikaler und kortikaler Bahnen statt. Die Aufteilung der Verarbeitung erfolgt schon in der Retina, welche Ganglienzellen zweier unterschiedlicher Größen enthält:

- a) Große Zellen, magnozellular oder Typ M genannt und
- b) kleinere Zellen, welche als parvozellulär oder Typ P bezeichnet werden.

M-Zellen verfügen über weit verzweigte Dendritenbäume und haben somit große rezeptive Felder. Sie sind sensitiv für Luminanzunterschiede. Die P-Zellen verfügen über ein schmaleres rezeptives Feld und sind auf Farbwahrnehmung spezialisiert.

Die Axone aller Ganglienzellen bilden zusammen den Sehnerv. Dieser projiziert von der Retina zum Corpus geniculatum laterale. Der Corpus geniculatum laterale enthält sechs Zellkörperschichten. Die beiden am weitesten ventral liegenden Schichten werden magnozelluläre Schichten genannt. Sie erhalten Input von den M-Zellen der Retina. Die vier dorsal gelegenen Schichten werden als parvozelluläre Schicht zusammengefasst, welche ihre Information von den P-Zellen der Retina erhält.

Vom Corpus geniculatum laterale projizieren die parvo- und magnozellulären Schichten in unterschiedliche Bereiche den primären visuellen Kortex (Livingstone und Hubel, 1987).

Empirische Resultate weisen darauf hin, dass auf kortikaler Ebene eine zweite Aufspaltung der perzeptuellen Verarbeitung vorliegt. Ungerleider und Mishkin (1982) unterscheiden einen dorsalen und einen ventralen Pfad. Der dorsale Pfad verläuft von V1 über V2 und

den Temporallappen in parietale Regionen (Sakata et al., 1997). Er ist vor allem mit der Analyse von Bewegungen, räumliche Beziehungen und visuell geleiteten Handlungen betraut („Wo“, Goodale, 1998).

Der ventrale Pfad verläuft von V1 über V2 und V4 zu inferioren, temporalen Arealen. Im ventralen Pfad findet die Verarbeitung von Farbe, Form, Oberflächeninformation und Objektidentität statt. Im Folgenden wird Information, welche im ventralen Pfad verarbeitet wird, auch visuelle Information oder „Was“ genannt.

Im primären visuellen Kortex findet eine Vermischung der subkortikalen P- und M-Bahnen statt, allerdings ist ihre Verbindung zu den kortikalen dorsalen und ventralen Bahnen nicht gleichförmig. Die dorsale Bahn erhält größtenteils Input vom M-System, während die ventrale Bahn zu gleichen Teilen magno- und parvozellulären Input erhält (Lachica et al., 1992; Maunsell und Newsome, 1987).

### *„Was vs. Wo“: Neuropsychologische Befunde*

Neuropsychologische Fallberichte stützen die Annahme, dass die Trennung der perzeptuellen Verarbeitung in eine ventrale und eine dorsale Bahn auch für höhere kognitive Prozesse des Arbeitsgedächtnisses erhalten ist.

Erste Hinweise zugunsten dieser Spekulation wurden durch den Fall FH geliefert (Farah et al., 1988). FH war ein 36-jähriger Mann, der einen Hirnschaden durch einen Autounfall erlitten hatte. Räumliche Vorstellungsaufgaben bearbeitete er auf normalem Niveau. Bei Aufgaben zu Farben-, Formen- oder Größenvergleichen traten allerdings Leistungsminderungen auf. In der Literatur wird dem Fall FH, der eine selektive Beeinträchtigung von visuellen Gedächtniskomponenten besaß, häufig der Fall EP gegenübergestellt (Luzzatti et al., 1998). EP war eine 74-jährige Hausfrau, die sich im frühen Stadium einer Alzheimererkrankung befand und Objekte bei Vorstellungsaufgaben gut visualisieren konnte (z.B. „Hat Person XY einen Bart?“), aber starke

Beeinträchtigungen in räumlichen Leistungen des Arbeitsgedächtnisses (mentale Rotation, Wiedergabe räumlicher Positionen etc.) hatte. Die genannten Einbußen trafen nicht nur das Halten von Material im visuellen AG, sondern auch aktive Leistungen wie das Generieren eines Bildes in der Vorstellung (Formisano et al., 2002).

Ähnliche Dissoziationen fanden auch Grossi et al. (1993) an Alzheimerpatienten. Einer der Patienten wies normale Leistungen im „corsi-block test“ auf (dient der Erfassung räumlicher Leistungen des AG), während Defizite in der Bearbeitung des „visual-matrix test“ vorlagen (dieser soll visuelle Leistungen des AG erheben). Bei einem zweiten Probanden konnte das umgekehrte Leistungsprofil gefunden werden („Doppeldissoziation“). Auch Carlesimo et al. (2001) berichten von einem Fall MV, welcher Beeinträchtigungen im räumlichen Arbeitsgedächtnis aufwies, aber nicht in Arbeitsgedächtnisaufgaben für Formen und verbalem Material.

Die oben genannten Studien geben Hinweise darauf, dass zwei getrennte, materialspezifische Subsysteme im visuellen Arbeitsgedächtnis existieren. Allerdings wurden häufig unterschiedliche Tests mit unbekannter Validität zur Messung der visuellen und räumlichen Komponenten des Arbeitsgedächtnisses verwendet. Della Sala et al. (1999) versuchten deshalb, die visuelle Komponente des visuellen AG mit möglichst geringen räumlichen Anteil zu untersuchen und konstruierten dafür den „visual-pattern test“. Geringe Korrelationen zwischen diesem Test und dem „corsi-block test“ (räumlich) legten nahe, dass das neue Verfahren nur im geringen Umfang räumliche Information erfasste. Es konnten bei neuropsychologische Patienten Doppel-Dissoziationen in der Bearbeitungsleistung beider Tests dokumentiert werden. Zusätzlich validierten die Autoren die Tests mit Interferenzaufgaben an Gesunden. Die Leistungen beider Tests wurden jeweils durch verschiedene Arten von Interferenz (räumliche vs. visuelle) beeinträchtigt. Es ist den Autoren somit gelungen, durch ein experimentell validiertes Verfahren eine

Trennung von räumlichen und visuellen Komponenten des visuellen AG zu dokumentieren.

*„Was vs. Wo“: Experimentalpsychologische Befunde*

Im Nachstehenden werden Studien präsentiert, welche mit Hilfe von Dual- und Interferenzaufgaben eine materialspezifische Dissoziation des visuellen AG dokumentierten. Dual-Aufgaben erfordern das gleichzeitige Bearbeiten zweier Aufgaben, während Interferenzaufgaben in Kombination einer Aufgabe mit irrelevanten Reizen bestehen, z.B. Luminanzflickern.

In einer kombinierten Dual- und Interferenzstudie von Logie und Marchietti (1991) konnte eine Doppeldissoziation von räumlichen und visuellen Komponenten demonstriert werden: Räumliche Interferenz (Armbewegung während des Intervall des Haltens) führte zu schlechteren Leistungen in räumlichen, aber nicht in visuellen Arbeitsgedächtnisaufgaben. Umgekehrt führte das Präsentieren von irrelevanten Bildern während des Halteintervalls zu einer verminderten Leistung in visuellen, aber nicht in räumlichen Arbeitsgedächtnisleistungen.

Logie (1995) entwickelte auf der Basis dieser Befundlage ein Modell des visuellen AG, in dem eine visuelle und eine räumliche Komponente getrennt voneinander existieren. Er verknüpfte diese materialspezifische Aufteilung mit Prozessen, durch die visuelles Material bearbeitet werden kann: Die visuelle Komponente wurde als passiver Speicher konzipiert, die räumliche dagegen als eine aktive Komponente die zuständig für das „rehearsal“, Bewegungsplanung und die Manipulation ist. Diese Aufteilung wurde in Analogie zu der Aufteilung der phonologischen Schleife entwickelt, welche einen passiven, phonologischen Speicher und eine aktive Komponente für das „rehearsal“ besitzt (Baddeley, 1990).

Die Befunde der räumlichen und visuellen Doppel-Dissoziation konnten von Tresch, Sinnamon und Seamon (1993) und Della Sala et al. (1999, siehe oben) bestätigt werden. Tresch et al. entdeckten, dass das Halten von Positionen im Raum durch gleichzeitiges Bearbeiten einer Bewegungsaufgabe beeinträchtigt wurde, jedoch nicht durch das Bearbeiten einer Farbdiskriminationsaufgabe. Umgekehrt wurde das Behalten von Objekten nicht durch die konkurrierende Bewegungsaufgabe gestört, aber durch die gleichzeitig zu lösende Farbdiskriminationsaufgabe.

Auch mittels einfacher Interferenzaufgaben fand sich eine Objekt-Raum Dissoziation im visuellen AG. Kessels, Postma und De Haan (1999) benutzten zwei Interferenztechniken, um jeweils die visuelle oder die räumliche Komponente des visuellen AG zu beeinflussen: Farbflickern für die visuelle und Luminanzflickern für die räumliche Komponente. Die Probanden hatten den Auftrag, sich jeweils Objekte oder räumliche Anordnungen zu merken. Das Farbflickern führte zu schlechteren Leistungen im Objektgedächtnistest, aber nicht im räumlichen Gedächtnistest. Das räumliche Gedächtnis war dafür durch das Luminanzflickern beeinträchtigt, während die Leistungen im Objektgedächtnistest unbeeinflusst blieben. Auch Hecker und Mapperson (1997) konnten einen spezifischen Interferenzeffekt von Farb- oder Luminanzflickern auf das Halten von Objekten und Positionen dokumentieren.

Die bisher berichteten Experimente zur Aufteilung des visuellen AG nach Materialart berücksichtigten nicht, dass auch Evidenzen für getrennte Prozesse des Haltens und Manipulierens im AG existieren, was im nachstehenden Kapitel ausführlicher erläutert wird. Manipulieren ist ein aktiver Prozess welcher im Gegensatz zum Halten auf zentral-exekutiven Ressourcen basiert und das Transformieren des gehaltenen Materials verlangt (Bruyer und Scailquin, 1998). Die Mehrzahl der Studien verwendeten Paradigmen, die nur das Halten von Informationen verlangten (Della Sala et al., 1999; Hecker und Mapperson, 1997; Kessels, Postma und De Haan, 1999; Tresch, Sinnamon und Seamon, 1993).

Nur in einer Studie wurde eine materialspezifische Dissoziation von aktiven, zentral-exekutiv basierten Prozessen mittels einer „n-back-Aufgabe“ untersucht (Vuontela et al., 1999). Die „n-back-Aufgabe“ verlangt das kontinuierliche Beobachten einer Reihe von Reizen. Eine positive Antwort ist erforderlich, wenn der aktuell präsentierte Stimulus mit dem vorigen, n-ten Stimulus übereinstimmt. Die „n-back-Aufgabe“ geht bei einem  $n > 0$  über das reine Halten von Information hinaus. Die Aufgabe soll dann zentral-exekutive Komponenten beinhalten, da die Probanden kontinuierlich die Informationen im AG aktualisieren müssen („stimulus updating“, Baddeley, 1996).

In der „n-back-Aufgabe“ der Autoren wurden Farbstimuli oder räumliche Stimuli (Positionen) verwendet. Im Delay der Aufgabe wurde entweder Interferenz per Darbietung eines Farbstimulus oder eines räumlichen Stimulus erzeugt. Farbinterferenz führte zu schlechteren Leistungen in der Farbaufgabe, aber nicht in der räumlichen Bedingung. Räumliche Interferenz führte zu schlechteren Leistungen in der räumlichen Bedingung, aber nicht in der Farbbedingung. Die Studie weist darauf hin, dass die Trennung „visuell-räumlich“ nicht nur für das Halten von Information von Bedeutung sein könnte, sondern auch für zentral-exekutiv basierte, aktive Prozesse im AG.

Allerdings kann mit dem gewählten Interferenzparadigma diese Vermutung nicht eindeutig bestätigt werden. Der Leistungseinbruch in den Interferenzbedingungen könnte durch ein Problem des Haltens des Materials entstanden sein, analog zu den Ergebnissen der Studie von Kessels, Postma und De Haan (1999) und nicht durch eine Störung aktiver Prozesse. Des Weiteren verlangt die „n-back-Aufgabe“ keine domänenspezifische Transformation der gemerkten Objekte, sondern eher ein kontinuierliches Aktualisieren ihrer Position in einer Reihe von Stimuli. Darüber hinaus liegen Evidenzen vor, dass es mit der „n-back-Aufgabe“ nicht möglich ist, „Was“ und „Wo“ Material getrennt zu erfassen, da auch die Bearbeitung nicht-räumlicher „n-back-Aufgabe“n räumliche Lösungsstrategien beinhalten soll (Meegan et al., 2004).

*Prozesse: „Halten vs. Manipulieren“*

Die Unterscheidung zwischen Halten und Manipulieren von Information im AG geht auf Baddeley (1990) zurück. Vecchi, Monticellai und Cornoldi (1995) entwickelten dieses Konzept weiter. Die Autoren bezeichnen Prozesse des Haltens als passive Prozesse. Passive Aufgaben verlangen von den Probanden keine Transformation des zu speichernden Materials. Zum Beispiel können Probanden sich Farben merken und einige Sekunden später beurteilen, ob eine Testfarbe identisch mit einer der vorher präsentierten Farben ist. Die Lösung der Aufgabe erfordert nicht, das zu behaltende Material zu transformieren. Die Autoren stellen den passiven Prozessen aktive Prozesse gegenüber. Bei aktiven Aufgaben ist es notwendig, das gespeicherte Material nach dem Enkodieren zu transformieren, so verlangen mentale Rotationsaufgaben von den Probanden beispielsweise eine räumliche Veränderung des enkodierten Materials. Die Autoren nahmen an, dass der Unterschied zwischen passiven und aktiven Aufgaben gradueller Natur ist.

An dieser Stelle werden zunächst Ergebnisse von neuropsychologischen Testbefunden an Patienten und Gesunden, welche Evidenzen für eine Trennung von Prozessen des Haltens und des Manipulierens im visuellen AG erbrachten, vorgestellt und diskutiert. Der zweite Abschnitt stellt Resultate aus experimentalpsychologischen Studien zur Dissoziation beider Prozesse vor.

*„Halten vs. Manipulieren“: Neuropsychologische Befunde*

Ältere Modelle des Arbeitsgedächtnisses postulierten, dass das Halten und Manipulieren auf gemeinsamen Ressourcen basiert (Baddeley, 1986). Empirische Unterstützung für diese Annahme erbrachte eine Untersuchung von Baddeley (1990): Die Manipulation von visuell-räumlicher Information interferierte mit deren Halten.

Der Fall MG von Morton und Morris (1995) erbrachte allerdings Hinweise gegen einheitliche aktive und passive Ressourcen. MG war eine Frau, die ein Hämatom in parietalen Arealen erlitt. In neuropsychologischen Tests zeigte sich, dass MG eine Beeinträchtigung visuell-räumlicher Manipulationsprozesse aufwies, wie z.B. mentale Rotation nach Cooper und Shepard (1973). Keine Leistungsminderung trat in Aufgaben auf, welche das Halten von Information verlangten (z.B. „corsi-block test“, Gedächtnis für Gesichter). Morton und Morris vertraten die Ansicht, dass die gefundenen Beeinträchtigungen im Widerspruch zu der Annahme stehen, dass sich Halten und Manipulieren gemeinsame Ressourcen im Arbeitsgedächtnis teilen. Der Befund unterstützt dagegen Konzepte, welche getrennte Prozesse des Haltens und des Manipulierens postulieren, wie z.B. das Modell von Kosslyn (1994).

Gefundene Doppel-Dissoziationen in der Bearbeitung aktiver und passiver Aufgaben bei zwei Kindern mit nonverbaler Lernstörung („nonverbal learning disability“, NVLD), legen zusätzlich eine prozessspezifische Aufteilung des AG nahe (Cornoldi et al., 2000). Eines der Kinder war in der Lage, sich visuelle und räumliche Informationen für eine kurze Zeitspanne zu merken (Halten), aber es zeigte Defizite in der unmittelbaren Manipulation der Information (z.B. mentale Rotation). Bei dem anderen Kind lag der umgekehrte Befund vor: Es konnte direkt dargebotene visuell-räumliche Information manipulieren, aber nicht über eine kurze Zeitspanne behalten

Neuropsychologische Testbefunde an blind geborenen Probanden lieferten zusätzliche Hinweise für eine Trennung der beiden Prozesse. Blinde sind fähig, ihre mentale, bildhafte Vorstellung zu benutzen, z.B. sich die räumliche Position von Kuben vorzustellen und zu behalten. Vecchi (1998) beobachtete, dass keine Unterschiede zwischen Blinden und Normalsichtigen in der Bearbeitungsleistung von passiven visuellen Vorstellungsaufgaben zu finden waren. Bei aktiven Vorstellungsaufgaben, welche Manipulationsprozesse verlangten, schnitten die normalsichtigen Probanden jedoch deutlich besser ab.

Auch aus Studien zu Geschlechtsunterschieden und Altersunterschieden werden Resultate von getrennten passiven und aktiven Prozessen berichtet (Vecchi und Girelle, 1998; Vecchi und Cornoldi, 1999). Männliche Probanden erzielten in aktiven Aufgaben (mental ein Bild generieren und einem Pfad folgen) bessere Leistungen im Vergleich zu weiblichen Probanden, während in der Bearbeitung von passiven Aufgaben (Erinnern an Positionen in einer Matrix) keine Unterschiede zu verzeichnen waren.

Befunde zum selektiven Abbau von aktiven visuell-räumlichen Leistungen bei erhaltenen passiven visuell-räumlichen Fähigkeiten im Alterungsprozess, weisen zusätzlich auf prozessspezifisch organisierte Ressourcen hin (Vecchi und Cornoldi, 1999). Die Autoren untersuchten drei verschiedene Altersgruppen (Junge: 19-29; junge Alte: 60-70, Alte: 72-84). Die Gruppe der Alten (72-84) unterschied sich nur in der Leistung in aktiven, visuell-räumlichen Aufgaben von der Gruppe der jungen Alten (60-70), nicht aber in passiven, visuell-räumlichen Aufgaben.

### *„Halten vs. Manipulieren“: Experimentalpsychologische Befunde*

Duff und Logie (1999) demonstrierten mit einer Dual-Aufgabe, dass aktive (räumliche Koordinationsaufgabe) und passive Prozesse (das Merken von Formen) im visuellen Gedächtnis nicht interferieren. Dieser Befund legt nahe, dass getrennte Ressourcen für die beiden Prozesse existieren. In der verwendeten Aufgabe war allerdings die Prozessart mit der Materialart (Objekt vs. Raum) konfundiert. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Ergebnisse auf einer Objekt-Raum Dissoziation basieren.

Selektive Beeinträchtigungen in Arbeitsgedächtnisleistungen durch die Gabe von Ketamin unterstützen die Annahmen einer Aufteilung des AG nach Prozessart (Honey et al., 2003). Die Autoren konnten demonstrieren, dass eine Injektion von Ketamin im Vergleich zu Placebo zu einer deutlichen Leistungsverschlechterung der Manipulation, aber nicht des Haltens von verbaler Information führte

In weiteren Studien gelang es, zu demonstrieren, dass Halten und Manipulieren unterschiedlichen Ausmaßes auf Ressourcen der ZE zugreifen (Bruyer und Scailquin, 1998; Duff, 2000, Miyake et al., 2000). Bruyer und Scailquin überprüften, ob passive (das Merken von Bildern) und aktive Prozesse (Generierung visueller Vorstellungen, mentale Rotation) gemeinsame Ressourcen mit der zentralen Exekutiven teilen. Ein Dual-Paradigma wurde verwendet indem die Probanden aktive und passive Aufgaben einzeln oder in Kombination mit ZE-Aufgaben durchführten („random generation“). Passive Aufgaben interferierten nicht mit „random generation“, dagegen wurde die Leistung in aktiven Aufgaben bei synchronen „random generation“ deutlich schlechter. Im Unterschied zu passiven scheinen aktive Prozesse mit Unterstützung der zentralen Exekutiven zu operieren.

Ähnliche Befunde wurden von Duff (2000) dokumentiert. Die Probanden bearbeiteten in einer Dual-Aufgabe eine passive phonologische und eine passive visuelle Aufgabe synchron. Im Einklang mit dem Modell von Baddeley (1990) konnte keine Interferenz gefunden werden, was die für die Existenz zweier getrennter Systeme des Haltens von phonologischer und visueller Information spricht (phonologische Schleife vs. VRN). Interferenz entstand allerdings während dem gleichzeitigen Bearbeiten von aktiven verbalen und aktiven visuellen Aufgaben. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei der Manipulation von Information im Arbeitsgedächtnis gemeinsame, zentral-exekutive Ressourcen benötigt werden.

Ergebnisse von Miyake et al. (2000) stützen zusätzlich die Annahme eines engen Zusammenhanges zwischen zentral-exekutiven Funktionen und der Manipulation. Die Autoren berechneten eine konfirmatorische Faktorenanalyse über Testleistungen, welche zentral-exekutive, visuelle und räumliche Fähigkeiten erfassten. Je stärker eine Aufgabe aktive Elemente beinhaltete, desto stärker waren zentral-exekutive Prozesse in die Aufgabe involviert, in maximalem Ausmaß bei der Konstruktion eines räumlichen

Vorstellungsbildes und in minimalem Ausmaß während der bloßen räumlichen Wahrnehmung.

#### **1.1.4. Zusammenfassung und Fragestellung der ersten Studie**

Zum Aufbau des visuellen AG existieren eine Vielzahl an Studien, welche sowohl eine Aufteilung nach Materialart („Was vs. Wo“) als auch nach Prozessart („Halten vs. Manipulieren“) nahe legen. Aktive Prozesse wie das Manipulieren von Information im visuellen AG scheinen im Gegensatz zum passiven Halten auf zentral-exekutiven Ressourcen zu beruhen (Bruyer und Scailquin, 1998; Miyake et al., 2000), wobei die Involvierung der ZE und der Unterschied zwischen Halten und Manipulieren vermutlich gradueller Art ist.

Die meisten aussagekräftigen Studien, welche eine materialspezifische Aufteilung des visuellen AG untersuchten, beschränkten sich auf Paradigmen, die das Halten/Speichern von Information verlangten (z.B. Della Sala et al., 1999; Tresch, Sinnamon und Seamon, 1993). Interpretierbare Befunde zur Trennung von Manipulationsprozessen nach Materialart wurden bisher nur von wenigen neuropsychologischen Fallstudien erbracht (Luzatti et al., 1998).

Es konnte somit demonstriert werden, dass die Aufteilung der visuellen Wahrnehmung in eine ventrale und dorsale Bahn auch für höhere kognitive Prozesse wie das Halten von Information im visuellen AG erhalten ist. Offen bleibt allerdings die Frage, ob diese Trennung auch für aktive Prozesse wie das Manipulieren von Information im visuellen AG bestehen bleibt.

Experimentalpsychologische Untersuchungen zu getrennten Ressourcen für das Manipulieren von „Was“ und „Wo“ Information benötigen Paradigmen, in denen die Manipulation beider Informationsarten valide erfasst werden können. Ein solches Paradigma existiert bisher nur für räumliche Information (z.B. mentale Rotation), ein

valides Paradigma für die Manipulation ventraler Information wurde in bisherigen Studien nicht dokumentiert.

Die neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG wurden in den letzten Jahren dank der Entwicklung bildgebender Verfahren (PET, SPECT, fMRT) intensiv untersucht. Die Studien behandelten auch in diesem Forschungsfeld die Frage, ob die neurophysiologischen Grundlagen des AG nach Materialart („Was vs. Wo“) oder nach Prozessart („Halten vs. Manipulieren“) organisiert sind.

## **1.2. Neurophysiologische Basis des visuellen Arbeitsgedächtnisses**

Im vorigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass die Ressourcenverteilung des visuellen AG für Prozesse und Materialarten in wesentlichen Punkten noch ungeklärt ist. Diese Befunde stammen größtenteils aus der Forschungsrichtung der experimentellen Psychologie und der klinischen Neuropsychologie. Interessanterweise hat sich in den kognitiven Neurowissenschaften eine ähnliche Debatte über die neurophysiologischen Ressourcen und Grundlagen des Arbeitsgedächtnisses entwickelt. Viele Studien erbrachten deutliche Hinweise darauf, dass der frontale Kortex (FK) eine zentrale Rolle für die Bewältigung von Arbeitsgedächtnisaufgaben spielt (z.B. Bauer und Fuster, 1976). Aus diesem Grund wird die Anatomie dieser Hirnregion knapp in einem ersten Teil skizziert. Danach werden konkurrierende Theorien über die funktionelle Spezialisierung des FK im Hinblick auf das AG erläutert. Abschließend wird die Fragestellung der zweiten Studie begründet.

### **1.2.1. Anatomie des Frontallappens**

Der Frontallappen umfasst das gesamte Kortexgewebe anterior des Sulcus centralis (Abbildung 1). Er besteht aus mehreren funktionell getrennten Regionen: (a) dem motorischen Kortex, (b) dem praemotorischen Kortex und (c) dem praefrontale Kortex (PFK).

Der motorische Kortex entspricht dem Gyrus praecentralis, der das Areal 4 einnimmt. Er ist zusammen mit anderen Arealen in den Prozess der Willkürbewegung eingebunden. Der Gyrus praecentralis weist eine somatotopische Gliederung auf. Die Brodmannareale 6 und 8 werden dem praemotorischen Kortex zugeordnet. Aus evolutionsbiologischer Sicht hat sich das laterale praemotorische Areal beim Menschen ausgedehnt und umfasst das motorische Sprachzentrum (Broca-Sprachzentrum, Areal 44).

Der PFK beinhaltet diejenigen Areale des Frontallappens, welche sich rostral des praemotorischen Kortex bis zum Frontalpol erstrecken. Der praefrontale Kortex kann in drei Regionen untergliedert werden:

Dorsolateraler praefrontaler Kortex (DLPFK, Areal 9 und 46),

ventrolateraler praefrontaler Kortex (VLPFK, Areal 11, 44, 45 und 47) und

mediofrontaler Kortex (Areal 25 und 32).

Der praefrontale Kortex gilt als Endpunkt der perzeptuellen Verarbeitung der dorsalen und ventralen Bahn. Projektionen aus parietalen Regionen, dem Sulcus temporalis superior und dem Cingulum enden im DLPFK. Temporalen Gebiete, z.B. visuelle Regionen des inferioren Temporallappens, projizieren in den VLPFK.

### **1.2.2. Visuelles Arbeitsgedächtnis und praefrontaler Kortex**

Zwei wichtige Experimente an Affen dokumentierten die zentrale Rolle des lateralen FK für das Arbeitsgedächtnis. Bauer und Fuster (1976) konnten durch experimentell verursachte Schädigungen des Sulcus principalis Beeinträchtigungen in der Bearbeitung von AG-Aufgaben erzeugen, welche mit steigender Gedächtnisspanne zunahmen. Eine weitere Studie konnte mittels Einzelzelleableitung demonstrieren, dass Neuronen im DLPFK während des Delays einer AG-Aufgabe anhaltend aktiv sind (Fuster und Alexander, 1976). Es wurde angenommen, dass die anhaltende Aktivität der Neuronen eine Brücke zwischen dem Stimuli, z.B. dem Ort eines Lichtblitzes, und der zeitlich verzögerten Antwort, z.B. das Ausführen einer Sakkade zur Position des Lichtblitzes, darstellt.

Auf der Grundlage weiterer Tierstudien entstanden zwei konkurrierende Ansätze über die funktionelle Gliederung des FK: Die domänenspezifische Theorie und die prozessspezifische Theorie.

*Die domänspezifische Theorie*

Die domänspezifische Theorie ist der Annahme, dass der FK nach Art des Materials organisiert ist (Goldman-Rakic, 1987). Der VLPFK soll mit dem Halten und Manipulieren von Objekten (Form, Farbe und Textur, „Was“) in Beziehung stehen und der DLPFK hingegen mit dem Halten und Manipulieren von räumlicher Information („Wo“).

Experimentelle Bestätigungen dieser Theorie wurden vor allem an Studien mit Primaten gewonnen. So dokumentierten Wilson, Scalaidhe und Goldman-Rakic (1993), dass Zellen ventral des Sulcus principalis während des Delays einer AG-Aufgabe aktiv waren, in welcher das Halten von Objekten verlangt wurde. Dorsal gelegene Zellen zeigten dagegen anhaltende Aktivität im Delay bei räumlichen AG-Aufgaben wie das Merken von Positionen. Die domänspezifische Theorie erweitert das Konzept der getrennten perzeptuellen Bahnen (Ungerleider und Mishkin, 1982) auf höhere kognitive Prozesse des Haltens und Manipulierens von Information im Arbeitsgedächtnisses.

*Die prozessspezifische Theorie*

Die prozessspezifische Theorie postuliert eine alternative Aufteilung des FK. Die funktionelle Spezialisierung des VLPFK und des DLPFK erfolgt nicht auf der Basis des zu erinnernden Materials, sondern auf Grundlage des durchgeführten Prozesses (Petrides, 1994). Der VLPFK soll nach diesem Ansatz verantwortlich für das Halten von Information sein. Dagegen soll der DLPFK komplexere Prozesse wie das Überwachen, das Planen und das Manipulieren von Information im visuellen AG unterstützen.

Auch für diese Theorie fanden sich empirische Evidenzen. Petrides (1995) konnte dokumentieren, dass Läsionen im DLPFK bei Affen zu einer schlechteren Leistung in Aufgaben des „self-ordering“ führten (erfordert das Überwachen und Aktualisieren von Inhalten des AG) jedoch nicht in „delayed-matching“ Aufgaben (verlangt das bloße Halten

von Information im AG). Defizite in Aufgaben des „self-ordering“ wurden auch bei Patienten mit Läsionen des DLDPFK beobachtet (Owen et al., 1990).

### **1.2.3. Ergebnisse bildgebender Studien**

Die Untersuchung des Arbeitsgedächtnisses hat durch die Entwicklung bildgebender Untersuchungsmethoden einen starken Aufschwung erhalten. Mit Hilfe dieser Verfahren ist es möglich, die Aktivität unterschiedlicher kortikaler Areale während des Ablaufs psychologischer Prozesse zu erheben. Die meisten Untersuchungen zum Arbeitsgedächtnis wurden mit Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) durchgeführt. Lokale Konzentrationsänderungen von Positronen emittierenden Radioisotopen können durch PET quantitativ erfasst werden. Dagegen ist das fMRT sensibel für die Blutoxygenierung im Hirngewebe, die durch lokale neuronale Aktivität beeinflusst wird („blood oxygenation level dependent“ = BOLD, Ogawa et al., 1990). Die zeitliche und räumliche Auflösung des fMRT ist wesentlich besser als die des PET, so dass die Mehrzahl der hier berichteten Studien auf fMRT basieren.

Das Ziel vieler Untersuchungen war es, eine Entscheidung zwischen domän- und prozessspezifischen Theorien herbeizuführen. Die Befundlage ist allerdings uneinheitlich. Im Folgenden wird versucht, aus den bisher widersprüchlichen Befunden einen Untersuchungsansatz abzuleiten, der eine mögliche Antwort auf die funktionelle Organisation des FK geben kann. Dazu werden einleitend Studien vorgestellt, welche Aktivierungen im FK für das Halten der Materialarten „Was“ und „Wo“ erfassten. Anschließend werden Experimente präsentiert, welche die Spezialisierung des FK für das Manipulieren der beiden Materialarten untersuchten. Experimente, in denen Prozesse des Haltens und Manipulierens kontrastiert wurden, werden im abschließenden Teil dargestellt.

*Halten: „Was vs. Wo“*

Eine Reihe von Studien bestätigten die Vorhersagen der domänspezifischen Theorie. So fanden Courtney et al. (1998), dass Regionen um den SFI (links) über das Delay einer AG-Aufgabe signifikant stärker für das Halten von Gesichtern („Was“) im Vergleich zum Halten von räumlicher Information („Wo“) aktiv waren. Ein umgekehrtes Bild fand sich im Sulcus frontalis superior (SFS), anterior zum frontalen Augenfeld (FAF, bilateral). Diese Region war in größerem Umfang mit dem Halten von räumlicher Information verbunden.

Weitere Studien replizierten, dass ventral gelegene Regionen im FK (links) beim Halten von Gesichtern und anderer Objektinformation aktiviert wurden (Belger et al., 1998; Courtney et al., 1997; McCarthy et al., 1996; Munk et al., 2002; Sala, Rama und Courtney, 2003). Auch der Befund, dass der DLPFK/prämotorische Kortex bilateral mit dem Halten von räumlicher Information assoziiert ist, konnte von anderen Studien bestätigt werden (Courtney et al., 1996; Jonides et al., 1993; Munk et al., 2002).

Allerdings traten auch Ergebnisse auf, welche nicht im Einklang mit den Annahmen der domänspezifischen Theorien standen. Baker et al. (1996) fanden in einer PET-Untersuchung stärkere rechtshemisphärische Aktivierung im DLPFK für das Halten von Positionen („Wo“) und stärkere linkshemisphärische Aktivierung im DLPFK für das Halten von Objekten („Was“). Smith und Jonides (1995) kontrastierten in einer PET-Studie das Halten von Objekten und das Halten von räumlicher Information. Die Autoren konnten keine dorso-ventrale Dissoziation nach Art des Materials finden. Die Areale, welche stärker während der räumlichen Aufgabe aktiviert wurden, waren der rechte VLPFK, der rechte praemotorische Kortex und der rechte posteriore Areale. Linke parietale und inferior temporale Regionen waren stärker während des Haltens von Objekten aktiviert.

Um die widersprüchliche Befundlage zu sortieren, analysierten D'Esposito et al. (1998) die bestehenden bildgebenden AG-Studien. Die Autoren projizierten die Ergebnisse der Untersuchungen auf ein standardisiertes Gehirn und kamen zu dem Schluss, dass keine Evidenzen für eine dorso-ventrale Raum-Objekt Dissoziation vorlagen. Stattdessen postulierten sie eine hemisphärische Organisation des FK: Das Halten von nicht-räumlicher Information würde zu links- und das Halten von räumlicher Information zu rechtshemisphärischen Aktivierungen führen.

Eine neuere Metaanalyse wurde von Wager und Smith (2003) mit 60 fMRT und PET-Studien durchgeführt. Auch diese Autoren fanden keine Hinweise für eine dorso-ventrale Raum-Objekt Dissoziation des FK. Eine materialspezifische Dissoziation konnte nur in posterioren Arealen gefunden werden. Auch Fletcher und Henson (2001) kamen in ihrem Überblicksartikel zu dem Ergebnis, dass die Befundlage zu der Aufteilung des FK uneinheitlich sei und am ehesten für eine hemisphärische Dissoziation spricht.

In Affen-Studien konnte häufig mittels Einzelzelleitungen eine materialspezifische Organisation des FK beobachtet werden (z.B. Wilson, Scalaidhe und Goldman-Rakic, 1993). Studien mit bildgebenden Verfahren am Menschen erbrachten sehr uneinheitliche Resultate. Mehrere Ursachen für die widersprüchliche Befundlage zwischen den Ergebnissen von Affen-Studien und den Ergebnissen am Menschen sind möglich.

Viele Studien die keine materialspezifische Aufteilung des FK fanden, verwendeten PET als Untersuchungsinstrument, welches nur eine begrenzte zeitliche und räumliche Auflösung besitzt und somit kaum die Delay-Aktivität von perzeptueller Aktivität der Enkodierungs- und Abrufphase trennen kann.

Die Diskrepanz zwischen Affen- und Menschen-Studien könnte auch durch die verbale Kodierung der Experimentalreize bei menschlichen Probanden verursacht worden sein. Dieses Problem könnte durch eine Unterdrückung von sprachlichen Prozessen während des

Bearbeitens von visuellen AG-Aufgaben kontrolliert werden (z.B. über gleichzeitige artikulatorische Suppression).

Ein weiteres Problem der durchgeführten Studien liegt in der geringen Spezifität des verwendeten Materials. Ventrale Information („Was“) wurde in vielen Studien mit Hilfe von Objekten, wie z.B. abstrakte Formen, operationalisiert. Allerdings beinhalten Objekte auch räumliche Aspekte. Sala, Rämä und Courtney (2003) konnten die Vorhersagen der domänspezifischen Theorie am Menschen bestätigen, wenn sie das Ausmaß räumlicher Information in Objekten kontrollierten. Superiore dorsolaterale Regionen waren für das Halten von räumlicher Information (Ort) aktiv, inferiore dorsolaterale Areale wurden beim Halten von Häusern aktiviert, welche viele räumliche Details enthielten. Areale im VLPFK waren mit dem Halten von Gesichtern assoziiert, welche in geringeren Umfang räumliche Information beinhalteten.

Auch Yee, Sala und Courtney (2003) konnten mittels Farbstimuli und abstrakten Formen demonstrieren, dass die häufig als Objektinformation verwendeten abstrakten Formen räumliche Informationen beinhalten und im Kontrast zu Farbinformation dorsale Areale aktivieren. Das Halten der Farbstimuli führte dagegen zu Aktivierungen des ventrolateralen FK. Diese Ergebnisse demonstrieren, dass die Vorhersagen der domänspezifischen Theorie durchaus bestätigt werden können, wenn eine gründliche Kontrolle der Validität der verwendeten Materialien („Was“ oder „Wo“) durchgeführt wird. Dieser Sachverhalt wurde in vielen Studien vernachlässigt.

Die Validität der verwendeten Stimuli könnte auch durch eine Kontrolle der subkortikalen Grundlagen der ventralen und dorsalen Bahn erhöht werden. Es ist bekannt, dass sowohl der dorsale als auch der ventrale Pfad in unterschiedlichem Maße Input von den subkortikalen M- und P-Kanälen erhält (Lachica et al., 1992; Maunsell und Newsome, 1987). Luminanzunterschiede (M) werden für die räumliche und die Bewegungsanalyse verwendet. Informationen des ventralen Pfades basieren stärker auf Unterschiede der

Farbabstufung (P). Möglicherweise ist ein Teil der uneinheitlichen Befundlage durch die Verwendung von Materialien entstanden, welche nicht im Hinblick auf Luminanz- und Farbabstufungen ausbalanciert wurden.

*Manipulieren: „Was vs. Wo“*

Das Manipulieren von Inhalten des AG umfasst eine Reihe von Prozessen, welche auf ZE-Ressourcen basieren (Bruyer und Scailquin, 1998). Eine größere Anzahl von Paradigmen wurde entwickelt, um unterschiedliche ZE-Prozesse erfassen zu können (Baddeley, 1996). In fMRI-Studien wurden unter anderem „n-back-Aufgabe“, Dual-Aufgaben, „Turm von London“ usw. verwendet (Collette und Linden, 2002). In vielen Studien ließ sich eine Aktivierung von frontalen und parietalen Arealen bei ZE-Aufgaben entdecken (Collette und Linden, 2002). Nach meinem Wissen existieren bisher nur zwei Studien, in denen das Manipulieren von Objekt- und Rauminformation gegeneinander kontrastiert wurde. Beide Studien benutzten ein „n-back“ Paradigma.

Owen et al. (1998) verwendeten eine 2-back Aufgabe. Unterschiede in den kortikalen Aktivierungen zwischen den räumlichen Stimuli und Objekten fanden sich vor allem in posterioren Regionen, aber nicht in Arealen des FK. Beide Materialarten aktivierten bilateral den DLPFK.

Nystrom et al. (2000) kontrastierten verbales Material, Objekte und räumliche Information in einer 0-, 1-, 2- und „3-back-Aufgabe“. Sie fanden zwischen den verschiedenen Materialarten weder eine hemisphärische noch eine dorso-ventrale Dissoziation.

Die Befunde beider Experimente widersprechen einer dorso-ventralen Raum-Objekt Dissoziation des FK während der Manipulation, wie sie von Goldman-Rakic (1987) vorgeschlagen wurde. Die gefundene Aktivierung des DLPFK für das Manipulieren (Owen et al., 1998) steht dagegen in Einklang mit den Vorhersagen der prozessspezifischen Theorie.

Allerdings weisen Resultate anderer Autoren darauf hin, dass es nicht möglich ist, mit der „n-back-Aufgabe“ unterschiedliche Materialarten getrennt zu erfassen. Sowohl räumliche als auch nicht-räumliche „n-back-Aufgabe“n sollen räumliche Anforderungen beinhalten (Meegan et al., 2004). Die Ergebnisse beider Studien sind aus diesem Grunde im Hinblick auf eine materialspezifische Spezialisierung des FK nur eingeschränkt interpretierbar.

### *„Halten vs. Manipulieren“*

Nachfolgend werden Studien vorgestellt, welche eine Kontrastierung von Halten und ZE-Prozessen (z.B. Manipulieren) vornahmen. Im ersten Teil werden Befunde, die mit unterschiedlichen Paradigmen gewonnen wurden, dargestellt. Zur Berechnung von Kontrasten zwischen Halten und ZE-Prozessen wurden häufig Dual-Aufgaben verwendet. Deren Ergebnisse werden im zweiten Teil dieses Kapitels näher erläutert und diskutiert.

Die Vorhersage einer dorso-ventralen Dissoziation des FK auf Basis der Prozesse konnte durch mehrere Untersuchungen bestätigt werden. So konnten Klingberg et al. (1997) mittels PET eine dorso-ventrale Manipulieren-Halten-Dissoziation im FK demonstrieren. Die Probanden führten einen „delayed matching to sample task“ durch, in welchem sie sich entweder Farben und Muster merken mussten (Halten) oder eine komplexere Aufgabe bearbeiteten (z.B. wiederholter Aufgabenwechsel). Beide Bedingungen aktivierten den VLPFK, aber nur letztere zusätzlich den DLPFK. Weitere PET-Studien unterstützen diesen Befund. So entdeckten Owen, Evans und Petrides (1996), dass das einfache Behalten von Bewegungen im Raum zu bilateralen Aktivierungen im VLPFK führt. Dagegen konnte bilaterale Aktivierung im DLPFK dokumentiert werden, wenn die räumliche Aufgabe zusätzlich Überwachungs- und Manipulationsanforderungen stellte.

Allerdings fanden sich auch Ergebnisse, welche den Grundannahmen der prozessspezifischen Theorie widersprechen. Glahn et al. (2001) testeten, welche FK-Areale bei steigender räumlicher Gedächtnisbelastung involviert waren und kontrastierten

zusätzlich in einem zweiten Experiment das Halten von räumlicher Information mit der Manipulation von räumlicher Information (mentale Rotation). Die Autoren evaluierten, dass Areale des SFS mit dem Halten von räumlicher Information verbunden waren. Mit ansteigender Gedächtnisbelastung stieg die Aktivierung des SFS an und es wurden zusätzliche Regionen im VLPFK rekrutiert. Auch in der Manipulationsbedingung konnten Aktivierungen des DLPFK dokumentiert werden. Die Befunde der Autoren stehen nicht im Einklang mit der prozessspezifischen Theorie, da der DLPFK sowohl beim Halten als auch beim Manipulieren von räumlicher Information aktiviert war.

Eine weitere Forschungsrichtung operationalisierte ZE-Prozesse durch Dual-Aufgaben. Nach Baddeley (1996) stellt das gleichzeitige Bearbeiten zweier Aufgaben eine Funktion der zentralen Exekutive dar.

