

Aus dem Bereich Funktionelle Kernspintomographie
der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie
der Medizinischen Fakultät der Universität des Saarlandes,
Homburg/Saar

Erhöht Expertise die Kapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses durch effizientere neuronale Kodierung?

*Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Medizin (Dr. med.)
der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES
2012*

vorgelegt von: Christian Popp
geb. am: 7. Januar 1980
in Saarbrücken

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract / Zusammenfassung	- 1 -
2	Einleitung	- 2 -
3	Modelle des Arbeitsgedächtnisses	- 3 -
3.1	Das Arbeitsgedächtnis	- 3 -
3.2	Das Visuelle Arbeitsgedächtnis (ViAG) und seine Begrenztheit.....	- 4 -
3.3	Haltedauer des visuellen Arbeitsgedächtnisses.....	- 8 -
3.4	Quantifizierung der visuellen Arbeitsgedächtniskapazität	- 8 -
3.5	„The Magical Number 4“ (Cowan, 2001) – Die Begrenzung der Arbeitsgedächtniskapazität auf 4 Objekte	- 9 -
3.6	Das ViAG und seine neuronalen Korrelate	- 20 -
3.7	Kurzfristiges visuelles Behalten: Entwurf eines Modells.....	- 22 -
4	Training des Arbeitsgedächtnisses	- 26 -
4.1	Veränderung durch Training	- 26 -
4.2	Die Verwendung chinesischer Schriftzeichen als Items	- 30 -
4.3	Expertiseeffekte	- 31 -
4.4	Einführung der Fragestellung	- 33 -
5	Material und Methodik	- 36 -
5.1	Material.....	- 36 -
5.2	Studiendesign	- 37 -
5.3	Aufbau der einzelnen Experimentalphasen	- 39 -
5.3.1	Die Arbeitsgedächtnisaufgabe	- 39 -
5.3.2	Das Training.....	- 42 -
5.3.3	Erste Kernspinmessung (t1).....	- 44 -
5.3.4	Zweite Kernspinmessung (t2)	- 44 -
5.3.5	Lernerfolgskontrolle.....	- 45 -

5.4	Vorselektion der Items	- 37 -
5.5	Teilnehmer des Experiments.....	- 46 -
5.6	MRT-Messungen	- 46 -
5.6.1	Daten der Kernspin-Messung.....	- 47 -
5.6.2	Statistische Aufbereitung der fMRT Daten	- 47 -
6	Ergebnisse.....	- 49 -
6.1	Behaviorale Ergebnisse.....	- 49 -
6.1.1	Ergebnisse der Lernerfolgskontrolle	- 49 -
6.1.2	Unspezifische Übungseffekte	- 49 -
6.1.3	Spezifischer Trainingseffekt	- 52 -
6.2	fMRT - Ergebnisse.....	- 55 -
6.3	Übersicht über die fMRT-Ergebnisse	- 77 -
7	Diskussion.....	- 78 -
	Literaturverzeichnis	- 84 -
	Anhang: Verwendete Items.....	- 91 -
	Danksagung	- 93 -
	Publikation.....	- 94 -
	Lebenslauf.....	- 95 -

1 Abstract / Zusammenfassung

This study examines the hypothesis, that training of the visual form of items improves visual working memory. Based on the assumption that visual working memory and long term memory use the same neuronal network, I was looking for training-induced changes within these areas. 12 subjects trained the visual forms of 20 Chinese character components (radicals) during four weeks, which were novel stimuli for the participants. Pre-training- and post-training fMRI scans were used to reveal changes in the activation of visual working memory-dependent cortical areas in the posterior brain. Results show that there is a specific training-induced decrease of activation in lateral occipital cortex. Activation decrease for trained stimuli could also be found in the intraparietal sulcus for set size 2. The findings are consistent with behavioural data, which show an item-specific training effect for reaction times and accuracy for a set of two Items. This study therefore gives strong evidence that visual training leads to a more effective and sparsely encoding of the trained Items. The conclusion can be drawn that long term memory entries support short term representations.

Diese Studie überprüft die Hypothese, dass das Training der visuellen Form von Stimuli zu einer spezifischen Verbesserung des visuellen Arbeitsgedächtnisses führt. Ausgehend von der Vermutung, dass visuelles Arbeitsgedächtnis und Langzeitgedächtnis das gleiche neuronale Netzwerk nutzen, interessierten mich trainingsbedingte Veränderungen innerhalb dieser Strukturen. 12 Probanden trainierten über einen Zeitraum von vier Wochen 20 für sie unbekannte chinesische Schriftzeichenbausteine (Radikale). Zum Auffinden trainingsbedingter Aktivationsänderungen in Arealen des visuellen Arbeitsgedächtnisses im posterioren Cortex, wurden vor und nach dem Training fMRT-Messungen durchgeführt. Als Ergebnis ließ sich eine trainingsbedingte neuronale Aktivationsabnahme im lateral-okzipitalen Cortex und ebenso im Bereich des intraparietalen Sulcus für Setsize 2 feststellen. Die Befunde stehen in Einklang mit den Verhaltensdaten, die Reaktionszeitverbesserungen und Zunahme der Antwortrichtigkeit für Setsize 2 erkennen ließen. Die Studie liefert deutliche Hinweise darauf, dass visuelles Training zu einer effektiveren und sparsameren neuronalen Codierung führt. Es wird vermutet, dass Einträge im Langzeitgedächtnis Repräsentationen des Kurzzeitgedächtnisses unterstützen.

2 Einleitung

Wir nehmen im Laufe eines Tages Tausende von visuellen Sinneseindrücken wahr. Manche davon sind so kurzzeitig, dass sie uns gar nicht bewusst werden, andere dringen in das Bewusstsein vor und werden zumindest kurzzeitig erinnert, aber nur ein kleiner Teil wird für längere Zeit gespeichert. Gegenstand dieser Arbeit ist das kurzzeitige Erinnern im Bereich von wenigen Sekunden. Dieses kurzzeitige Erinnern wird in der einschlägigen psychologischen Forschung als Leistung eines Kurzzeit- oder Arbeitsgedächtnisses betrachtet. Mich interessiert speziell das visuelle Arbeitsgedächtnis. Es ist wichtig für die visuelle Wahrnehmung, das Bilden visueller Vorstellungen oder allgemein das anschauliche Denken. Aufgaben, die das visuelle Arbeitsgedächtnis fordern, begegnen uns deshalb im Alltag in vielfältiger Weise.

Im Zuge der Internationalisierung werden Instruktionstexte vermehrt nonverbal abgefasst. So geben beispielsweise viele Baupläne von Möbelstücken die Handlungsanweisungen nur noch mithilfe von Abbildungen. Diese müssen kurzzeitig behalten werden, um weitere Prozesse, wie die Umsetzung in motorische Handlungen, zu ermöglichen (s. dazu: Morrell & Park, 1993). Als anderes Beispiel sei etwa die Bedienungsanleitung eines Defibrillators an öffentlichen Plätzen mit großem Publikumsverkehr wie etwa Flughäfen genannt. Für dieses Vorgehen spricht die Tatsache, dass solche Anleitungen weitgehend kultur- und sprachunabhängig verstehbar sind. Eingeschränkt wird die Verwendung dieses Kommunikationskanals durch die Tatsache, dass das visuelle Arbeitsgedächtnis auf wenige Elemente beschränkt (Luck & Vogel, 1997) und dass es expertiseabhängig ist. Experten vermögen mehr Elemente zu halten, als Novizen (Sun, Zimmer & Fu, 2011). Dahinter steht die Vorstellung, dass es durch Expertise (Training) zur Ausbildung von visuellen Repräsentationen von Objekten kommt, und diese besser und/oder schneller erkannt und erinnert werden (Curby, Glazek & Gauthier, 2009; Sun, Zimmer & Fu, 2011). Mich interessieren in der vorliegenden Studie die Modifizierbarkeit des visuellen Arbeitsgedächtnisses durch Training, sowie die trainingsbedingten neuronalen Veränderungen in arbeitsgedächtnisassoziierten Arealen.

3 Modelle des Arbeitsgedächtnisses

3.1 Das Arbeitsgedächtnis

Die Erforschung des menschlichen Kurzzeiterinnerns hat in der Psychologie eine lange Tradition. Man vermutet, dass das Kurzzeitgedächtnis einen Arbeitsspeicher darstellt, der die aufgenommene Information für kurze Zeit bereithält, ehe sie nach und nach wieder verblasst. Die unterschiedlichen Auffassungen von Aufbau und Interaktionen dieses Speichers mit den anderen Gedächtniskomponenten flossen in verschiedene Modelle ein, die im folgenden Kapitel kurz vorgestellt und erläutert werden.