In einer Dual-Studie von D'Esposito et al. (1995) aktivierte keine der beiden Einzelaufgaben (räumliche und semantische) den DLPFK. Nur das synchrone Bearbeiten in der Dual-Bedingung führte zu aktiven Clustern bilateral im DLPFK. Dieser Befund stützt die prozessspezifische Theorie. Allerdings konnte das Ergebnis der Autoren nur selten repliziert werden (Szameitat et al., 2002) während anderen Studien die Wiederholung der Ergebnisse nicht gelang (Adcock et al., 2000; Bunge et al., 2000; Klingberg, 1998). Just et al. (2001) dokumentierten sogar gegenteilige Effekte: In der Dual-Bedingung wurden keine zusätzlichen DLPFK-Areale aktiviert, sondern es traten geringere kortikale Aktivierungen im Vergleich zur Summe der Aktivierungen der Einzelbedingungen auf. Die Autoren interpretierten den Sachverhalt so, dass eine biologische Grenze für die maximale kortikale Aktivierung und die Aufmerksamkeitszuwendung existiere.

Linden und Collete (2002) folgerten in ihrem Überblicksartikel, dass die meisten Studien zu Dual-Aufgaben keine Resultate erbrachten, welche die Sichtweise der prozessspezifischen Theorie unterstützen würden.

Die Vorhersagen der prozessspezifischen Theorie über eine dorso-ventrale Manipulieren-Halten-Dissoziation des FK ließen sich somit nicht immer bestätigen. Insbesondere die Resultate in Dual-Aufgaben widersprechen häufig den Vorhersagen der prozessspezifischen Theorie. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass die Einzelaufgaben schon in unterschiedlichem Masse Manipulationsprozesse beinhalteten, so dass im Kontrast zur Dualbedingung keine zusätzlichen Aktivierungen im DLDPFK zu verzeichnen waren. Experimente, die beide Prozesse kontrastieren wollen, müssen in einem ersten Schritt per Verhaltensdaten dokumentieren, dass die Prozesse des Manipulierens auf ZE-Ressourcen basieren, solche des Haltens aber nur in geringen Umfang (z.B. mittels konkurrierendem „random generation“).

### **1.2.4. Zusammenfassung und vorläufige Fragestellung der zweiten Studie**

Es fanden sich in einer Reihe von Studien deutliche Hinweise dafür, dass der FK eine zentrale Rolle für das visuelle AG einnimmt. Die Debatte in den Neurowissenschaften drehte sich bald um ähnliche Fragen wie die Diskussion in der experimentellen Psychologie. Erfolgt die Ressourcenverteilung im AG auf Basis von Materialarten oder auf der Grundlage von Prozessen?

Seit längerer Zeit stehen sich konkurrierende Modelle gegenüber, welche eine Aufteilung des FK nach Materialtyp (domänenspezifische Theorie, Goldman-Rakic, 1987) oder nach Prozessart (prozessspezifische Theorie, Petrides, 1994) postulieren.

Bildgebende Untersuchungen am Menschen über die Organisation des FK haben widersprüchliche Resultate hervorgebracht. Es existieren Ergebnisse, welche die domänenspezifische Theorie bestätigenden (z.B. Courtney et al., 1997; 1998; Munk et al., 2002), jedoch konnten diese Resultate nicht immer repliziert werden (siehe Überblicksarbeit Wager und Smith, 2003).

Oft fand sich nur eine materialspezifische Lateralisierung des FK (Baker et al., 1996). Auf der anderen Seite existieren Befunde, welche für eine prozessspezifische Aufteilung des FK sprechen (D'Esposito, 1995; Owen, Evans und Petrides, 1996), obwohl auch diese Annahme in vielen Studien nicht repliziert wurde (siehe auch Überblicksarbeit von Collette und Linden, 2002).

Die uneinheitliche Befundlage könnte einerseits durch verbales Rekodieren des visuell-räumlichen Materials, durch unterschiedliche Untersuchungsmethoden (PET vs. fMRT) oder durch die Verwendung von „Was“-Stimuli mit starken räumlichen Aspekten bedingt sein (z.B. abstrakte Formen, siehe Ergebnisse von Courtney et al., 2003, Yee, Sala und Courtney, 2003). Es ist auch möglich, dass eine mangelnde Kontrolle der Luminanz oder der Farbabstufungen der Stimuli (P- und M-Bahnen) zu einer Vermischung der Aktivität der ventralen und dorsalen Bahn geführt hat. Zukünftige Studien müssen aus diesem Grund das verwendete Untersuchungsmaterial besser validieren (Kontrollaufgaben mit artikulatorischer Suppression, isoluminante Stimuli etc.).

Eine weitere Schwachstelle vieler bisheriger Experimente liegt in der schlechten Trennung der Prozesse des Haltens und Manipulierens. Experimente, die beide Prozesse gegeneinander kontrastieren wollen, müssen in einem ersten Schritt dokumentieren, dass die Prozesse des Manipulierens auf Basis von ZE- Ressourcen operieren (Bruyer und Scailquin, 1998). Prozesse des Haltens sollten dagegen weitgehend unabhängig von ZE-Ressourcen sein (Bruyer und Scailquin, 1998). Dies kann z.B. über konkurrierendes „random generation“ getestet werden (Baddeley, 1966).

Aus der bisherigen Befundlage lässt sich somit diese vorläufige Fragestellung formulieren: Besteht eine materialspezifische dorso-ventrale Dissoziation des FK oder ist der FK auf der Grundlage von Prozessen organisiert?

## Einleitung

Um eine Entscheidung zwischen beiden konkurrierenden Theorien zu fällen ist es notwendig, ein Paradigma zu entwickeln, welches das Halten und Manipulieren von Objekt- und Rauminformation erfasst. Alle vier Bedingungen (Halten von Objekten, Halten von räumlicher Information, Manipulieren von Objekten und Manipulieren von räumlicher Information) müssten gegeneinander kontrastiert werden. Keine Studie hat dies bisher versucht, da kein objektbezogenes Manipulationsparadigma zur Verfügung stand. Eine Beantwortung der Frage über die funktionelle Struktur des FK setzt somit die Entwicklung eines objektbezogenen Manipulationsparadigmas voraus.

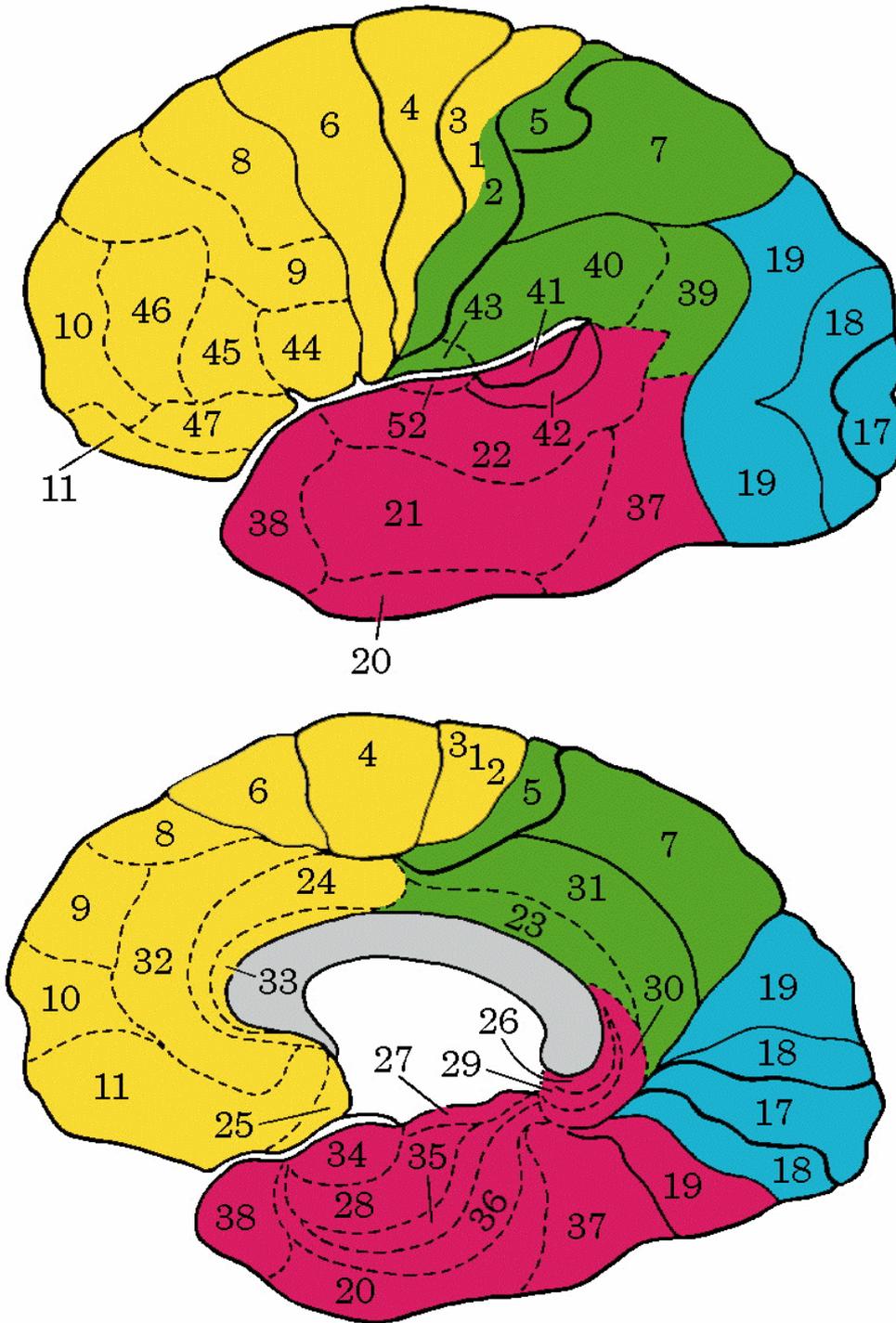


Abbildung 1

Cytoarchitektonische Felder des Kortex nach Brodmann

(Quelle: [www.appliedneuroscience.com](http://www.appliedneuroscience.com))

## **2. Studie 1: Fragestellung und Thesen**

Die übergeordnete Fragestellung der Gesamtstudie beschäftigt sich mit der Ressourcenverteilung im visuellen AG nach Material („Was und Wo“) und Prozess („Halten und Manipulieren“) und den damit korrelierten neurophysiologischen Grundlagen.

Die Fragestellung entwickelte sich vor dem Hintergrund der Ergebnisse von Verhaltensstudien (z.B. Logie und Marchietti, 1991), neuropsychologischen Fallberichten (z.B. Farah et al., 1988) und Experimenten mit bildgebenden Verfahren (z.B. Courtney et al., 1997).

### **2.1. Materialspezifische Trennung Zentral-Exekutiver Prozesse?**

Ergebnisse von Verhaltensstudien sprechen für eine Aufteilung des visuellen Arbeitsgedächtnisses nach Material („Was“ und Wo) und Prozess (Halten und Manipulieren). In einer Reihe von Studien konnte dokumentiert werden, dass das Halten von Material des ventralen und dorsalen Pfades auf gesonderten Ressourcen basiert (Della Sala et al., 1999).

Bisher wurde kein valides Experiment durchgeführt, welches untersuchte, ob eine Trennung visueller Verarbeitungsprozesse in eine ventrale und eine dorsale Komponente auch für höhere kognitive Prozesse wie das Manipulieren erhalten bleibt. Die Fragestellung für das erste Experiment lautet wie folgt:

Basieren Prozesse der Manipulation von ventralen („Was“) und dorsalen („Wo“) Material auf getrennten Ressourcen?

## **2.2. Thesen**

Studie 1 hatte zum Ziel, eine Trennung von Manipulationsprozessen im visuellen AG nach Informationsart in eine „ventrale“ („Was“) und eine „dorsale“ („Wo“) Komponente per Verhaltensdaten zu dokumentieren.

Aufbauend auf der Beobachtung, dass sich die Perzeption und das Halten visueller Information in eine ventrale und dorsale Komponente trennen lässt, wird die Annahme vertreten, dass diese Dissoziation auch für höhere kognitive Prozesse der Manipulation erhalten bleibt.

Eine reine „ventrale“ Manipulationsaufgabe, welche sich nicht mit einer „dorsalen“ Aufgabe überschneidet und welche nicht sprachlich rekodiert wird, lässt sich allerdings schwer erzeugen. Das Verändern von Objektinformation oder Gesichtern in einer Aufgabe führt zwangsläufig zu räumlichen Variationen. Um räumliche Komponenten in der Aufgabe so gering wie möglich zu halten wurde die ventrale Manipulationsbedingung über das Mischen von Farben operationalisiert. Farbinformation wird schon auf subkortikaler Ebene von Bewegungsinformation getrennt verarbeitet (parvozelluläre Kanäle) und das mentale Mischen von Farben beinhaltet kaum räumliche Information.

Die Farben in den Aufgaben ähnelten sich oft sehr stark, um eine verbale Lösung der Aufgabe zu erschweren (Beispiel: Grün und Blau mischen, als Lösungen wurden verschiedene Stufen von Grünblau dargeboten). Im folgenden Methodenteil wird die Operationalisierung der Stimuli differenzierter dargestellt.

### **3. Studie 1: Methode**

Die vorliegenden Experimente sind konstruiert worden, um zu untersuchen, ob Prozesse der Manipulation auf materialspezifisch getrennten Ressourcen basieren (Experimente 1-4). Zwei zusätzliche Experimente wurden zur Kontrolle der untersuchten Prozesse konstruiert (Experimente 5 und 6). Mit ihnen sollte überprüft werden, ob sich Prozesse der Manipulation qualitativ von denen des Haltens unterscheiden.

#### **3.1. Stichprobe**

In Experiment 1 wurden 31 Probanden untersucht (11 Männer, Alter Mittelwert  $M = 27$ , Standardabweichung  $SD = 5.3$ ). Elf Probanden nahmen an Experiment 2 teil (6 Männer,  $M = 27.5$ ,  $SD = 2.38$ ) und 30 in Experiment 3 (10 Männer,  $M = 27.5$ ,  $SD = 6$ ). Experiment 4 wurde von 22 Probanden bearbeitet (7 Männer,  $M = 24.8$ ,  $SD = 9.2$ ). In Experiment 5 und 6 wurden jeweils 30 Probanden untersucht (Experiment 5: 10 Männer,  $M = 26.4$ ,  $SD = 6.1$ , Experiment 6: 12 Männer,  $M = 26.2$ ,  $SD = 3.5$ ). Alle Probanden waren normalsichtig oder korrigiert normalsichtig. Störungen des Farbsinns konnten nicht dokumentiert werden (Ishihara, 2001).

#### **3.2. Operationalisierung**

Um eine mögliche Aufteilung der Ressourcen des visuellen AG nach Materialart zu untersuchen, wurden 6 verschiedene Experimente konstruiert, welche im folgenden näher beschrieben werden.

##### **3.2.1. Materialspezifische Ressourcenverteilung: Experimente 1-4**

Die Experimente 1-4 wurden entworfen, um eine materialspezifische Ressourcenverteilung bei Prozessen der Manipulation zu dokumentieren. Darstellungen der Paradigmen finden

sich in Abbildung 2. Die Experimente 1-3 basieren auf einer ventralen („Was“) und dorsalen („Wo“) Manipulationsaufgabe. Um die Unabhängigkeit der beiden Komponenten zu testen, wurde eine Dual-Aufgabe verwendet, in der die Probanden beide Aufgaben einzeln oder synchron bearbeiten mussten. Dual-Aufgaben kamen in Arbeitsgedächtnisexperimenten häufig zur Anwendung (z.B. Bruyer und Scailquin, 1998; Della Sala et al., 1999; Tresch, Sinnamon und Seamon, 1993). Mit diesem Paradigma lässt sich feststellen, ob die Bearbeitung zweier Aufgaben auf getrennten oder gemeinsamen Ressourcen basiert. Wenn beim synchronen Bearbeiten eine deutliche Leistungsverschlechterung gegenüber der Einzelaufgabe zu beobachten ist (Interferenz), dann wird dies als Hinweis gewertet, dass beide Aufgaben die gleichen Ressourcen beanspruchen.

Mit Hilfe eines Farben-Paradigmas sollte die Manipulation ventraler Information operationalisiert werden. Manipulation ist ein Prozess, welcher von den Probanden das aktive Verändern und Transformieren des Materials verlangt (Vecchi, 1998). Farbe ist eine Informationsart, welche zusammen mit Form, Objektidentität und Textur über den ventralen Pfad verarbeitet wird (Ungerleider und Mishkin, 1982). Die Probanden mussten entscheiden, ob eine präsentierte Farbe (Test) das Resultat einer Mischung zweier zuvor dargebotenen Farben (Samples) ist. Die Aufgabe kann nur gelöst werden, wenn die Probanden die ursprünglichen Stimuli mental transformieren und verändern (Mischfarbe erzeugen). Bisher wurde meines Wissens noch in keiner experimentellen Untersuchung ein ventrales Manipulationsparadigma dokumentiert, da Schwierigkeiten in der Erzeugung einer rein ventralen Manipulationsaufgabe bestehen: Manipulationen an den meisten ventralen Informationsarten (Form, Textur, Objektidentität) erzeugen zusätzlich räumliche Veränderungen. Farbe dagegen beinhaltet kaum räumliche Information und wird schon auf subkortikalen Pfaden von Bewegungsinformation getrennt verarbeitet (parvozelluläre Kanäle).

Die Operationalisierung der Manipulation räumlicher Information erfolgte anhand einer mentalen Rotationsaufgabe. Die Probanden sollten entscheiden, ob ein Halbkreis (Test) im mittleren Winkel zweier vorher präsentierter Halbkreise (Samples) orientiert ist. Die Lösung der Aufgabe erfordert eine mentale Transformation und Veränderung der ursprünglich dargebotenen Stimuli. Mentale Rotations- und Bewegungsaufgaben werden häufig verwendet, um räumliche Manipulation im visuellen AG zu untersuchen (z.B. Bruyer und Scailquin, 1998).

Zwei zusätzliche Experimente (Experimente 2 und 3) wurden konstruiert, um mögliche Störeinflüsse zu kontrollieren. Es kam dasselbe Stimulusmaterial wie in Experiment 1 zur Anwendung, einzig die zeitliche Anordnung der Stimuluspräsentation wurde variiert.

In Experiment 2 wurden die Samples und der Test gleichzeitig präsentiert, um eine serielle Lösung der Dual-Bedingung zu verhindern. Mit Experiment 3 sollte ausgeschlossen werden, dass die Probanden die räumliche Aufgabe durch Gestaltwahrnehmung lösen. Initial wurde nur ein Sample präsentiert, das zweite Sample wurde anschließend zusammen mit dem Test eingeblendet. Zusätzlich verhindert die zeitliche Darbietung der Stimuli in Experiment 3 eine serielle Lösung der Dual-Bedingung, analog zu Experiment 2.

Experiment 4 beinhaltet eine dorsal-dorsale Dual-Aufgabe, welche demonstrieren soll dass bei der zeitlich synchronen Manipulation von Material desselben Subsystems Interferenz entsteht.

### **3.2.2. Ressourcen des Haltens und Manipulierens: Experimente 5-6**

Mit Experiment 5 und 6 soll untersucht werden, ob Prozesse der Manipulation und des Haltens auf unterschiedlichen Ressourcen basieren. Die Probanden bearbeiteten in Experiment 5 die Aufgabe des Farbenmischens und des Rotierens unter verschiedenen Interferenzbedingungen: Bedingung KI (keine Interferenz, Kontrollbedingung), Bedingung AS mit artikulatorischer Suppression, Bedingung RG mit dem zufälligen Generieren einer

Buchstabenreihe („random generation“). In der Bedingung artikulatorische Suppression sollten die Testpersonen kontinuierlich eine Silbe wiederholen („la“). Diese Aufgabe interferiert mit dem verbalen Wiederholen und Speichern von Information (Levy, 1977). „random generation“ soll ZE-Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses benötigen (Baddeley, 1966; 1998).

Experiment 6 verfügte über den identischen Aufbau wie Experiment 5, mit der einzigen Ausnahme, dass die Probanden Farben und räumliche Orientierungen halten sollten (Halteaufgabe). Halteaufgaben können ohne eine Transformation/Veränderung des Materials gelöst werden.

### **3.2.3. Kontrollvariable: Ishihara-Test**

Zur Kontrolle von Farbsinnstörungen wurde mit allen Probanden der Ishihara-Test durchgeführt (Ishihara, 2001). Dieser erfasst die fünf am häufigsten vorkommenden Farbsinnstörungen: Protanopie (Rotblindheit), Protanomalie (Rotschwäche), Deuteranopie (Grünblindheit), Deuteranomalie (Grünschwäche) und Achromatopsie (totale Farbenblindheit).

Der Test besteht aus insgesamt 24 Farbtafeln. Auf den ersten 17 Farbtafeln sind per Farbkontrast Zahlen dargestellt, die der Proband laut vorlesen soll. Bei den letzten sieben Tafeln muss der Proband eine geschwungene Farblinie verfolgen. Die Tafeln werden bei natürlichem Tageslicht ohne direkte Sonneneinstrahlung in 75 cm Entfernung senkrecht zur Blickrichtung des Untersuchten vorgelegt. Bei der Auswertung wird ein Punkt pro richtig gelesene Tafel vergeben und die Gesamtpunktzahl und das Profil der Ergebnisse mit Normwerten verglichen.

### 3.3. Versuchsaufbau und Ablauf

#### 3.3.1. „Farbe & Orientierung“: Experiment 1

Eine schematische Darstellung der Stimuli von Experiment 1 ist in Abbildung 2 zu sehen. Zu Beginn sahen die Probanden zwei Halbkreise (Samples) für 500 ms, die sich in Farbe und räumlicher Orientierung unterschieden ( $3.1^\circ \times 1.34^\circ$ , Entfernung Mittelpunkt von Mittelpunkt der Halbkreise =  $3.98^\circ$ , alle Gradangaben beziehen sich auf den Schwinkel). Nach einer Pause von 500 ms wurde eine Instruktion (aus drei möglichen) zufällig präsentiert: „Farben mischen“, „Mittlere Rotation“ oder „Dual“ (1500 ms). Nach der Instruktion erschien ein Fixationskreuz (2000 ms,  $.022^\circ \times .022^\circ$ ) und anschließend ein dritter Halbkreis in bestimmter Farbe und Orientierung (Test, 3000 ms,  $3.49^\circ \times 1.48^\circ$ , dargeboten in der Bildschirmmitte).

Während der Aufgabestellung „Farbe mischen“ mussten die Versuchspersonen entscheiden, ob die Farbe des dritten Halbkreises (Test) der Mischfarbe der beiden Samplefarben entsprach. Es wurden nur solche Farben verwendet, welche im Farbspektrum benachbart sind (z.B. Gelb-Grün), so dass deren Mischung eine Kombination beider Grundfarben darstellte (Gelb + Grün = Grüngelb). Es wurden keine Farben verwendet, deren Mischung eine qualitativ neue Farbe entstehen lässt (z.B. Gelb + Blau = Grün), da die Bewältigung dieser Aufgabe stark vom semantischen Wissen der Probanden abhängig ist.

In der Bedingung „Mittlere Rotation“ mussten die Probanden beurteilen, ob die Orientierung des dritten Halbkreises (Test) den gemittelten Rotationswinkeln aus Sample 1 und Sample 2 entsprach. In der Bedingung „Dual“ sollten die Probanden beide Aufgaben simultan durchführen.

Die Probanden hatten drei Sekunden Zeit, um die Ja- oder Nein- Taste zu drücken. Aufgezeichnet wurden die Reaktionszeiten und die Korrektheit der Antworten. Die

Probanden erhielten nach ihrer Entscheidung per Farbwechsel des Fixaktionskreuzes ein Feedback über ihre Leistung (1000 ms). Das Kreuz wurde grün, wenn sie richtig geantwortet hatten, rot bei falscher Antwort und grau, wenn die Antwortzeit von drei Sekunden überschritten war. Das Zeitintervall zwischen zwei Aufgaben betrug zwei Sekunden, in dem ein weißes Fixaktionskreuz präsentiert wurde.

### **3.3.2. „Farbe & Orientierung“: Experiment 2**

Das zweite Experiment war in Aufbau, Material und Aufgaben fast identisch zu dem Ersten. Der einzige Unterschied bestand darin, dass keine Pause zwischen der Darbietung der Samples und des Tests existierte (Abbildung 2). Der Test erschien gleichzeitig mit den beiden Samples in der unteren Mitte des Bildschirms (3000 ms Präsentationszeit von Samples und Test, Distanz des Tests zu den Samples:  $4.2^\circ$ , Mittelpunkt zu Mittelpunkt). Die Probanden hatten drei Sekunden Zeit, eine Entscheidung zu treffen und unmittelbar darauf wurde Feedback über die erbrachte Leistung gegeben.

Die Instruktion erschien für 1500 ms vor der Präsentation der Stimuli. Zwischen den Trials erschien für 2000 ms ein weißes Fixaktionskreuz. Das zweite Experiment wurde ohne Pause zwischen Samples und Test konstruiert, um auszuschließen, dass die Probanden die Dual-Bedingung seriell bearbeiteten.

### **3.3.3. „Farbe & Orientierung“: Experiment 3**

Im dritten Experiment wurden die Samples sequentiell dargeboten, um eine perzeptuelle Lösung der räumlichen Aufgabe aufgrund von Gestaltgesetzen zu vermeiden. Zusätzlich verhindert Experiment 3 analog zu Experiment 2 eine serielle Bearbeitung der Dual-Bedingung. Zu Beginn eines Trials erschien für 1500 ms die Instruktion. Die Aufgaben waren dieselben wie in Experiment 1 und 2. Der Anweisung folgte auf der rechten Hälfte des Bildschirms das erste Sample (600 ms). Die Probanden sollten je nach Aufgabe die

Farbe, den Rotationswinkel oder beide Informationen im Gedächtnis behalten. Nach einer Pause von 400 ms erschien auf der rechten Hälfte des Bildschirms das zweite Sample (3500 ms). Simultan mit dem zweiten Sample wurde der Test in der Mitte des Bildschirmes, unterhalb des Samples, dargeboten (3500 ms,  $4.2^\circ$  Distanz zu den Samples, Mittelpunkt zu Mittelpunkt). Die Probanden sollten während der synchronen Präsentation des zweiten Samples und des Tests ihre Entscheidung per Tastendruck (ja/nein) fällen. Feedback wurde anschließend für 1000 ms gegeben. Zwischen den Trials wurde für 2000 ms ein weißes Fixaktionskreuz präsentiert.

#### **3.3.4. „Orientierung & Distanz“: Experiment 4**

Dieses Experiment beinhaltete eine räumlich-räumliche Dual-Aufgabe. Der zeitliche Aufbau orientierte sich an Experiment 2 (Abbildung 2). Zu Beginn wurde den Probanden eine Instruktion (aus drei möglichen, 1500 ms) präsentiert: „Mittlere Rotation“, „Halbe Distanz“ und „Dual“. Anschließend wurde der Test in der Mitte des Bildschirms unterhalb der gleichzeitig präsentierten Samples dargeboten ( $1.3^\circ \times .64^\circ$ ). Test und Samples erschienen für 3000 ms und Feedback wurde unmittelbar gegeben (1000 ms). In der Bedingung „Mittlere Rotation“ bearbeiteten die Probanden die gleiche Aufgabe wie in Experiment 1, 2 und 3.

Die Bedingung „Halbe Distanz“ verlangte von den Probanden die Einschätzung, ob die Distanz zwischen dem Test und dem rechten Sample mit der halben Distanz zwischen den beiden Samples (Mittelpunkt zu Mittelpunkt) identisch war. In der Dual-Aufgabe („Dual“) mussten die Testpersonen beide Aufgaben simultan lösen. Zwischen den Trials wurde ein Fixaktionskreuz präsentiert (2000 ms).

### **3.3.5. Ressourcen der Manipulation: Experiment 5**

In diesem Experiment wurde die Leistung in zwei Manipulationsaufgaben („Farben mischen“ und „Mittlere Rotation“, siehe Experiment 1-3) unter verschiedenen Interferenzbedingungen untersucht: Kontrollbedingung (keine Interferenzaufgabe, KI), Interferenz durch artikulatorische Suppression (AS) und Interferenz durch „random generation“ (RG). Jede Bedingung wurde in zwei Blöcken präsentiert: In jeweils einem Block sollten die Probanden Farben mischen und in dem anderen die Rotationsaufgabe bearbeiten. Die Blöcke wurden in randomisierter Reihenfolge bearbeitet. Die Interferenzaufgabe „artikulatorische Suppression“ bestand aus dem kontinuierlichen Wiederholen der Silbe „la“. Die Bedingung „random generation“ verlangte von den Probanden das verbale Generieren einer Sequenz von Buchstaben. Die Buchstabenserie durfte nicht die Reihenfolge des Alphabetes oder eines Wortes aufweisen und somit keinen semantischen Sinn ergeben (zufälliges Generieren). Die Probanden mussten alle zwei Sekunden einen Buchstaben nennen (synchronisiert durch Computerton im 2-Sekundentakt). Jeder Block wurde durch die Präsentation der Instruktion eingeleitet.

### **3.3.6. Ressourcen des Haltens: Experiment 6**

Im Gegensatz zu Experiment 5 bearbeiten die Probanden in Experiment 6 zwei Haltaufgaben (Abbildung 3). Den Probanden wurden die gleichen Sample-Stimuli wie in Experiment 5 dargeboten. Die Teilnehmer wurden instruiert, sich entweder die Farbe oder die Orientierung der Halbkreise zu merken. Im Unterschied zu Experiment 5 erschien nicht ein Test, sondern zwei Tests an der gleichen Position wie die Samples auf dem Bildschirm. Die beiden Tests waren in unterschiedlicher Farbe und Orientierung gehalten. Die Teilnehmer hatten 3000 ms Zeit für die Entscheidung, ob die Farben der Tests identisch zu denen der beiden Samples waren (Farben merken) oder ob die Rotation der beiden Tests mit denen der Samples übereinstimmte (Merken der Rotation). Die Probanden antworteten

per Ja- oder Nein- Tastendruck und erhielten dafür Feedback (1000 ms). Auch das sechste Experiment teilte sich in drei Bedingungen. In der ersten Bedingung bearbeiteten die Probanden die Halteaufgabe ohne zusätzliche Interferenz (Bedingung keine Interferenz, KI). In der Bedingung AS und RG führten die Probanden zusätzlich eine artikulatorische Suppression (AS) oder das „random generation“ (RG) durch.

In Experiment 6 wurden zwei identische Tests an der gleichen Position wie die Samples dargeboten um räumliche Manipulationsprozesse in der Lösung der Aufgabe zu vermeiden. Wenn der Test an anderer Stelle als das Sample erscheinen würde, dann müssten die Probanden das gemerkte Sample mental an die Position des Tests rücken, um Farbe oder Orientierung zu vergleichen. Diese Prozedur geht über eine reine Halteaufgabe hinaus und ein Vergleich zwischen Halte- und Manipulationsprozessen wäre an dieser Stelle nur eingeschränkt möglich gewesen.

### **3.4. Material und Stimuluskonstruktion**

Die Stimuli wurden mit einem 19 Zoll Monitor (Multiscan 20 SE, Sony Inc.) auf einem dunklen Hintergrund ( $.26 \text{ cd/m}^2$ ) dargeboten. Der Monitor wurde mit einem Spotmessgerät (Minolta CS-100) kalibriert. In einem verdunkelten Raum war der Monitor die einzige Lichtquelle. Programmiert wurde das Experiment in ERTS (Experimental Runtime System©, BeriSoft Cooperation).

#### **3.4.1. Konstruktion der Halbkreise**

Die Halbkreise wurden im Uhrzeigersinn um ihren geometrischen Mittelpunkt rotiert. Ein Samplehalbkreis unterschied sich im Rotationswinkel vom zweiten Sample um  $30^\circ$  (50%) oder  $40^\circ$  (50%).

In der passenden räumlichen Bedingung der Experimente 1-5 war der Rotationswinkel des Tests  $T$  gleich dem gemittelten Rotationswinkel der beiden Samples  $S1$  und  $S2$  ( $T = (S1 +$

S2)/2). In der unpassenden Bedingung wich die Rotation des Tests vom mittleren Rotationswinkel um +/- 10° (8.3%), 15° (33.3%), 20° (16.6%), 35° (16.6%) oder 40° (16.6%) ab. In Experiment 6 waren in der passenden Bedingung die Rotationswinkel der beiden Testhalbkreise identisch mit den Rotationswinkeln der beiden Samples. In der unpassenden Bedingung wichen die Tests in der Rotation um 10° (33%), 20° (33%) oder 25° (33%) vom entsprechenden Sample ab.

### **3.4.2. Konstruktion der mittleren Distanz**

Die Distanz der Samples variierte in 12 Schritten zwischen 2.74° und 5.9° Sehwinkel. Der Test wurde unterhalb des rechten Samples präsentiert. In der passenden Bedingung war die Distanz zwischen dem Test und dem rechten Sample identisch mit der Hälfte der Distanz zwischen den beiden Samples (Mittelpunkt zu Mittelpunkt, Abbildung 2). In der unpassenden Bedingung wich die Distanz zwischen Test und rechtem Sample um .64° oder .55° von der mittleren Distanz zwischen den beiden Samples ab.

### **3.4.3. Konstruktion der Mischfarben**

Die Farben für das Sample-Paar und dem dazugehörigen Test waren entsprechend CIE (1931) in Luminanz und Sättigung gleich gehalten. Nur der Farbton bzw. die dominante Wellenlänge durfte variieren.

Es wurde definiert, dass die Mischfarbe zweier Samplefarben in der empfundenen Mitte im Farbraum zwischen beiden Samplefarben liegt (CIE-1976,  $L^* u^* v^*$ ). Um einen Farbraum zu erhalten, in dem die geometrischen Abstände den empfindungsgemäßen Abständen entsprechen, wurden die Farbkoordinaten XYZ (CIE-1931) in den  $L^* u^* v^*$  Farbraum transformiert (CIE-1976, nach Wyszecki und Stiles, 2000). Mit folgender Formel wurden die Abstände der Farben berechnet:

$$\Delta H_{uv} = \left[ (\Delta E_{uv})^2 - (\Delta L_{uv})^2 - (\Delta C_{uv})^2 \right]^{1/2}$$

$H$  ist die Farbtondifferenz zweier Farben in den Koordinaten  $u^*$   $v^*$ ,  $E$  ist die Gesamtdifferenz zweier Farben,  $L$  ist die Differenz in der Helligkeit und  $C$  die Differenz in der Chromatizität (Wyszecki und Stiles, 2000).

Für Experiment 1, 2, 3 und 5 wurden 14 Sample-Farbpaare erzeugt und 14 dazu passende Mischfarben (Tests). 56 weitere Farben wurden als Tests für die unpassende Bedingung kalibriert. In der unpassenden Bedingung wurden Farben verwendet, welche:

1. Nicht in dem Spektrum zwischen den Samplefarben angesiedelt waren (28 Farben) oder
2. im Spektrum zwischen den Samplefarben angesiedelt waren, aber nicht in der berechneten Mitte (28 Farben).

Ein Validierungsexperiment wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob die berechneten und kalibrierten Mischfarben tatsächlich als Mittelpunkt des Farbraums zwischen zwei Samplefarben empfunden wurde. 32 Probanden schätzten auf einer Skala von 0 bis 4, wie gut eine bestimmte Farbe mit der idealen Mischfarbe übereinstimmt. Den Testpersonen wurden zwei farbige Halbkreise (Samples) im oberen Teil des Bildschirms präsentiert. In der Mitte des unteren Teils des Bildschirms wurde ein weiterer Halbkreis (Test) dargeboten. Die Probanden sollten beurteilen, ob die Farbe des Tests in der Mischfarbe der beiden Samples gehalten war. Vier Punkte sollten vergeben werden, wenn eine Farbe optimal die Mischfarbe darstellte (beide Farben gleichgewichtet vertreten). Eine Farbe sollte mit null Punkten bewertet werden, wenn die Farbe eindeutig nicht die Mischfarbe darstellte. Die Werte sollten für weitere Abstufungen verwendet werden (3 = sehr nah an Mischfarbe, 2 = Anteile der Mischfarbe enthalten, 1 = nur geringe Anteile an Mischfarbe). Zu einem Samplepaar wurde entweder die echte Mischfarbe oder eine unpassende Farbe dargeboten. Die unpassenden Farben wurden in drei Stufen unterteilt (drei unterschiedliche

Entfernungen zur echten Mischfarbe). Die Darbietung der Farben erfolgte randomisiert. Die Beurteilungen der Testfarben unterschieden sich signifikant,  $F(3, 93) = 29.2, p < .01$  (einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung). Einzelkontraste zwischen den Bedingungen demonstrierten, dass die Bedingung „echte Mischfarbe“ höhere Beurteilungen erhielt ( $M = 3.18$ , Standardfehler  $SE = .08$ ) im Vergleich zu allen drei Stufen der abweichenden Farben, „echte Mischfarbe“ vs. Stufe 1:  $F(1, 31) = 97.4, p < .01$ , „echte Mischfarbe“ vs. Stufe 2:  $F(1, 31) = 241.69, p < .01$  und „echte Mischfarbe“ vs. Stufe 3:  $F(1, 31) = 437.92, p < .01$ . Die vollständigen Ergebnisse des Experimentes sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Probanden akzeptierten somit die berechneten und kalibrierten Mischfarben und die Stimuli wurden für die weiteren Experimente übernommen.

In Experiment 6 wurden die gleichen 14 Sample-Farbpaare verwendet wie in Experiment 1, 2, 3 und 5. In der passenden Bedingung waren die beiden Teststimuli in den gleichen Farben gehalten wie die beiden Samples und in der unpassenden Bedingung war einer der beiden Tests in der Mischfarbe der beiden Samples gehalten (50%) oder die Farbe des Tests war im Farbraum zwischen der Mischfarbe und der Samplefarbe lokalisiert (50%).

### **3.5. Datensammlung**

In den Experimenten 1,2 und 4 bis 6 wurden 108 Trials präsentiert, im dritten Experiment 126. Eine Bedingung bestand aus jeweils 36 Trials (42 in Experiment 3), 12 passenden (66%) und 24 unpassenden (33%) (28 unpassende und 14 passende in Experiment 3). Die Trials wurden in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Der Monitor wurde 20 Minuten vor jedem Experiment eingeschaltet, um eine konstante Betriebstemperatur des Gerätes zu gewährleisten und damit einhergehende Stabilität der Farbdarstellung zu gewährleisten. Zu Beginn jedes Experimentes bearbeiteten die Probanden einen Übungsdurchgang mit 12 Trials.

### **3.6. Hypothesen**

#### **3.6.1. Getrennte Ressourcen von „Farbe & Orientierung“**

Es wurde angenommen, dass keine Interferenz in der Dual-Bedingung der Experimente 1-3 auftreten sollte, da die Manipulation von Farb- und Rauminformation auf der Basis getrennter neuronaler Ressourcen stattfindet (Hypothese 1-3). Der Interferenzbegriff wird im folgenden Kapitel „Statistische Auswertung“ definiert.

#### **3.6.2. Gemeinsame Ressourcen von „Orientierung & Distanz“**

Interferenz sollte in der Dualbedingung von Experiment 4 entstehen, da beide räumliche Manipulationsaufgaben auf der Grundlage desselben räumlichen Subsystems im visuellen AG durchgeführt werden (Hypothese 4).

#### **3.6.3. „Halten vs. Manipulieren“**

Prozesse der Manipulation sollten auf ZE-Ressourcen basieren; solche des Haltens sollten nur in geringen Umfang von diesen Ressourcen abhängig sein (Bruyer und Scailquin, 1998). Deshalb sollte im Vergleich zur Kontrollaufgabe „random generation“ mit den Manipulationsaufgaben interferieren (Hypothese 5, Experiment 5), aber nicht mit den Halteaufgaben (Hypothese 6, Experiment 6). In beiden Experimenten sollte die artikulatorische Suppression keinen Interferenzeffekt auf die Manipulation oder das Halten ausüben, da die beiden Aufgaben verbal nicht codierbares Material enthalten (Hypothese 7).

### **3.7. Statistische Auswertung**

Der folgende Abschnitt behandelt die statistische Auswertung. Die Datenanalyse erfolgte anhand der Signaldetektionstheorie (SDT, Green und Swets, 1966). Im ersten Teil wird die

SDT anhand von Beispielen kurz skizziert. Anschließend wird die Berechnung der Interferenz erläutert, die anhand von  $A'$  erhoben wurde. Danach schließt sich die Berechnung der Stichprobengröße auf Basis der zu erwartenden Effektstärken an.

### 3.7.1. Signaldetektionstheorie

Die Signaldetektionstheorie wurde ursprünglich in der Psychophysik entwickelt (Green und Swets, 1966). Die Grundannahmen dieser Theorie werden im folgenden Abschnitt anhand von Antwortbeispielen aus der oben beschriebenen Farbmischaufgabe beschrieben.

In den vorliegenden Experimenten sollten die Probanden aus bestimmten Samplefarben die passende Mischfarbe mental erzeugen und beurteilen, ob ein dargebotener Test in der Mischfarbe gehalten war. Erreicht der sensorische Eindruck des Tests eine bestimmte Schwelle, welche ein subjektives Kriterium übersteigt (Kriterium, ab welchen Farbeindruck die Testfarbe in der Mitte des Farbraumes liegt), so entscheidet sich der Proband dafür, dass ein Signal vorhanden ist (Tastendruck „Ja“, Mischfarbe vorhanden). Wird das Kriterium unterschritten, so nimmt der Betrachter an, dass kein Zielsignal enthalten ist (z.B. Tastendruck „Nein“, Test ist nicht in Mischfarbe gehalten).

Dabei lassen sich prinzipiell vier Fälle unterscheiden. Wird kein Zielreiz dargeboten (Test in unpassender Farbe gehalten) und der Proband entscheidet sich für „Nein“, dann spricht man von korrekter Zurückweisung („correct rejection“,  $CR$ ). Lautet die Antwort dennoch „Ja“, so handelt es sich um einen Fehllalarm ( $FA$ ). Bei einem Zielsignal, welches nicht detektiert wurde (Tastendruck „Nein“), handelt es sich um einen Verpasser ( $V$ ). Im anderen Fall (Tastendruck „Ja“ und Test Mischfarbe eingeblendet) spricht man von einem Treffer ( $H$ ).

Die Funktion, welche die Trefferrate in Abhängigkeit der Fehllalarme darstellt, wird „receiver operating characteristic“ genannt (ROC-Kurve). Eine diagonale ROC-Kurve entspricht dem Rateverhalten, das heißt Trefferanzahl. = Anzahl Fehllalarme. Ausgehend

von den empirisch ermittelten Treffern und falschen Alarmen lässt sich die Signaldetektionssensitivität  $d'$  nach folgender Formel berechnen:  $d' = Z(H) - Z(FA)$ , wobei  $Z(H)$  der  $Z$ -transformierte Wert von  $H$  ist und  $Z(FA)$  der  $Z$ -transformierte Wert von  $FA$ .

Die  $d'$ -Werte sind unabhängig von der Antworttendenz der Versuchspersonen und der Auftretendwahrscheinlichkeit der Reize.

In der vorliegenden Studie wurde die Signaldetektionssensitivität anhand von  $A'$ -Werten anstatt der häufig verwendeten  $d'$ -Werte berechnet (Grier, 1977). Folgende Gründe waren dafür ausschlaggebend.  $A'$  ist robuster gegen Verletzungen der Grundannahmen der SDT im Vergleich zu  $d'$  (Homogenität der Varianzen der hypothetischen Verteilungen, Donaldson, 1993). Des Weiteren ist  $A'$  im Gegensatz zu  $d'$  bestimmbar, wenn die Probanden keine falschen Alarme begehen. Der Wertebereich von  $A'$  reicht von .5 (Ratewahrscheinlichkeit) bis 1 (perfekte Leistung).  $A'$  ist ein Schätzer für das Areal unter der ROC-Kurve. Für jeden Probanden wurde  $A'$  nach der Formel von Grier (1977) berechnet:

$$A' = 0.5 + [(H - FA) \times (1 + H - FA)] / [4 \times H \times (1 - FA)]$$

Bei  $FA > H$  wurde eine alternative Berechnung verwendet, da der Wert unterhalb der Ratediagonalen liegt:

$$A' = 0.5 - [(FA - H) \times (1 + FA - H)] / [4 \times FA \times (1 - H)]$$

Wenn zwei Aufgaben, welche die gleichen Ressourcen nutzen, synchron bearbeitet werden, dann sollte Interferenz in Form einer sinkenden Signaldetektionssensitivität in der Dual-Aufgabe im Vergleich zu der Einzelaufgabe mit der niedrigsten Sensitivität zu beobachten sein.

Einfaktorielle ANOVA (Messwiederholung) wurden berechnet, um die Sensitivität  $A'$  zwischen den drei Experimentalbedingungen zu vergleichen. In Experiment 1-4 wurde ein Einzelkontrast (Helmert) zwischen der Einzelbedingung mit der niedrigsten Sensitivität  $A'$  und der Dual-Bedingung berechnet. Interferenz liegt vor, wenn in der Dual-Bedingung ein niedrigerer  $A'$ -Wert vorliegt im Vergleich zur Einzelaufgabe mit dem niedrigsten  $A'$ -Wert.

Als zusätzliche Kontrollvariable wurde die Reaktionszeit zwischen den experimentellen Bedingungen analysiert (einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung, drei Stufen). Damit sollte ausgeschlossen werden, dass die Aufgaben in der Dual-Bedingung seriell gelöst werden. Unter der Bedingung einer seriellen Bearbeitung der Dual-Aufgabe sollte es zu einer Aufsummierung der Reaktionszeiten kommen.

### 3.7.2. Optimale Stichprobengröße

Die optimale Stichprobengröße wurde anhand der erwarteten Interferenzeffektstärke berechnet. Folgende Effektstärken konnten aus bisherigen Dual-Experimenten im Bereich des visuellen AG geschätzt werden:

1. Della Sala et al. (1999) kombinierten eine räumliche AG-Aufgabe mit einer räumlichen Interferenzaufgabe. Eine Effektstärke von 2.54 wurde aus den berichteten Daten errechnet (räumliche Einzelaufgabe  $M = 6.1$ ,  $SD = .86$ , räumlich + räumlich  $M = 4$ ,  $SD = .79$ , berechnet auf die Anzahl richtiger Antworten, abhängige Stichproben,  $N = 16$ ).

2. Eine Effektstärke von  $d = 1.27$  konnte aus einer Studie von Vandierendonck et al. (2004) mit einer räumlich-räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe kalkuliert werden. Die Kombination einer räumlichen Manipulationsaufgabe mit einer zentral-exekutiven Aufgabe führte zu Interferenz mit einer Effektstärke von  $d = 1.19$ . (räumlich einzeln:  $M =$

85 %,  $SD = 1.1$ ; räumlich + räumlich:  $M = 74$  %,  $SD = 1$ ; räumlich + ZE:  $M = 73.2$  %,  $SD = 1.1$ ; abhängige Stichproben,  $N = 25$ , berechnet auf prozentual richtige Antworten).

3. In einer Studie von Lee und Kang (2002) mussten die Probanden Multiplikationen oder Subtraktionen in Kombination mit einer visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe durchführen. Interferenz trat in den Leistungen der visuell-räumlichen Aufgabe in Kombination mit der Subtraktionsaufgabe mit einer Effektstärke von  $d = 2.52$  auf (visuell-räumlich + Multiplizieren  $M = 98.5\%$ ,  $SD = 3.2$ , visuell-räumlich + Subtrahieren  $M = 89.2\%$ ,  $SD = 4.1$ , abhängige Stichproben,  $N = 10$ , berechnet auf prozentual richtige Antworten).

Interferenz in Dual-Aufgaben des visuellen AG schlug sich in den genannten Studien mindestens als starker Effekt nieder ( $d > .9$ , Cohen, 1988). Da in den vorliegenden Experimenten 1-3, 5 und 6 die Nullhypothese vertreten wird, wurde der  $\beta$ -Fehler indirekt klein gehalten, indem der  $\alpha$ -Fehler auf 15% erhöht wurde (Bortz, 1993). Bei einem  $\alpha$ -Fehlerniveau von .15, einem  $\beta$ -Fehler von .05 und einer Effektstärke von  $d > .9$  berechnet sich eine Stichprobenmindestgröße von  $N = 11$  (ANOVA mit Messwiederholung,  $df = 2$ , Bortz und Döring, 1995).

In Experiment 4 wird die Alternativhypothese  $H1$  vertreten, das  $\alpha$ -Fehlerniveau wurde auf 5% und das  $\beta$ -Fehlerniveau auf 15 % festgelegt (Bortz, 1993). Auch für diese Testparameter errechnete sich eine Stichprobenmindestgröße von  $N = 11$  (ANOVA mit Messwiederholung,  $df = 2$ , Bortz und Döring, 1995).

Um mögliche Unterschiede zwischen den Gruppen zu entdecken, welche auf kleineren Effektgrößen basieren, wurde die Teststärke erhöht, indem die zu untersuchende Stichprobe auf über 20 Probanden vergrößert wurde (Experimente 1, 3- 6).

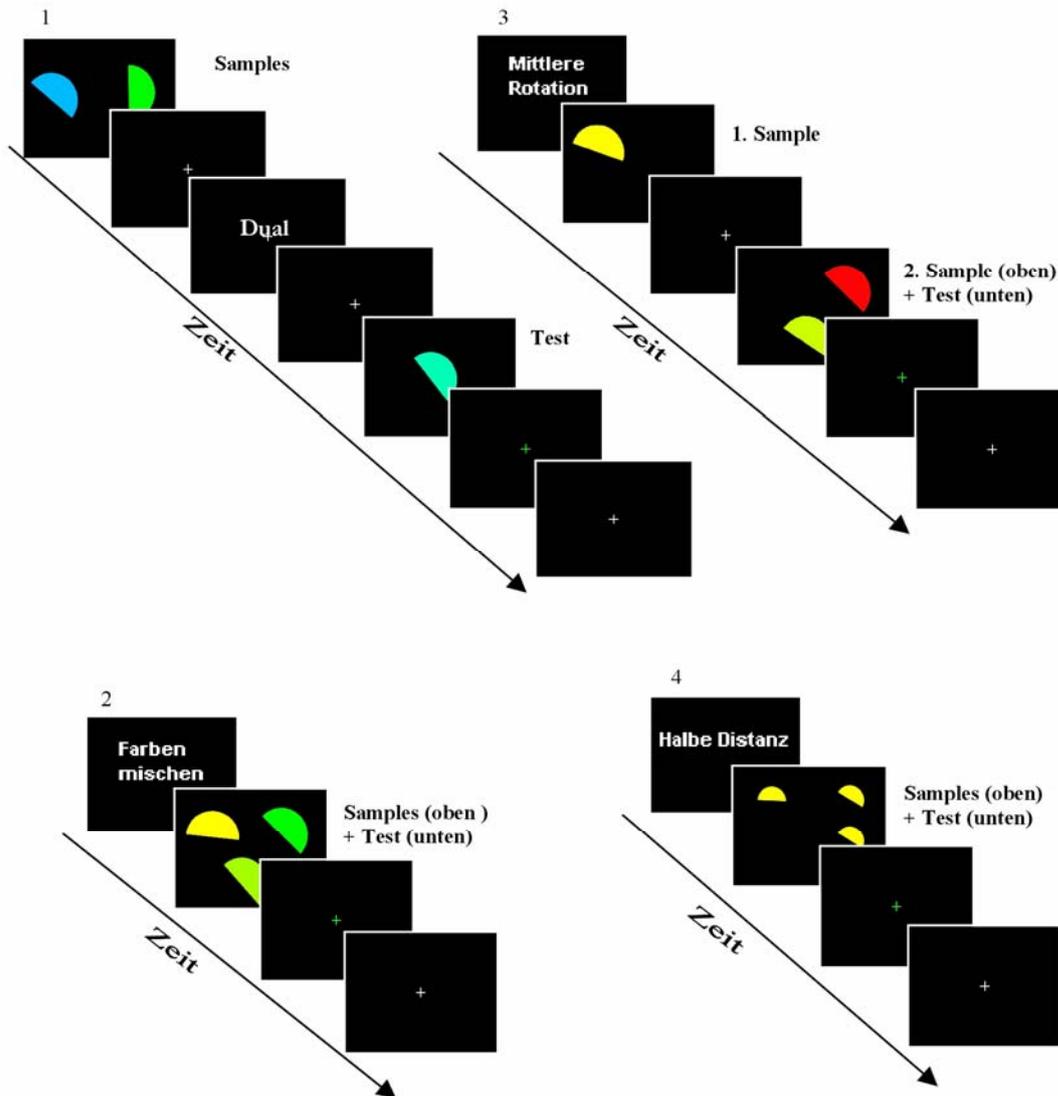


Abbildung 2

Stimuluspräsentation der Experimente 1-4

1: In Experiment 1 wurden zu Beginn der Aufgabe zwei Samples für 1500 ms dargeboten. Nach einer Pause von 500 ms erschien die Instruktion (1500 ms). Dieser folgte ein weißes Fixaktionskreuz (2000 ms) und anschließend der Test, welcher für 3000 ms präsentiert wurde. Über ein Farbwechsel des Fixaktionskreuzes wurde Feedback gegeben (1000 ms). Im „inter-trial interval“ (ITI: 2000 ms) erschien ein weißes Fixaktionskreuz. Die Probanden sollten die Farben der Samples mischen, den mittleren Rotationswinkel generieren oder beide Aufgabe synchron als Dual-Aufgabe durchführen (Experiment 1, 2 und 3).

2: Im zweiten Experiment wurde der Test zusammen mit den Samples präsentiert (3000 ms). Anschließend wurde Feedback gegeben (1000 ms). Die Instruktion erschien zeitlich vor der Präsentation der Halbkreise für eine Dauer von 1500 ms. In der ITI wurde ein weißes Fixaktionskreuz dargeboten (2000 ms).

3: Ein Trial im dritten Experiment startete mit der Präsentation der Instruktion (1500 ms), gefolgt von dem ersten Sample (600 ms). Nach einer Pause von 400 ms wurde der Test simultan mit dem zweiten Sample präsentiert (3500 ms). Feedback wurde unmittelbar gegeben (1000 ms). Im ITI erschien ein weißes Fixaktionskreuz (2000 ms).

4: Im vierten Experiment wurde der Test gleichzeitig mit den Samples eingeblendet (3000 ms). Dem folgte die Darbietung des Feedbacks (1000 ms). Vor dem Erscheinen der Halbkreise wurde die Instruktion eingeblendet (1500 ms). Die ITI bestand aus der Präsentation eines weißen Fixaktionskreuzes (2000 ms). Die Probanden sollten die Halbkreise rotieren, Distanzen vergleichen oder beide Aufgaben simultan durchführen.

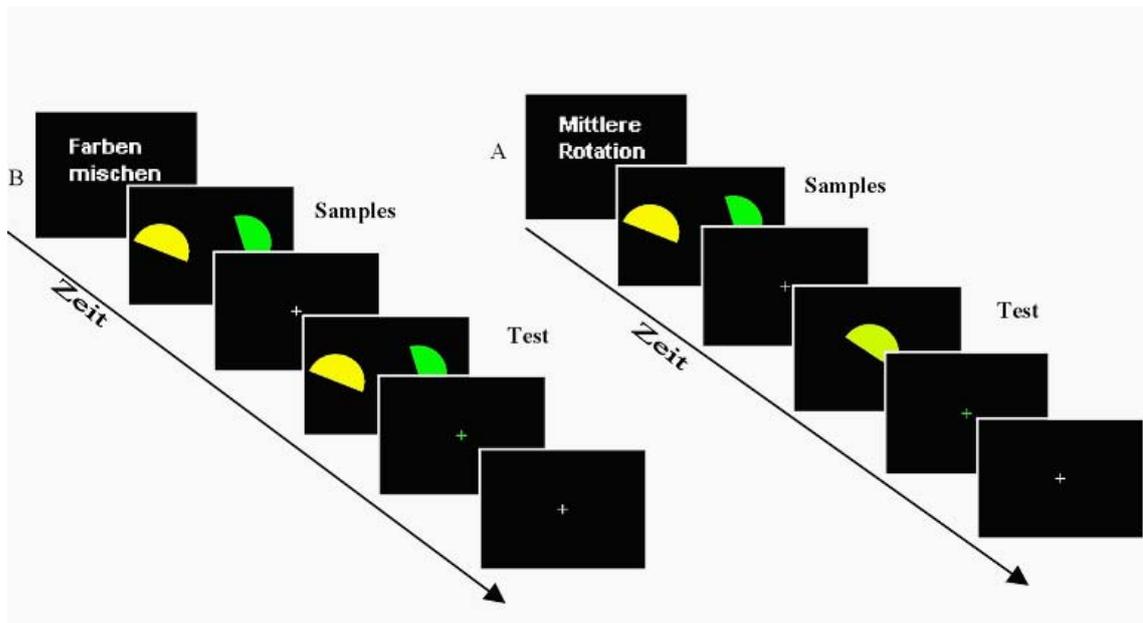


Abbildung 3

Stimuluspräsentation der Experimente 5-6

A, Beispielaufgabe aus Experiment 5. Für eine Dauer von 500 ms erschienen initial zwei Samples, denen nach einer Pause von 1500 ms ein Test folgte (3000 ms). Das Feedback wurde unmittelbar danach gegeben (1000 ms). Die ITI bestand aus der Präsentation eines weißen Fixaktionskreuzes (2000 ms). Aufgabe: Die Probanden sollten unter drei experimentellen Bedingungen Farben mischen oder die Halbkreise rotieren: (a) keiner Interferenz (KI, Kontrollbedingung), (b) artikulatorischer Suppression, (c) dem zufälligen Generieren von Buchstaben („random generation“, RG).

B, Beispielaufgabe aus Experiment 6. Für eine Dauer von 500 ms erschienen zwei Samples, gefolgt von einer Pause (1500 ms). Danach erschienen zwei Tests (3000 ms). Das Feedback wurde unmittelbar danach gegeben (1000 ms). Ein weißes Fixaktionskreuz wurde in der ITI präsentiert (2000 ms). Aufgabe: Die Probanden sollten die Farben oder die Orientierung der beiden Halbkreise halten. Die Interferenzbedingungen waren identisch zu Experiment 5.

## Studie 1: Methode

**Tabelle 1**

**Vergleich der experimentellen Bedingungen des Farben-Validierungsexperimentes**

	<i>M</i>	<i>SE</i>	ANOVA, Haupteffekt <i>F</i> und <i>p</i>	Einzelkontrast Stufe vs. Mischfarbe
Echte Mischfarbe	3.18	.08	$F(3, 93) = 29.2, p < .01$	
Unpassende Farbe (Stufe 1)	2.6	.08		$F(1, 31) = 97.4$ $p < .01$
Unpassende Farbe (Stufe 2)	1.49	.09		$F(1, 31) = 241.69$ $p < .01$
Unpassende Farbe (Stufe 3)	.61	.10		$F(1, 31) = 437.92$ $p < .01$

Die 4 Stufen des Experimentes wurden mittels einer einfaktoriellen ANOVA (Messwiederholung) verglichen. Es folgten Einzelkontraste zwischen den Werten jeder Stufe und der Bedingung „Echte Mischfarbe“. Fragestellung: Erkennen die Probanden die konstruierten Mischfarben als Mischfarbe im Vergleich zu anderen Farben?

## 4. Studie 1: Resultate

Zu Beginn werden die Resultate der drei Versionen der Dual-Aufgabe „Was vs. Wo“ dargestellt (Experimente 1-3, Hypothese 1-3). Dem folgen die Ergebnisse von Experiment 4, in dem die Probanden eine räumlich-räumliche Dual-Aufgabe („Wo vs. Wo“, Hypothese 4) bearbeiteten. Abschließend werden Resultate über das Ausmaß von sprachlichen und zentral-exekutiven Einflüssen auf das Manipulieren und Halten präsentiert (Experiment 5 und 6, Hypothese 5 und 6).

### 4.1. „Farbe & Orientierung“: Experiment 1

Mit Experiment 1 wurde getestet, ob die Manipulation von räumlichen und farblichen Material auf getrennten Ressourcen basiert. Die Resultate der drei experimentellen Bedingungen (Farbe, Raum und Dual) sind in den Abbildungen 4 und 5 und in Tabelle 2 dargestellt ( $A'$ ,  $H$ ,  $FA$  und die Reaktionszeiten  $RT$ ).

Durch das gleichzeitige Bearbeiten der Raum- und Farbaufgabe in der Dual-Bedingung entstand keine Interferenz. Zwar konnte ein signifikanter Haupteffekt zwischen den drei experimentellen Bedingungen in der Signaldetektionssensitivität  $A'$  dokumentiert werden,  $F(2, 60) = 3.28, p = .044$ , aber es trat kein Unterschied zwischen der Einzelaufgabe mit der niedrigsten Sensitivität  $A'$  (räumliche Manipulation) und der Dual-Bedingung auf,  $F(1, 30) = .93, p = .34$ .

Die Durchführung der ANOVA erbrachte einen bedeutsamen Unterschied zwischen den drei Bedingungen in den Reaktionszeiten,  $F(2, 60) = 15.9, p < .01$ . Es existiert keine signifikant erhöhte Reaktionszeit in der Dual-Bedingung im Vergleich zur Einzelbedingung mit der höchsten Reaktionszeit,  $F(1,30) = .018, p = .89$ . Die Analyse der Reaktionszeiten erbrachte somit keinen Anhaltspunkt für eine serielle Bearbeitung der Aufgaben in der Dual-Bedingung.

#### 4.2. „Farbe & Orientierung“: Experiment 2

Experiment 2 verhindert durch seinen zeitlichen Aufbau eine serielle Bearbeitung der Dual-Aufgabe. Abbildungen 4 und 5 und Tabelle 2 geben die Resultate der drei experimentellen Bedingungen von Experiment 2 wieder (Farbe, Raum und Dual;  $H$ ,  $FA$ ,  $A'$  und  $RT$ ). Die Analyse der Sensitivitätswerte  $A'$  erbrachte einen bedeutungsvollen Haupteffekt,  $F(2, 20) = 16.23$ ,  $p < .001$ . Keine Interferenz trat in der Dual-Bedingung im Vergleich zur Einzelbedingung mit der niedrigsten Sensitivität  $A'$  auf,  $F(1, 10) = .03$ ,  $p = .85$ , (Tabelle 1).

Mit der ANOVA wurde ein signifikanter Haupteffekt in den Reaktionszeiten der drei Bedingungen entdeckt,  $F(2, 20) = 12.34$ ,  $p < .001$ . Die Dual-Bedingung und die Einzelbedingung mit den höchsten Reaktionszeiten unterschieden sich aber nicht signifikant,  $F(1,10) = .05$ ,  $p = .81$ , was ein serielles Bearbeiten der Aufgaben in der Dual-Bedingung ausschließt.

#### 4.3. „Farbe & Orientierung“: Experiment 3

Die Lösung der räumlichen Aufgabe auf der Basis von perzeptuellen Prozessen wurde durch Experiment 3 kontrolliert. Abbildungen 4 und 5 und Tabelle 2 beinhalten die Ergebnisse (Farbe, Raum und Dual;  $H$ ,  $FA$ ,  $A'$  und  $RT$ ).

Ein Haupteffekt bestand für die drei experimentellen Bedingungen in der Sensitivität  $A'$ ,  $F(2, 58) = 15.5$ ,  $p < .01$ , aber kein statistisch relevanter Unterschied konnte im Kontrast zwischen der Dual-Bedingung und der Einzelbedingung mit der niedrigsten Sensitivität dokumentiert werden,  $F(1, 29) = 1.97$ ,  $p = .17$ . Experiment 3 wurde in der Dual-Bedingung ohne einen Interferenzeffekt zwischen der Raum- und der Farbaufgabe bearbeitet ( $A'$ ).

Die Reaktionszeiten unterschieden sich statistisch bedeutsam zwischen den drei Bedingungen,  $F(2, 58) = 15.74$ ,  $p < .01$ . Auch zwischen der Dual-Bedingung und der

Einzelbedingung mit den höchsten Reaktionszeiten konnte eine signifikante Differenz gefunden werden,  $F(1,29) = 3.8, p = .06, \alpha = .15$ .

Die Reaktionszeiten sind zwar für die Dual-Bedingung im Vergleich zu der Einzelbedingung mit den höchsten Reaktionszeiten erhöht, allerdings betragen die mittleren Bearbeitungszeiten für die Dual-Bedingung 1787 ms ( $SE = 62$ ), für die Bedingung „räumliche Manipulation“ 1683 ms ( $SE = 59$ ) und für die Bedingung „Farbe manipulieren“ 1527 ms ( $SE = 51$ ). Somit ist nicht von einer seriellen Lösung der Dual-Aufgabe auszugehen, da keine Aufsummierung der Reaktionszeiten in der Dual-Bedingung dokumentiert werden kann.

#### **4.4. „Orientierung & Distanz“: Experiment 4**

Mit diesem Experiment sollte demonstriert werden, dass Interferenz beim synchronen Bearbeiten zweier Aufgaben entsteht, welche die gleichen Ressourcen im visuellen AG nutzen („Wo vs. Wo“). In Abbildung 4 und 5 und in Tabelle 2 werden die Ergebnisse dargestellt. Es wurde sowohl ein signifikanter Haupteffekt in der ANOVA für die drei experimentellen Bedingungen in  $A'$  entdeckt,  $F(2, 42) = 5.8, p = .006$ , als auch eine geringere Sensitivität  $A'$  in der Dual-Bedingung im Vergleich zur Einzelbedingung mit dem niedrigsten  $A'$ -Wert,  $F(1, 21) = 5.8, p = .02$ . In der räumlich-räumlichen Dual-Bedingung von Experiment 4 trat somit ein deutlicher Interferenzeffekt in der Signaldetektionssensitivität  $A'$  auf.

Die Reaktionszeiten der experimentellen Bedingungen unterschieden sich statistisch bedeutsam,  $F(2, 42) = 47.75, p < .01$ . Im Einzelkontrast konnte eine verlängerte Reaktionszeit in der Dual-Bedingung im Vergleich zu der Einzelbedingung mit der höchsten Reaktionszeit gefunden werden,  $F(1,21) = 18.59, p < .01$ . Die Reaktionszeiten der Dual-Bedingung betragen 1871 ms ( $SE = 42$ ), in der Bedingung „Raum1“ 1797 ( $SE = 60$ ) und in der Bedingung „Raum2“ 1607 ms ( $SE = 51$ ). Somit wird deutlich, dass die

erhöhten Reaktionszeiten in der Dual-Bedingung nicht auf einer Aufsummierung der Einzelreaktionszeiten beruhen. Trotz Interferenzeffekt in der Dual-Bedingung bearbeiteten die Probanden die Aufgaben nicht seriell.

#### **4.5. Ressourcen der Manipulation: Experiment 5**

Das vorliegende Experiment wurde konstruiert, um die kognitiven Ressourcen von Manipulationsprozessen zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 6 und 7 und in Tabelle 3 zu sehen. Es wurde jeweils eine einfaktorielle ANOVA mit drei Faktorstufen (keine Interferenz KI, artikulatorische Suppression AS und „random generation“ RG) für Farbmanipulation und Winkelmanipulation berechnet.

Die Analyse der  $A'$ -Werte ergab einen signifikanten Haupteffekt über die drei Bedingungen für die Farbmanipulation,  $F(2, 58) = 3.68, p = .03$ , und die Winkelmanipulation,  $F(2, 58) = 7.53, p = .001$ . Einzelkontraste, mit denen die KI-Bedingung mit der AS- und RG-Bedingung in der Sensitivität  $A'$  verglichen wurden, schlossen sich an. Es konnte dokumentiert werden, dass die Signaldetektionssensitivität  $A'$  durch gleichzeitiges „random generation“ reduziert wird, Farbmanipulation:  $F(1, 29) = 15.55, p < .01$ ; Winkelmanipulation:  $F(1, 29) = 9.38, p < .01$ . Durch artikulatorische Suppression tritt keine signifikante Beeinträchtigung in der Aufgabenbearbeitung auf, Farbmanipulation:  $F(1, 29) = .71, p = .40$ ; Winkelmanipulation:  $F(1, 29) = .036, p = .85$ .

Während der Farbmanipulation unterschieden sich die Reaktionszeiten über die drei Bedingungen hinweg,  $F(2, 58) = 4.5, p = .016$ , im Einzelkontrast konnte eine signifikante Differenz zwischen KI und RG gefunden werden,  $F(1, 29) = 6, p = .02$ .

Die Reaktionszeiten während der Winkelmanipulation differierten zwischen den drei Bedingungen,  $F(2, 58) = 4.1, p = .02$  und auch zwischen KI und RG im Einzelkontrast,  $F(1, 29) = 5.33, p = .02$ .

#### **4.6. Ressourcen des Haltens: Experiment 6**

Experiment 6 prüft, auf welchen kognitiven Grundlagen Prozesse des Haltens im visuellen AG beruhen. Die Resultate sind in den Abbildungen 6 und 7 und in Tabelle 3 dargestellt. Die Analyse der Daten erfolgte analog zu Experiment 5. In Experiment 6 entstand keine Interferenz in der Bearbeitung der beiden Halteaufgaben durch „random generation“ oder durch artikulatorische Suppression, Farbenhalten:  $F(2, 58) = .09, p = .9$ ; Winkelhalten:  $F(2, 58) = .78, p = .46$  (einfaktorielle ANOVA, drei Stufen, Messwiederholung).

In den Reaktionszeiten zeigte sich kein bedeutsamer Unterschied zwischen den experimentellen Bedingungen für das Farbenhalten  $F(2, 58) = .55, p = .57$ , aber ein signifikanter Haupteffekt für das Winkelhalten,  $F(2, 58) = 4.4, p = .01$ , mit einem Trend im Einzelkontrast zwischen KI und RG,  $F(1, 29) = 3.26, p = .08$ .

## Studie 1: Resultate

**Tabelle 2**  
**Ergebnisse der Experiment 1-4**

	<i>H</i>	<i>FA</i>	<i>A'</i>	Haupteffekt <i>A'</i>	Einzelkontrast „Dual“ vs. Einzelbedingung mit niedrigsten <i>A'</i>
<b>Experiment 1</b>					
Farbe	.74 (.03)	.3 (.02)	.80 (.01)	$F(2, 60) = 3.28$ $p = .044$	n.s.
Raum	.7 (.3)	.31 (.01)	.77 (.02)		
Dual	.68 (.03)	.34 (.02)	.74 (.02)		
<b>Experiment 2</b>					
Farbe	.81 (.05)	.06 (.05)	.93 (.01)	$F(2,20) = 16.52$ $p < .001$	n.s.
Raum	.68 (.04)	.23 (.03)	.81 (.02)		
Dual	.7 (.05)	.23 (.01)	.8 (.03)		
<b>Experiment 3</b>					
Farbe	.75 (.03)	.19 (.03)	.85 (.02)	$F(2, 58) = 15.5$ $p < .001$	n.s.
Räuml.	.69 (.02)	.3 (.02)	.76 (.02)		
Dual	.67 (.03)	.34 (.02)	.74 (.02)		
<b>Experiment 4</b>					
Raum 1	.72 (.03)	.17 (.02)	.85 (.01)	$F(2, 42) = 5.84$ $p = .006$	$F(1, 21) = 5.83$ $p = .025$
Raum 2	.72 (.03)	.19 (.02)	.83 (.02)		
Dual	.63 (.03)	.25 (.02)	.76 (.01)		

Dargestellt sind die Mittelwerte (+/- SE) der Treffer *H*, der Fehlalarme *FA* und von *A'* für die drei experimentellen Bedingungen der Experimente 1-4. Die *A'*-Werte der drei experimentellen Bedingungen der Experimente 1-4 wurden mittels einfaktorieller ANAOVA (Messwiederholung) verglichen. Die Dual-Bedingung wurde mit der Einzelbedingung, welche die niedrigsten *A'*-Werte aufwies, kontrastiert ( $p < .05$ ).

## Studie 1: Resultate

**Tabelle 3**  
**Ergebnisse der Experiment 5 und 6**

	<i>H</i>	<i>FA</i>	<i>A'</i>	Haupteffekt <i>A'</i>	Einzelkontrast <i>A'</i> : 1. KI vs. AS, 2. KI vs. RG
<b>Experiment 5</b>					
<b>Raum KI</b>	.86 (.03)	.28 (.03)	.86 (.02)	$F(2, 58) = 7.53$ $p < .01$	1. n.s. 2. $F(1, 29) = 9.38$ $p < .01$
<b>Raum AS</b>	.86 (.02)	.37 (.03)	.84 (.04)		
<b>Raum RG</b>	.73 (.05)	.38 (.03)	.74 (.02)		
<b>Experiment 5</b>					
<b>Farbe KI</b>	.77 (.03)	.33 (.03)	.80 (.03)	$F(2, 58) = 3.68$ $p = .031$	1. n.s. 2. $F(1, 29) = 15.57$ $p < .01$
<b>Farbe AS</b>	.73 (.03)	.34 (.02)	.76 (.03)		
<b>Farbe RG</b>	.63 (.05)	.38 (.03)	.69 (.03)		
<b>Experiment 6</b>					
<b>Raum KI</b>	.8 (.03)	.26 (.02)	.84 (.02)	n.s.	1. n.s. 2. n.s.
<b>Raum AS</b>	.81 (.03)	.26 (.02)	.85 (.02)		
<b>Raum RG</b>	.73 (.04)	.28 (.03)	.82 (.01)		
<b>Experiment 6</b>					
<b>Farbe KI</b>	.85 (.02)	.39 (.03)	.82 (.02)	n.s.	1. n.s. 2. n.s.
<b>Farbe AS</b>	.83 (.02)	.37 (.03)	.81 (.02)		
<b>Farbe RG</b>	.75 (.03)	.28 (.02)	.81 (.02)		

Dargestellt sind die Mittelwerte (+/- *SE*) der Treffer *H*, der Fehlalarme *FA* und von *A'* für die drei experimentellen Bedingungen von Experiment 5 und 6. Die *A'*-Werte der experimentellen Bedingungen KI (keine Interferenz, Kontrolle), AS (artikulatorische Suppression) und RG („random generation“) wurden mit einer einfaktoriellen ANOVA verglichen. Es schlossen sich Einzelkontraste an: KI vs. AS und KI vs. RG ( $p < .05$ ).

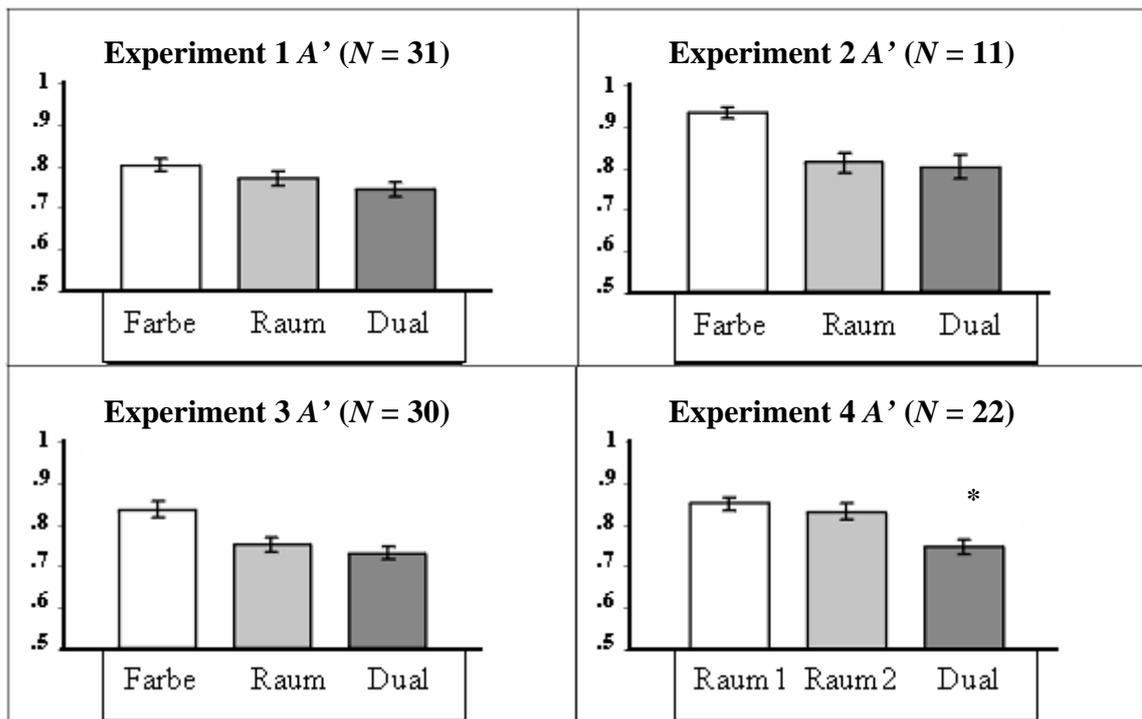


Abbildung 4

Die mittleren  $A'$ -Werte und Standardfehler ( $SE$ ) der drei experimentellen Bedingungen der Experimente 1-4 (Experiment 1-3: Räumliche Manipulation = Raum, Farben Manipulieren = Farbe, und Dual-Manipulation = Dual; Experiment 4: Räumliche Manipulation 1 = Raum 1, räumliche Manipulation 2 = Raum 2 und Dual-Manipulation = Dual; Dual-Bedingungen, welche mit \* gekennzeichnet sind, haben signifikant niedrigere  $A'$ -Werte im Vergleich zur Einzelbedingung mit dem niedrigsten  $A'$ -Wert,  $p < .05$ ).

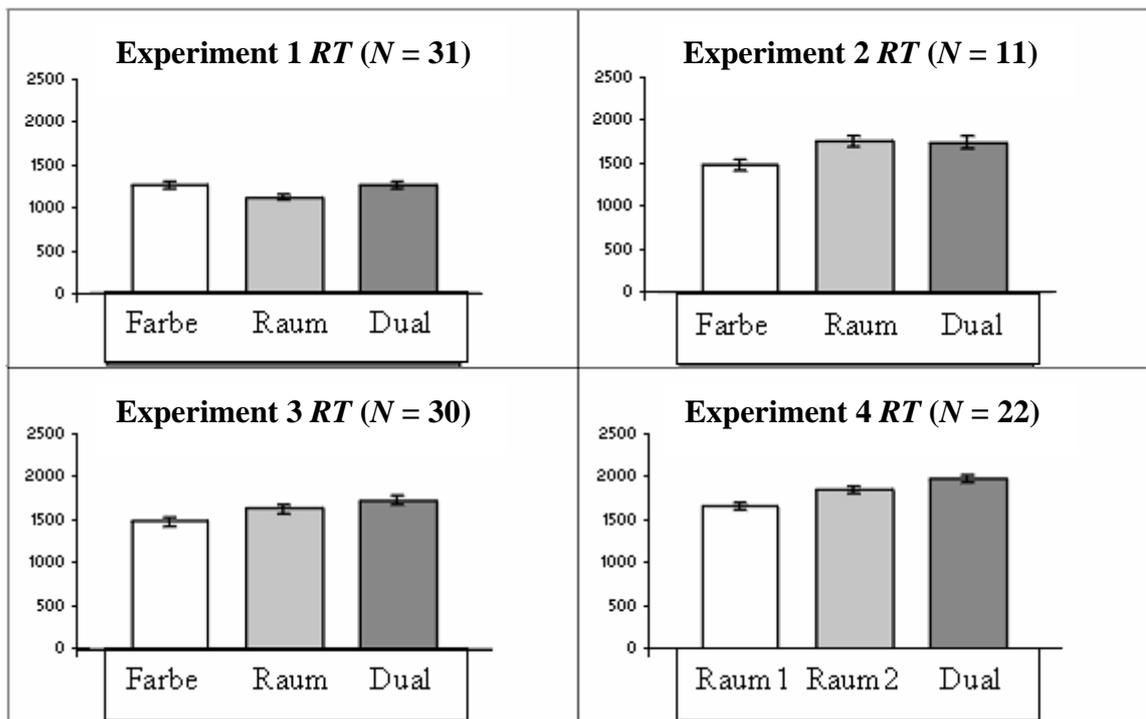


Abbildung 5

Mittlere Reaktionszeiten (*RT*) und Standardfehler (*SE*) der drei Bedingungen der Experimente 1-4. (Experiment 1-3: Räumliche Manipulation = Raum, Farben Manipulieren = Farbe, und Dual-Manipulation = Dual; Experiment 4: Räumliche Manipulation 1 = Raum 1, räumliche Manipulation 2 = Raum 2 und Dual-Manipulation = Dual).

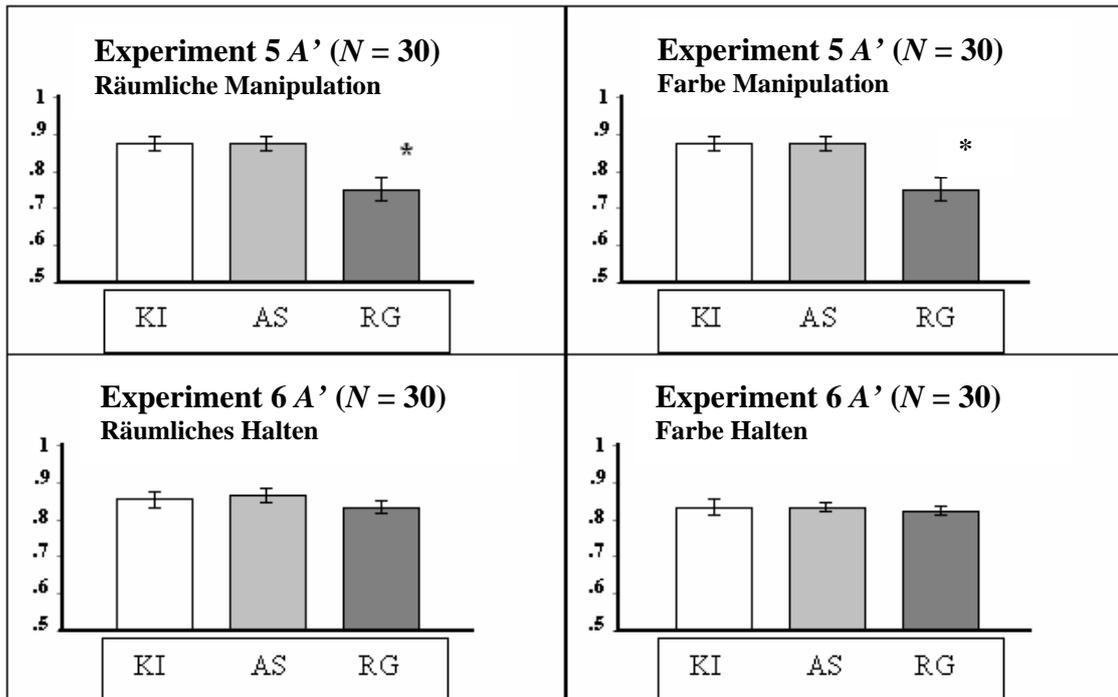


Abbildung 6

Mittlere  $A'$ -Werte und Standardfehler ( $SE$ ) für (a) das Manipulieren von Farben und Winkeln (Experiment 5), und das (b) Halten von Farben und Winkeln (Experiment 6, dargestellt für die drei experimentellen Bedingungen KI = keine Interferenz, AS = artikulatorische Suppression und RG = „random generation“. Bedingungen, die mit \* gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant von KI,  $p < .05$ ).

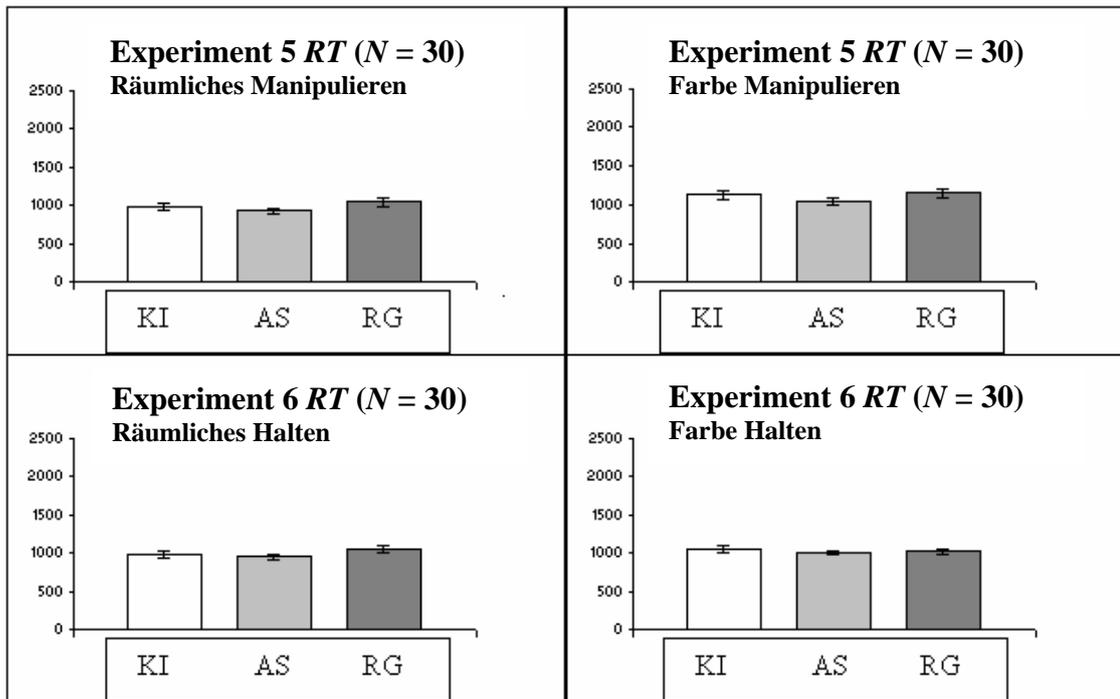


Abbildung 7

Mittlere Reaktionszeiten (*RT*) und Standardfehler (*SE*) für (a) das Manipulieren von Farben und Winkeln (Experiment 5), (b) und das Halten von Farben und Winkeln (Experiment 6, dargestellt für die drei experimentellen Bedingungen KI = keine Interferenz, AS = artikulatorische Suppression und RG = „random generation“). Bedingungen, die mit \* gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant von KI,  $p < .05$ ).

## 5. Studie 1: Diskussion

Mit der vorliegenden Studie sollten folgende Annahmen getestet werden:

Manipulationsprozesse können im visuellen AG in eine dorsale und ventrale Komponente aufgeteilt werden. Prozesse der Manipulation benötigen andere Ressourcen als Prozesse des Haltens.

Es wurde ein Dualparadigma verwendet. Die Probanden erhielten die Anweisung, mental einzeln oder simultan Farben zu mischen und/oder räumliche Rotationen durchzuführen (Experimente 1-3, „Farbe & Orientierung“). In einem weiteren Experiment sollten die Probanden zwei räumliche Manipulationsaufgaben einzeln oder simultan lösen (Experiment 4, „Orientierung & Distanz“). Annahme war, dass keine Interferenz in der Dualbedingung der ersten drei Experimente entsteht, da das Manipulieren von Farbe und Winkel auf gesonderten Ressourcen basieren sollte (Hypothesen 1-3). Dagegen wurde erwartet, dass in der Dualbedingung von Experiment 4 Interferenz entsteht, da beide räumliche Aufgaben Zugriff auf die Ressourcen des räumlichen Subsystems nehmen (Hypothese 4).

Zwei weitere Interferenzaufgaben wurden konstruiert, um die kognitiven Grundlagen von Manipulations- und Halteprozessen zu vergleichen („Halten vs. Manipulieren“). Die Probanden bearbeiteten eine Farb-, eine Winkelmanipulations- (Experiment 5) oder eine Halteaufgabe (Experiment 6) unter verschiedenen Interferenzbedingungen (KI, AS und RG). In der Bedingung KI lösten die Probanden die Aufgaben ohne zusätzliche Interferenz, in der Bedingung AS mit artikulatorischer Suppression und in RG gemeinsam mit dem zufälligen Generieren von Buchstaben („random generation“).

Es wurde angenommen, dass „random generation“ mit dem Manipulieren von Farbe und Orientierung (Hypothese 5) und nicht mit dem Halten dieser Materialarten (Hypothese 6) interferiert. Artikulatorische Suppression sollte sich weder mit dem Manipulieren noch mit dem

Halten von dorsaler und ventraler Information überlagern, da beide Aufgaben ohne verbale Codierung der Stimuli gelöst werden sollten (Hypothese 7).

### **5.1. „Farbe & Orientierung“: Getrennte Ressourcen**

Die vertretenen Hypothesen wurden in allen Experimenten bestätigt. In Experiment 1 trat in der Dualbedingung keine verringerte Signaldetektionssensitivität im Vergleich zu der Einzelbedingung mit der niedrigsten Sensitivität (Hypothese 1) auf. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der vertretenen Annahme, dass zwei unabhängige Ressourcen für die Manipulation von Farbe und Orientierung zur Verfügung stehen.

Die zeitliche Darbietung der Stimuli in Experiment 2 soll ein serielles Bearbeiten der beiden Aufgaben in der Dualbedingung erschweren. Auch in Experiment 2 konnte kein Interferenzeffekt in der Dualbedingung gefunden werden, was die Annahme getrennter, materialspezifischer Ressourcen unterstützt (Hypothese 2).

Experiment 3 wurde konstruiert, um eine Lösung der räumlichen Rotationsaufgabe auf der Basis von perzeptuellen Prozessen (z.B. Gestaltwahrnehmung) zu verhindern. Aber auch in Experiment 3 wurde keine Interferenz während der synchronen Bearbeitung beider Aufgaben in der Dual-Bedingung beobachtet (Hypothese 3). Zusätzlich erschwert die zeitliche Darbietung der Stimuli eine serielle Lösung der Dual-Aufgabe. In Experiment 3 kann somit auch auf der Basis einer großen Stichprobe von 30 Probanden eine serielle Lösung der Dual-Aufgabe ausgeschlossen werden (Experiment 2:  $N = 11$ ).

Zusätzlich wird die Annahme einer parallelen Bearbeitung der beiden Aufgaben in der Dualbedingung der Experimente 1-3 durch die Analyse der Reaktionszeiten unterstützt. Es gab keine Hinweise für eine Aufsummierung der Reaktionszeiten in dieser Bedingung. Die Reaktionszeiten der Dualbedingung der Experimenten 1 und 2 waren im Vergleich zu den Reaktionszeiten der schwierigsten Einzelbedingung nicht signifikant erhöht. Nur in Experiment 3 konnte eine geringe Steigerung der Reaktionszeiten in der Dualbedingung beobachtet werden,

welche aber nicht auf eine Aufsummierung der Reaktionszeiten der Einzelaufgaben zurückgeführt werden kann. Verantwortlich für diesen Anstieg ist vermutlich eine erhöhte Aufmerksamkeitsbelastung durch das gleichzeitige Beachten zweier Aufgaben.

Die relativ niedrigen Signaldetektionswerte der drei Experimente weisen auf eine starke Arbeitsbelastung der Probanden hin. Trotzdem konnte keine Interferenz in den Dualbedingungen der Experimente 1-3 beobachtet werden. Dieser Befund unterstützt zusätzlich die vertretene Annahme, dass unabhängige Ressourcen für die Manipulation von Farbe und Raum vorliegen.

## **5.2. „Orientierung & Distanz“: Gemeinsame Grundlagen**

Allerdings könnte das Ausbleiben der Interferenz in den Experimenten 1-3 auch die Folge eines Bodeneffektes sein, d.h. die Signaldetektionssensitivität konnte nicht in bedeutsamem Umfang in der Dualbedingung sinken, da das Bearbeiten der Einzelbedingungen schon sehr schwierig war. Aus diesem Grund war es wichtig, eine Aufgabe mit derselben Schwierigkeit wie in den Experimenten 1-3 zu konstruieren, in der Interferenz in der Dualbedingung erwartet wurde, da beide Aufgaben das gleiche kognitive System beanspruchen. Diesem Zweck diene Experiment 4. Es zeigte sich, dass die Probanden eine deutliche Einbuße in der Signaldetektionssensitivität während der Bearbeitung der räumlich-räumlichen Dualbedingung erlitten.

Dieses Ergebnis dokumentiert, dass die synchrone Bearbeitung zweier Einzelaufgaben, welche die gleichen Ressourcen belasten, zu Interferenz führt. In Experiment 4 konnte auch eine Verlängerung der Reaktionszeiten in der Dualbedingung beobachtet werden, die aber, wie in Experiment 3, nicht als Aufsummierung der Reaktionszeiten der Einzelaufgaben betrachtet werden kann. Somit wurde in Experiment 4 die Dualbedingung, ungeachtet eines deutlichen Interferenzeffektes, nicht seriell, sondern parallel gelöst.

Zusammengefasst bestätigen die Resultate der ersten vier Experimente die Annahme, dass die Manipulation von ventraler und dorsaler Information von separaten Systemen des

Arbeitsgedächtnisses unterstützt wird. Eine materialspezifische Dissoziation der AG-Ressourcen wurde bisher zum größten Teil von Experimenten dokumentiert, welche Halteaufgaben verwendeten (Della Sala et al., 1999; Hecker und Mapperson, 1997; Kessels, Postma und De Haan, 1999; Logie und Marchetti, 1991; Tresch, Sinnamon und Seamon, 1993).

Meiner Kenntnis nach wurde bisher nur in einer experimentellen Studie eine materialspezifische Ressourcenverteilung für Manipulationsprozesse untersucht (Vuontela et al., 1999). Die Resultate der Autoren lassen sich allerdings wegen des verwendeten „n-back“ Paradigma nicht eindeutig interpretieren (Meegan et al., 2004, siehe Einleitung). Befunde, welche eine materialspezifische Trennung von aktiven Prozessen im visuellen AG dokumentieren, wurden bislang nur von wenigen neuropsychologischen Fallstudien erbracht (Farah et al., 1988; Luzzatti et al., 1998).

### **5.3. „Halten vs. Manipulieren“: Einfluß der ZE**

Wie angenommen interferierte das Manipulieren von „Was“ und „Wo“ Information mit dem zufälligen Generieren von Buchstaben (Experiment 5, Hypothese 5), nicht aber das Halten dieses Materials (Experiment 6, Hypothese 6). Die artikulatorische Suppression interferierte nicht mit dem Manipulieren oder dem Halten der beiden Materialarten, was im Einklang mit der Hypothese steht, dass diese nicht verbal codiert wurden (Hypothese 7).

Die vorliegenden Experimente 5 und 6 demonstrierten, dass sich das Halten und Manipulieren im Ausmaß der benötigten ZE-Ressourcen unterscheiden: Das Halten erfordert nur in geringem Umfang ZE-Ressourcen während die Manipulation in bedeutsamem Umfang Grundlagen der zentralen Exekutive in Anspruch nimmt. Der vorliegende Befund unabhängiger aktiver (Manipulation) und passiver (Halten) Prozesse steht im Einklang mit experimentalpsychologischen Resultaten (Bruyer und Scailquin, 1998; Duff, 2000; Miyake, 2001), neuropsychologischen Fallstudien (Cornoldi et al., 2000) und

neuropsychopharmakologischen Studien (Honey et al., 2003). Die vorliegenden Ergebnisse geben allerdings keinen Anhaltspunkt dafür, dass sich die Prozesse des Manipulierens und Haltens analog zu der Unterscheidung „Was vs. Wo“ in diskrete Subkomponenten teilen lassen. Aufgaben können vermutlich in unterschiedlichem Ausmaß auf der zentralen Exekutive basieren, so dass die Unterscheidung „Halten vs. Manipulieren“ gradueller Natur ist (siehe auch Vecchi und Cornoldi, 1999).

#### **5.4. Aufteilung des visuellen AG**

Bisherige Modelle des visuellen AG berücksichtigten nicht, dass auch Prozesse der Manipulation auf Basis getrennter, materialspezifischer Ressourcen arbeiten.

Baddeley (1998) nahm an, dass nur das Halten von Material des ventralen und dorsalen Pfades auf getrennten Komponenten basiert. Dagegen sollen Prozesse der Manipulation auf der Grundlage einheitlicher ZE-Ressourcen operieren. In neueren Ansätzen definiert Baddeley (1996) Subprozesse der zentralen Exekutiven (z.B. Inhibition, Aufmerksamkeitslenkung), ohne allerdings die Möglichkeit materialspezifisch getrennter ZE-Ressourcen zu beachten.

Logie (1995) verband in einem alternativen Modell die Art des Materials mit der Art des durchgeführten Prozesses: Ventrales Material soll in einem passiven visuellen Speicher gehalten werden, während Manipulationsprozesse in einem räumlichen „inner scribe“ statt finden. Dieser Ansatz sieht keine eigenständigen Ressourcen für das Manipulieren von ventralem visuellem Material vor.

Aufbauend auf den Befunden der vorliegenden Experimente lässt sich ein Modell des visuellen AG aufstellen, in dem getrennte Ressourcen nach Materialart („Was vs. Wo“) und nach Art des Prozesses bestehen („Halten vs. Manipulieren“). Der Unterschied zwischen den Prozessen des Haltens und des Manipulierens ist wahrscheinlich kontinuierlich.

### **5.5. Ausblick auf Studie 2: Aufbau des FK**

Die neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG sind trotz vieler Studien umstritten. In der Einleitung wurden bereits zwei konkurrierenden Theorien über die funktionelle Organisation des PFK dargestellt, nämlich die domänenspezifische und die prozessspezifische Theorie.

Erstere behauptet, dass der PFK materialspezifisch aufgeteilt ist („Was vs. Wo“) und letztere vertritt die Annahme, dass der PFK prozessspezifisch organisiert ist („Halten vs. Manipulieren“).

Die vorliegenden Verhaltensdaten weisen darauf hin, dass das visuelle AG getrennte materialspezifische Ressourcen besitzt und dass der Unterschied zwischen Halten und Manipulieren auf einer graduellen Involvierung von ZE-Ressourcen beruht.

Rückschlüsse von der Verteilung kognitiver Ressourcen auf die Organisation kortikaler Areale sind allerdings nur eingeschränkt möglich, da keine logische Beziehung zwischen Verhaltensdaten und der Organisation neurophysiologischer Strukturen bestehen muss. So kann nach dem Modell von Marr (1982) die Informationsverarbeitung in drei Ebenen beschrieben werden. In der obersten ist das Ziel oder Problem formuliert, das es zu lösen gilt (z.B. Farbwahrnehmung). In der zweiten wird spezifiziert, wie dieses Ziel erreicht werden soll. Das Problem wird in einen Algorithmus mit verschiedenen Lösungsmöglichkeiten übertragen. Die dritte Ebene repräsentiert die physikalische/neurophysiologische Implementierung des Algorithmus. Es gibt in der Regel mehrere Alternativen, einen Algorithmus physikalisch umzusetzen.

Eine direkte Übertragung der vorliegende Verhaltensresultate auf die neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG ist somit schwierig. Eine Theorie, die in diesem Zusammenhang hilfreiche Aussagen über die Beziehungen der verhaltens- und der neurophysiologischen Ebene macht, ist die „cortical field hypothesis“ (Klingberg, 1998; Roland und Zilles, 1998).

Nach diesem Ansatz sind die größten funktionalen Einheiten des Kortex Felder (Größe 600-2000 mm<sup>3</sup>), die sich aus Säulen zusammensetzen<sup>1</sup>. Diese Felder arbeiten außer in primären sensorischen Arealen nicht-parallel. Aus diesem Grund sollen Leistungseinbußen bei der Bearbeitung von Dual-Aufgaben entstehen, welche die gleichen Felder beanspruchen. Nach dieser Hypothese weist das Ausbleiben von Interferenz in der vorliegenden Dual-Aufgabe („Was vs. Wo“) darauf hin, dass die Bearbeitung der beiden Materialarten auf getrennten neurophysiologischen Ressourcen beruhen.

Die per Verhaltensdaten dokumentierte materialspezifische Dissoziation könnte somit ihre Grundlage in materialspezifisch getrennten kortikalen Feldern des PFK haben. Dieser Befund kann als Unterstützung der domänenspezifischen Theorie gewertet werden, wobei allerdings offen ist, ob die postulierte kortikale Dissoziation wirklich den PFK oder stärker posterior gelegenen Areale betrifft.

Auf der anderen Seite konnte die vorliegende Studie auch getrennte Ressourcen für das Halten und Manipulieren dokumentieren. Dieser Befund könnte nach der „cortical field hypothesis“ darauf hinweisen, dass Halten und Manipulieren auf getrennten kortikalen Arealen basieren. Das benutzte Interferenzparadigma („random generation“) erlaubt allerdings nicht den Schluss, dass die gefundenen Unterschiede zwischen den Prozessen diskreter Natur sind (siehe oben). Somit können die Vorhersagen der prozessspezifischen Theorie durch die vorliegenden Befunde nicht eindeutig bestätigt werden.

Das Farbmanipulationsparadigma, welches für die vorliegende Studie entwickelt wurde, ist ein neues und valides Instrument für die aktive Manipulation von Information des ventralen visuellen Pfades. In der folgenden fMRT-Studie wird es zusammen mit dem räumlichen Manipulationsparadigma verwendet, um die funktionelle Organisation der neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG zu untersuchen. Die Anwendung des Farbmanipulationsparadigmas in einer bildgebenden Studie stellt das erste reine ventrale,

---

<sup>1</sup> Kortikale Neuronen sind in Säulen angeordnet, die über mehrere Schichten reichen. Innerhalb einer Säule sind die Neuronen funktionell miteinander verbunden, z.B. für bestimmte Orientierungen von Reizen.

nonverbale Manipulationsparadigma dar, von dem in der Literatur berichtet wurde. Dieses Paradigma soll helfen, das Ausmaß einer domän- oder prozessspezifischen Spezialisierung des PFK zu klären.

## **6. Studie 2: Fragestellung und Thesen**

Die übergeordnete Fragestellung der Gesamtstudie beschäftigt sich mit der Aufteilung des visuellen Arbeitsgedächtnisses nach Material und Prozess und den damit korrelierten neurophysiologischen Grundlagen. Während in der ersten Studie per Verhaltensdaten materialspezifisch getrennte Ressourcen von Manipulationsprozessen erfasst wurden, sollen in der zweiten Studie die neurophysiologischen Korrelate des visuellen AG mittels fMRT untersucht werden.

### **6.1. Materialspezifische Organisation des FK?**

Für Studie 2 wurde folgende vorläufige Fragestellung formuliert: Besteht eine dorso-ventrale Dissoziation des FK nach Materialart („Was vs. Wo“, domänenspezifische Theorie, Goldman-Rakic, 1987) sowohl für die Prozesse des Haltens wie des Manipulierens? Verhaltensstudien erbrachten Hinweise für materialspezifisch getrennte Ressourcen für das Halten von visueller Information (z.B. Dela Sella et al., 1999). Die vorliegenden Verhaltensdaten der ersten Studie dokumentieren, dass auch Prozesse des Manipulierens materialspezifisch getrennte Grundlagen besitzen (siehe auch Mohr und Linden, 2005). Diese Ergebnisse unterstützen die Sichtweise, dass eine materialspezifische Dissoziation des AG über unterschiedliche Prozesse hinweg existiert (domänenspezifische Theorie). Somit stellt sich die Frage, ob die per Verhaltensdaten gefundene Aufteilung des visuellen AG ihre Entsprechung in der funktionellen Organisation des FK findet. Die Befundlage bisheriger bildgebender Studien zur Organisation des FK ist widersprüchlich, allerdings wurden in den meisten Studien Stimuli verwendet, welche nur schlecht zwischen ventraler und dorsaler perzeptueller Information trennten.

## **6.2. Thesen**

Aufbauend auf Befunden von Verhaltensexperimenten (z.B. Dela Sella et al., 1999), Bildgebungsstudien, welche den Einfluss ventraler und dorsaler Information systematisch variierten (Sala, Rama, und Courtney, 2003) und vorliegenden eigenen Ergebnissen, welche für das Halten und Manipulieren getrennte Ressourcen nach Materialart ergaben, wird folgende These vertreten:

Sowohl für das Halten als auch das Manipulieren sollte eine dorso-ventrale Dissoziation des FK nach Materialart vorliegen. Ventrale Regionen sollten mit dem Halten und Manipulieren von Objektinformation assoziiert sein, dorsale Gebiete des FK mit dem Halten und Manipulieren von räumlicher Information.

## **7. Studie 2: Methode**

Im zweiten Teil der Arbeit soll mittels fMRT die neurophysiologische Grundlage des visuellen Arbeitsgedächtnisses untersucht werden. Es wird die Annahme überprüft, dass eine dorso-ventrale Raum-Objekt-Dissoziation des FK für Prozesse des Haltens und des Manipulierens besteht (domänenspezifische Theorie, Goldman-Rakic, 1987). Um eine Entscheidung zwischen der prozess- und der domänenspezifischen Theorie zu fällen, war es notwendig, ein Design, welches folgende Kontrastierungen ermöglichte, zu ermitteln:

1. „Was vs. Wo“ beim Halten von Information
2. „Was vs. Wo“ beim Manipulieren von Information und
3. „Halten vs. Manipulieren“.

Das nachstehende Kapitel beginnt mit einer knappen Darstellung der physikalischen und physiologischen Grundlagen des fMRT. Dem schließt sich die Darstellung der Stichprobe, der Operationalisierung der Variablen und der Versuchsablauf an. Daran folgend werden die Hypothesen formuliert und abschließend die Messung und die statistische Auswertung der fMRT-Daten geschildert.

### **7.1. Funktionelle Magnetresonanztomographie**

Die funktionelle Magnetresonanztomographie basiert auf dem Befund von Ogawa (1990), dass die Magnetresonanztomographie sensitiv für die Sauerstoffsättigung des Blutes ist („blood oxygen level dependent“, BOLD). Diese Variation der Sauerstoffsättigung steht in Zusammenhang mit neuronaler Aktivität, so dass die Methode funktionelle Messungen erlaubt.

#### **7.1.1. Physikalische Grundlagen**

Die allgemeinen physikalischen Grundlagen des fMRT sollen hier nicht erläutert werden, da sie nicht im Fokus der Arbeit stehen. Zentrale Prinzipien zum Verständnis des fMRT

hingegen werden ausgeführt. Eine umfassende Darstellung des funktionellen MRT findet sich bei Cohen (1999).

Die Magnetresonanztomographie (MRT) beruht auf den magnetischen Eigenschaften der Protonen, welche sich unter Einfluss eines äußeren Magnetfeldes parallel oder antiparallel zu den Magnetfeldlinien ausrichten (z-Achse). Dadurch wird ein magnetischer Summationsmoment in z-Richtung aufgebaut (Longitudinal-Magnetisierung). Die Protonen vollbringen nun Präzessionsbewegungen entlang der Feldlinien. Bildlich dargestellt torkelt das Proton um seine Achse wie ein Kreisel.

Die Protonen werden durch einen elektromagnetischen Hochfrequenzimpuls (HF-Impuls) in Ausrichtung zu dem externen Magnetfeld gekippt (z.B.  $90^\circ$ ). Der HF-Impuls bewirkt, dass die Protonenpräzision synchronisiert wird. Die Ausrichtung ihrer Magnetfelder ist somit zu jedem Zeitpunkt identisch. Die sich bisher gegenseitig neutralisierenden Magnetvektoren quer zum externen Magnetfeld addieren sich nun und es tritt eine Transversalmagnetisierung auf. Die Longitudinalmagnetisierung nimmt in Folge des HF-Impulses ab.

Sobald der HF-Impuls abgeschaltet wird, kehrt das System in den ursprünglichen Zustand zurück (Relaxation). Es lassen sich zwei verschiedene Relaxationsarten unterscheiden: Die Longitudinalrelaxation und die Transversalrelaxation. Unter Longitudinalrelaxation versteht man die vollständige, energierückgebende Erholung der Longitudinalmagnetisierung nach einem HF-Impuls. Die longitudinale Relaxationszeit  $T_1$  beschreibt die Geschwindigkeit, mit der die Longitudinalrelaxation abläuft. Die Rückkehrgeschwindigkeit wird wesentlich von der Schnelligkeit der Energieübertragung auf nicht angeregte Molekülgitter wie z.B. Protein- oder Lipidverbände im Gewebe bestimmt.

Unter Transversalrelaxation versteht man außer Phase geratende Protonen. Dabei nimmt die Quermagnetisierung wieder ab. Die transversale Relaxationszeit  $T_2$  beschreibt die

Geschwindigkeit, mit der dieser Prozess abläuft. Er beruht auf einer Wechselwirkung zwischen den Protonen.  $T_2$  ist von der Gewebeart abhängig, Fett besitzt eine kurze, Wasser hingegen eine lange  $T_2$ . Das externe Magnetfeld ist allerdings nur theoretisch homogen. Externe Magnetfeldinhomogenitäten bewirken eine Beschleunigung der Dephasierung der Protonen. Diese schnellere Zeitkonstante wird  $T_2^*$  genannt.

Nach dem Abschalten des *HF*-Impulses erhält man das so genannte *FID*-Signal („free induction decay“). Das *FID*-Signal ist ein Summenvektor. Es setzt sich aus dem Vektor der abnehmenden Quermagnetisierung und dem Vektor der zunehmenden Längsmagnetisierung zusammen. Der Summenvektor präzidiert, so dass er eine Spiralbewegung ausführt.

Die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden *HF*-Impulsen wird *TR*-Zeit genannt (auch Repetitionszeit). Echozeit (*TE*) bezeichnet die Zeitspanne zwischen einem gesendeten *HF*-Impuls und dem Empfang des *FID*-Signals. Durch unterschiedliche Längen der *TR*- und der *TE*-Zeit lassen sich  $T_1$  oder  $T_2$ - gewichtete Bilder erstellen.

### **7.1.2. Physiologische Grundlagen des fMRT**

Das fMRT erfasst Suszeptibilitätsunterschiede im Hirngewebe, die durch lokale Durchblutungsänderungen verursacht werden. Die Suszeptibilitätsveränderungen werden vor allem durch das Verhältnis der oxygenierten/desoxygenierten Hämoglobinkonzentration bestimmt. Desoxygeniertes Hämoglobin (dHB) ist paramagnetisch und führt zu lokalen Feldinhomogenitäten und somit zu einer Verringerung des MR-Signals (kürzere  $T_2^*$ ), oxygeniertes Hämoglobin (HB) hingegen hat diamagnetische Eigenschaften und deshalb keinen Einfluss auf das MR-Signal. Schwankungen im Verhältnis zwischen dHB und HB führen zu Veränderungen im Bildkontrast (BOLD).

Neuronale Aktivität führt zu einem erhöhten neuronalen Sauerstoffverbrauch. Kurze Zeit nach dem Einsetzen der neuronalen Aktivität kommt es wegen des plötzlich erhöhten O<sub>2</sub>-Bedarfs zu einem initialen Anstieg des dHB. Die Folge ist ein schneller, geringfügiger Abfall des MR-Signals („initial dip“) wonach ein entgegengesetzter Mechanismus in Kraft tritt: Es findet eine Zunahme des regionalen zerebralen Blutflusses und des damit umgesetzten Blutvolumens statt (Fox et al., 1986). Dieser Zufluss ist so stark, dass er zu einer erhöhten Konzentration an diamagnetischem HB im Vergleich zu paramagnetischen dHB führt (Überkompensation des Sauerstoffbedarfs). Dadurch nimmt die Magnetfeldinhomogenität ab. Infolgedessen wird die transversale Relaxation verlangsamt und das Signal steigt im Vergleich zu einer Ruhephase an (ca. 4-6 Sekunden nach Beginn der neuronalen Aktivität). Dies wird als positiver BOLD- Effekt bezeichnet. Ein positiver BOLD- Ausschlag entspricht einer Erhöhung der neuronalen Aktivität (vor allem „lokal field potentials“, Logothetis et al., 2001). Die funktionelle Bedeutung eines negativen Ausschlags ist noch nicht geklärt. Einige Autoren vertreten die Ansicht, dass ein negatives BOLD- Signal eine Minderung der neuronalen Aktivität anzeigt (Fransson et al., 1999).

## **7.2. Stichprobe**

Zehn rechtshändige Probanden bearbeiteten Experiment 1 und 2 (normalsichtig oder korrigiert normalsichtig, farbnormalsichtig nach Ischiyama, 2001, davon 6 Frauen, Durchschnittsalter  $M = 26.8$ ,  $SD = 3.52$ ).

## **7.3. Operationalisierung**

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die gleichen Paradigmen und Materialien verwendet wie in der zuvor berichteten Verhaltensstudie. Ausführlichere Darstellungen und Begründungen finden sich im Methodenteil von Studie 1.

### **7.3.1. Halten von „Farbe & Orientierung“: Experiment 1**

Das Halten ventraler Information wurde über das Merken der Farben zweier Halbkreise realisiert. Beim Halten von dorsaler Information mussten sich die Probanden die Orientierung zweier Halbkreise einprägen.

### **7.3.2. Manipulieren von „Farbe & Orientierung“: Experiment 2**

Die Manipulation ventraler Information wurde über das mentale Mischen der Farben zweier Halbkreise erfasst, die Operationalisierung der Manipulation dorsaler Information geschah über die mentale Rotation eines Halbkreises.

### **7.3.3. Ishihara-Test**

Zur Kontrolle von Farbsinnstörungen wurde mit allen Probanden der Ishihara-Test (Ishihara, 2001) durchgeführt. Eine nähere Beschreibung des Testverfahrens findet sich im Methodenkapitel der ersten Studie.

### **7.3.4. Verhaltensdaten**

Unterschiedlich starke Bearbeitungsintensitäten in den experimentellen Bedingungen können die Vergleichbarkeit der kortikalen Aktivierungsmuster beeinträchtigen. Aus diesem Grund wurden die experimentellen Bedingungen in den Reaktionszeiten und der prozentualen Anzahl richtiger Antworten (%C) verglichen.

### **7.3.5. Infrarot-Okulographie**

Als zusätzliche Kontrollvariable wurden die Augenbewegungen per Infrarot-Okulographie (IROG) registriert. Augenbewegungen führen zu kortikaler Aktivierung des frontalen Augenfeldes und des Parietallappens (Paus, 1996). Um Unterschiede in der Anzahl Sakkaden zwischen den experimentellen Bedingungen zu kontrollieren, wurden beide

Experimente außerhalb des Scanners durchgeführt ( $N = 5$ , Ober 2 „infrared eye tracker“, Permobil Meditech, Woburn, MA).

#### **7.4. Versuchsaufbau und Ablauf**

*Experiment 1:* Eine schematische Darstellung der Stimuli ist in Abbildung 8 zu sehen. Das Experiment startete mit der Präsentation der Instruktion (aus drei möglichen Instruktionen, 1500 ms):  $F$  = Farben halten,  $R$  = Rotation halten,  $D$  = Farben und Rotation halten. Nach einer kurzen Pause (500 ms) wurden die beiden Samples für 500 ms präsentiert (Enkodierung): zwei Halbkreise, welche sich in Farbe und räumlicher Orientierung unterschieden, worauf eine weitere, längere Pause (Delay, 7500 ms) folgte. Anschließend wurden zwei Testhalbkreise für 3000 ms dargeboten (beide in Farbe und Orientierung verschieden, Abruf). In der Bedingung  $F$  sollten die Probanden entscheiden, ob die beiden Testhalbkreise in den gleichen Farben gehalten waren wie einer der beiden Samplehalbkreise. Die Bedingung  $R$  forderte von den Probanden die Entscheidung, ob die beiden Testhalbkreise in den gleichen Rotationswinkeln orientiert waren wie die beiden Samplehalbkreise. In der Bedingung  $D$  mussten die Probanden beide Aufgaben synchron bearbeiten. Die Probanden hatten 3000 ms Zeit um ihre Entscheidung zu fällen, sie erhielten anschließend per Farbwechsel des Fixationskreuzes eine Rückmeldung über die erbrachte Leistung (1000 ms). Eine ITI von 6000 ms trennte die Trials.

Räumliche Manipulationsprozesse in der Bearbeitung von Experiment 1 sollten über die Darbietung von zwei identischen Tests, welche auf der gleichen Position wie die beiden Samples präsentiert wurden, ausgeschlossen werden. Ein Unterschied in der Position zwischen Tests und Samples hätte räumliche Manipulationsprozesse erzeugen können, da in diesem Falle die Probanden die gehaltenen Samples mental an die Testposition rücken müssten, um die Aufgabe zu lösen. Diese Bearbeitungsstrategie geht über das bloße Halten von Information hinaus.

*Experiment 2:* Die Zeitstruktur und die Stimuli des zweiten Experimentes waren analog zu denen des ersten (Abbildung 8). Eingangs erschien eine Instruktion für 1500 ms aus drei möglichen:  $F$  = Farbenmischen,  $R$  = Winkelrotation,  $D$  = Farbenmischen und Winkelrotation. Nach einer Pause (500 ms) erschienen die beiden Samplehalbkreise (Enkodieren). Anschließend wurde ein Fixaktionskreuz für 7500 ms eingeblendet (Delay). Der Test bestand aus einem Halbkreis in bestimmter Farbe und Orientierung (3000 ms, Abruf). Die Probanden sollten je nach Instruktion entscheiden, ob der Test in der Mischfarbe der beiden Samples gehalten war ( $F$ ), im mittleren Rotationswinkel der beiden Samples orientiert war ( $R$ ) oder es waren beide Aufgaben synchron zu bearbeiten ( $D$ ). Die Probanden hatten 3 Sekunden um ihre Entscheidung zu fällen. Sie bekamen anschließend eine Rückmeldung über die Richtigkeit der Antwort. In dem Inter-Trial-Intervall (6000 ms) wurde ein weißes Fixaktionskreuz dargeboten.

### **7.5. Material und Stimuluskonstruktion**

Die visuelle Stimulation erfolgte mit einem PC, der über Trigger mit dem MRT synchronisiert wurde. Dargeboten wurden die Stimuli über einem LCD-Projektor (Eiki, LC-6000), auf schwarzen Hintergrund ( $.25 \text{ cd/m}^2$ ). Programmiert wurde das Experiment in ERTS (Experimental Runtime System©, BeriSoft Cooperation).

Eine Beschreibung der Farbkalibrierung und der Konstruktion der Winkelrotation findet sich im Methodenteil der ersten Studie.

### **7.6. Hypothesen**

Der frontale Kortex (FK) spielt eine zentrale Rolle bei der Bearbeitung von AG-Aufgaben (Bauer und Fuster, 1976). Die funktionelle Organisation des FK ist allerdings umstritten (Goldman-Rakic, 1987; Petrides, 1994). Die folgende Untersuchung wurde durchgeführt,

um die Annahme zu testen, dass der FK unabhängig von der Prozessart materialspezifisch organisiert ist: Ventrale Areale sollten beim Halten und Manipulieren von Objektinformation aktiviert werden, dorsale Regionen dagegen sollten mit dem Halten und Manipulieren von räumlicher Information verbunden sein. Um diese Annahmen zu überprüfen, wurden zwei Experimente konstruiert.

### **7.6.1. Materialspezifische Organisation des FK für Halten**

In Experiment 1 müssen die Probanden ventrale und dorsale Information halten. Nach der domänspezifischen Theorie sollte das Halten von Farben zu einer ventralen Aktivierung des FK führen, hingegen das Halten von räumlicher Information zu Aktivierung von dorsalen frontalen Arealen.

### **7.6.2. Materialspezifische Organisation des FK für Manipulieren**

Experiment 2 verlangt von den Probanden die Manipulation von ventraler und dorsaler Information. Die domänspezifische Theorie sagt voraus, dass analog zu Experiment 1 eine ventro-dorsale Dissoziation nach Materialart existiert.

Um eine möglicherweise vorliegende prozessspezifische Organisation des FK zu entdecken, wurde ein direkter Kontrast zwischen Experiment 1 (Halten) und 2 (Manipulieren) für alle drei Aufgabenphasen (Enkodieren, Delay, Abruf) berechnet. Dieser Kontrast wurde für beide Materialarten zusammen und getrennt nach Materialart kalkuliert. Der FK ist in eine Reihe von zentral-exekutiven Prozessen involviert (Collette und Linden, 2002) und deshalb wurde eine mögliche prozessspezifische Aufteilung des FK anhand einer zweiten zentral-exekutiven Aufgabe überprüft. Das Bearbeiten von Dual-Aufgaben stellt nach Baddeley (1996) eine zentral-exekutive Leistung dar.

### 7.7. Messung

Die Untersuchungen erfolgten an einem 1.5 Tesla MRT „Vision“ der Firma Siemens AG, im Institut für Neuroradiologie der Universitätsklinik Frankfurt. Eine handelsübliche Kopfspule wurde benutzt. Für die fMRT-Messung fand eine Gradientenecho-Sequenz Anwendung („echo planar imaging“, EPI, Mansfield, 1977). Die EPI-Sequenz ist in der Gradientenversion mit langer Echozeit sehr sensibel für lokale Suszeptibilitätsunterschiede in der Umgebung von desoxygenierten Hämoglobin. Diese Sequenz wird deshalb bevorzugt zur funktionellen Abbildung aktivierter Hirnregionen eingesetzt.

Die Repetitionszeit  $TR$  betrug 2000 ms, die Echozeit  $TE$  60 ms. Es wurde ein Flipwinkel von  $90^\circ$  ausgewählt. Die Größe des untersuchten Bildausschnittes („field of view“, FOV) umfasste  $200 \times 200 \text{ mm}^2$ , bei einer Voxelgröße von  $3.13 \times 3.13 \times 5 \text{ mm}^3$  (Volumen an Gehirn, das durch einen Bildpunkt repräsentiert wird) und die Matrix hielt  $64 \times 64$  Datenpunkte. Ein Volumen bestand aus 16 Schichten mit einer Dicke von 5 mm. In beiden Experimenten wurden drei funktionelle Messungen durchgeführt (365 Volumen per Messung, 10 Volumen per Trial, 36 Trials per Messung). Jeder Proband bekam in den Experimenten 1 und 2 108 Trials in pseudo-randomisierter Reihenfolge präsentiert. Eine Bedingung bestand aus 36 Trials (drei Bedingungen  $F$ ,  $W$ ,  $D$ ), 24 passenden (66%) und 12 unpassenden (33%). 20 Minuten vor jedem Experiment wurde der Projektor eingeschaltet, um eine konstante Betriebstemperatur des Gerätes während des Experimentes zu gewährleisten. Zu Beginn jedes Experimentes bearbeiteten die Probanden einen Übungsdurchgang mit 12 Trials.

Funktionelle Bilddaten haben eine geringe Kontrastierung und räumliche Auflösung, so dass BOLD-Änderungen anatomisch nur ungenau zugeordnet werden können. Aus diesem Grund wurde ein hoch auflösender  $T1$ -gewichteter MP-RAGE-Datensatz („magnetization-

prepared-rapid-gradient-echo“) am Ende der Messung von jedem Probanden erhoben. Die Voxelgrösse betrug  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ . Die Versuchspersonen sollten während der Messung Kopfbewegungen vermeiden und den Blick auf das Fixationskreuz richten.

### **7.8. Aufbereitung und Auswertung der fMRT- Daten**

Die Daten wurden mit dem Programm Brainvoyager 4.9 ([www.Brainvoyager.com](http://www.Brainvoyager.com), Brain Innovation B.V., NL.) aufbereitet und statistisch ausgewertet. Die ersten fünf Volumen eines funktionellen Datensatzes wurden entfernt. Da Kopfbewegungen zu falschen Aktivierungsmustern führen können, wurde jeder Datensatz einer 3D-Bewegungskorrektur unterworfen. Bei Verschiebungen von mehr als 4 mm wird eine Verwerfung des Datensatzes empfohlen, was aber bei keinem Probanden dieser Studie erforderlich war.

Um die individuellen Variationen kortikaler Strukturen verschiedener Probanden vergleichbar zu machen, wurde ein räumlicher Glättungsfilter (Gausscher Kernel) mit 4 mm Halbwertsbreite (FWHM = „full width at half maximum“) verwendet. Jeder Datensatz erhielt eine zeitliche Hochpassfilterung (3 Zyklen bei 360 Volumen) um langsame Verschiebungen im BOLD-Verlauf zu entfernen.

Die Schichten eines Volumens werden zu unterschiedlichen Punkten im Zeitverlauf erhoben. Bei ereignisbezogenen Messungen wird ein Volumen allerdings als ein Zeitpunkt betrachtet. Aus diesem Grund ist es üblich, die Schichten eines Volumens zeitlich zu interpolieren („slice scan time correction“).

Um interindividuelle Gruppenvergleiche der Daten zu ermöglichen, wurden die Bilddaten der verschiedenen Probanden in einen standardisierten anatomischen Raum transformiert (Talairachtransformation). Diese Transformation wird in zwei Schritten durchgeführt: 1. Rotation des individuellen anatomischen Datensatzes entlang der AC-PC-Ebene (AC = Commissura anterior, PC = Commissura posterior) und 2. Anpassung des individuellen

Datensatzes an die standardisierten Talairachpunkte mittels Bestimmung von definierten Grenzen des Gehirns.

### 7.8.1. Statistische Gruppenanalyse

Die statistische Analyse der BOLD-Zeitreihe erfolgte per multipler Regressionsanalyse im Rahmen eines Allgemeinen Linearen Modells (ALM, Friston et al., 1995). Das ALM kann als multiple Regressionsanalyse beschrieben werden, wenn eine lineare Kombination von verschiedenen Prädiktorvariablen für die Vorhersage einer Kriteriumsvariablen (BOLD-Signal) genutzt werden:

$$y(t) = y'(t) + e(t) = b_0 + b_1x_1(t) + b_2x_2(t) + \dots + b_Nx_N(t) + e(t)$$

wobei  $y(t)$  der beobachtete BOLD-Verlauf ist,  $x_i$  sind die Prädiktorvariablen,  $b_i$  ist der Regressorwert und  $e(t)$  ist die nicht erklärte Restvarianz der vorhergesagten Variablen  $y'(t)$  zur Variablen  $y(t)$ , des gemessenen BOLD-Wertes zu einem Zeitpunkt an einem Voxel. Die Regressionsgewichte werden nach dem Kriterium der kleinsten Quadrate gewonnen.

Ein ANOVA-Design lässt sich als Regressionsgleichung berechnen, wenn die Bedingungen eines Experimentes über Dummycodierung verschlüsselt werden. Das ALM integriert somit regressions- und varianzanalytisches Vorgehen.

Für Experiment 1 und 2 wurde das ALM jeweils über die 30 z-transformierten Zeitverläufe berechnet (3 pro Proband, 10 Probanden pro Experiment). Die z-Transformation wurde bei jedem Probanden für jeden Zeitverlauf eines Voxels kalkuliert. Das ALM erhielt 6 Prädiktoren, welche den Zeitverlauf des BOLD-Signals vorhersagen sollten: die drei experimentellen Bedingungen („Was“, „Wo“ und „Dual“) und die drei Aufgabenstadien Enkodierung (2 Volumen), Delay (2 Volumen) und Abruf (2 Volumen). Durch diesen Aufbau wird ein Teil der Delayphase der Enkodierungs- und der Abrufphase zugewiesen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Aktivität des Delays weitest gehend frei von

perzeptueller Aktivität ist, welche durch die Stimuluspräsentation in den beiden anderen Phasen erzeugt wird.

Die Designmatrix wurde auf der Basis einer idealen Box-Car-Funktion konstruiert. Wenn ein Prädiktor im Zeitverlauf dargeboten wird, erhält er in der Design-Matrix den Wert 1, für die übrigen Zeitpunkte den Wert 0. Da die hämodynamische Antwort einer kortikalen Region eine Latenz von 2-6 Sekunden aufweist (Kwong et al., 1992), wurden die Prädiktoren mit einer Verzögerung von 4 Sekunden modelliert.

Es fand eine Anfertigung von 3D-gruppenstatistischen Abbildungen der Aktivierungsmuster statt, indem man jedes Voxel mit dem  $F$ -Wert eines spezifischen Prädiktors verband. Eine Korrektur der  $p$ -Werte für multiple Vergleiche schloss sich an ( $p < .05$ , Bonferroni-Korrektur). Die statistischen Ergebnisse wurden auf ein standardisiertes Gehirn projiziert (zur Verfügung gestellt vom „Montreal Neurological Institute“, MNI).

Um fMRT-Befunde auf die Grundgesamtheit generalisieren zu können, ist es notwendig, in einem zusätzlichen Schritt eine „random effects analysis“ durchzuführen. Dies bedeutet, dass die untersuchte Stichprobe als eine zufällig gezogene Stichprobe aus der Grundgesamtheit betrachtet wird, wodurch die Effektstärken in der Regel wesentlich schwächer werden.

### **7.8.2. Abbildungen der relativen Prädiktorbeiträge**

Für jede Aufgabenphase erfolgte die Berechnung des relativen Anteils eines Prädiktors für die signifikant aktivierten Voxel („relative contribution“,  $RC$ ). Der  $RC$ -Wert berechnete sich nach folgender Formel:

$$RC = (R^2_{extra} - R^1_{extra}) / (R^2_{extra} + R^1_{extra})$$

$R^1$  stellt den Anteil des ersten Prädiktors an der aufgeklärten Varianz und  $R^2$  den Anteil des zweiten Prädiktors dar (Sack et al., 2002). Der Anteil von einem (mehreren) Prädiktore(n) an der aufgeklärten Varianz wird als inkrementeller, multipler Korrelationskoeffizient

$R_{extra}$  berechnet („extra sum of squares principle“, Draper und Smith, 1998). Bei einem  $RC$ -Wert von 1 (Kontrast „Was vs. Wo“: Farbcodierung Rot = „Wo“, Kontrast „Halten vs. Manipulieren“: Farbcodierung Blau = „Halten“) wird ein Zeitverlauf eines Voxels alleine durch den Prädiktor 1 erklärt, während bei einem  $RC$ -Wert von  $-1$  (Kontrast „Was vs. Wo“: Farbcodierung Gelb = „Was“, Kontrast „Halten vs. Manipulieren“: Farbcodierung Grün = „Manipulieren“) der Zeitverlauf allein durch Prädiktor 2 erklärt wird.

Für den Kontrast „Was vs. Wo“ wurden nur  $RC$ -Werte größer als .3 mit Clustergrößen von mehr als 200 Voxel abgebildet. Im Kontrast „Halten vs. Manipulieren“ wurden Daten aus zwei verschiedenen Messungen verglichen (Experiment 1 und 2). Dies hat den Nachteil, dass das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis ungünstiger ist als im Kontrast „Was vs. Wo“, welcher für Daten berechnet wurde, die innerhalb einer Messung gewonnen wurden. Um Unterschiede zwischen den Prädiktoren Halten und Manipulieren zu entdecken, welche nur geringe Varianzanteile umfassen, wurden in die  $RC$ -Map alle  $RC$ -Werte  $> 0$  aufgenommen (Clustergröße  $> 200$  Voxels).

Da der  $RC$ -Wert keine Aussage über die statistische Signifikanz des Beitrages eines Prädiktors leistet, wurden für die aktivierten Cluster ROI-ALMs berechnet (ROI = „region of interest“). Die ROI-ALMs beinhalteten Kontraste zwischen den Prädiktoren („Was vs. Wo“, „Halten vs. Manipulieren“ oder „Single vs. Dual“), getrennt jeweils nach der Aufgabenphase (Enkodieren, Delay, Abruf). Die Kontrastierung der Prädiktoren erfolgte anhand der Beta-Gewichte des ALM (für jeden Probanden). Es fand eine Bereinigung der Prädiktoren von seriellen Korrelationen statt.

Um eine Verallgemeinerung der Effekte auf die Grundgesamtheit durchführen zu können, wurden abschließend ein „random effect“  $2 \times 2$ -ALM (Material  $\times$  Prozess) über alle Voxel des Gehirns hinweg in der Phase des Delays kalkuliert. Solchen Analysen fallen im Vergleich zu „fixed-effect“ basierten  $RC$ -Maps sehr konservativ aus. Damit die Information aus den vorliegenden Daten möglichst umfassend analysiert werden konnte,

wurden in einem ersten Schritt die *RC*-Maps berechnet und erst in einem zweiten Schritt das konservativere Verfahren verwendet.

### **7.8.3. Superpositionsbilder**

Für Experiment 1 und 2 wurden Superpositionsbilder über alle drei Aufgabenphasen erstellt. Es erfolgte eine Zuordnung von verschiedenen Farben des RGB-Systems zu den drei experimentellen Bedingungen („Wo“ = Blau, „Was“ = Grün, „Dual“ = Rot). Areale, in denen sich die Aktivitäten der experimentellen Bedingungen überlappten, wurden in der jeweilig passenden Mischfarbe koloriert.

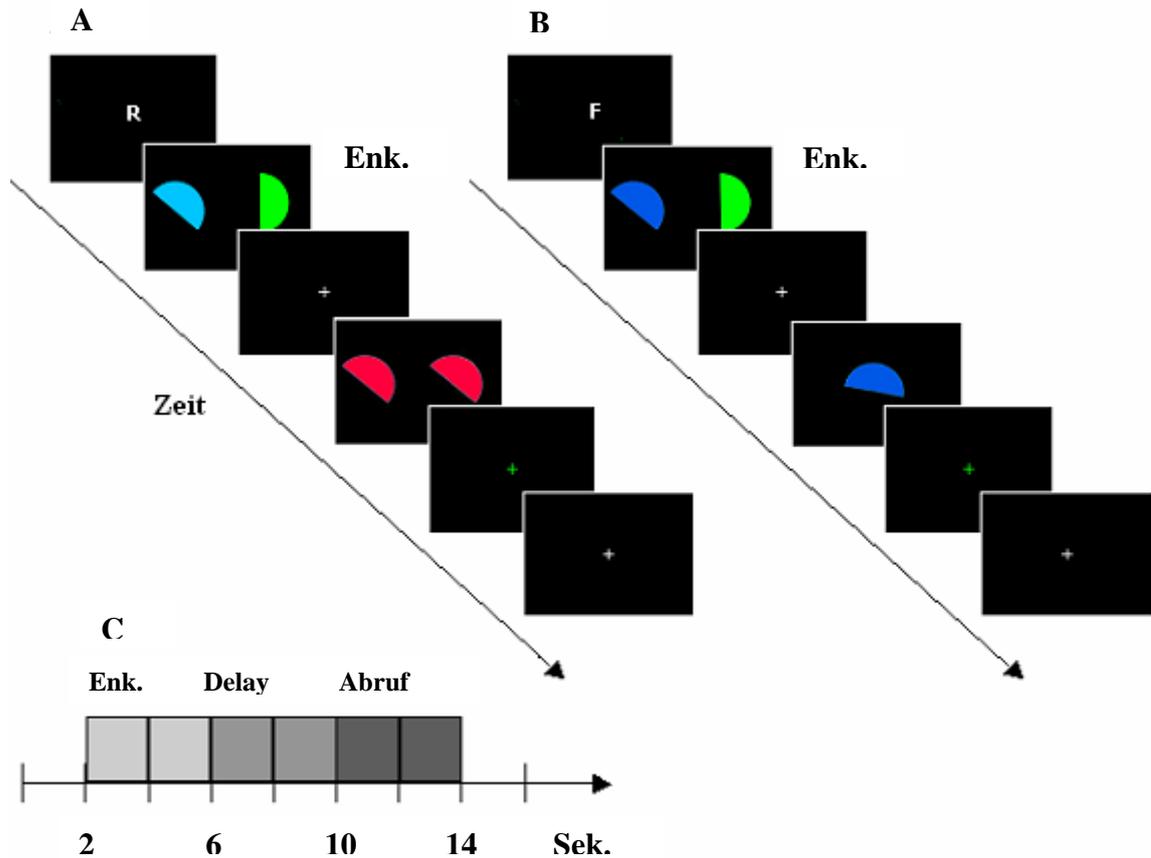


Abbildung 8

**A:** Beispielaufgabe aus Experiment 1. Anfangs erschien die Instruktion für 1500 ms, gefolgt von einer Pause (500 ms) und den Samples (Enk. = Enkodieren, 500 ms). Das Delay betrug 7500 ms, anschließend wurden zwei Tests präsentiert (3000 ms). Über Farbwechsel des Fixaktionskreuzes wurde Rückmeldung gegeben (1000 ms). In der ITI sahen die Probanden für 6000 ms ein weißes Fixaktionskreuz. Aufgabe: Die Probanden sollten sich die Farben (*F*), den Rotationswinkel (*R*) oder beides synchron (*D*) merken.

**B:** Experiment 2 verfügte über die gleiche Zeitstruktur und Stimuli wie Experiment 1. Nur ein Teststimulus wurde dargeboten (3000 ms). Aufgabe: Die Probanden sollten die Farben mischen (*F*), die Halbkreise rotieren (*R*) oder beide Aufgaben synchron durchführen (*D*).

**C:** Abbildung der drei Aufgabenphasen von Experiment 1 und 2, Enkodieren (2 Volumen), Delay (2), und Abruf (2). Dieser Aufbau ermöglichte es, Delayaktivität mit nur geringem perzeptuellem Anteil zu erfassen.

## 8. Studie 2: Resultate

Der erste Abschnitt des folgenden Kapitels stellt die Resultate der Verhaltensdaten und der Infrarot-Okulographie vor. Anschließend werden die funktionellen Daten des ersten Experiments präsentiert und die Überprüfung der Hypothese 1 geschildert („Was vs. Wo“ Halten). Dem schließt sich die Darstellung der Ergebnisse von Experiment 2 und der Testung der zweiten Hypothese an („Was vs. Wo“ Manipulieren). Die Resultate des Vergleiches „Halten vs. Manipulieren“ folgen im nächsten Abschnitt und abschließend werden die Resultate des Kontrastes „Single vs. Dual“ für beide Experimente präsentiert.

### 8.1. Verhaltensdaten und Augenbewegungen

Es wurden diejenigen experimentellen Bedingungen in den Reaktionszeiten und der Anzahl richtiger Antworten  $%C$  verglichen, welche in den *RC*-Maps gegeneinander kontrastiert wurden (*t*-Test für abhängige Stichproben, Tabelle 4 und 5). Es konnten keine signifikanten Unterschiede in Experiment 1 und 2 zwischen den Bedingungen „Was vs. Wo“ gefunden werden (Experiment 1, *RT*:  $t = .23$ ,  $p = \text{n.s.}$ ,  $%C$ :  $t = .39$ ,  $p = \text{n.s.}$ ; Experiment 2, *RT*:  $t = 1.5$ ,  $p = \text{n.s.}$ ;  $%C$ :  $t = 1,8$ ,  $p = \text{n.s.}$ , siehe Tabelle 4). Um Anforderungsunterschiede zwischen den beiden Experimenten auszuschließen, wurden die Bedingungen von Experiment 1 und 2 in *RT* und  $%C$  kontrastiert. Auch zwischen den beiden Experimenten zeigten sich keine bedeutsamen Differenzen (Farbe *RT*:  $t = .1$ ,  $p = \text{n.s.}$ ; Winkel *RT*:  $t = .93$ ,  $p = \text{n.s.}$ ; Farbe  $%C$ :  $t = .48$ ,  $p = \text{n.s.}$ ; Winkel  $%C$ :  $t = 1.25$ ,  $p = \text{n.s.}$ ).

Keine Abweichungen ergaben sich in der Anzahl der Sakkaden zwischen der Farbbedingung und der Winkelbedingung von Experiment 1 und 2 (Experiment 1, Farbe vs. Winkel:  $t = .12$ ,  $p = .91$ ; Experiment 2, Farbe vs. Winkel:  $t = .23$ ,  $p = .82$ ). Auch der Vergleich in der Anzahl Sakkaden zwischen Experiment 1 und Experiment 2 fiel nicht

signifikant aus (Farbe, „Halten vs. Manipulieren“:  $t = .089$ ,  $p = .93$ ; Winkel, „Halten vs. Manipulieren“:  $t = .33$ ,  $p = .75$ ).

## **8.2. FMRT- Daten, Experiment 1**

Die mit den drei Prädiktoren korrelierte Aktivität findet sich getrennt nach den Gedächtnisphasen in Abbildung 9 (Superpositionmaps).

### **8.2.1. Enkodieren**

Das Enkodieren führt in allen drei Bedingungen („Wo“, „Was“ und „Dual“) zur Aktivierung eines großen, fronto-parietalen und temporo-okzipitalen Netzwerkes. Überlappende Aktivität der drei experimentellen Bedingungen konnte in folgenden Arealen gefunden werden: im linken Sulcus frontalis inferior (SFI), entlang des Sulcus praecentralis (SPC, LH/RH), des Gyrus postcentralis (LH/RH), des Lobus parietalis, (LH/RH), des inferioren, medialen und superioren Gyrus okzipitalis (LH/RH) und in posterioren Arealen des Gyrus temporalis inferior (LH/RH).

### **8.2.2. Delay**

Das Halten der Information ohne weiteren perzeptuellen Input führte in allen drei Bedingungen zu einer Aktivierung eines fronto-parietalen Netzwerkes. Überlappende Aktivierungen waren im inferioren und im superioren SPC (LH/RH) zu sehen. Auch trat im Delay eine bilaterale Aktivierung der Insula für alle drei Bedingungen auf. Des Weiteren ließ sich eine großflächige, gemeinsame Aktivierung des Parietallappens (LH/RH) für die drei Bedingungen finden.

### 8.2.3. Abruf

In der Abrufphase war für alle drei Bedingungen ein dem Enkodieren ähnliches Netzwerk aktiv, welches sich über okzipitale, parietale und frontale Regionen erstreckte. Überlappende Cluster finden sich bilateral in SFI-Arealen, entlang des SPC und in der Insula. Zusätzlich lassen sich gemeinsam aktivierte Cluster in folgenden posterioren Arealen dokumentieren: Gyrus postcentralis (LH/RH), Lobus parietalis superior und inferior (LH/RH), Gyrus okzipitalis superior, medius und inferior (LH/RH), Gyrus fusiformis (LH/RH), Cuneus (LH/RH), Praecuneus und dem Gyrus cinguli.

### 8.2.4. „Was vs. Wo“

In diesem Abschnitt soll Hypothese 1 geprüft werden: Für das Halten von Farben gilt die Annahme einer Aktivierung ventral gelegener Regionen des FK, wohingegen das Halten von räumlicher Information mit Aktivierung von dorsalen Arealen verbunden sein sollte. Die Berechnungen erfolgten in zwei Schritten. Erst wurden *RC*-Maps für die beiden Prädiktoren „Was“ und „Wo“ berechnet ( $RC > .3$ , siehe Abbildungen 10-12, Bedingung Farbe = Gelb, Bedingung Winkel = Rot). Auf Basis der gefundenen FK-Cluster wurden in einem weiteren Schritt in ROI-ALMs Kontraste zwischen den Prädiktoren „Was“ und „Wo“ kalkuliert. Tabelle 6 stellt die Resultate dieser Kontraste dar.

#### *Enkodieren*

Während des Enkodierens konnte im linken FK eine dorso-ventrale Dissoziation nach Materialart gefunden werden. Für die Bedingung Farbe trat erhöhte Aktivität um den SFI (LH) und um den inferioren SPC (LH) auf (SFI:  $t = 3.81$ ,  $p < .01$ , inferiorer SPC:  $t = 4.55$ ,  $p < .01$ ) und für das Enkodieren von räumlicher Information war ein Cluster im superioren SPC, in der Nähe des frontalen Augenfeldes (FAF), zu dokumentieren ( $t = 6.36$ ,  $p < .01$ ). Signifikant gesteigerte Aktivität für das Enkodieren räumlicher Information lag auch in

den Arealen des Gyrus frontalis medius (RH) vor ( $t = 4.78, p < .01$ ). Ferner fand sich auch in posterioren Gebieten eine Dissoziation nach Materialart: Das Enkodieren der Farben führte zu erhöhter Aktivität im linken Lobus parietalis inferior ( $t = 4.42, p < .01$ ) und im linken Gyrus lingualis ( $t = 2.88, p < .01$ ), wogegen für das Enkodieren von räumlicher Information eine Reihe von bilateral verteilten Clustern auftraten, z.B. in Regionen des Lobus parietalis inferior (LPI-LH:  $t = 5.17, p < .01$ , LPI-RH:  $t = 5.6, p < .01$ ) und im Praecuneus (LH:  $t = 4.76, p < .01$ , R:  $t = 4.32, p < .01$ ). Eine vollständige Auflistung der Regionen ist in Tabelle 6 dargestellt.

### *Delay*

Das Delay war wie auch das Enkodieren durch eine ventro-dorsale Dissoziation des linken FK nach Materialart gekennzeichnet. Ein Gebiet um den SFI war in bedeutsamen Umfang stärker für Farbe aktiviert ( $t = 2.85, p < .01$ ), ein Cluster in der Region des superioren SPC war stärker mit dem Halten von räumlicher Information verbunden ( $t = 5.63, p < .01$ ).

Darüber hinaus fanden sich im linken FK zwei weitere Areale, welche in statistisch bedeutsamen Umfang mit dem Prädiktor Farbe in Zusammenhang standen: Im Gyrus frontalis medialis ( $t = 3.95, p < .01$ ) und im inferioren Gyrus praecentralis ( $t = 2.02, p < .05$ ). Das Cluster im inferioren Gyrus praecentralis ist nicht auf der *RC*-Map von Abbildung 10 dargestellt, da es unterhalb der standardmäßig festgelegten Grenze der grauen Substanz lag.

Posteriore Gebiete wie beispielsweise der linke Lobus parietalis inferior waren stärker für räumliche Information aktiv,  $t = 9.1, p < .01$ . Neben der dorso-ventralen Dissoziation des FK fand sich zusätzlich eine links-rechts Dissoziation nach Materialart, rechtshemisphärisch ließ sich kein Areal finden, das für den Farbprädiktor signifikant stärker aktiviert war.

### *Abruf*

Beim Abruf fand sich eine materialspezifische fronto-parietale Dissoziation. Der Abruf von Farbinformation führte zu einer Reihe von aktiven Clustern im FK: um den SFI (LH,  $t = 4.27$ ,  $p < .01$ ), im Gyrus cinguli (LH,  $t = 3.96$ ,  $p < .01$ ) und in der Insula (LH,  $t = 4.46$ ,  $p < .01$ , RH,  $t = 3.55$ ,  $p < .01$ ). Weiter posterior ließen sich signifikante Cluster für die Farbbedingung zum Beispiel um den Gyrus postcentralis (LH,  $t = 3.68$ ,  $p < .01$ ) dokumentieren. Räumlicher Abruf war nur posterior mit Clustern verbunden, beispielsweise im rechten Praecuneus ( $t = 5.59$ ,  $p < .01$ ).

Wie im Enkodieren fand sich auch im Abruf eine Dissoziation von okzipitalen Arealen nach Materialart: Im Cuneus (LH,  $t = 3.05$ ,  $p < .01$ , RH,  $t = 4.37$ ,  $p < .01$ ) und im Gyrus lingualis (LH,  $t = 2.63$ ,  $p < .01$ , RH,  $t = 3.53$ ,  $p < .01$ ) waren Areale stärker für die Farbbedingung aktiv.

## **8.3. FMRT-Daten, Experiment 2**

Die Aktivitätsmuster der Superpositionsmaps der drei Bedingungen (Farbe, Winkel und Dual, Abbildung 13) von Experiment 2 ähneln denen von Experiment 1.

### **8.3.1. Enkodieren**

Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, ist das Enkodieren durch ein großes, fronto-parietales und temporo-okzipitales Netzwerk gekennzeichnet. Überlappende Aktivität der drei experimentellen Bedingungen konnte in folgenden Arealen gefunden werden: Im linken SFI, entlang des SPC (LH/RH), dem Gyrus frontalis medialis (LH/RH), dem Lobus parietalis, (LH/RH), dem inferioren, medialen und superioren Gyrus okzipitalis (LH/RH).

### **8.3.2. Delay**

Das Manipulieren der Information führte in allen drei Bedingungen zu einer Aktivierung eines fronto-parietalen Netzwerkes analog zu Experiment 1. Überlappende Aktivierungen waren entlang des SPC (LH/RH), in der Insula (LH/RH), im Gyrus frontalis medialis (LH/RH) und in weiten Arealen des Parietallappens (LH/RH) zu finden.

### **8.3.3. Abruf**

Das Aktivitätsmuster charakterisierte sich durch ein fronto-parietales und temporo-okzipitales Netzwerk. Weite Bereiche der Netzwerke der drei Bedingungen überlappten sich, z.B. bilateral in der Nähe des SFI, des SPC, in der Insula, in parietalen Regionen und im Okzipitallappen.

### **8.3.4. „Was vs. Wo“**

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Überprüfung der zweiten Hypothese. Während des Manipulierens sollte eine dorso-ventrale Raum-Objekt Dissoziation des FK zu beobachten sein. Um diese Annahme zu überprüfen, wurden in einem ersten Schritt *RC*-Maps erstellt, mit denen der relative Beitrag der beiden Prädiktoren „Was“ und „Wo“ untersucht wurde ( $RC > .3$ , Cluster  $> 200$  Voxel). Es schlossen sich ROI-ALMs an (Kontrast „Was vs. Wo“). Die *RC*-Maps sind in den Abbildung 14-16 und die Resultate der ROI-ALMs in Tabelle 7 präsentiert (Bedingung Farbe = Gelb, Bedingung Winkel = Rot).

#### *Enkodieren*

Im linken FK fand sich eine dorso-ventrale Dissoziation nach Materialart: Cluster um den SFI waren signifikant stärker für Farbe aktiv ( $t = 2.47$ ,  $p < .01$ ), Cluster um den superioren SPC in größeren Umfang für das Enkodieren von räumlicher Information ( $t = 3.77$ ,  $p <$

.01). Rechtshemisphärisch fanden sich im FK nur Cluster, welche mit dem Prädiktor „Wo“ assoziiert waren, z.B. im Gyrus frontalis medius ( $t = 4, p < .01$ ).

In den meisten posterioren Arealen erklärte der räumliche Prädiktor mehr Varianz (z.B. im Lobus parietalis superior, LH,  $t = 2.89, p < .01$ ). Nur im linken Lobus parietalis inferior war ein Cluster stärker für Farbmanipulation aktiv ( $t = 4.17, p < .01$ ).

Zusätzlich fand sich auch im Okzipitallappen eine Trennung der Aktivität nach Materialart. Der Gyrus lingualis war in signifikant größerem Umfang mit der Bedingung Farbe assoziiert (RH,  $t = 2.2, p < .05$ ).

### *Delay*

Das Delay von Experiment 2 wird durch eine dorso-ventrale Dissoziation des FK (LH) zwischen Raum- und Farbinformation geprägt. In der Nähe des SFI konnte ein Cluster dokumentiert werden, welches signifikant stärker mit dem Manipulieren von Farbe verbunden war ( $t = 4.56, p < .01$ ). Ein Cluster in der Region des superioren SPC war signifikant für das Manipulieren von räumlicher Information aktiv ( $t = 8.72, p < .01$ ). Eine materialspezifische links-rechts Dissoziation ließ sich auch im Delay von Experiment 2 dokumentieren. In der rechten Hemisphäre fanden sich keine Cluster, welche stärker mit dem Prädiktor Farbe assoziiert waren. Posteriore Gebiete waren generell stärker für die räumlichen Bedingung aktiv (z.B. Lobus parietalis inferior, LH,  $t = 9.1, p < .01$ ).

### *Abruf*

Auch in der Abrufphase trat eine materialspezifische Dissoziation des FK auf. Es waren hauptsächlich Cluster im linken SFI und um den rechten Gyrus praecentralis (GP) mit der Farbbedingung assoziiert (SFI, LH,  $t = 6.95, p < .01$ ; GP, RH,  $t = 4.09, p < .01$ ). Hingegen führte der Abruf räumlicher Information zu einer stärkeren Aktivierung im rechten Gyrus

frontalis medius ( $t = 4.73$ ,  $p < .01$ ). Posterior lagen Areale vor, für die der Prädiktor „Wo“ mehr Varianz aufklärte (z.B. Lobus parietalis inferior, RH,  $t = 5.08$ ,  $p < .01$ ).

Zusätzlich fanden sich wieder in okzipitalen Regionen Areale, welche stärker mit dem Prädiktor Farbmanipulation in Zusammenhang standen (Gyrus lingualis, LH,  $t = 5.17$ ,  $p < .01$ ; Gyrus lingualis, RH,  $t = 6.03$ ,  $p < .01$ ).

#### **8.4. FMRT-Daten, „Halten vs. Manipulieren“**

Im folgenden Abschnitt wird eine mögliche prozessspezifische Organisation des FK untersucht. Um mögliche materialspezifische Aufteilungen zwischen den Prozesse zu identifizieren, wurden *RC*-Maps ( $RC > 0$ ) und ROI-ALMs für den Kontrast „Halten vs. Manipulieren“ für die beiden Materialarten „Was“ und „Wo“ getrennt durchgeführt. Der Prädiktor Manipulieren wurde mit Grün, der Prädiktor Halten mit Blau codiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17-18 und in Tabelle 8-9 zu sehen.

##### **8.4.1. „Halten vs. Manipulieren“: Farbe**

In Abbildung 17 ist der *RC*-Kontrast für Farbe zwischen Halten und Manipulieren in den drei Phasen dargestellt. Die Ergebnisse der ROI-ALMs sind in Tabelle 8 dokumentiert. Es sollte untersucht werden, ob eine prozessspezifische Dissoziation des FK bei Arbeitsgedächtnisaufgaben mit der Materialart Farbe existiert. Der Prädiktor Manipulieren wurde mit grün, der Prädiktor Halten mit blau codiert.

##### *Enkodieren*

Die Prädiktoren weisen in der Phase des Enkodierens ein gemeinsames fronto-parietales und temporo-okzipitales Netzwerk auf. Die visuelle Inspektion der *RC*-Maps erweckt den Eindruck, dass ein Areal um den SFI (LH/RH) in größerem Umfang durch den Prädiktor Manipulieren vorhergesagt wird. Das ROI-ALM dieses Areals bestätigt den visuellen

Eindruck: Manipulieren von Farbe führt im SFI (RH) zu einer signifikant stärkeren Aktivierung im Vergleich zu deren Halten ( $t = 2.86, p < .01$ ). In anderen Arealen des FK konnte kein Unterschied entdeckt werden.

#### *Delay*

Das Delay ist für beide Prädiktoren durch ein fronto-parietales Netzwerk gekennzeichnet, das sich ausschließlich linkshemisphärisch erstreckt. Auch im Delay fand sich in der *RC*-Map ein ähnliches Bild wie im Enkodieren: Das Cluster um den linken SFI ist stärker für das Manipulieren codiert, was auch durch das ROI-ALM bestätigt werden kann ( $t = 1.78, p < .05$ ).

#### *Abruf*

Das Halten und Manipulieren von Farbinformation teilt sich ein großes, fronto-parietales und temporo-okzipitales Netzwerk in der Abrufphase. In Arealen des FK ließ sich während des Abrufs kein signifikanter Unterschied zwischen den Prädiktoren Halten und Manipulieren nachweisen.

#### **8.4.2. „Halten vs. Manipulieren“: Winkel**

In Abbildung 18 ist der *RC*-Kontrast zwischen dem Halten und Manipulieren von räumlicher Information dargestellt. Die Ergebnisse der ROI-ALMs sind in Tabelle 9 dokumentiert. Es sollte untersucht werden, ob eine prozessspezifische Dissoziation des FK für räumliche Information existiert. Der Prädiktor Manipulieren wurde mit Grün, der Prädiktor Halten mit Blau codiert.

### *Enkodieren*

Beide Prädiktoren führen in der Phase des Enkodierens zu einer ausgedehnten, fronto-parietalen und temporo-okzipitalen Aktivierung. Im ROI-ALM fand sich ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Prädiktoren im rechten, superioren SPC zugunsten der Manipulation ( $t = 3.4, p < .01$ ). In den restlichen Clustern des FK war keine Differenz zwischen Halten und Manipulieren festzustellen.

### *Delay*

Ein fronto-parietales Netzwerk (bilateral) kennzeichnet die Delayaktivität für beide Prädiktoren. In allen Arealen ist in der *RC*-Map eine stärkere Farbcodierung für das Manipulieren zu sehen. Dieser Eindruck bestätigt sich durch die Berechnungen mittels der ROI-ALMs: Bilateral ist der SFI stärker mit dem Manipulieren assoziiert (SFI LH,  $t = 2.43, p < .05$ ; SFI RH,  $t = 3, p < .01$ ). Auch im SPC superior (bilateral) lässt sich ein Unterschied zugunsten des Prädiktors Manipulation entdecken (SPC LH,  $t = 3.27, p < .01$ ; SPC RH,  $t = 2.83, p < .01$ ).

### *Abruf*

Im Abruf ist für beide Prädiktoren ein ausgedehntes, fronto-parietales und temporo-okzipitales Netzwerk zu erkennen. Posteriore Regionen (okzipital) sind farblich stärker für das Halten codiert. Ein Unterschied zwischen den beiden Prädiktoren ließ sich nur im SPC superior zugunsten des Haltens finden (SPC RH,  $t = 2.26, p < .05$ ).

## **8.5. “Random-effect”- Analyse**

Ein weiteres  $2 \times 2$  ALM (Material  $\times$  Prozess in der Phase des Delay,  $q(\text{FDR}) < .01$ ) wurde über beide Experimente hinweg auf der Basis einer „random-effect“ Analyse berechnet. Im direkten gesamt kortikalen Kontrast „Was vs. Wo“ zeigte sich, dass die materialspezifische

Dissoziation des FK auch bei dieser konservativen statistischen Analyse erhalten blieb: Ein Areal um den SFI (LH) war stärker für die Farbbedingung aktiv, ein Areal im dorsalen praemotorischen Kortex (LH/RH) stärker für die Winkelaufgabe.

Es fanden sich weder für den Kontrast „Halten vs. Manipulieren“ aktive Cluster im FK, noch konnten Interaktionen zwischen den beiden Prädiktoren Material und Prozess dokumentiert werden. Die Resultate sind in Tabelle 10 dargestellt.

### **8.6. „Single vs. Dual“**

In diesem Abschnitt wird überprüft, welche zusätzlichen kortikalen Ressourcen bei dem Bearbeiten der Dualbedingung rekrutiert werden. Das Ziel der folgenden Berechnungen war es, Regionen im DLPFK zu identifizieren, welche mit der Dualbedingung stärker verbunden waren als für jeweils beide Einzelbedingungen. Die Berechnungen wurden in zwei Schritten durchgeführt: Zuerst wurde für jedes aktive Cluster aus der Superpositionmap des FK ein Kontrast zwischen der Dualbedingung und beiden Einzelbedingungen kalkuliert („Was + Wo vs. Dual“). Falls ein signifikanter Unterschied zugunsten der Dualbedingung gefunden wurde, schloss sich diesem ein zweiter Berechnungsschritt an. Die Dualbedingung wurde nun gegen jeweils eine Einzelbedingung kontrastiert. Dieser Kontrast wurde für „Wo vs. Dual“ und „Was vs. Dual“ berechnet.

#### **8.6.1. Halten**

Die Ergebnisse der Kontraste „Single vs. Dual“ für Experiment 1 (Halten) sind in Tabelle 11 abgebildet.

##### *Enkodieren*

In der Enkodierungsphase fand sich nur ein einziger signifikanter Unterschied zugunsten der Dual-Bedingung um den linken Gyrus frontalis medius / SFI ( $t = 2.56, p < .05$ ).

Allerdings zeigte sich im zweiten Berechnungsschritt, dass die Dualbedingung diese Region nicht stärker als die Einzelbedingung Farbe aktivierte ( $t = 1$ , n.s.).

#### *Delay*

Im Delay konnte nur in dem superioren SPC (LH) eine stärkere Aktivierung zugunsten der Dual-Bedingung im Kontrast zu beiden Einzelbedingungen gefunden werden ( $t = 2.11$ ,  $p < .05$ ). Der anschließende Kontrast im ROI-ALM „Wo vs. Dual“ dokumentiert keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Bedingungen ( $t = .5$ , n.s.).

#### *Abruf*

Im Abruf konnten keine Cluster innerhalb des FK gefunden werden, welche stärker für die Dualbedingung aktiviert waren.

### **8.6.2. Manipulieren**

Die Ergebnisse der Kontraste „Single vs. Dual“ für Experiment 2 (Manipulieren) sind in Tabelle 12 dargestellt.

#### *Enkodieren*

Der erste Kontrast „Dual“ vs. beide Einzelbedingungen erbrachte in der Enkodierungsphase nur im Gyrus frontalis medius / SFI (LH) einen Unterschied zugunsten der Dualbedingung ( $t = 2.66$ ,  $p < .05$ ). Der zweite Berechnungsschritt zeigte allerdings, dass die Dualbedingung die Region nicht stärker aktivierte als die Einzelbedingung Farbe ( $t = 1.1$ , n.s.).

### *Delay*

Im SPC superior (LH) und dem Gyrus frontalis medius (RH) fand sich eine signifikant stärkere Aktivierung zugunsten der Dual-Bedingung im Kontrast zu beiden Einzelbedingungen (SPC superior, LH,  $t = 2.11$ ,  $p < .05$ ; Gyrus frontalis medius, RH,  $t = 1.94$ ,  $p < .05$ ). In den anschließenden Berechnungen konnte im SPC kein Unterschied zugunsten der Dual-Bedingung im Vergleich zur räumlichen Bedingung dokumentiert werden ( $t = .83$ , n.s.). Im Gyrus frontalis medius (RH) konnte weder zwischen „Wo vs. Dual“, noch zwischen „Was“ vs. Dual“ eine signifikante Differenz gefunden werden („Wo vs. Dual“,  $t = 1.7$ , n.s.; „Was vs. Dual“,  $t = 1.6$ , n.s.). Auch im Delay von Experiment 2 kann kein Areal identifiziert werden, welches für die Dualbedingung am stärksten aktiviert war.

### *Abruf*

Im Abruf des zweiten Experiments fand sich kein Unterschied in Arealen des DLPMK zwischen der Dualbedingung und den Einzelbedingungen.

## Studie 2: Resultate

**Tabelle 4**

**Vergleich der Reaktionszeiten (RT) und Anzahl richtiger Antworten (%C) zwischen den Bedingungen Farbe und Winkel, Experiment 1 und 2 (t-Test, abhängige Stichproben,  $M$  = Mittelwert,  $SE$  = Standardfehler)**

	Farbe, $M/SE$	Raum, $M/SE$	$t$	$p$
<b>Experiment 1, Halten</b>				
<b>RT</b>	1100.1 / 97.4	1110.7 / 87.6	0.23	n.s.
<b>%C</b>	70.8 / 4.1	68.7 / 4.6	0.39	n.s.
<b>Experiment 2, Manipulation</b>				
<b>RT</b>	1087.1 / 60.2	1010.2 / 65.2	1.5	n.s.
<b>%C</b>	69 / 2.2	75.2 / 2.4	1.8	n.s.

**Tabelle 5**

**Vergleich der Reaktionszeiten (RT) und der Anzahl richtiger Antworten (%C) zwischen Experiment 1 und 2 (t-Test, abhängige Stichproben,  $M$  = Mittelwert,  $SE$  = Standardfehler)**

	$t$	$p$
<b>RT</b>		
<b>Farbe</b>	0.10	n.s.
<b>Raum</b>	0.93	n.s.
<b>%C</b>		
<b>Farbe</b>	0.48	n.s.
<b>Raum</b>	1.25	n.s.

## Studie 2: Resultate

**Tabelle 6**

**Kontraste "Was vs. Wo" in "regions of interest" (ROI) von Experiment 1 mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel**

Anatomisches Areal / Brodmann	Hem.	RC > .3	x	y	z	Clustergröße	t	p
<b>Enkodieren</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Farbe	-44	22	34	452	3.81	< .01
Sulcus praecentralis inferior / 6	LH	Farbe	-50	-13	42	548	4.55	< .01
Sulcus frontalis superior/Sulcus praecentralis / 6	LH	Räuml.	-20	-6	55	1043	6.36	< .01
Lobus parietalis inferior / 7/40	LH	Räuml.	-39	-42	52	1641	5.17	< .01
Praecuneus / 7	LH	Räuml.	-14	-64	52	1735	4.76	< .01
Lobus parietalis inferior / 40	LH	Räuml.	-54	-28	35	765	3.23	< .01
Lobus parietalis inferior / 40/19	LH	Farbe	-36	-56	38	219	4.42	< .01
Gyrus temporalis medius / 19	LH	Räuml.	-32	-74	20	1537	4.26	< .01
Gyrus temporalis inferior / 19	LH	Räuml.	-46	-56	-1	2286	5.62	< .01
Gyrus lingualis / 18	LH	Farbe	-13	-77	0	212	2.88	< .01
Gyrus frontalis medius / 6	RH	Räuml.	20	-7	54	549	4.78	< .01
Gyrus praecentralis / 6	RH	Räuml.	53	3	29	1442	5.36	< .01
Lobus parietalis inferior 40	RH	Räuml.	43	-37	42	2088	5.6	< .01
Lobus parietalis superior 7	RH	Räuml.	20	-57	56	319	3.83	< .01
Gyrus temporalis inferior 37/19	RH	Räuml.	46	-51	-5	664	2.61	< .01
Precuneus 7	RH	Räuml.	13	-68	47	1336	4.32	< .01
Gyrus temporalis medius 19	RH	Räuml.	35	-69	18	1473	4.06	< .01
<b>Delay</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Farbe	-34	27	31	995	2.85	< .01
Sulcus praecentralis / 6	LH	Räuml.	-24	-7	60	1223	5.63	< .01
Gyrus praecentralis inferior / 6	LH	Farbe	-32	-4	35	260	2.02	< .05
Gyrus frontalis medialis / 6	LH	Farbe	0	-14	58	205	3.95	< .01
Lobus parietalis inferior / 40	LH	Räuml.	-45	-39	49	974	3.41	< .01
Praecuneus / 7	LH	Räuml.	-20	-62	49	6842	6.03	< .01
Sulcus frontalis superior –Sulcus praecentralis / 6	RH	Räuml.	28	-8	53	2219	5.53	< .01
Gyrus postcentralis / 2	RH	Räuml.	57	-20	46	242	4.06	< .01
Lobus parietalis inferior / 40	RH	Räuml.	38	-39	44	1333	4.41	< .01
Lobus parietalis superior / 7	RH	Räuml.	21	-59	54	2481	5.21	< .01

Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). In der Spalte RC > .3 ist die Bedingung mit dem stärkeren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

## Studie 2: Resultate

### Fortsetzung Tabelle 6

#### Kontraste "Was vs. Wo" in "regions of interest" (ROI) von Experiment 1 mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel

Anatomisches Areal / Brodmann	Hem.	RC > .3	x	y	z	Clustergröße	t	p
<b>Abruf</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Farbe	-35	15	30	1584	4.27	< .01
Insula / 13	LH	Farbe	-39	-2	15	1747	4.46	< .01
Gyrus cinguli / 31	LH	Farbe	-8	-9	46	391	3.96	< .01
Gyrus postcentralis 3	LH	Farbe	-42	-18	48	637	3.68	< .01
Gyrus okzipitalis medius / 19/37	LH	Farbe	-32	-50	-6	588	4.29	< .01
Praecuneus / 7	LH	Räuml.	-17	-59	52	398	-2.98	< .01
Gyrus temporalis inferior / 37	LH	Räuml.	-53	-62	0	241	-3.66	< .01
Cuneus / 17/18	LH	Farbe	-22	-72	6	300	3.05	< .01
Gyrus lingualis / 17/18	LH	Farbe	-18	-91	2	256	2.63	< .01
Insula / 13	RH	Farbe	39	1	12	1190	3.55	< .01
Gyrus postcentralis / 3	RH	Räuml.	59	-23	40	418	3.9	< .01
Gyrus lingualis / 19	RH	Farbe	30	-42	-4	286	3.53	< .01
Precuneus / 7	RH	Räuml.	16	-64	51	2893	5.59	< .01
Cuneus / 17/30	RH	Farbe	21	-72	10	602	4.37	< .01
Gyrus okzipitalis inferior / 18	RH	Farbe	22	-80	-4	822	5.19	< .01

Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). In der Spalte RC > .3 ist die Bedingung mit dem stärkeren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

## Studie 2: Resultate

**Tabelle 7**

**Kontraste “Was vs. Wo” in den “regions of interest“ (ROI) von Experiment 2 mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel**

Anatomisches Areal / Brodmann	Hem.	RC > .3	x	y	z	Clustergröße	t	p
<b>Enkodieren</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Farbe	-37	15	30	4783	2.42	< .01
Sulcus praecentralis / 6	LH	Räuml.	-53	-2	41	222	1.87	n.s
Sulcus praecentralis / 6	LH	Farbe	-45	-5	46	1101	2.99	< .01
Gyrus frontalis medialis / 6	LH	Farbe	-2	-20	61	213	.35	n.s.
Sulcus praecentralis / 6	LH	Räuml.	-20	-13	57	1005	3.77	< .01
Sulcus postcentralis / 3	LH	Räuml.	-53	-24	34	1163	2.93	< .01
Gyrus lingualis / 19/18	LH	Farbe	-9	-55	0	4278	1.18	n.s.
Lobus parietalis superior / 7	LH	Räuml.	-28	-50	56	1037	2.89	< .01
Gyrus parietalis inferior / 40	LH	Farbe	-35	-55	36	492	4.17	< .01
Gyrus temporalis medium / 21 /37	LH	Räuml.	-47	-52	0	1047	3.83	< .01
Gyrus fusiformis / 19	LH	Farbe	-19	-55	-8	211	.681	n.s.
Gyrus okzipitalis medius 19/18	LH	Räuml	-34	-74	12	459	2.15	< .05
Cuneus /19	LH	Farbe	-7	-79	28	487	1.7	n.s.
Gyrus praecentralis /6	RH	Räuml.	53	4	27	2456	4.7	< .01
Gyrus frontalis medius /6	RH	Räuml.	24	-9	57	2811	4	< .01
Lobus parietalis inferior / 40	RH	Räuml.	47	-30	41	4867	4.73	< .01
Gyrus temporalis inferior / 37	RH	Räuml.	47	-46	-5	894	2.28	< .01
Gyrus lingualis / 19	RH	Farbe	12	-51	4	1227	2.2	< .05
Precuneus / 7	RH	Räuml.	15	-59	53	2910	2.88	< .01
Gyrus temporalis medius / 39	RH	Räuml.	35	-69	17	3250	3.04	< .01
Cuneus / 18	RH	Farbe	6	-69	15	201	.884	n.s.
Gyrus temporalis medius / 18	RH	Farbe	17	-87	19	360	1.9	n.s

**Delay**

Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Farbe	-37	21	28	3900	4.56	< .01
Sulcus praecentralis / 6	LH	Räuml.	-54	3	35	730	3.76	< .01
Sulcus praecentralis superior/ 6	LH	Räuml.	-23	-8	57	5094	8.72	< .01
Lobus parietalis superior / 7	LH	Räuml.	-28	-52	46	23857	9.1	< .01
Lobus parietalis inferior / 40	LH	Räuml.	-45	-39	49	974	3.41	< .01
Insula / 13	RH	Räuml.	44	13	15	311	3.14	< .01
Gyrus praecentralis / 6	RH	Räuml.	52	3	27	2221	5.54	< .01
Gyrus frontalis medius / 6	RH	Räuml.	27	-8	54	4611	7.7	< .01
Lobus parietalis inferior-Precuneus / 40/7	RH	Räuml.	33	-45	47	13602	1.8	< .01
Precuneus / 7	RH	Räuml	11	-73	45	342	5.81	< .01

Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). In der Spalte RC > .3 ist die Bedingung mit dem höheren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

## Studie 2: Resultate

Fortsetzung Tabelle 7

**Kontraste "Was vs. Wo" in den "regions of interest" (ROI) von Experiment 2 mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel**

Anatomisches Areal / Brodmann	Hem.	RC > .3	x	y	z	Clustergröße	t	p
<b>Abruf</b>								
Sulcus frontalis inferior / 6	LH	Farbe	-37	13	30	6891	6.95	< .01
Gyrus postcentralis / 2	LH	Räuml.	-60	-22	37	243	3.83	< .01
Lobus paritalis inferior / 40	LH	Räuml.	-38	-34	50	433	5.1	< .01
Lobus parietalis superior/7	LH	Räuml.	-19	-61	50	6595	7.22	< .01
Gyrus lingualis / 18/17	LH	Farbe	-17	-86	-3	1504	5.17	< .01
Gyrus frontalis medius / 6	RH	Räuml.	24	-4	53	734	4.73	< .01
Gyrus praecentralis / 4	RH	Farbe	38	-22	51	723	4.09	< .01
Gyrus postcentralis 3/1/2	RH	Räuml.	60	-23	39	438	4.73	< .01
Lobus parietalis inferior 40	RH	Räuml.	39	-35	35	660	5.08	< .01
Lobus parietalis superior 40/7	RH	Räuml.	23	-64	45	7990	7.51	< .01
Gyrus temporalis superior 22	RH	Räuml.	40	-45	16	392	3.7	< .01
Gyrus lingualis 18/17	RH	Farbe	16	-86	3	1583	6.03	< .01

Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). In der Spalte RC > .3 ist die Bedingung mit dem höheren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

Tabelle 8

**Kontrast "Halten vs. Manipulieren" von Farbe in den „regions of interest“ (ROI) mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel**

Anatomisches Areal / Brodmann	Hem.	RC > 0	x	y	z	Clustergröße	t	p
<b>Enkodieren</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Manip.	-36	23	29	4283	1.58	n.s
Sulcus praecentralis superior / 6	LH	Manip.	-31	-8	52	7372	.73	n.s
Sulcus praecentralis inferior / 6	RH	Manip.	43	1	31	554	2.86	< .01
Sulcus praecentralis superior / 6	RH	Manip.	30	-11	54	3267	.75	n.s.
<b>Delay</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Manip.	-36	24	26	3939	1.78	< .05
Sulcus praecentralis superior / 6	LH	Manip.	-28	-9	50	2734	.09	n.s.
<b>Abruf</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Manip.	-36	27	27	5653	.53	n.s.
Sulcus praecentralis superior /6	LH	Halten	-32	-9	51	5837	.91	n.s
Sulcus frontalis inferior / 9	RH	Halten	43	23	26	12661	1.76	.078
Sulcus praecentralis superior / 6	RH	Halten	34	-14	56	3179	1.15	n.s.

Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). In der Spalte RC > 0 ist die Bedingung mit dem stärkeren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

## Studie 2: Resultate

**Tabelle 9**

**Schwerpunkte und Signifikanzlevel des Kontrastes "Halten vs. Manipulieren" für Winkel in den „regions of interest“ (ROI) mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel**

Anatomisches Areal / Brodmann	Hem.	RC > 0	x	y	z	Clustergröße	t	p
<b>Enkodieren</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Manip.	-36	24	30	754	1.73	.08
Sulcus praecentralis superior / 6	LH	Halten	-26	-10	55	7974	1.32	n.s.
Sulcus praecentralis inferior / 6	RH	Halten	51	3	29	3081	1.79	.08
Sulcus praecentralis superior / 6	RH	Manip.	29	-9	55	6412	3.4	< .01
<b>Delay</b>								
Sulcus frontalis inferior / 6	LH	Manip.	-47	3	31	2653	2.43	< .05
Sulcus praecentralis superior / 6	LH	Manip.	-25	-10	55	6671	3.27	< .01
Sulcus frontalis inferior / 6	RH	Manip.	53	4	27	1043	3	< .01
Sulcus praecentralis superior / 6	RH	Manip.	28	-9	54	3790	2.83	< .01
<b>Abruf</b>								
Sulcus frontalis inferior / 9	LH	Manip.	-37	30	29	1639	.17	n.s.
Sulcus praecentralis superior / 6	RH	Halten	-29	-11	57	4747	1	n.s.
Sulcus frontalis inferior / 9	RH	Manip.	39	30	27	6018	.2	n.s.
Sulcus praecentralis superior / 6	RH	Halten	31	-10	57	5341	2.26	< .05

Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). In der Spalte RC > 0 ist die Bedingung mit dem stärkeren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

**Tabelle 10**

**Kontrast „Was vs Wo“, „random effect“ im Delay für Experiment 1 und 2 über alle Voxel, Areale im FK**

Areal	Bedingung	Hem.	x	y	z	Clustergröße & t-Wert
<b>„Was vs. Wo“</b>						
Sulcus frontalis inferior / 9/46	Farbe	LH	-39	29	16	950, t(9) = -5.37
Sulcus Frontalis Superior/ 6	Winkel	LH	-24	-8	61	1300, t(9) = 8.6
Sulcus Frontalis Superior/ 6	Winkel	RH	28	-6	55	800, t(9) = 7.3

Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben. q (FDR) = .01

## Studie 2: Resultate

**Tabelle 11**

**Schwerpunkte und Signifikanzlevel des Kontrastes "Single vs. Dual" in den „regions of interest“ (ROI) des FK, Experiment 1 (Halten)**

Anatomisches Areal / Brodmann	Hem.	RC > 0	x	y	z	Clustergröße	„WAS + WO vs. DUAL“	Einzelkontraste
<b>Enkodieren</b>								
Gyrus frontalis medius - SFI / 9	LH	Dual	-35	30	25	7662	t = 2.56, p <.05	„Dual vs. Wo“: t = 3.39, p <.01 „Dual vs. Was“: t = 1, n.s.
SPC superior / 6	LH	Dual	-28	-8	49	17611	t = 1.1, n.s.	
Gyrus frontalis medius / 9	RH	Dual	32	36	36	527	t = .54, n.s.	
<b>Delay</b>								
Gyrus frontalis medius, SFI / 9	LH	Dual	-34	26	29	5410	t = 1.03, n.s.	
SPC superior / 6	LH	Dual	-27	-10	52	13156	t = 2.11, p <.05	„Dual vs. Wo“: t = .5, n.s. Dual vs. Was“: t = 2.33, p <.01
Insula / 13	RH	Dual	34	19	13	2286	t = .12, n.s.	
SPC superior / 6	RH	Dual.	32	-18	53	16887	t = 1.6, n.s.	
<b>Abruf</b>								
SPC superior / 6	LH	Dual	-31	-9	51	11405	t = 1.7, n.s.	
SPC superior / 6	RH	Dual	28	-6	55	7334	t = 1.6, n.s.	

Im ersten Kontrast werden beide Einzelbedingungen mit der Dualbedingung verglichen („Was + Wo vs. Dual“). Falls dieser Kontrast signifikant ausfiel, schloss sich ein getrennter Vergleich der „Einzelbedingung vs. Dual“ an (Einzelkontrast). Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). SFI = Sulcus frontalis inferior, SFS = Sulcus frontalis superior, SPC = Sulcus praecentralis. In der Spalte RC > 0 ist die Bedingung mit dem stärkeren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

## Studie 2: Resultate

**Tabelle 12**

**Schwerpunkte und Signifikanzlevel des Kontrastes "Single vs. Dual" in den „regions of interest“ (ROI) des FK, Experiment 2 (Manipulieren)**

Areal	Hem.	RC > 0	x	y	z	Cluster größe	„WAS + WO vs. DUAL“	Einzelkontraste
<b>Enkodieren</b>								
<b>Gyrus frontalis medius - SFI / 9</b>	LH	Dual	-35	29	29	8450	$t = 2.66,$ $p < .01$	„Dual vs. Wo“: $t = 3.2$ $p < .05$ „Dual vs. Was“: $t = 1.1,$ n.s.
<b>SPC superior / 6</b>	LH	Dual	-23	-7	55	10579	$t = 1.6,$ n.s.	
<b>Gyrus frontalis medius / 9</b>	RHJ		37	33	34	1932	$t = 1.6,$ n.s.	
<b>SPC superior / 6</b>	RH		28	-7	56	7466	$t = 1.5,$ n.s.	
<b>Delay</b>								
<b>Gyrus frontalis medius - SFI / 9</b>	LH	Dual	-34	30	28	11976	$t = .7,$ n.s.	
<b>SPC superior / 6</b>	LH	Dual	-22	-8	55	13663	$t = 2.41,$ $p < .05$	„Dual vs. Wo“: $t = .83$ n.s. „Dual vs. Was“: $t = 3.34,$ $p < .01$
<b>Gyrus frontalis medius / 9</b>	RH	Dual	36	33	33	1206	$t = 1.94,$ $p < .05$	„Dual vs. Wo“: $t = 1.7,$ n.s. „Dual vs. Was“: $t = 1.6,$ n.s.
<b>SPC superior / 6</b>	RH	Dual	28	-10	54	8004	$t = 1.18,$ n.s.	
<b>Abruf</b>								
<b>Gyrus frontalis medius- SFI / 9</b>	LH	Dual	-36	31	26	1144	$t = 1.2,$ n.s.	
<b>SPC superior / 6</b>	LH	Dual	-28	-12	56	8168	$t = .13,$ n.s.	
<b>Gyrus frontalis medius / 9</b>	RH		39	36	31	7870	$t = .79,$ n.s.	
<b>SPC superior / 6</b>	RH		33	-10	56	8281	$t = .16,$ n.s.	

Im ersten Kontrast werden beide Einzelbedingungen mit der Dualbedingung verglichen („Was + Wo vs. Dual“). Falls dieser Kontrast signifikant ausfiel, schloss sich ein getrennter Vergleich der „Einzelbedingung vs. Dual“ an (Einzelkontrast). Hem. = Hemisphäre (LH = links, RH= rechts). SFI = Sulcus frontalis inferior, SFS = Sulcus frontalis superior, SPC = Sulcus praecentralis. In der Spalte RC > 0 ist die Bedingung mit dem stärkeren BOLD-Signal vermerkt. x, y, z = Talairach-Koordinaten; Größe der Cluster ist in mm<sup>3</sup> wiedergegeben.

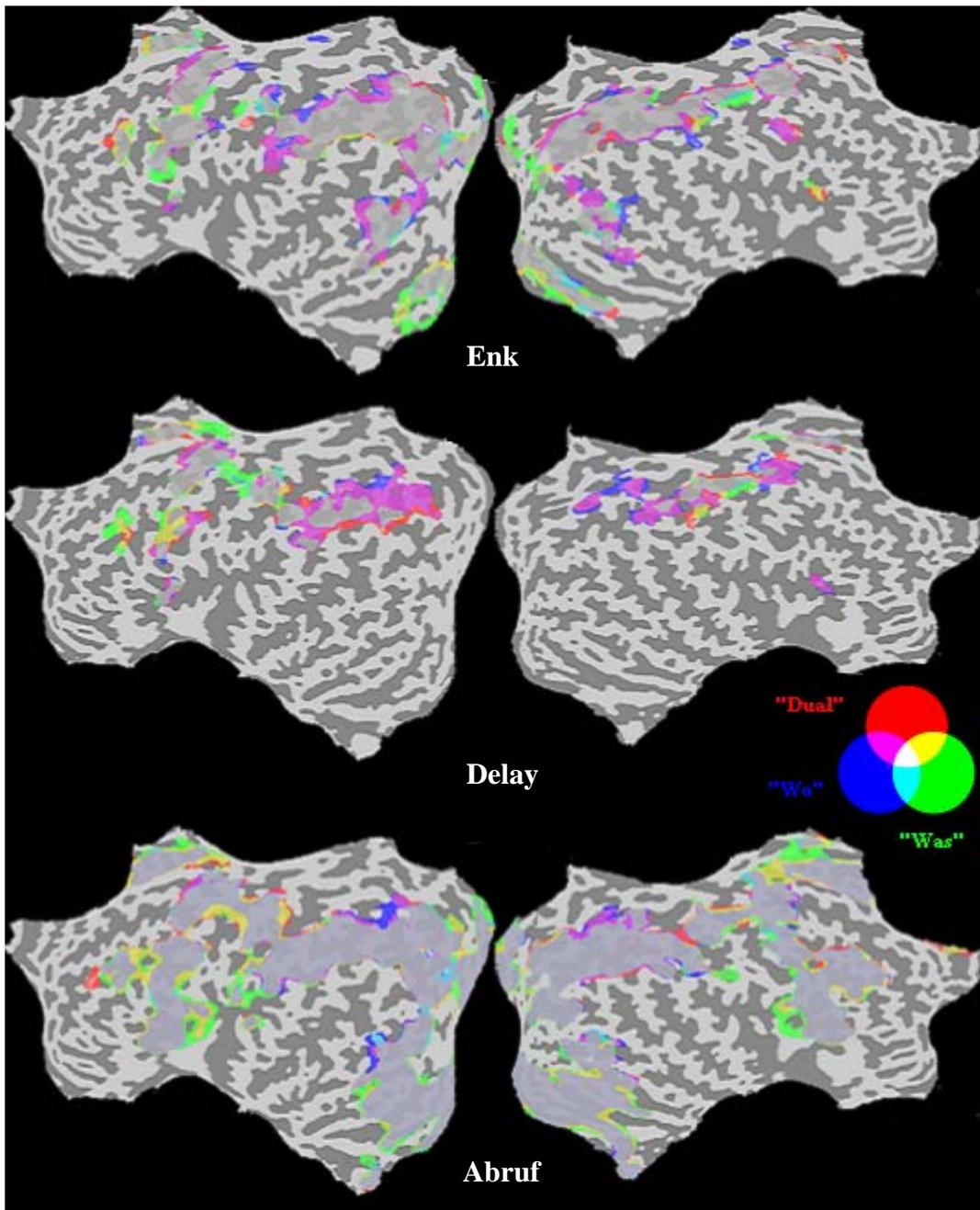


Abbildung 9

Superpositionsmaps für alle drei Bedingungen („Was“, „Wo“ und „Dual“) in Experiment 1, getrennt nach den drei Gedächtnisphasen Enkodieren, Delay und Abruf (Grün = Farbe: „Was“; Blau = Winkel: „Wo“; und Rot = Dual: „Was“ und „Wo“).

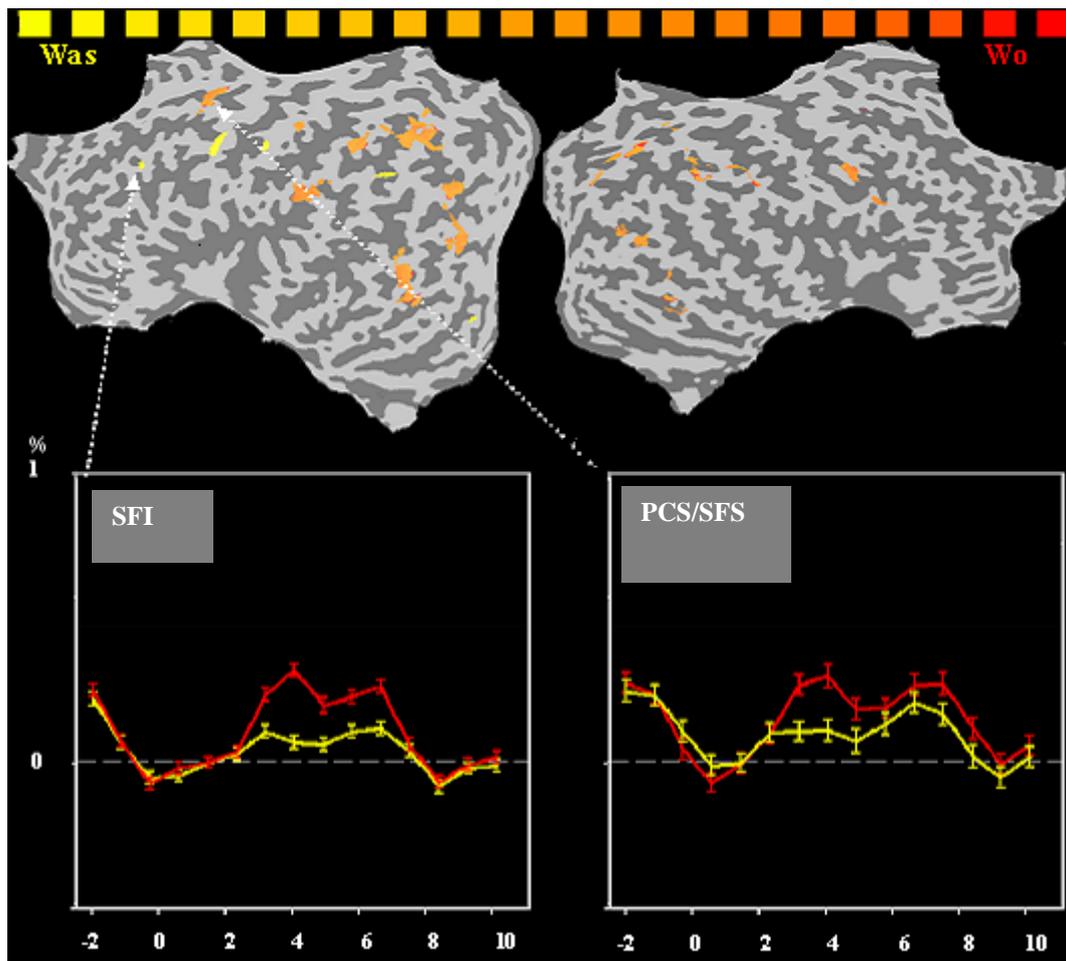


Abbildung 10

RC-Maps ( $RC > 0.3$ ) des Kontrasts „Was vs. Wo“ in Experiment 1 für die Phase des Enkodierens (im unteren Teil der Abbildungen sind die Zeitverläufe des BOLD-Signals im Sulcus frontalis inferior = SFS und im Sulcus praecentralis/ Sulcus frontalis superior = PCS/SFS dargestellt. Gelb = Manipulieren der Farbinformation: „Was“; Rot = Manipulieren des räumlichen Materials: „Wo“).

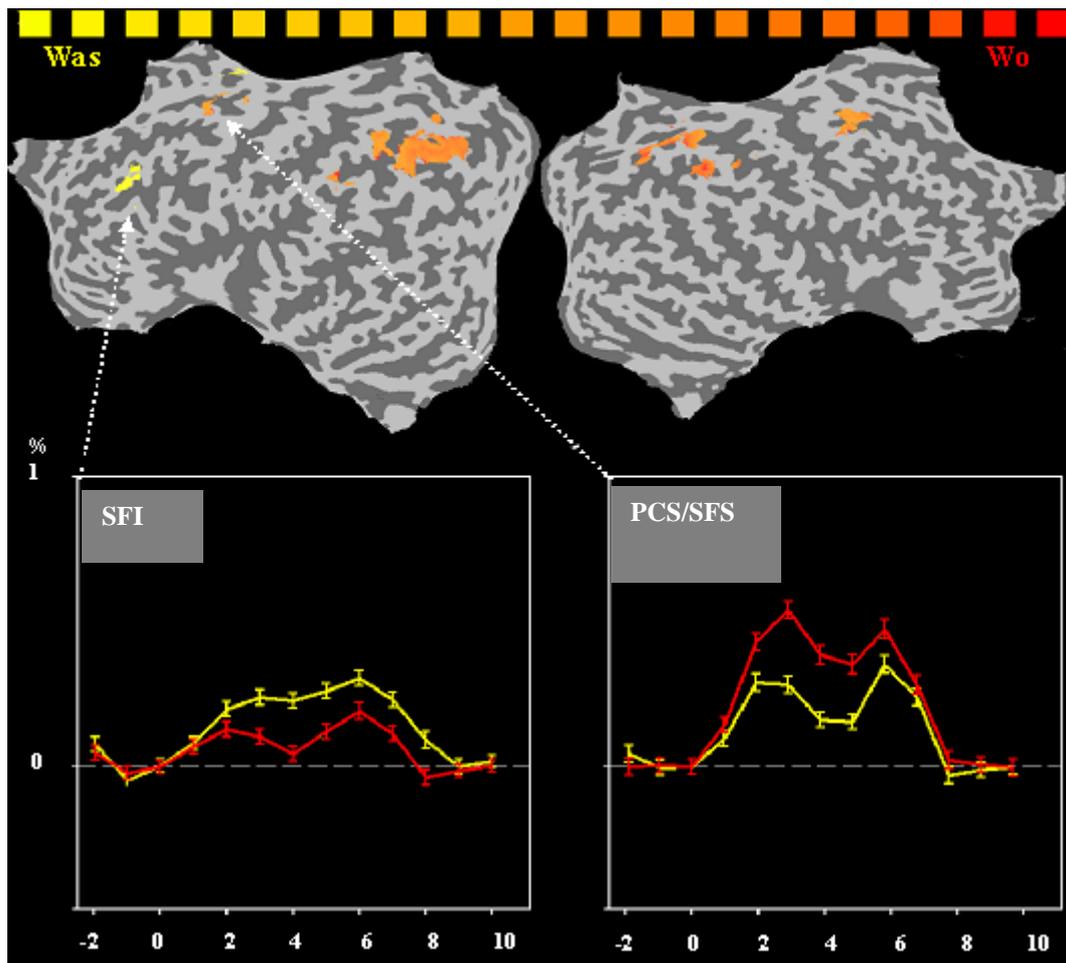


Abbildung 11

*RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) für den Kontrast „Was vs. Wo“ in Experiment 1 für die Phase des Delays (im unteren Teil der Abbildungen sind die Zeitverläufe des BOLD-Signals im Sulcus frontalis inferior = SFS und im Sulcus praecentralis/ Sulcus frontalis superior = PCS/SFS dargestellt. Gelb = Manipulieren der Farbinformation: „Was“; Rot = Manipulieren des räumlichen Materials: „Wo“).

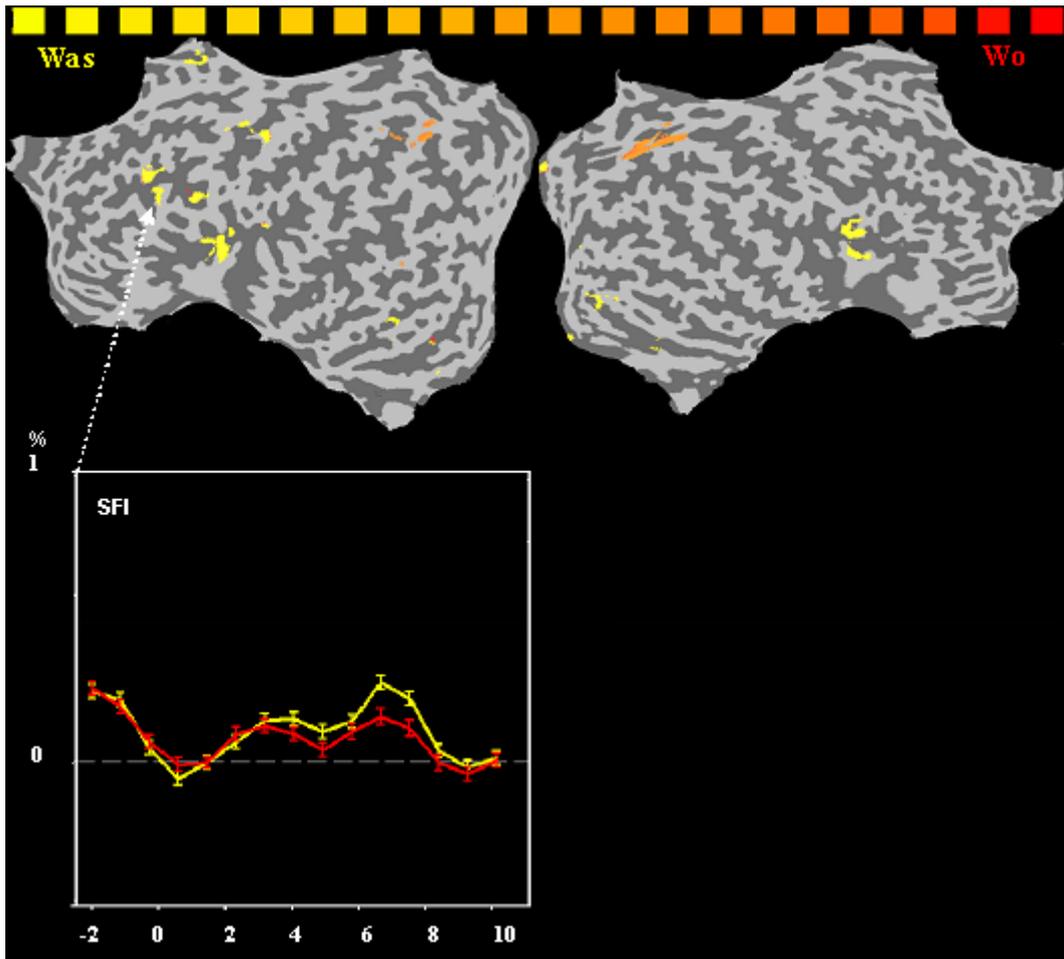


Abbildung 12

RC-Maps ( $RC > 0.3$ ) für den Kontrast „Was vs. Wo“ in Experiment 1 für die Phase des Abrufs (im unteren Teil der Abbildungen sind die Zeitverläufe des BOLD-Signals im Sulcus frontalis inferior = SFI dargestellt. Gelb = Manipulieren der Farbinformation: „Was“; Rot = Manipulieren des räumlichen Materials: „Wo“).

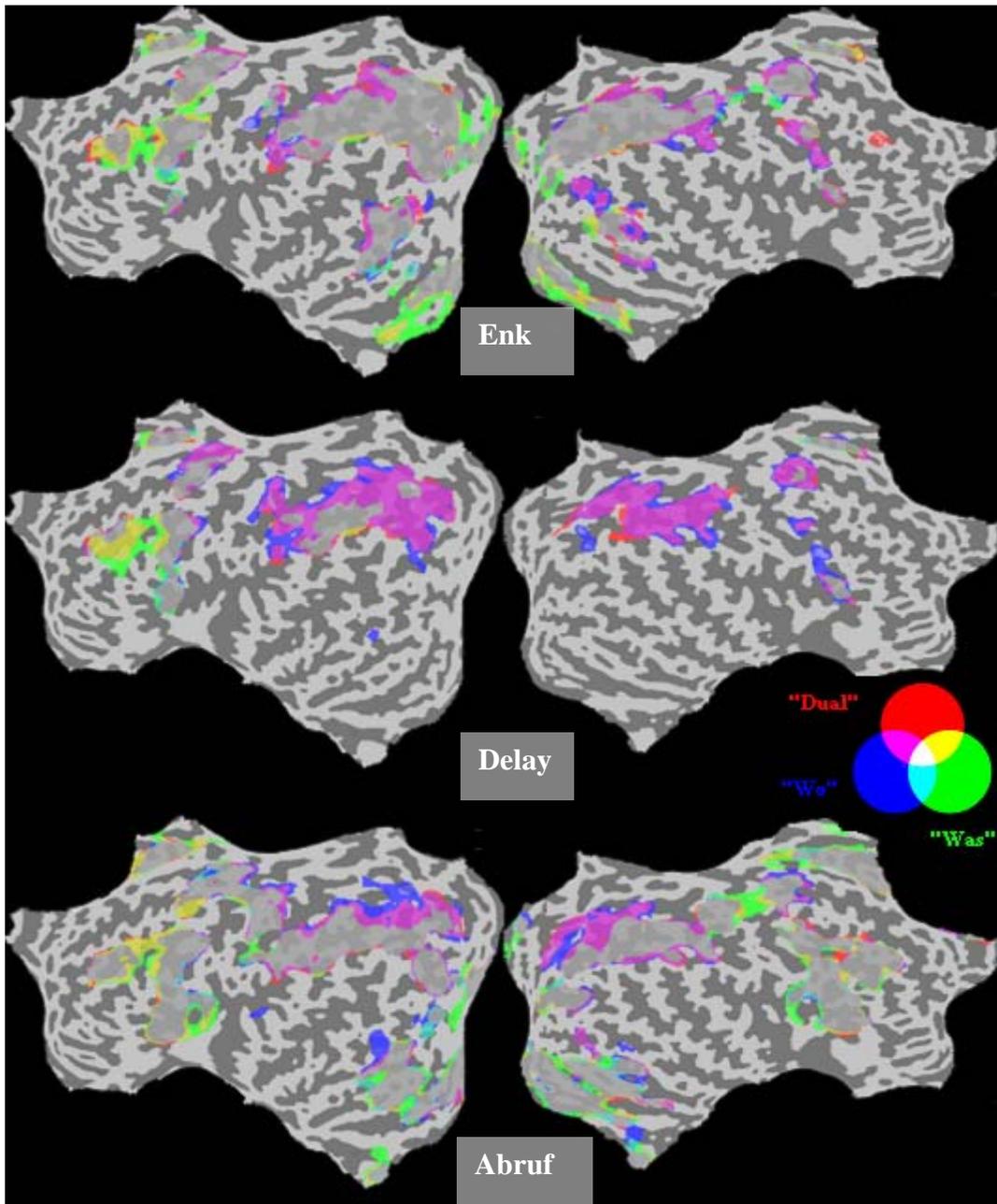


Abbildung 13

Superpositionsmaps für alle drei Bedingungen („Was“, „Wo“ und „Dual“) in Experiment 2, getrennt nach den drei Gedächtnisphasen Enkodieren, Delay und Abruf (Grün = Farbe, „Was“; Blau = Winkel, „Wo“; und Rot = Dual, „Was“ und „Wo“).

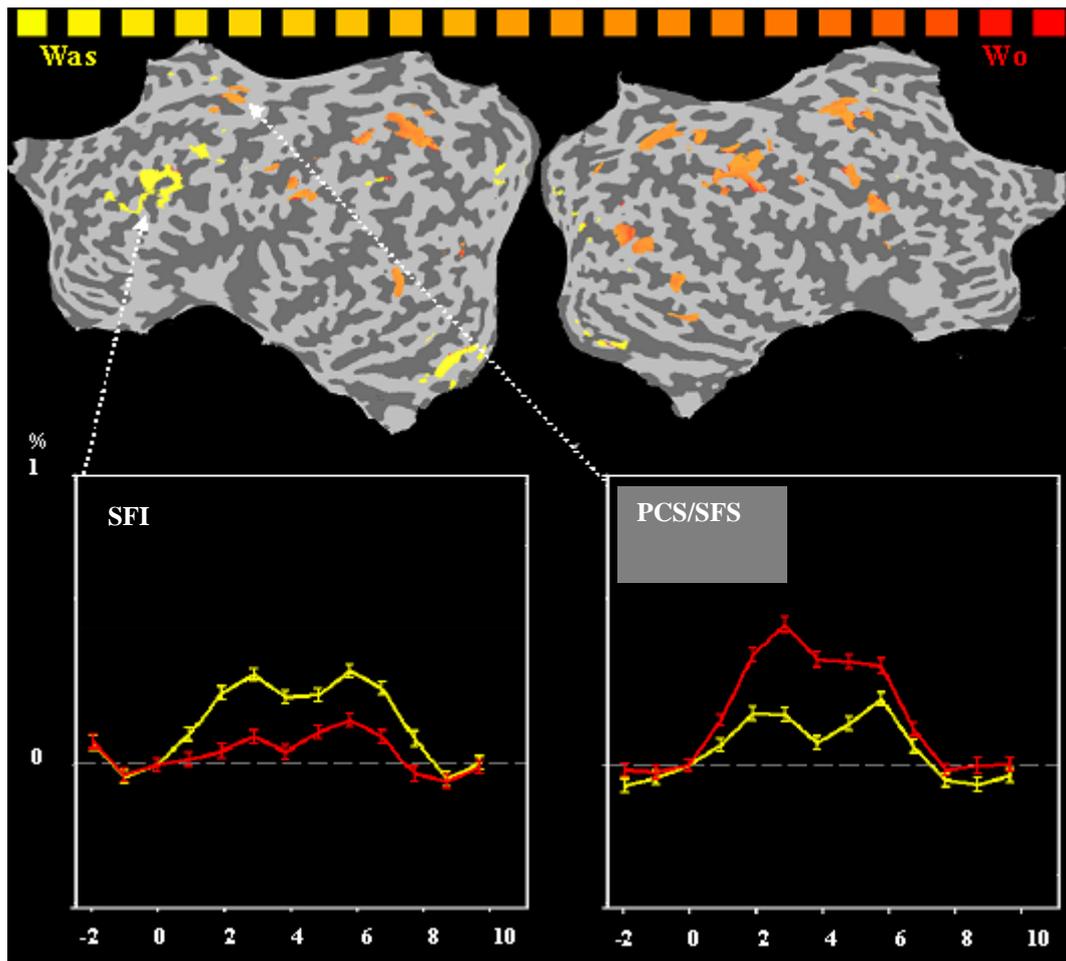


Abbildung 14

*RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) für den Kontrast „Was vs. Wo“ in Experiment 2 für die Phase des Enkodierens (im unteren Teil der Abbildungen sind die Zeitverläufe des BOLD-Signals im Sulcus frontalis inferior = SFS und im Sulcus praecentralis/ Sulcus frontalis superior = PCS/SFS dargestellt. Gelb = Manipulieren der Farbinformation: „Was“; Rot = Manipulieren des räumlichen Materials: „Wo“).

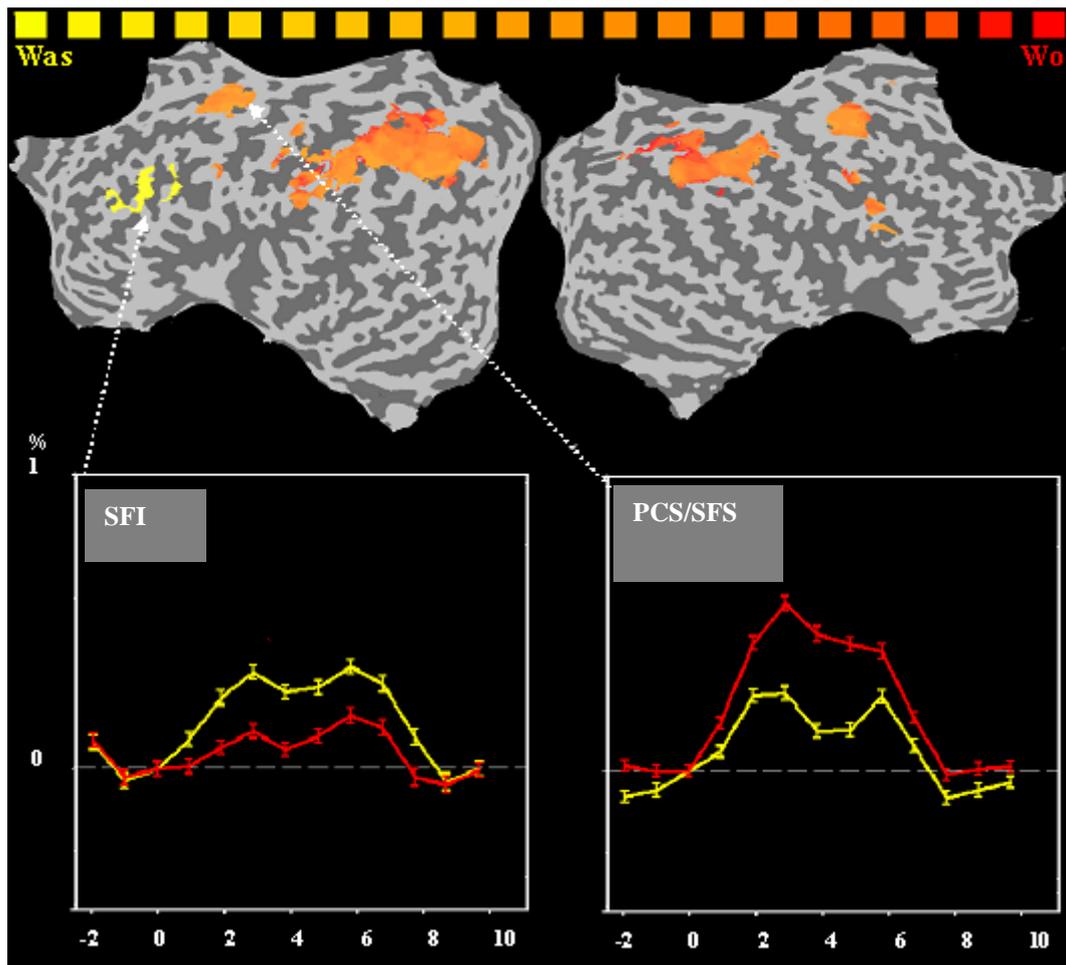


Abbildung 15

RC-Maps ( $RC > 0.3$ ) für den Kontrast „Was vs. Wo“ in Experiment 2 für die Phase des Delays (im unteren Teil der Abbildungen sind die Zeitverläufe des BOLD-Signals im Sulcus frontalis inferior = SFS und im Sulcus praecentralis/ Sulcus frontalis superior = PCS/SFS dargestellt. Gelb = Manipulieren der Farbinformation: „Was“; Rot = Manipulieren des räumlichen Materials: „Wo“).

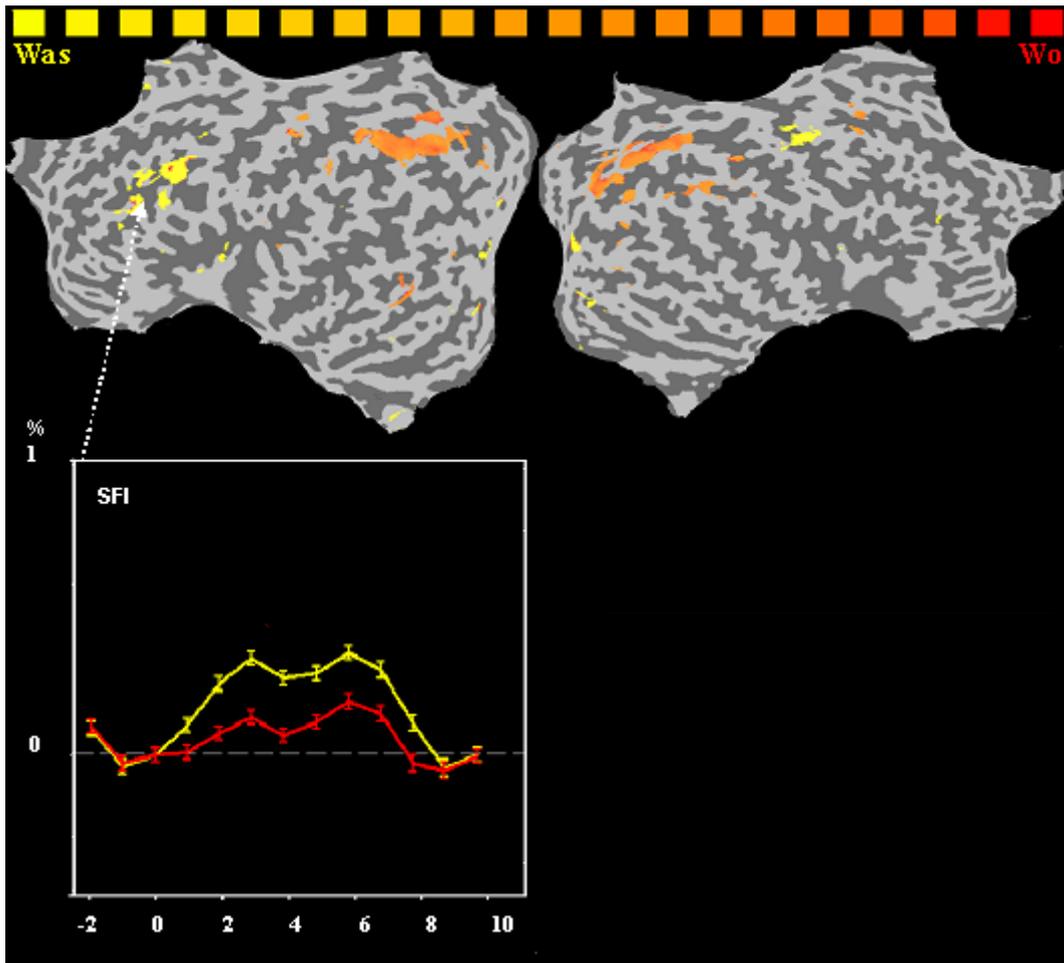


Abbildung 16

RC-Maps ( $RC > 0.3$ ) für den Kontrast „Was vs. Wo“ in Experiment 2 für die Phase des Abrufs (im unteren Teil der Abbildungen sind die Zeitverläufe des BOLD-Signals im Sulcus frontalis inferior dargestellt. Gelb = Manipulieren der Farbinformation: „Was“; Rot = Manipulieren des räumlichen Materials: „Wo“).

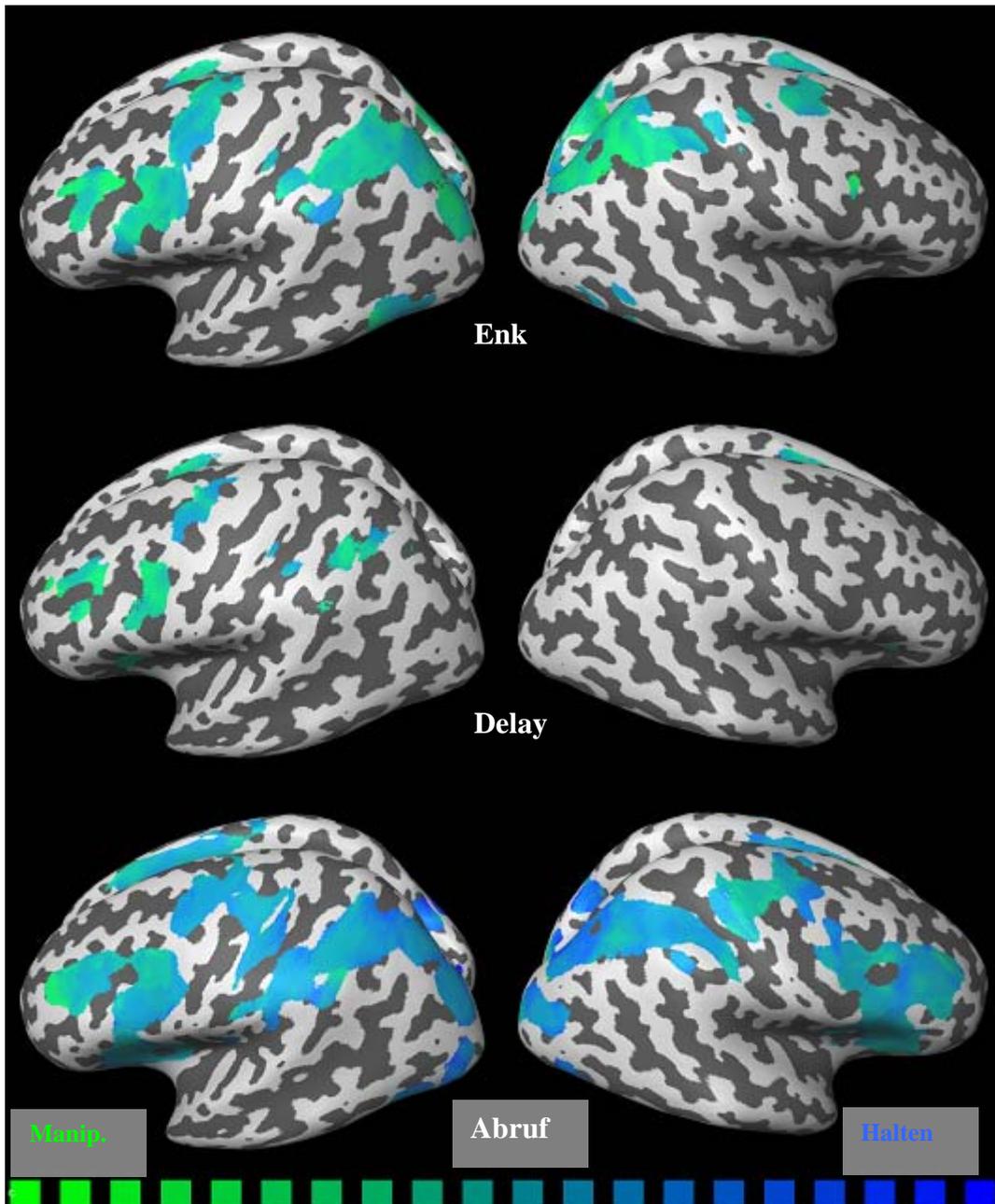


Abbildung 17

RC-Maps ( $RC > 0$ ) für den Kontrast "Halten vs. Manipulieren" über die drei Gedächtnisphasen Enkodieren (Enk.), Delay und Abruf für Farbe (Blau = „Halten“ von Farbe, Grün = Manipulieren von Farbe).

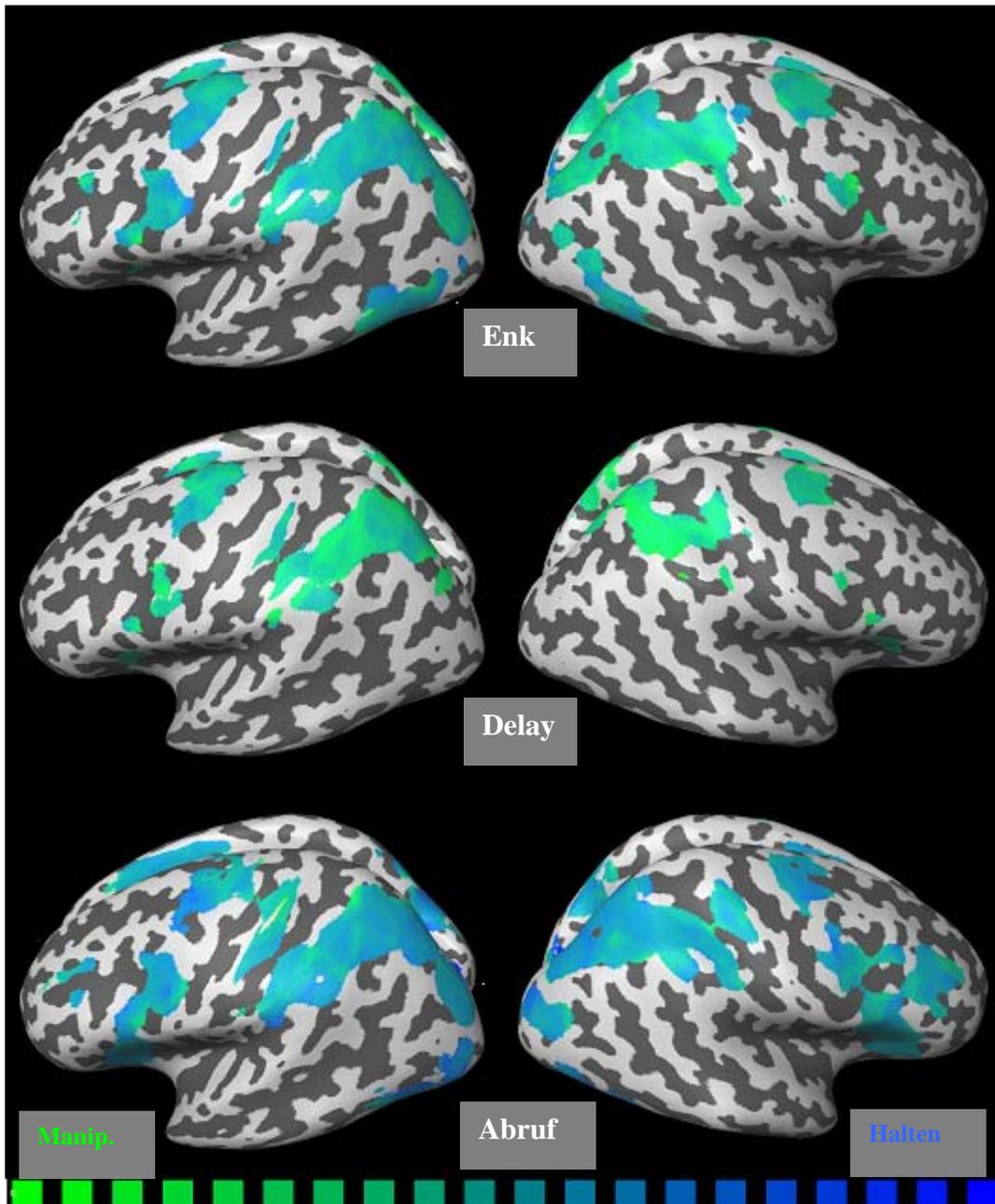


Abbildung 18

*RC*-Maps ( $RC > 0$ ) für den Kontrast „Halten vs. Manipulieren“ über die drei Gedächtnisphasen Enkodieren, Delay und Abruf für die räumliche Information (Blau = „Halten“ von Winkel, Grün = Manipulieren von Winkel).

## 9. Studie 2: Diskussion

Die funktionelle Spezialisierung des FK stand im Fokus der zweiten Studie. Die gegensätzlichen Vorhersagen der domän- und der prozessspezifischen Theorie wurden anhand zweier Experimente überprüft. Im ersten Experiment sollten die Probanden Farben und Winkel über ein kurzes Zeitintervall von 7,5 Sekunden halten. Das zweite Experiment verlangte von ihnen das Manipulieren von Farb- und Winkelinformation.

Ergebnisse aus Verhaltensstudien (z.B. Della Sala et al., 1999; Logie und Marchietti, 1991) legen nahe, dass die Aufteilung perzeptueller Prozesse in eine dorsale und eine ventrale Bahn auch für höhere kognitive Leistungen, wie das Halten von Information im visuellen AG, erhalten bleibt. Eigene Verhaltensdaten (Studie 1) erweitern diesen Befund: Auch Manipulationsprozesse operieren auf der Basis getrennter ventraler und dorsaler Ressourcen. Die vorliegenden Verhaltensdaten der ersten Studie unterstützen die Annahme, dass getrennte kortikale Ressourcen für das Manipulieren von Information des ventralen und dorsalen Pfades existieren (domänspezifische Theorie). Auf der Grundlage der domänspezifischen Theorie wurde die Hypothese vertreten, dass der FK für Prozesse des Haltens und des Manipulierens eine dorso-ventrale Dissoziation nach Materialart aufweist (Hypothese 1 und 2). Ventrale Areale des FK sollten während des Haltens und Manipulierens von ventraler Information (Farbe, „Was“) aktiviert werden, dorsale Regionen für das Halten und Manipulieren von räumlicher Information (Winkel, „Wo“). Eine mögliche Organisation des FK auf der Grundlage von Prozessen wurde anhand von zwei Kontrasten untersucht. In dem ersten wurde das Halten der Farb- und Winkelinformation gegen das Manipulieren dieser Information kontrastiert. Im zweiten wurden die Einzelaufgaben gegen die Dual-Bedingung kontrastiert, welche nach Baddeley (1996) auf Ressourcen der zentralen Exekutive fußen sollen.

Im Kommenden werden in einem ersten Schritt die Aktivierungsmuster für die verschiedenen Gedächtnisphasen interpretiert. Anschließend werden die Resultate der Experimente im Hinblick auf die vertretenen Hypothesen diskutiert.

### **9.1. Aufgabenphasen**

Die Superpositionmaps und *RC*-Maps beider Experimente dokumentieren, dass es bis zu einem gewissen Maße möglich gewesen ist, kortikale Aktivierungscluster auf der Basis von Gedächtnisphasen zu trennen. In der Enkodierungsphase, in der die Samples dargeboten wurden, fanden sich Aktivitäten in okzipitalen und temporalen Regionen. In der Delayphase, in der kein perzeptueller Input erfolgte, waren in okzipitalen Regionen keine aktiven Cluster zu beobachten. Stattdessen fanden sich Cluster im Frontal- und im Parietallappen. Ein ansteigender BOLD-Effekt in okzipitalen Arealen trat erst wieder während der Präsentation der Teststimuli in der Abrufsphase auf. Die dokumentierten phasenspezifischen Aktivierungsmuster des visuellen AG stehen in Einklang mit Ergebnissen anderer Studien (z.B. Munk et al., 2002). Allerdings sollte bedacht werden, dass wegen der eingeschränkten Zeitauflösung des fMRT ( $TR = 2$  Sekunden) eine genaue Trennung der drei Gedächtnisphasen nicht möglich ist.

Jeder Phasenprädiktor bestand aus zwei Volumen, so dass davon auszugehen ist, dass während der festgelegten Enkodierungs- und der Abrufsphase auch schon Prozesse des Haltens/Manipulierens einsetzen. Nur die Delayphase beinhaltet mit großer Wahrscheinlichkeit keine Aktivitäten aus den beiden anderen Phasen, da in dieser Phase kein aufgabenrelevanter perzeptueller Input dargeboten wurde. Darüber hinaus wurde die BOLD-Antwort mit vier Sekunden (Boxcar) so moduliert, dass die BOLD-Verläufe aus der Enkodierungsphase nicht systematisch in die Delayphase hineinreichten. Allerdings ist eine strikte Trennung der drei Gedächtnisphasen nicht notwendig, da die vorhergesagten Dissoziationen des FK nicht primär von der Phasenart abhängig sein sollten. Zur

zusätzliche Kontrolle wurden für alle drei Gedächtnisphasen getrennte *RC*-Maps berechnet.

## **9.2. Halten: „Was vs. Wo“**

Der folgende Abschnitt diskutiert die Ergebnisse der Kontrastierung „Was vs. Wo“ während des Haltens visueller Information im AG. Experimente, welche das Halten der beiden Informationsarten kontrastierten, erbrachten bisher eine gemischte Befundlage, auf deren Basis keine Entscheidung zwischen den Vorhersagen der prozessspezifischen und der domänenspezifischen Theorie möglich war (siehe auch Überblicksarbeit von Fletcher und Henson, 2001).

Aus den Superpositionmaps ist ersichtlich, dass die experimentellen Bedingungen über alle drei Gedächtnisphasen hinweg zu einer Aktivierung eines großen, gemeinsamen Netzwerkes führen. Dies verdeutlicht, dass weite Bereiche des Kortex unabhängig von der Materialart bei visuellen Arbeitsgedächtnisaufgaben aktiviert werden.

### **9.2.1. Dissoziationen im FK**

Um die Vorhersage einer dorso-ventralen Winkel-Farbe Dissoziation des FK während des Haltens von Information zu überprüfen (Hypothese 1), wurden die beiden Prädiktoren „Was“ und „Wo“ in *RC*-Maps mittels ROI-ALMs und in einem weiteren Schritt über alle Voxel als „random-effect“ ALM kontrastiert. Eine materialspezifische Dissoziation des FK konnte gemäß der vertretenen Hypothese gefunden werden. Das Enkodieren und das Halten der Farben im Delay aktiviert im FK eine Region um den SFI (LH). Das Enkodieren und Halten von Winkelinformation in der Delayphase führte zu einer Aktivierung um den SPC superior (LH/RH) und zu bilateralen Aktivierungen in parietalen Arealen. Im Abruf trat eine Dissoziation nach Art des Materials auf, welche allerdings zwischen dem SFI („Was“) und parietalen Arealen („Wo“) bestand.

Die gefundene Dissoziation für das Halten von dorsaler und ventraler Information konnte auch in vorangehenden Studien dokumentiert werden. Der linke SFI war in mehreren Studien mit dem Halten von Objekten oder Gesichtern („Was“) assoziiert (Courtney et al., 1998; Munk et al., 2002; Sala, Rämä und Courtney, 2003).

Es muss allerdings bedacht werden, dass Areale im linken ventralen FK zusätzlich im Zusammenhang mit dem verbalen AG (phonologische Schleife) stehen. Es existiert deshalb die Möglichkeit, dass die Probanden die Farben über verbales Rekodieren im AG aufrechterhalten haben. Die Ursache der gefundenen dorso-ventralen Dissoziation des FK würde damit auf der Unterscheidung zwischen räumlichen und verbalen AG beruhen. Gegen diese Annahme spricht allerdings, dass das verbale AG andere Positionen beansprucht als die vorliegenden des Farbgedächtnisses. Walter et al. (2003) kalkulierten einen Kontrast zwischen dem Halten von verbaler und räumlicher Information (Buchstaben vs. Positionen der Buchstaben). Die Autoren dokumentierten, dass das Halten von verbaler Information mit folgenden Positionen assoziiert war:  $x = -56, y = 12, z = 10$ . In einer fMRI-Studie dokumentierten Logie et al. (2003) ein Areal im VLFK (LH), welches im Zusammenhang mit subvokalem Wiederholen von Buchstabensequenzen stand:  $x = -50, y = 16, z = 18$ . Das in der vorliegenden Studie gefundene Areal, das mit dem Halten der Farbinformation verbunden war, nimmt eine deutlich andere Position ein (Delay):  $x = -34, y = 31, z = 27$ .

Die fMRT-Daten stehen im Einklang mit den vorliegenden Befunden der Verhaltensdaten aus Studie 1. Dort fand sich keine Evidenz für ein verbales Rekodieren der Farbinformation für die Halte- und die Manipulationsaufgabe.

Die mit dem Halten von räumlicher Information verbundenen Areale liegen an der posterioren Grenze des FK im superioren SPC/prämotorischen Kortex in der Nähe des frontalen Augenfeldes (FAF, Koyama et al., 2004, FAF:  $x = -24, y = -15, z = 46$ , vorliegende Studie  $x = -24, y = -7, z = 60$ ). Da das FAF in die Generierung willkürlicher

Augenbewegungen involviert ist (Anderson et al., 1996; Corbetta et al., 1998), könnte die vorliegende dorso-ventrale Dissoziation auch auf der Basis einer größeren Anzahl von Augenbewegungen in der räumlichen Bedingung im Vergleich zur Farbbedingung entstanden sein. Allerdings fanden sich keine Unterschiede in der Anzahl Sakkaden zwischen den beiden experimentellen Bedingungen „Was“ und „Wo“.

Darüber hinaus demonstrierten eine Reihe von Studien, dass Areale in der Nähe des FAF Informationen für das räumliche AG codieren (Courtney et al., 1997; Sala, Rämä und Courtney, 2003; Zarahn, Aguirre und D'Esposito, 1999; 2000). Diese Sicht wird von Studien an nicht-menschlichen Primaten gestützt: Neuronen im FAF wiesen anhaltende Aktivität während der Delayphase einer Arbeitsgedächtnisaufgabe auf (Bruce und Goldberg, 1985; Funahashi, Bruce und Goldman-Rakic, 1989). Unklar ist allerdings, welche funktionelle Rolle das FAF für Prozesse des räumlichen AG einnimmt. Curtis und D'Esposito (2003) vermuten in ihrem Überblicksartikel, dass das FAF in das „rehearsal“ von räumlicher Information involviert ist. Diese Annahme steht im Einklang mit Befunden, welche eine Beziehung zwischen dem FAF und der verdeckten Verlagerung der räumlichen Aufmerksamkeit demonstrierten („covert attention shift“, Corbetta et al., 1998). Die verdeckte Verlagerung der räumlichen Aufmerksamkeit bildet möglicherweise die Grundlage für das räumliche „rehearsal“ im visuellen AG (Awh, Jonides und Reuter-Lorenz, 1998).

Die räumliche Aufgabe in der vorliegenden Studie unterschied sich von denen der meisten bisher verwendeten Experimente, in denen oft das Behalten der Position eines Stimuli verlangt wurde und nicht die Orientierung. Allerdings konnte per Verhaltensdaten dokumentiert werden, dass die Aufgabe der Winkeltransformation mit einer klassischen räumlichen Aufgabe (Positionsveränderung) interferierte. Dies unterstreicht den räumlichen Charakter der verwendeten Aufgabe.

Die Beteiligung des dorsalen praemotorischen Kortex (dPMK) bei der räumlichen Aufgabe legt einen möglichen neuronalen Codierungsmechanismus nahe: die räumliche Orientierung könnte durch Aktivierungen von Neuronen im FAF repräsentiert werden, welche verdeckte Augenbewegungen zu den Positionen der Halbkreisenden codieren. Die Position der Halbkreisenden variiert in Abhängigkeit von dem Grad der Rotation der Halbkreise.

Alternativ könnte das Halten der Winkelorientierung durch Zellen im dPMK codiert worden sein, welche sensitiv für die Richtung von Objekten sind. Es konnte gezeigt werden, dass solche Zellen Informationen über Orientierung von Stimuli über das Delay einer motorischen Aufgabe hin hielten (Cisek und Kalaska, 2005).

Zusätzlich fand sich im Gyrus medialis in der Delayphase und im Abruf eine stärkere Aktivierung zugunsten des Prädiktors Farbe. Mit dieser Region wird die Bereitschaft verbunden, eine motorische Antwort auf im AG gehaltene Informationen zu vollbringen (SMA, prae-SMA, Petit et al., 1998).

### **9.2.2. Dissoziation in posterioren Arealen:**

Während des Enkodierens und des Abrufes fand sich eine materialspezifische Dissoziation in okzipitalen Arealen. Mit dem Enkodieren und dem Abruf von Farbinformation waren Regionen entlang des Gyrus lingualis verbunden. Dieses Resultat steht im Einklang mit Ergebnissen anderer Studien, welche diese Region als Teil des ventralen Pfades während dem passiven Wahrnehmen von Farbstimuli oder während Farbdiskriminationsaufgaben identifizierten (Corbetta et al., 1991; Gulyas und Roland, 1994; McKeefry und Zeki, 1997; Morita et al., 2004).

Das Halten der räumlichen Information war über alle drei Gedächtnisphasen mit Aktivierungen in parietalen Arealen verbunden. Der Parietallappen ist in die Verarbeitung

räumlicher Stimuli (dorsale Bahn), das räumliche Arbeitsgedächtnis und in das mentale Generieren von räumlichen Vorstellungsbildern involviert (siehe auch Cohen et al., 1996; Wager und Smith, 2003).

Areale um den Sulcus centralis waren während des Abrufs linkshemisphärisch in größerem Umfang mit der Farbbedingung und rechtshemisphärisch stärker mit der räumlichen Bedingung assoziiert. Dieser Befund ist nicht einfach zu interpretieren und könnte mit der motorischen Antwortvorbereitung der Probanden in Zusammenhang stehen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Farbbedingung in der Enkodierungs- und der Delayphase stärker mit Arealen der linken Hemisphäre in Verbindung standen, während die räumliche Bedingung mit bilateral verteilten Arealen assoziiert war. Der Befund einer hemisphärischen Spezialisierung zwischen Objekt- und Rauminformation wurde schon mit anderem Stimulusmaterial erbracht (Form vs. Position, Baker et al., 1996; siehe auch Überblicksarbeit Fletcher und Henson, 2001).

In Experiment 1 gelang es, während der Perzeption von Farb- und Winkelinformation die ventrale und dorsale Bahn getrennt zu aktivieren. Darüber hinaus blieb diese Dissoziation in praefrontalen Arealen erhalten, wenn kein perzeptueller Input erfolgte (Halten der Information im visuellen AG). Die Ergebnisse bestätigen die vertretene Hypothese einer dorso-ventralen „Was vs. Wo“-Dissoziation des FK (Goldman-Rakic, 1987), wobei es sich vor allem um eine Dissoziation zwischen Regionen des Sulcus frontalis inferior und dem superioren praemotorischen Kortex/FAF handelt. Die vorliegenden Resultate verdeutlichen, dass es möglich ist, eine Raum-Objekt Dissoziation des FK zu finden, wenn ventrale Stimuli („Was“) mit einem möglichst geringen Anteil an räumlicher Information erzeugt werden (siehe auch Sala, Rämä und Courtney, 2003) und der Einfluss der subkortikalen P- und M-Kanäle kontrolliert wird. Die bisherige widersprüchliche

Befundlage bildgebender Studien zu der funktionalen Spezialisierung des FK ist möglicherweise auch durch eine unzureichenden Kontrolle der verwendeten Materialien verursacht worden.

### **9.3. Manipulieren: „Was vs. Wo“**

Im Folgenden werden die Resultate des Kontrastes zwischen den Prädiktoren „Was vs. Wo“ in der Manipulationsaufgabe erläutert und diskutiert (Experiment 2). Es wurde die Annahme vertreten, dass auch während der Manipulation von Farb- und Winkelinformation eine dorso-ventrale Raum-Objekt Dissoziation des FK vorliegt (Hypothese 2).

In Experiment 2 konnten ähnliche überlappende Netzwerke für die experimentellen Bedingungen wie in Experiment 1 beobachtet werden. Dieses Resultat verdeutlicht, dass der größte Teil des kortikalen Netzwerkes des visuellen AG nicht materialspezifisch organisiert ist und dass bestehende materialspezifische Unterschiede gradueller Natur sind.

#### **9.3.1. Dissoziationen im FK**

Die Kontrastierung der beiden Prädiktoren „Was“ vs. „Wo“ erbrachte ähnliche Resultate wie die Analyse in Experiment 1. In allen drei Phasen trat eine materialspezifische Dissoziation im linken FK auf. Areale um den SFI waren stärker für das Manipulieren von Farbinformation aktiv, wobei Regionen um den SPC superior (LH/RH), in der Nähe des FAF stärker mit dem Manipulieren von Winkelinformation verbunden waren. Die Ergebnisse blieben im Delay auch auf Basis eines „random effect“ ALM bestehen. Das mit dem Prädiktor Farbe verbundene Cluster im SFI war auf einer ähnlichen Position wie in Experiment 1 lokalisiert. Diese Region liegt an einer anderen Position als das verbale Arbeitsgedächtnis, womit ein verbales Rekodieren der Farbinformation durch die Probanden unwahrscheinlich ist. Die Infrarot-Okulographie demonstrierte keine Differenz

in der Anzahl Sakkaden zwischen der Farb- und der Winkelbedingung, somit sind die Aktivierungsunterschiede in der Nähe des FAF höchstwahrscheinlich nicht durch Abweichungen in den Augenbewegungen verursacht worden.

### **9.3.2. Posteriore Regionen**

Darüber hinaus konnte wie auch in Experiment 1 eine Dissoziation in okzipitalen Regionen während des Enkodierens und des Abrufs beobachtet werden. Gebiete im Gyrus lingualis und im Gyrus fusiformis waren stärker mit der Farbbedingung assoziiert. Somit gelang es auch in Experiment 2 die ventralen und dorsalen Bahnen während der Perzeption visueller Stimuli gesondert zu aktivieren (Corbetta et al., 1991; Gulyas und Roland, 1994; McKeefry und Zeki, 1997; Morita et al., 2004).

Die Manipulation räumlichen Materials führte in allen drei Gedächtnisphasen zu Aktivierungen in parietalen Arealen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit einer größeren Anzahl von Studien, welche aktive Cluster im superioren Parietallappen während des Halten und der mentalen Vorstellung von räumlichen Stimuli dokumentierten (Cohen et al., 1996; Wager und Smith, 2003).

Zusätzlich konnte demonstriert werden, dass Areale um den Gyrus praecentralis während des Abrufs in größeren Umfang mit der Farbbedingung assoziiert waren, was als eine stärkere motorische Antwortvorbereitung interpretiert werden kann.

### **9.3.3. Hemisphären**

Analog zu Experiment 1 waren Cluster, welche mit der Farbbedingung assoziiert waren, häufiger linkshemisphärisch verbreitet, während Cluster der räumlichen Bedingung bilateral auftraten. Einige Autoren vermuten, dass eine links-rechts Dissoziation nach Materialarten abhängig von der Bearbeitungsstrategie der Probanden sei und vor allem beim Halten und Speichern von Material auftreten würde (Manoach et al., 2004). In der

vorliegenden Studie traten die Hemisphärenunterschiede zwischen den Materialarten für das Halten sowie für das Manipulieren auf und scheinen damit unabhängig vom Prozess oder der Bearbeitungsstrategie zu existieren.

Experiment 2 erweitert bisherige Befunde über die neurophysiologischen Korrelate des visuellen Arbeitsgedächtnisses. Es ist gelungen, eine dorso-ventrale Dissoziation des FK für die Prädiktoren „Was“ und „Wo“ zu dokumentieren, welche über die Perzeption und das Halten der Stimuli hinaus reicht und das Manipulieren von Material umfasst. Allerdings ist es nicht möglich, den Zeitpunkt der Manipulation während der Aufgabenbearbeitung zu bestimmen. Die Manipulation des Materials könnte schon kurz nach dem Enkodieren, während des Delays oder erst beim Abruf einsetzen. Aus diesem Grund war es notwendig, den Kontrast „Was vs. Wo“ über alle drei Aufgabenphasen zu berechnen. Die ermittelten Ergebnisse einer Objekt-Raum Dissoziation in der funktionalen Organisation des FK stehen im Einklang mit den Ergebnissen der Verhaltensdaten aus Studie 1, welche getrennte materialspezifische Ressourcen für das Manipulieren demonstrierten. Die wenigen bisher durchgeführten Studien zu materialspezifisch getrennten Manipulationsressourcen lassen wegen Einschränkungen der verwendeten Paradigmen keine eindeutigen Aussagen zu (siehe auch Methodendiskussion der „n-back-Aufgabe“ bei Meegan et al., 2004).

Mit dieser Studie konnte per fMRT am Menschen dokumentiert werden, dass Prozesse des Manipulierens wie des Haltens materialspezifisch organisierte neurophysiologischen Grundlagen besitzen.

#### **9.4. „Halten vs. Manipulieren“**

Im kommenden Abschnitt werden die Ergebnisse des Kontrastes „Halten vs. Manipulieren“ diskutiert (Experiment 1 vs. 2).

Nach der prozessspezifischen Theorie sollte eine ventro-dorsale Dissoziation des FK auf der Basis der Prozesse des Haltens und Manipulierens existieren..

Die Kontraste „Halten vs. Manipulieren“ wurden für Farbe und Winkel in einem ersten Schritt auf der Basis vom *RC-Maps* getrennt berechnet („fixed-effect“). Um Aussagen auf die Grundgesamtheit übertragen zu können schloss sich eine Kontrastierung „Halten vs. Manipulieren“ für beide Materialarten auf Basis eines „random-effect“ ALM an.

Während in der Farbbedingung keine stärkere Aktivierung des superioren SPC beim Manipulieren zu beobachten war, fanden sich im Enkodieren und im Delay der Winkelbedingung stärkere Aktivierungen zugunsten des Manipulierens in dieser Region („fixed-effect“). Das Manipulieren der Farben war allerdings im größeren Umfang mit Arealen im SFI verbunden (Enkodieren und Delay). Diese Befundlage bestätigt zumindest für die Winkelbedingung die prozessspezifische Annahme.

Eine alternative Erklärung der Resultate kann post-hoc aus den Daten erschlossen werden. Der direkte Vergleich „Halten vs. Manipulieren“ demonstrierte, dass beim Manipulieren die materialspezifischen Areale stärker aktiviert werden, der SFI bei Farbe, der superiore SPC bei räumlichem Material. Manipulationsprozesse scheinen auf materialspezifischen Arealen zu basieren. Das Manipulieren aktiviert dabei die materialspezifischen Regionen in größeren Umfang als das bloße Halten der Information. Es fanden sich keine Areale im FK, welche generell stärker für das „Halten“ oder „Manipulieren“ über beide Materialarten hinweg aktiv waren („random effect“ ALM). Diese Interpretation kann als eine erweiterte, domänenspezifische Annahme betrachtet werden und steht in den meisten Phasen mit den gefundenen Resultaten im Einklang. Allerdings bleibt zu beachten, dass der Kontrast „Halten vs. Manipulieren“ über zwei zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführten Studien berechnet wird, wodurch das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis vermutlich schlechter ist als für den Kontrast „Was vs. Wo“. Dadurch könnten mögliche prozessspezifische Aktivierungen überlagert werden.

### 9.5. „Single vs. Dual“

Die zentrale Exekutive wird nicht mehr als einheitliches System angesehen sondern es werden verschiedene Subprozesse postuliert (z.B. Inhibition, Koordination von Dual-Aufgaben, Manipulation etc., Baddeley, 1996). Aus diesem Grund wurde eine mögliche prozessspezifische Organisation des FK anhand einer weiteren Bedingung untersucht. Nach Baddeley (1996) werden beim synchronen Bearbeiten zweier Aufgaben ZE-Ressourcen benötigt. Es wurden Kontraste zwischen den Dualbedingungen und den Einzelbedingungen von Experiment 1 und 2 kalkuliert. Die prozessspezifische Theorie sagt voraus, dass ZE-Prozesse den dorsalen FK beanspruchen (Petrides, 1995). D'Esposito et al. (1998) gelang es, eine bilaterale Aktivierung des DLFK zugunsten einer Dual-Aufgabe im Kontrast zu Einzelaufgaben zu demonstrieren. Spätere Untersuchungen konnten diesen Befund nicht immer replizieren (Bunge et al., 2000; Klingberg, 1998). Eine mögliche Erklärung für die widersprüchliche Befundlage wurde von Fletcher und Henson (2001) aufgestellt. Die Einzelaufgaben unterschiedlicher Studien beinhalteten vermutlich schon in gewissem Umfang ZE-Prozesse und somit konnte im Kontrast „Einzel vs. Dual“ keine ZE-spezifische Aktivität entdeckt werden.

Die vorliegenden Experimente ermöglichen Kontraste zwischen Einzel- und Dualbedingungen in denen das Ausmaß, mit dem die Einzelaufgaben auf ZE-Ressourcen basieren, variiert werden kann. Das Halten des Materials benötigt nur im geringen Umfang ZE-Ressourcen und das Manipulieren dieser Information beansprucht in signifikantem Ausmaß Unterstützung der ZE (siehe Studie 1). Nach den Vorhersagen der prozessspezifischen Theorie sollte zumindest im Kontrast „Einzel vs. Dual“ der Halteaufgaben eine stärkere Aktivierung des DLFK in der Dualbedingung zu dokumentieren sein.

Jedoch wurden weder in der Halte- noch in der Manipulationsaufgabe eine stärkere Aktivierung des DLFK oder des superioren PCS (oder einer anderen Region des FK) zugunsten der Dualbedingung entdeckt. Diese Resultate stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen von D'Esposito et al. (1998) und den Annahmen der prozessspezifischen Theorie. Die vorliegenden Resultate bestätigen dagegen die domänenspezifische Vorhersage. Sie bestätigen Befunde von Bunge (2000) und Klingberg (1998), welche keine erhöhte Aktivität des DLFK während der Bearbeitung von Dual-Aufgaben fanden. Die Resultate stehen auch im Einklang mit dem Ergebnis von Munk et al. (2002), dass die Aktivität in einer Dualbedingung vor allem aus der Rekrutierung von Teilen des Netzwerkes der Einzelbedingungen besteht und nicht aus der bloßen Addition der Einzelkomponenten.

#### **9.6. Zusammenfassung und Ausblick**

Die vertretenen Hypothesen, die auf den Vorhersagen der domänenspezifischen Theorie basieren (Goldman-Rakic, 1987) konnten bestätigt werden. Zusammenfassend ergibt sich, dass der FK sowohl für Prozesse des Haltens als auch des Manipulierens nach Materialart organisiert ist (siehe auch Mohr, Goebel und Linden, 2006). Die Trennung der visuellen Verarbeitung, welche in der Retina beginnt (subkortikal: P- und M-Kanäle, kortikal: Ventral-dorsal), existiert nicht nur für die perzeptuelle Analyse, sondern bleibt auch für höhere kognitive Prozesse wie das Halten und Manipulieren von Information im visuellen AG erhalten. Areale in der Nähe des SFI (LH) werden im verstärkten Umfang beim Halten und Manipulieren von Farbinformation rekrutiert, Regionen in der Umgebung des FAF / praemotorischem Kortex (LH/RH) sind in größerem Umfang mit dem Halten und Manipulieren von räumlicher Information verbunden. Zentral-exekutiv basierte Prozesse (Manipulation, Dual-Aufgaben) führen nicht zu einer zusätzlichen Aktivierung von Arealen des dorsalen FK. ZE-Prozesse scheinen dagegen auf einer zusätzlichen Bereitstellung von materialspezifischen Ressourcen und Arealen zu basieren.

Offen bleibt die Frage welche Funktion der FK bei AG-Aufgaben übernimmt. Einerseits ist es möglich, dass im FK die verschiedene Materialarten („Was“ und „Wo“) gehalten und manipuliert werden. Andererseits ist es auch denkbar, dass materialspezifisch organisierte frontale Areale über Ressourcenzuteilung eine zentrale Rolle für den Erhalt interner Repräsentationen sensorischer Stimuli spielen, welche in posterioren Arealen gespeichert werden (über „rehearsal“ und Aufmerksamkeitslenkung, Curtis und D’Esposito, 2003).

Für letztere Interpretation sprechen Befunde von fMRT-Studien. Postle, Druzgal und D’Esposito (2003) dokumentierten, dass Aktivierungen im FK verschwanden, wenn in das Delay einer AG-Aufgabe Disktraktoren eingefügt wurden. Die einzige Region, in der Aktivierung im Delay erhalten blieb, war der Gyrus fusiformis. Todd und Marois (2004) entdeckten, dass die Aktivität einer Region im posterioren Parietallappen starke Korrelationen mit der Gedächtnisbelastung der Aufgabe aufwies und interpretierten, dass der posteriore Parietallappen eine Schlüsselregion für das Halten einer visuellen Repräsentation sei. Auch fanden Ranganath, DeGutis und D’Esposito (2004), dass kategorienspezifische visuelle Areale („fusiform face area“ und „parahippocampal place area“) im inferioren Temporallappen während des Haltens von Gesichtern oder Häusern aktiv waren. In die gleiche Richtung weisen Befunde von Slotnick, Thompson und Kosslyn (2005). Die Autoren demonstrierten, dass frühe visuelle Areale retinotop alleine durch das mentale Vorstellen eines durch Helligkeitskontraste bestimmten Bildes aktiviert wurden.

In der vorliegenden Studie konnte eine materialspezifische Aktivierung für Farbinformation außerhalb des FK nur während des Enkodieren/Abrufs beobachtet werden (Gyrus lingualis). Die vorliegenden Daten unterstützen eher die Annahme, dass während des Delays die zu behaltene Information in materialspezifisch organisierte Regionen des FK transferiert wird.

Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass visuelle Areale eine wichtige Rolle bei dem Halten und Generieren von Farbvorstellungen spielen. Um diese Frage genauer zu beantworten wäre es allerdings notwendig, ein Design zu entwickeln, mit dem visuelle Areale spezifischer erfasst werden können. So müsste in einem ersten Schritt eine retinotop und farbspezifische Kartierung visueller Areale durchgeführt werden (Methode zur Kartierung der Farbverarbeitung in den visuellen Arealen bei Hadjikhani et al., 1998) um in einem weiteren Schritt das mentale Vorstellen von Farben mit dem von Luminanzunterschieden in den gefundenen Arealen direkt zu kontrastieren. Eine weitere Untersuchungsmethode könnte darin bestehen, mittels Transkranieller Magnetstimulation (TMS) materialspezifische Areale des FK und posteriore visuelle Gebiete zu inhibieren, um deren funktionelle Relevanz für das Halten der Farbinformation zu untersuchen.

Eine zusätzlich offene Frage der vorliegenden Studie betrifft die synchrone Bearbeitung der Einzelaufgaben in der Dualbedienung. In dieser Bedingung wurde im Vergleich zu den Einzelbedingungen keine zusätzliche Region des FK aktiv. Somit bleibt die Frage offen, wie das Gehirn das synchrone Bearbeiten zweier Aufgaben koordiniert, welche in weit zerstreuten Arealen verarbeitet werden. Ergebnisse von Tierstudien legen nahe, dass die Koordination eines räumlich zerstreuten Mosaiks von funktionell spezialisierten Gehirnarealen vermutlich über synchrone, elektrophysiologische Aktivität der beteiligten Neuronen im Gamma-Frequenzbereich erfolgt (Singer und Gray, 1995). Empirische Evidenz für diese Annahme konnte beim Menschen für verschiedene kognitive Prozesse gefunden werden (Rodriguez et al., 1999; Tallon-Baudry und Bertrand, 1999; Tallon-Baudry, Kreiter und Bertrand, 1999). Es wäre möglich, dass zentral-exekutive Prozesse wie die Koordination zweier Einzelaufgaben auf synchroner, oszillatorischer Aktivität räumlich zerstreuter, materialspezifischer Areale basiert. Um diese weitergehende

## Studie 2: Diskussion

Fragestellung zu testen, wäre es notwendig, das vorliegende Dual-Paradigma z.B. als EEG-Studie durchzuführen.

## 10. Zusammenführende Diskussion

Die Gesamtstudie beschäftigte sich mit der Struktur des visuellen AG. Resultate aus Verhaltensstudien und neurophysiologischen Untersuchungen zeigen, dass das visuelle AG auf Basis der Materialart („Was vs. Wo“) und dem operierenden kognitiven Prozess („Halten vs. Manipulieren“) aufgeteilt werden kann. Die Ressourcenverteilung zwischen den beiden Faktoren Material und Prozess war allerdings bisher für die psychologische wie die neurophysiologische Ebene ungeklärt.

In der ersten Studie der vorliegenden Arbeit konnte mittels Verhaltensdaten demonstriert werden, dass das Manipulieren von Objekt- und Rauminformation auf getrennten Ressourcen des visuellen AG basiert. Dieser Befund erweitert bisherige Ergebnisse über materialspezifisch getrennte Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses. Zusätzlich wurde dokumentiert, dass die Prozesse des Haltens und Manipulierens sich im Ausmaß an benötigten ZE-Ressourcen unterscheiden. Das Halten benötigt nur in geringem Umfang Unterstützung durch die zentrale Exekutive, das Manipulieren basiert dagegen in bedeutsamem Ausmaß auf der zentralen Exekutive. Der Unterschied zwischen den beiden Prozessen ist vermutlich kontinuierlich, d.h. Prozesse im visuellen AG können in geringerem oder größerem Umfang die zentrale Exekutive involvieren (siehe auch Vecchi und Cornoldi, 1999).

Die per Verhaltensdaten demonstrierte materialspezifische Ressourcenverteilung spiegelt sich in der Organisation des FK wieder (Goldman-Rakic, 1987). Der FK wies getrennte Areale für das Halten und Manipulieren von „Was“ (SFI) und „Wo“ (FAF, praemotorischer Kortex) auf. Dagegen fanden sich keine dorso-ventrale Dissoziation des FK für die Prozesse des Haltens und Manipulierens. Das Manipulieren von Material führte nur zu einer zusätzlichen Aktivierung von materialspezifischen Arealen. Dieser Befund könnte

sich mit der Annahme decken, dass der Unterschied zwischen den Prozessen des Haltens und Manipulierens nicht diskret, sondern kontinuierlich ist.

Die Ergebnisse der Verhaltensdaten und des fMRT stehen im Einklang mit den Vorhersagen der „cortical field theory“, welche annimmt, dass Interferenz in der Bearbeitung zweier Aufgaben entsteht, wenn diese dieselben kortikalen Felder beanspruchen (Roland und Zilles, 1998).

In der vorliegenden Untersuchung konnte eine Entsprechung in der Organisation der psychologischen und in der neurophysiologischen Ebene gefunden werden. Damit stellt sich die Frage über die Beziehung von Verhaltensdaten, Kognition und Neurophysiologie.

Lassen sich Ergebnisse der einen Beobachtungsebene auf die andere übertragen?

Nach der Ansicht einiger Autoren sind Schlussfolgerungen zwischen den genannten Ebenen nur sehr eingeschränkt möglich (Searle, 1992):

Even if my belief that Denver is the capital of Colorado is identical with a certain brain state, it seems too much to expect that everyone who believes that Denver is the capital of Colorado must have an identical neurophysiological configuration in his or her own brain (S.123).

Dieser Standpunkt ist eng verwandt mit dem Modell von Marr (1982). Marr nahm an, dass ein kognitiver Prozess als Algorithmus beschrieben werden kann, für dessen physikalische Implementierung verschiedene Möglichkeiten existieren, welche von der Struktur des Algorithmus unabhängig sind. Demnach könnten neurophysiologische Daten kaum benutzt werden, um den Aufbau kognitiver Prozesse zu untersuchen.

Auf der anderen Seite gibt es aber durchaus Beispiele dafür, dass neurobiologische Befunde wichtige Hinweise für die Generierung kognitiver Modellen geben. Zum Beispiel gelang es Downing et al. (2001) zu dokumentieren, dass bei der Perzeption von Objekten ein Areal im ventralen Pfad aktiviert wird, welches sensitiv für den menschlichen Körper ist („extra striate body area“, EBA) und welches nicht bei anderen Objektklassen (Werkzeuge etc.) rekrutiert wird. Dieser Befund legt nahe, dass die Verarbeitung von

Objektinformation in getrennten Modulen erfolgt und nicht auf einem einheitlichen Mechanismus beruht. Dieser Befund steht im Einklang mit Ergebnissen von Verhaltensdaten neurologischer Patienten, welche selektive Beeinträchtigungen des semantischen Wissens über den menschlichen Körper aufwiesen bei gleichzeitigen Erhalt des Wissens über andere Objektkategorien (Shelton, Fouch und Caramazza, 1998). Ergebnisse aus bildgebenden Studien können somit durchaus genutzt werden, um Hypothesen über die Struktur kognitiver Prozesse zu formulieren.

Auch in der vorliegenden Arbeit war es möglich, auf Basis von Verhaltensdaten Annahmen auszuarbeiten, welche sehr hilfreich bei der Interpretation der kortikalen Aktivierungen waren. Eine zu strikte Trennung der Ebenen scheint demnach nicht nützlich zu sein. Einige Autoren gehen sogar so weit, keine deutliche Trennung der Beobachtungsebenen vorzunehmen, sondern Verhaltensdaten und neurophysiologische Daten als gleichberechtigte Anzeigen von kognitiven Prozessen zu betrachten (siehe auch Überblicksartikel von Wilkinson und Halligan, 2004).

Es sollte allerdings bedacht werden, dass kognitive Begriffe wie beispielsweise Gedächtnis, Konstrukte darstellen, die immer nur in Bezug zu Verhalten definiert werden können. Das Konstrukt des Gedächtnisses wird z.B. als Erklärung für die Beobachtung von Lernaufwand oder Reproduktionsleistung benutzt. Es ist nicht sinnvoll, Gedächtnis über biologische Variablen zu definieren.

Somit sind die Verhaltensdaten in der Untersuchung kognitiver Prozesse den neurophysiologischen Daten übergeordnet. Experimente, welche Kognition und Neurophysiologie gemeinsam untersuchen, sollten deshalb zuerst per Verhaltensdaten die Struktur des kognitiven Prozesses definieren und erfassen, um dann in einem zweiten Schritt deren neurophysiologische Implementierung prüfen. Die Ergebnisse der Neurophysiologie können dann wiederum die Hypothesenbildung über Aufbau und Struktur der Kognition beeinflussen.

## **Zusammenfassung**

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die kognitiven und neurophysiologischen Grundlagen des visuellen Arbeitsgedächtnisses (AG) zu untersuchen.

Es wurden zwei Studien durchgeführt. In der ersten wurden per Verhaltensdaten die Ressourcen von Manipulationsprozessen im visuellen AG nach Materialart erfasst. Dazu wurden insgesamt sechs Experimente konstruiert. In der zweiten Studie wurden mit zwei Experimenten die neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG per funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) dargestellt.

Im Folgenden wird kurz das Modell des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley (1992) erläutert, gefolgt von einer Beschreibung der visuellen Pfade, welche für die Struktur des visuellen AG grundlegend sind. Danach werden die kortikalen Korrelate des visuellen AG skizziert. Anschließend werden aus den dargestellten Befunden die Methoden für die beiden Studien dargestellt und deren Ergebnisse diskutiert.

Baddeley (1992) definiert das Arbeitsgedächtnis als ein System für das kurzfristige Halten und Manipulieren von Information, welche für weitere komplexe kognitive Prozesse wie Verstehen, Lernen und Schlussfolgern benötigt wird (Baddeley, 1992).

Baddeley und Hitch (1974) entwickelten ein Modell des Arbeitsgedächtnisses, das aus drei getrennten Subsystemen besteht:

Einer zentralen Exekutive (ZE), welche als übergeordnetes Aufmerksamkeits-Kontrollsystem arbeitet und die in das aktive Manipulieren von Material involviert ist, wie z.B. die mentale Rotation von Objekten. Dazu wurden zwei Sklavensysteme postuliert, die phonologische Schleife und der visuell-räumlichen Notizblock (im folgenden visuelles AG genannt). Die phonologische Schleife hält phonologisch basierte Information und der visuell-räumliche Notizblock visuelles Material.

Resultate aus psychologischen Experimenten und bildgebenden Studien dokumentieren, dass sowohl die kognitiven wie die neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG

auf Basis der Materialart („Was vs. Wo“) und den operierenden kognitiven Prozessen („Halten vs. Manipulieren“) organisiert sind. Das Verhältnis zwischen den beiden Faktoren Material und Prozess ist bisher sowohl für die kognitive als auch für die neurophysiologische Ebene trotz einer Vielzahl an Untersuchungen umstritten.

Im folgenden Abschnitt werden knapp die für die Struktur des visuellen AG wichtigen parallelen perzeptuellen Bahnen beschrieben. Eine funktionelle Trennung der visuellen Wahrnehmung erfolgt bereits in der Retina. Magnozelluläre Ganglienzellen sprechen vor allem auf Luminanzunterschiede an, parvozelluläre auf Wellenlängenunterschiede (Livingstone und Hubel, 1987).

Kortikal wird die visuelle Information weiter in parallelen Bahnen verarbeitet. Eine ventrale Bahn analysiert vor allem Form und Farbe („Was“), eine dorsale die räumliche Position von Objekten und Bewegungen („Wo“, Ungerleider und Mishkin, 1982). Es konnte demonstriert werden, dass die Aufteilung der visuellen Wahrnehmung in eine ventrale und dorsale Bahn auch für höhere kognitive Prozesse wie das Halten von Information im visuellen AG erhalten ist (Della Sala et al., 1999). Die Autoren fanden bei neuropsychologischen Patienten Doppel-Dissoziationen in der Bearbeitungsleistung von Arbeitsgedächtnistests, welche sensitiv für das Halten von ventraler und dorsaler perzeptuelle Information sein sollten. Zusätzlich validierten die Autoren die Tests mit Interferenzaufgaben an Gesunden. Die Leistungen beider Tests wurden jeweils durch verschiedene Arten von Interferenz (räumliche vs. visuelle) beeinträchtigt. Somit konnte demonstriert werden, dass das Halten im visuellen AG nach Materialart getrennte Ressourcen aufweist. Ungeklärt ist, ob diese Trennung auch für aktive Prozesse wie das Manipulieren bestehen bleibt.

Auch in den kognitiven Neurowissenschaften ist die Organisation der neurophysiologischen Grundlagen des Arbeitsgedächtnisses umstritten. Es fanden sich in

einer Reihe von Studien deutliche Hinweise, dass der frontale Kortex (FK) eine zentrale Rolle für das visuelle AG einnimmt (Bauer und Fuster, 1976).

Eine Vielzahl an Studien erbrachte allerdings widersprüchliche Ergebnisse hinsichtlich der funktionalen Organisation des FK nach Material („Was vs. Wo“, domänenspezifische Theorie, Goldman-Rakic, 1987) und Prozessart („Halten vs. Manipulieren“, prozessspezifische Theorie, Petrides, 1994). Studien, die demonstrierten, dass der ventrolaterale FK für das Halten von Objekten und der dorsolaterale für das Halten von räumlichen Relationen spezialisiert ist (Courtney et al., 1998), konnten nicht immer bestätigt werden (D'Esposito et al., 1998).

Es konnte allerdings gezeigt werden, dass das verwendete Stimulusmaterial in den Experimenten großen Einfluss auf die Ergebnisse hatte und dass vor allem ein Defizit in der Konstruktion von ventralen Stimuli bestand, welche nur wenige räumliche Bestandteile beinhalteten (Sala, Rämä und Courtney, 2003). Somit ist diese unklare Befundlage unter anderem auf den Mangel an geeigneten Paradigmen zur Untersuchung vom Halten und Manipulieren ventraler Information zurückzuführen.

Mit Studie 1 sollte per Verhaltensdaten untersucht werden, ob Prozesse der Manipulation auf materialspezifisch getrennten, kognitiven Ressourcen basieren. Die Studie bestand aus sechs Experimenten. Die ersten drei bestanden aus einer Dual-Aufgabe, in der ventrale und dorsale Information einzeln oder synchron manipuliert werden mussten.

Die Manipulation ventraler Information wurde über das Mischen von Farben erfasst, die Manipulation dorsalen Materials über das mentale Rotieren von Halbkreisen. Zur Kontrolle von perzeptuellen und seriellen Lösungsstrategien wurden drei Varianten des Experimentes konstruiert, welche sich in der zeitlichen Darbietung der Stimuli unterschieden. In den Dual-Bedingungen der Experimente 1-3 trat keine Interferenz auf. Dieses Resultat unterstützt die Annahme getrennter, materialspezifischer kognitiver Ressourcen für das Manipulieren visuellen Materials.

Im vierten Experiment mussten die Probanden eine räumlich-räumliche Dual-Aufgabe bearbeiten. In der Dual-Bedingung von Experiment 4 entstand Interferenz, da beide Aufgaben das gleiche dorsale System im visuellen AG beanspruchen.

Zwei zusätzliche Experimente wurden zur Kontrolle der untersuchten Prozesse konstruiert (Experimente 5 und 6). Mit ihnen sollte überprüft werden, in welchem Umfang Prozesse des Manipulierens und des Haltens der visuellen Stimuli (Farbe und Rotation) auf Ressourcen der phonologischen Schleife und der zentralen Exekutive basieren. Es wurde dokumentiert, dass weder das Halten noch das Manipulieren des Materials die phonologische Schleife in Anspruch nimmt. Die Manipulation des visuellen Materials beruhte im Gegensatz zu deren Halten auf zentral-exekutive Ressourcen.

Die Resultate zeigen, dass die materialspezifische Aufteilung der visuellen Verarbeitung auch für höhere kognitive Prozesse des Manipulierens erhalten ist und dass sich das Manipulieren im Ausmaß der benötigten zentral-exekutiven Ressourcen vom Halten unterscheidet.

Studie 2 beschäftigte sich mit der funktionellen Organisation der neurophysiologischen Grundlagen des visuellen AG. Auf Basis des für Studie 1 entwickelten ventralen und dorsalen Halten- und Manipulationsparadigmas wurden zwei Experimente für das fMRT konstruiert.

Im ersten Experiment mussten die Probanden Farben und räumliche Orientierungen halten, im zweiten Experiment mussten sie beide Materialarten manipulieren. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Aufteilung des FK materialspezifisch erfolgt. Das Halten und Manipulieren der Farbinformation aktivierte Regionen um den Sulcus frontalis inferior, das Halten und Manipulieren des räumlichen Materials beanspruchte Regionen in der Nähe des Frontalen Augenfeldes (Kreuzung des Sulcus praecentralis / Sulcus frontalis superior). Der Kontrast zwischen Halten und Manipulieren erbrachte keine solche dorso-ventrale Dissoziation des FK.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Verhaltens- und fMRT-Daten beider Studien verdeutlichen die Organisation der kognitiven und neurophysiologischen Ressourcen des FK nach Materialart, aufbauend auf dem ventralen und dorsalen perzeptuellen Pfad. Das Ergebnis der vorliegenden Studie bestätigt frühere Untersuchungen zur Organisation des FK (Courtney et al., 1998) und erweitert die bisherigen Resultate dahingehend, dass der FK auch für Manipulationsprozesse materialspezifisch organisiert ist.

**Literatur**

- Adcock, R.A., Constable, R.T., Gore, J.C. & Goldman-Rakic, P.S. (2000). Functional neuro-anatomy of executive processes involved in dual-task performance. *Proc Natl Acad Sci USA*, 97, 3567-3572.
- Anderson, T.J., Jenkins, I.H., Brooks, D.J., Hawken, M.B., Frackowiak, R.S.J. & Kennard, C. (1994). Cortical control of saccades and fixation in man: a PET study. *Brain*, 117, 1073–1084.
- Atkinson, R.C. & Shiffrin, R.M. (1971). The control of short-term memory. *Sci Am*, 225, 82-90.
- Awh, E., Jonides, J. & Reuter-Lorenz, P.A. (1998). Rehearsal in spatial working memory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 24, 780-790.
- Baddeley, A. D. (1966). The capacity for generating information by randomization. *Q J Exp Psychol*, 18, 119-129.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon.
- Baddeley, A.D. (1990). *Human Memory*. London: Taylor & Francis Group.
- Baddeley, A.D. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556-559.
- Baddeley, A.D. (1996). Exploring the Central Executive. *Q J Exp Psychol*, 49, 5-28.
- Baddeley, A.D. (1998). Recent developments in working memory. *Curr Opin Neurobiol*, 8, 234-8.
- Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychol Rev*, 105, 158–173.
- Baddeley, A.D. & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G.A. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation*, Vol. 8. New York: Academic Press.
- Baker, S.C., Frith, C.D., Frackowiak, R.S. & Dolan, R.J. (1996). Active representation of shape and spatial location in man. *Cereb Cortex*, 6, 612-619.
- Bauer, R.H. & Fuster, J.M. (1976). Delayed-matching and delayed-response deficit from cooling dorsolateral prefrontal cortex in monkeys. *J Comp Physiol Psychol*, 90, 293–302.
- Belger, A., Puce, A., Krystal, J.H., Gore, J.C., Goldman-Rakic, P.S. & McCarthy, G. (1998). Dissociation of mnemonic and perceptual processes during spatial and nonspatial working memory using fMRI. *Hum Brain Mapp*, 6, 14–32.
- Bortz, J. (1993). *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer.
- Bortz, J. & Döring, N. (1995). *Forschungsmethoden und Evaluation für Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer.
- Bruce, C.J. & Goldberg, M.E. (1985). Primate frontal eye fields. I. Single neurons discharging

- before saccades. *J Neurophysiol*, 53, 603–635.
- Bruyer, R. & Scailquin, J.C. (1998). The visuospatial sketchpad for mental images: testing the multicomponent model of working memory. *Acta Psychol*, 98, 17-36.
- Buechel, C. & Friston, K.J. (1997). Modulation of connectivity in visual pathways by attention: orbital interactions evaluated with structural equation modelling and fMRI. *Cereb Cortex*, 7, 768-78.
- Bullmore, E., Brammer, M., Williams, S.C., Rabe-Hesketh, S., Janot, N., David, A., Mellers, J., Howard, R. & Sham, P. (1996). Statistical methods of estimation and inference for functional MR image analysis. *Magn Reson Med*, 35, 261-277.
- Bunge, S.A., Klingberg, T., Jacobsen, R.B. & Gabrieli, J.D. (2000). A resource model of the neural basis of executive working memory. *Proc Natl Acad Sci USA*, 97, 3573-3578.
- Carlesimo, G.A., Perri, R., Turriziani, P., Tomaiuolo, F. & Caltagirone, C. (2001). Remembering what but not where: independence of spatial and visual working memory in the human brain. *Cortex*, 37, 519-534.
- Cisek, P. & Kalaska, J.F. (2005). Neural correlates of reaching decisions in dorsal premotor cortex: specification of multiple direction choices and final selection of action. *Neuron*, 45, 801-814.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale: Erlbaum.
- Cohen, M.S. (1999) Echo-Planar imaging and functional MRI. In: Moonen, C.T.W. and Bandettini, P.A (Eds.), *Functional MRI* (pp 137-147). Berlin - Heidelberg - New York: Springer-Verlag.
- Cohen, M.S., Kosslyn, S.M., Breiter, H.C., DiGirolamo, G.J., Thompson, W.L., Anderson, A.K., Brookheimer, S.Y., Rosen, B.R. & Belliveau, J.W. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation. A mapping study using functional MRI. *Brain*, 119, 89-100.
- Collette, F. & Van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neurosci Biobehav Rev*, 26,105-125.
- Conrad, R. (1964). Acoustic confusion in immediate memory. *B J Psychol*, 55, 75–84.
- Cooper, L.A. & Shepard, R.N. (1973) Chronometric studies of the rotation of mental images. In W.G. Chase (Ed.), *Visual information processing*. New York: Academic Press.
- Corbetta, M., Akbudak, E., Conturo, T.E., Snyder, A.Z., Ollinger, J.M., Drury, H.A., Linenweber, M.R., Petersen, S.E., Raichle, M.E., Van Essen, D.C. & Shulman, G.L. (1998). A common network of functional areas for attention and eye movements. *Neuron*, 21, 761–773.

- 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. *J Neurosci*, *11*, 2383–2402.
- Cornoldi, C., Rigoni, F., Venneri, A. & Vecchi, T. (2000). Passive and active processes in visuo-spatial memory: double dissociation in developmental learning disabilities. *Brain Cogn*, *43*, 117-120.
- Courtney, S.M., Petit, L., Haxby, J.V. & Ungerleider, L.G. (1998). The role of prefrontal cortex in working memory: examining the contents of consciousness. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *353*, 1819-28.
- 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*, *27*, 1347-51.
- Courtney, S.M., Ungerleider, L.M., Keil, K. & Haxby, J.V. (1996). Object and spatial visual working memory activate separate neural systems in human cortex. *Cereb Cortex*, *6*, 39–49.
- Courtney, S.M., Ungerleider, L.G., Keil, K. & Haxby, J.V. (1997). Transient and sustained activity in a distributed neural system for human working memory. *Nature*, *386*, 608-611.
- Curtis, C.E. & D'Esposito, M. (2003). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends Cogn Sci*, *7*, 415-423.
- Della Sala, S., Gray, C., Baddeley, A.D., Allamano, N. & Wilson, L. (1999). Pattern span: a tool for unwelding visuo-spatial memory. *Neuropsychologia*, *37*, 1189-1199.
- D'Esposito, M., Aguirre, G.K., Zarahn, E., Ballard, D., Shin, R.K. & Lease, J. (1998). Functional MRI studies of spatial and nonspatial working memory. *Brain Res Cogn Brain Res*, *7*, 1-13.
- 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*, 279-281.
- D'Esposito, M., Postle, B.R., Ballard, D. & Lease, J. (1999). Maintenance versus manipulation of information held in working memory: an event-related fMRI study. *Brain Cogn*, *41*, 66-86 .
- Donaldson, W. (1993). Accuracy of  $d'$  and  $A'$  as estimates of sensitivity. *Bull Psychon Soc*, *31*, 271-274.
- Downing, P.E., Jiang, Y., Shuman, M. & Kanwisher, N. (2001). A cortical area selective for visual processing of the human body. *Science*, *293*. 2470 –2473.
- Draper, N.R. & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Druzgal, T.J. & D'Esposito, M. (2003). Dissecting contributions of prefrontal cortex and

- fusiform face area to face working memory. *J Cogn Neurosci*, 15, 771-784.
- Duff, S.C. (2000). What's working in working memory: a role for the Central Executive. *Scand J Psychol*, 41, 9-16.
- Duff, S.C. & Logie, R.H. (1999). Storage and processing in visuo-spatial working memory. *Scand J Psychol*, 40, 251-259.
- Elliott, R. & Dolan, R.J. (1998). The neural response in short-term visual recognition memory for perceptual conjunctions. *Neuroimage*, 7, 14-22.
- Farah, M.J., Hammond, K.M., Levine, D.N. & Calvanio, R. (1988). Visual and spatial mental imagery: dissociable systems of representation. *Cognit Psychol*, 20, 439-462.
- Fletcher, P.C. & Henson, R.N.A. (2001). Frontal lobes and human memory. Insights from functional neuroimaging. *Brain*, 124, 849-881.
- Formisano, E., Linden, D.E., Di Salle, F., Trojano, L., Esposito, F., Sack, A. T., Grossi, D., Zanella, F.E. & Goebel, R. (2002). Tracking the mind's image in the brain I: time-resolved fMRI during visuospatial mental imagery. *Neuron*, 35, 185-194.
- Fransson, P., Kruger, G., Merboldt, K.D. & Frahm, J. (1999). MRI of functional deactivation: temporal and spatial characteristics of oxygenation-sensitive responses in human visual cortex. *Neuroimage*, 9, 611-618.
- Friston, K.J., Holmes, A.P., Worsley, K.J., Poline, J.P., Frith, C.D. & Frackowiak, R.S.J. (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. *Hum Brain Mapp*, 2, 189-210.
- Funahashi, S., Bruce, C.J. & Goldman-Rakic, P.S. (1989). Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *J Neurophysiol*, 61, 331-349.
- Fuster, J.M. & Alexander, G.E. (1971). Neuron activity related to short-term memory. *Science*, 173, 652-654.
- Gathercole, S.E. & Baddeley, A. D. (1989). Evaluation of the role of phonological STM in the development of vocabulary in children: a longitudinal study. *J Mem Lang*, 28, 200-213.
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J.C. & Anderson, A.W. (2000). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nature Neurosci*, 3, 191-197.
- Glahn, D.C., Kim, J., Cohen, M.S., Poutanen, V.P., Therman, S., Bava, S., Van Erp, T.G., Manninen, M., Huttunen, M., Lonnqvist, J., Standertskjold-Nordenstam, C.G. & Cannon, T.D. (2002). Maintenance and manipulation in spatial working memory: dissociations in the prefrontal cortex. *Neuroimage*, 17, 201-213.

- Glanzer, M., & Cunitz, A.R. (1966). Two storage mechanisms in free recall. *J Verbal Learn Verbal Behav*, 5, 351–360.
- 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. *Eur J Neurosci*, 10, 1563-1573.
- Goldman-Rakic, P.S. (1987). Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational memory. In: Mountcastle V.B., Plum, F. (Eds.) *Handbook of Physiology*, Sect 1, Vol. 5, Pt.1 (pp 373-417). Bethesda MD: American Physiological Society.
- Goodale, M.A.(1998). Vision for perception and vision for action in the primate brain. In Bock, R. G., Goode, J. A. (Eds.) *Sensory guidance of movement*. Novartis Foundation Symposium Series, 218 (pp 21-34). Chichester: John Wiley & Sons.
- Green, D.M. & Swets, J.A. (1966). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. London: Wiley.
- Grier, J.B. (1971). Nonparametric indexes for sensitivity and bias: Computing formulas. *Psychol Bull*, 75, 424-429.
- Gulyas, B. & Roland, P.E. (1994). Processing and analysis of form, colour and binocular disparity in the human brain: functional anatomy by positron emission tomography. *Eur J Neurosci*, 6, 1811-1828.
- Hadjikhani, N., Liu, A.K., Dale, A.M., Cavanagh, P. & Tootell, R.B. (1998). Retinotopy and color sensitivity in human visual cortical area V8. *Nat Neurosci*, 1, 235-41.
- Haxby, J.V., Gobbini, M.I., Furey, M.L., Ishai, A., Schouten, J.L. & Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science*, 293, 2425-2439.
- Haxby, J.V., Petit, L., Ungerleider, L.G. & Courtney, S.M. (2000). Distinguishing the functional roles of multiple regions in distributed neural systems for visual working memory. *Neuroimage*, 11, 380-391.
- Hecker, R. & Mapperson, B. (1997). Dissociation of visual and spatial processing in working memory. *Neuropsychologia*, 35, 599-603.
- Honey, R.A., Turner, D.C., Honey, G.D., Sharar, S.R., Kumaran, D., Pomarol-Clotet, E., McKenna, P., Sahakian, B.J., Robbins, T.W. & Fletcher, P.C. (2003). Subdissociative dose ketamine produces a deficit in manipulation but not maintenance of the contents of working memory. *Neuropsychopharmacology*, 28, 2037-2044.
- Ishihara, M.D. (2001). *Ishihara's Tests for Colour Deficiency*. Tokyo: Kanehara & Co.

- 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*, 623–625.
- 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*, 417-426.
- Kessels, R.P., Postma, A. & de Haan, E. H. (1999). P and M channel-specific interference in The what and where pathway. *Neuroreport*, *10*, 3765-3767.
- Klingberg, T. (1998). Concurrent performance of two working memory tasks: potential mechanisms of interference. *Cereb Cortex*, *8*, 593-601.
- Klingberg, T., O’Sullivan, B.T. & Roland, P.E. (1997). Bilateral activation of fronto-parietal networks by incremental demand in a working memory task. *Cereb Cortex*, *7*, 465-471.
- Kosslyn, S.M. (1994). *Image and Brain*. Cambridge, MIT-Press.
- Koyama, M., Hasegawa, I., Osada, T., Adachi, Y., Nakahara, K. & Miyashita, Y. (2004). Functional magnetic resonance imaging of macaque monkeys performing visually guided saccade tasks: comparison of cortical eye fields with humans. *Neuron*, *41*, 795-807.
- Kwong, K.K., Belliveau, J.W., Chesler, D.A., Goldberg, I.E., Weisskoff, R.M., Poncelet, B.P., Kennedy, D.N., Hoppel, B.E., Cohen, M.S., Turner, R. & et al. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc Natl Acad Sci USA*, *89*, 5675-5679.
- Lachica, E.A., Beck, P.D. & Casagrande, V.A. (1992). Parallel pathways in macaque monkey striate cortex: anatomically defined columns in layer III. *Proc Natl Acad Sci USA*, *89*, 3566-3570.
- Lee, K.M. & Kang, S.Y. (2002). Arithmetic operation and working memory: differential suppression in dual tasks. *Cognition*, *83*, 63-68.
- Levy, B.A. (1977). Reading: Speech and meaning processes. *J Verbal Learn Verbal Behav*, *16*, 623-638.
- Linden, D.E.J., Bittner, R.A., Muckli, L., Waltz, J.A., Kriegeskorte, N., Goebel, R., Singer, W. & Munk, M.H. (2003). Cortical Capacity Constraints for Visual Working Memory: Dissociation of fMRI Load Effects in a Fronto-parietal Network. *Neuroimage*, *20*, 1518-30.
- Livingstone, M.S. & Hubel, D.H. (1987). Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *J Neurosci*, *7*, 3416-3468.
- Logie, R.H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates.

- Logie, R.H. & Marchetti, C. (1991). Visuo-spatial working memory: Visual, spatial or central executive? In Logie, R. H. & Denis, M. (Eds.) *Mental Images in Human Cognition*. (pp 105-115). Amsterdam: North Holland Press.
- Logie, R.H., Venneri, A., Della Sala, S., Redpath, T.W. & Marshall, I. (2003). Brain activation and the phonological loop: the impact of rehearsal. *Brain Cogn*, *53*, 293-296.
- Logothetis, N.K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T. & Oeltermann, A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature*, *412*, 150-157.
- Luzzatti, C., Vecchi, T., Agazzi, D., Cesa-Bianchi, M. & Vergani, C. (1998). A neurological dissociation between preserved visual and impaired spatial processing in mental imagery. *Cortex*, *34*, 461-469.
- Manoach, D.S., White, N.S., Lindgren, K.A., Heckers, S., Coleman, M.J., Dubal, S. & Holzman, P.S. (2004). Hemispheric specialization of the lateral prefrontal cortex for strategic processing during spatial and shape working memory. *Neuroimage*, *21*, 894-903.
- Mansfield, P. (1977). Multi-Planar Image Formation using NMR Spin Echoes. *J Phys C*, *10*, 55-58.
- Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco: Freeman.
- Maunsell, J.H. R. & Newsome, W.T. (1987). Visual processing in monkey extrastriate cortex. *Annu Rev Neurosci*, *10*, 363-401.
- McCarthy, G., Puce, A., Constable, R.T., Krystal, J.H., Gore, J.C. & Goldman-Rakic, P.S. (1996). Activation of human prefrontal cortex during spatial and nonspatial working memory tasks measured by functional MRI. *Cereb Cortex*, *6*, 600-611.
- McKeefry, D.J. & Zeki, S. (1997). The position and topography of the human colour centre as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Brain*, *120*, 2229-2242.
- Meegan, D.V., Purc-Stephenson, R., Honsberger, M.J. & Topan, M. (2004). Task analysis complements neuroimaging: an example from working memory research. *Neuroimage*, *21*, 1026-1036.
- Miyake, A., Friedman, N.P., Emerson, M.J., Witzki, A.H., Howerter, A. & Wager, T.D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognit Psychol*, *41*, 49-100.
- Mohr, H.M., Goebel, R. & Linden, D.E.J. (2006). Content-specific dissociation of prefrontal activity during maintenance and manipulation in visual working memory. *J Neurosci*, in press.
- Mohr, H.M. & Linden, D.E.J. (2005). Separation of the systems for color and spatial

- manipulation in working memory revealed by a dual task procedure. *J Cogn Neurosci*, 17, 355-66.
- Morita, T., Kochiyama, T., Okada, T., Yonekura, Y., Matsumura, M. & Sadato, N. (2004). The neural substrates of conscious color perception demonstrated using fMRI. *Neuroimage*, 21, 1665-1673.
- Morrison, N. & Jones, D.M. (1990). Memory updating in working memory: the role of the central executive. *Br J Psychol*, 6, 85-107.
- Morton, N. & Morris, R.G. (1995). Image transformation dissociated from visuo-spatial working memory. *Cogn Neuropsychol*, 12, 767-791.
- Munk, M.H., Linden, D.E.J., Muckli L., Lanfermann, H., Zanella, F.E., Singer, W. & Goebel, R. (2002). Distributed cortical systems in visual short-term memory revealed by event-related functional magnetic resonance imaging. *Cereb Cortex*, 12, 866-876.
- Norman, D.A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. In R.J. Davidson, G.E. Schwartz, & D.E. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory* (pp 1–18). New York: Plenum.
- Nystrom, L.E., Braver, T.S., Sabb, F.W., Delgado, M.R., Noll, D.C. & Cohen, J.D. (2000). Working memory for letters, shapes, and locations: fMRI evidence against stimulus-based regional organization in human prefrontal cortex. *Neuroimage*, 11, 424-446.
- Ogawa, S., Lee, T.M., Kay, A.R. & Tank, D.W. (1990). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 87, 9868-9872.
- Owen, A.M., Downes, J.J., Sahakian, B.J., Polkey, C.E. & Robbins, T.W. (1990). Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, 28, 1021-1034.
- Owen, A.M., Evans, A.C. & Petrides, M. (1996). Evidence for a two-stage model of spatial working memory processing within the lateral frontal cortex: a positron emission tomography study. *Cereb Cortex*, 6, 31–38.
- 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. *Eur J Neurosci*, 11, 567-574.
- Owen, A.M., Stern, C.E., Look, R.B., Tracey, I., Rosen, B.R. & Petrides, M. (1998). Functional organization of spatial and nonspatial working memory processing within the human lateral frontal cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*, 95, 7721-7726.
- Paulesu, E., Frith, C. D. & Frackowiak, R.S.J. (1993). The neural correlates of the verbal

- component of working memory. *Nature*, 362, 342–345.
- Paus, T. (1996). Location and function of the human frontal eye-field: a selective review. *Neuropsychologia*, 34, 475-483.
- Petit, L., Courtney, S.M., Ungerleider, L.G. & Haxby, J.V. (1998). Sustained activity in the medial wall during working memory delays. *J Neurosci*, 15, 9429-9437.
- Petrides, M. (1994). Frontal lobes and working memory: evidences from investigations of the effects of cortical excisions in nonhuman primates. In: Boller, F., Grafman, J. (Eds.). *Handbook of neuropsychology* (pp 59- 82). Amsterdam: Elsevier.
- Petrides, M. (1995). Impairments on nonspatial self-ordered and externally ordered working memory tasks after lesions of the mid-dorsal lateral part of the lateral frontal cortex of monkey, *J Neurosci*, 15, 359-375.
- Pickering, S.J. (2001). Cognitive approaches to the fractionation of visuo-spatial working memory. *Cortex*, 37, 457-473.
- Postle, B.R., Druzgal, T.J. & D'Esposito, M. (2003). Seeking the neural substrates of visual working memory storage. *Cortex*, 39, 927-946.
- Ranganath, C., DeGutis, J. & D'Esposito, M. (2004). Category-specific modulation of inferior temporal activity during working memory encoding and maintenance. *Brain Res Cogn Brain Res*, 20, 37-45.
- Rodriguez, E., George, N., Lachaux, J.P., Martinerie, J., Renault, B. & Varela, F.J. (1999). Perception's shadow: long-distance synchronization of human brain activity. *Nature*, 397, 430-433.
- Roland, P.E. & Zilles, K. (1998). Structural divisions and functional fields in the human cerebral cortex. *Brain Res Brain Res Rev*, 26, 87-105.
- Sack, A.T., Sperling, J.M., Prvulovic, D., Formisano, E., Goebel, R., Di Salle, F., Dierks, T. & Linden, D.E.J. (2002). Tracking the mind's image in the brain II: transcranial magnetic stimulation reveals parietal asymmetry in visuospatial imagery. *Neuron*, 35, 195-204.
- Sakata, H., Taira, M., Kusunoki, M., Murata, A. & Tanaka, Y. (1997). The TINS Lecture. The parietal association cortex in depth perception and visual control of hand action. *Trends Neurosci*, 20, 350-357.
- Sala, J.B., Rama, P. & Courtney, S.M. (2003). Functional topography of a distributed neural system for spatial and nonspatial information maintenance in working memory. *Neuropsychologia*, 41, 341-356.
- Searle, J. R. (1992). *The Rediscovery of the Mind*. Cambridge: MIT Press.
- Shelton, J., Fouch, E., & Caramazza, A. (1998). The selective sparing of body part knowledge: A

- case study. *Neurocase*, 4, 339-350.
- Singer, W. & Gray, C.M. (1995). Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annu Rev Neurosci*, 18, 555-586.
- Slotnick, S.D., Thompson, W.L. & Kosslyn, S.M. (2005). Visual mental imagery induces retinotopically organized activation of early visual areas. *Cereb Cortex*, 15, 1570-1583.
- Smith, E.E. & Jonides, J. (1995). Spatial vs. object working memory: PET investigations. *J Cogn Neurosci*, 7, 337-356.
- Szameitat, A.J., Schubert, T., Muller, K. & Von Cramon, D.Y. (2002). Localization of executive functions in dual-task performance with fMRI. *J Cogn Neurosci*, 14, 1184-1199.
- Tallon-Baudry, C. & Bertrand, O. (1999). Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends Cogn Sci*, 3, 151-162.
- Tallon-Baudry, C., Kreiter, A. & Bertrand, O. (1999). Sustained and transient oscillatory responses in the gamma and beta bands in a visual short-term memory task in humans. *Vis Neurosci*, 16, 449-459.
- Todd, J.J. & Marois, R. (2004). Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature*, 428, 751-754.
- Tresch, M.C., Sinnamon, H.M. & Seamon, J.G. (1993). Double dissociation of spatial and object visual memory: evidence from selective interference in intact human subjects. *Neuropsychologia*, 31, 211-219.
- Ungerleider, L.G., Courtney, S.M. & Haxby, J.V. (1998) A neural system for human visual working memory. *Proc Natl Acad Sci USA*, 95, 883-890.
- Ungerleider, L.G. & Haxby, J.V. (1994). 'What' and 'where' in the human brain. *Curr Opin Neurobiol*, 4, 157-165.
- Ungerleider, M.G & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In: Ingle, D. J., Goodale, M.A. & Mansfield, R.J.W. (Eds.) *Analysis of Visual Behavior* (pp 549-586). Cambridge: MIT Press.
- Van de Ven, V.G., Formisano, E., Prvulovic, D., Roeder, C. & Linden, D.E.J. (2004). Functional connectivity as revealed by spatial independent component analysis of fMRI measurements during rest. *Hum Brain Mapp*, 22, 165-178.
- Vandierendonck, A., Kemps, E., Fastame, M.C. & Szmalec, A. (2004). Working memory components of the Corsi blocks task. *Br J Psychol*, 95, 57-79.
- Vecchi, T. (1998). Visuo-spatial imagery in congenitally totally blind people. *Memory*, 6, 91-102.

- Vecchi, T. & Cornoldi, C. (1999). Passive storage and active manipulation in visuo-spatial working memory: Further evidence from the study of age differences. *Eur J Cogn Psychol*, *11*, 391-406.
- Vecchi, T. & Girelli, L. (1998). Gender differences in visuo-spatial processing: the importance of distinguishing between passive storage and active manipulation. *Acta Psychol*, *99*, 1-16.
- Vecchi, T., Monticellai, M.L. & Cornoldi, C. (1995). Visuo-spatial working memory: structures and variables affecting a capacity measure. *Neuropsychologia*, *33*, 1549-1564.
- Vuontela, V., Rama, P., Raninen, A., Aronen, H.J. & Carlson, S. (1999). Selective interference reveals dissociation between memory for location and colour. *Neuroreport*, *10*, 2235-2240.
- Wager, T.D. & Smith, E.E. (2003). Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis. *Cogn Affect Behav Neurosci*, *3*, 255-274.
- Walter, H., Bretschneider, V., Gron, G., Zurowski, B., Wunderlich, A.P., Tomczak, R. & Spitzer, M. (2003). Evidence for quantitative domain dominance for verbal and spatial working memory in frontal and parietal cortex. *Cortex*, *39*, 897-911.
- Whiteley, A.M. & Warrington, E.K. (1977). Prosopagnosia: a clinical, psychological and anatomical study of three patients. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, *40*, 395-403.
- Wilson, F.A., Scaldie, S.P. & Goldman-Rakic, P.S. (1993). Dissociation of object and spatial processing domains in primate prefrontal cortex. *Science*, *260*, 1955-1958.
- Wyszecki, G. & Stiles, W.S. (2000). *Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* (2<sup>nd</sup>). New York: Wiley.
- Yee, T.S.L., Sala, J.B. & Courtney, S.M. (2003). Differential dorsal and ventral activation in shape versus color working memory. *Soc Neurosci Abs*, *29*, 287-316.
- Zangwill, O.L. (1946). Some qualitative observations on verbal memory in cases of cerebral lesion. *Br J Psychol*, *37*, 8-19.
- Zarahn, E., Aguirre, G.K. & D'Esposito, M. (1999). Temporal isolation of the neural correlates of spatial mnemonic processing with fMRI. *Brain Res Cogn Brain Res*, *7*, 255-68.
- Zarahn, E., Aguirre, G.K. & D'Esposito, M. (2000). Replication and further studies of neural mechanisms of spatial mnemonic processing in humans. *Brain Res Cogn Brain Res*, *9*, 1-17.

## **Abbildungs- und Tabellenverzeichnis**

### **Kapitel 1: Einleitung**

Abbildungen

- 1 Cytoarchitektonische Felder des Kortex nach Brodmann.

Tabellen

Keine

### **Kapitel 2: Studie 1 Fragestellung und Thesen**

Abbildungen

Keine

Tabellen

Keine

### **Kapitel 3: Studie 1 Methoden**

Abbildungen

- 2 Stimuluspräsentation der Experimente 1-4.
- 3 Stimuluspräsentation der Experimente 5-6.

Tabellen

- 1 Vergleich der experimentellen Bedingungen des Farben-Validierungsexperimentes.

### **Kapitel 4: Studie 1 Resultate**

Abbildungen

- 4 Die mittleren  $A'$ -Werte und Standardfehler ( $SE$ ) der drei experimentellen Bedingungen der Experimente 1-4.

- 5 Mittlere Reaktionszeiten ( $RT$ ) und Standardfehler ( $SE$ ) der drei Bedingungen der Experimente 1-4.
- 6 Mittlere  $A'$ -Werte und Standardfehler ( $SE$ ) für (a) das Manipulieren von Farben und Winkeln (Experiment 5), und (b) das Halten von Farben und Winkeln (Experiment 6).
- 7 Mittlere Reaktionszeiten ( $RT$ ) und Standardfehler ( $SE$ ) für (a) das Manipulieren von Farben und Winkeln (Experiment 5), (b) und das Halten von Farben und Winkeln (Experiment 6).

#### Tabellen

- 2 Ergebnisse der Experimente 1-4.
- 3 Ergebnisse der Experimente 5-6.

### **Kapitel 5: Diskussion**

#### Abbildungen

Keine

#### Tabellen

Keine

### **Kapitel 6: Studie 2 Fragestellung und Thesen**

#### Abbildungen

Keine

#### Tabellen

Keine

### **Kapitel 7: Studie 2 Methoden**

#### Abbildungen

- 8 Beispielaufgaben mit Zeitverlauf aus Experiment 1 und 2.

Tabellen

Keine

## **Kapitel 8: Studie 2 Resultate**

Abbildungen

- 9 Superpositionsmaps für die drei Bedingungen von Experiment 1.
- 10 *RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) des Kontrasts “Was vs. Wo” in Experiment 1 für die Phase des Enkodierens.
- 11 *RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) des Kontrasts “Was vs. Wo” in Experiment 1 für die Phase des Delays.
- 12 *RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) des Kontrasts “Was vs. Wo” in Experiment 1 für die Phase des Abrufs.
- 13 Superpositionsmaps für die drei Bedingungen von Experiment 2.
- 14 *RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) des Kontrasts “Was vs. Wo” in Experiment 2 für die Phase des Enkodierens.
- 15 *RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) des Kontrasts “Was vs. Wo” in Experiment 2 für die Phase des Delays.
- 16 *RC*-Maps ( $RC > 0.3$ ) des Kontrasts “Was vs. Wo” in Experiment 2 für die Phase des Abrufs.
- 17 *RC*-Maps ( $RC > 0$ ) für den Kontrast “Halten vs. Manipulieren“ bei Material Farbe.
- 18 *RC*-Maps ( $RC > 0$ ) für den Kontrast “Halten vs. Manipulieren” bei Material Winkel.

Tabellen

- 4 Vergleich der Reaktionszeiten (*RT*) und Anzahl richtiger Antworten (*%C*) zwischen den Bedingungen Farbe und Winkel, Experiment 1 und 2.
- 5 Vergleich der Reaktionszeiten (*RT*) und der Anzahl richtiger Antworten (*%C*) zwischen Experiment 1 und 2.
- 6 Kontraste “Was vs. Wo” in “regions of interest“ (ROI) von Experiment 1 mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel.
- 7 Kontraste “Was vs. Wo” in den “regions of interest“ (ROI) von Experiment 2 mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel.

- 8 Kontrast “Halten vs. Manipulieren” von Farbe in den „regions of interest“ (ROI) mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel.
- 9 Schwerpunkte und Signifikanzlevel des Kontrastes “Halten vs. Manipulieren” für Winkel in den „regions of interest“ (ROI) mit Schwerpunkten und Signifikanzlevel.
- 10 2×2 ALM (Material × Prozess), „random effect“ im Delay für Experiment 1 und 2 über alle Voxel, Areale im FK.
- 11 Schwerpunkte und Signifikanzlevel des Kontrastes “Single vs. Dual” in den „regions of interest“ (ROI) des FK, Experiment 1 (Halten).
- 12 Schwerpunkte und Signifikanzlevel des Kontrastes “Single vs. Dual” in den „regions of interest“ (ROI) des FK, Experiment 2 (Manipulieren).

## **Kapitel 9: Studie 2 Diskussion**

Abbildungen

Keine

Tabellen

Keine

## Kapitel 10: Zusammenführende Diskussion

Abbildungen

Keine

Tabellen

Keine

# Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Mohr, Harald

geb. 15.01.1973, Landau i.d. Pfalz

ledig

Dipl. Psychologe

## Berufstätigkeit:

- 01.04.01-30.10.01    Wissenschaftlicher Mitarbeiter im psychophysiologischen Labor des Psychologischen Institutes, Abteilung Klinische und Angewandte Psychologie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn  
Tätigkeit: Untersuchung der Effektivität von Hypnotherapie bei primären Insomnien
- 01.11.01-15.08.04    Promotionsstipendiat, Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, Klinik für Psychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie  
Betreuer: Prof. Dr. Sireteanu und PD Dr. David Linden. Thema: Struktur und neurophysiologische Korrelate des visuellen Arbeitsgedächtnisses.
- 01.11.02-01.11.03    Psychiatrisches Jahr im Rahmen der Ausbildung zum Psychologischen Psychotherapeuten in der Klinik für Psychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie.
- Seit 15.08.04        Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für Psychosomatik in der Klinik für Psychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie.  
Tätigkeit: Psychotherapeutische Behandlungen. Grundlagen- und klinische Forschung im Feld der kognitiven Neurowissenschaften mittels fMRT.

## Bildungshintergrund:

### Hochschulausbildung:

1995-1997 Grundstudium der Psychologie an der Universität Fribourg (CH)

1997-2001 Hauptstudium der Psychologie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Diplomendnote: sehr gut (mit Auszeichnung)

Thema der Diplomarbeit:

Experimentelle EEG-Untersuchung zu semantischen Inhibitions- und Bahnungsprozessen. Titel: „Evozierte Potentiale bei semantischen Entscheidungsaufgaben“

### Psychologische Weiterbildung:

1998-2001 3-jährige gestalttherapeutische Weiterbildung, IHP Eschweiler

Seit WS 02/03 Ausbildung zum Psychologischen Psychotherapeuten an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

### Studienbegleitende Tätigkeiten:

2000-2001 Schlaflabor im Krankenhaus Porz am Rhein: polysomnographische Untersuchungen als studentische Hilfskraft (Diagnostik von Apnoen, Insomnien und Hypersomnien)

### Praktika:

1997 6-wöchiges psychiatrisches Praktikum an der Pfalzlinik Landeck im Rahmen des Diplomstudienganges Psychologie.

1999 6-wöchiges wirtschaftspsychologisches Praktikum in der Unternehmensberatung Wolff & Kollmar, Bonn

### Schulbildung:

1983-1993 Trifels-Gymnasium, Annweiler, Allgemeine Hochschulreife

## Publikationen und Beiträge

### Erstautor:

- 2003                    Mohr, H.M., Morawetz, C., Goebel, R., Singer, W. & Linden, D.E.J. (2003). Ventral-dorsal segregation of sensory and prefrontal cortical activity related to color and spatial manipulation. Abstract und Vortrag. *Society for Neuroscience*, 33rd Annual Meeting.
- 2005                    Mohr, H.M. & Linden, D.E.J. (2005). Separation of the systems for color and spatial manipulation in working memory revealed by a dual task procedure. *J Cogn Neurosci*, 17, 355-66.
- 2006                    Mohr, H.M., Goebel, R. & Linden, D.E.J. (2006). Content-specific dissociation of prefrontal activity during maintenance and manipulation in visual working memory. *J Neurosci*, in press, accepted 13.03. 06.
- 2006                    Mohr, H.M., Grabhorn, R., Lenz, C. (2006). Untersuchung der neuronalen Korrelate des Körperbildes bei Anorexia nervosa mittels fMRT. Abstract und Vortrag. *Psychother Psychosom Med Psycho*, 56, 98.

### Coautor:

- 2005                    Kadosh, R.C., Henik, A., Rubinsten, O., Mohr, H.M., Dori, H., van de Ven, V., Zorzi, M., Hendler, T., Goebel, R. & Linden D.E.J (2005). Are numbers special? The comparison systems of the human brain investigated by fMRI. *Neuropsychologia*, 43, 1238-1248.
- 2005                    Michal, M., Röder, C., Linden, D.E.J., Mohr, H.M. & Overbeck, G. (2005). Die funktionelle Neuroanatomie der Schmerzwahrnehmung bei hypnotisch induzierter Depersonalisation. *Psychother Psychosom Med Psychol*, 55, 56.

## Sonstiges

### Ersatzdienst:

1993-1994

Zivildienst Katholisches Altenzentrum, Landau

Frankfurt, 24.04.07

Harald Mohr