Eine frühe Modellvorstellung war das „Modale Modell“ von Atkinson und Shiffrin (1971). Hier wird ein sensorischer Reiz zunächst in einem „Sensorischen Register“ gehalten und danach in einem Kurzzeitspeicher („Short term store“) weiterverarbeitet. Der Kurzzeitspeicher steht unter dem Einfluss unterschiedlicher Kontrollprozesse wie Rehearsal, Codierung, Entscheidungsfindung und strategischem Vorgehen. Dieser Kurzzeitspeicher ruft Inhalte aus dem Langzeitgedächtnis ab und kann auch Einträge ins Langzeitgedächtnis vornehmen. Später wurde dieses Modell verfeinert, was ich im Folgenden darstellen werde, aber viele Modelle halten diese prinzipielle Trennung zwischen einem Langzeit- und Kurzzeitgedächtnis bei.

Bereits seit Jahrzehnten untersuchen Psychologen unter festgelegten Testbedingungen diesen Kurzzeitspeicher. Dabei wurde festgestellt, dass offenbar die Speicherung visueller und phonologischer Information voneinander getrennt ablief. Hinweise auf diese Trennung stammen sowohl aus klinischen (z.B.: De Renzi & Nichelli, 1975), als auch aus psychologischen Studien (z.B.: Scarborough, 1972; Baddeley & Hitch, 1974; Baddeley, 1986). In psychologischen Tests konnten visuelle Aufgaben, wie das Behalten von Bildern, oder das Behalten einer zeitlichen Abfolge von Punkten auf einer Matrix, (Corsi-Test) unbeeinflusst von phonologischen Parallelaufgaben ausgeführt werden. Dazu zählt z.B. das Behalten von Zahlenreihen. Allerdings schwächte die gleichzeitige Ausführung mehrerer visueller Aufgaben die Leistung der Probanden deutlich ab. Fortan ging man also von einer Trennung in einen visuellen und einen phonologischen Speicheranteil aus. Neben der Bezeichnung „Kurzzeitgedächtnis“ hat sich in jüngerer Zeit der Begriff „Arbeitsgedächtnis“ durchgesetzt, da seine Funktion fokussiert wird: Es

dient dazu, Information kurzfristig während der Bearbeitung für mentale Prozesse verfügbar zu halten. Diese Begriffsverwendung geht auf Baddeley und Kollegen zurück.

3.2 Das Visuelle Arbeitsgedächtnis (ViAG) und seine Begrenztheit

Baddeley und Hitch stellten 1974 ein Modell vor, das von einer getrennten Verarbeitung phonologischer und visueller Inputs ausgeht:

Im Zentrum des Modells stand ursprünglich die „Zentrale Exekutive“ als zentrale übergeordnete Steuerfunktion, die die Aufmerksamkeitsressourcen den abhängigen Komponenten zuteilt. Zu diesen abhängigen Komponenten zählen die Autoren die Phonologische Schleife („phonological loop“), die phonologische Information durch einen aktiven Prozess temporär bereithält, was als Rehearsal bezeichnet wird (Baddeley, Eysenck & Anderson, 2009). Mithilfe dieses Speichers können beispielsweise neue Telefonnummern oder eine Aufzählung unbekannter Personennamen für kurze Zeit im Gedächtnis gehalten werden. Visuelle Information hingegen speichert ein sogenannter visuell-räumlicher Notizblock („visuo-spatial sketchpad“). In diesem Modell wird somit eine Trennung zwischen visueller und räumlicher Information gefordert.

Dieses „Dreikomponentenmodell“ (Tripartite working-memory-model) war empirisch extrem fruchtbar und es wurde eine Fülle von Befunden generiert, insbesondere über die Eigenschaften der phonologischen Schleife. Dennoch blieben einige Phänomene unerklärt. Bei Experimenten war bereits früh aufgefallen, dass semantische Zusammenhänge bei Gedächtnisaufgaben zu einer Leistungsverbesserung führten. So lassen sich Sätze aus wesentlich mehr Worten behalten, als wenn Worte zusammenhangslos aufgereiht werden (Brenner, 1940). Den bereits erwähnten Gedächtniskomponenten lassen sich solche Leistungen indes nicht zuordnen, d.h. es kann weder von einer phonologischen Speicherung ausgegangen werden, noch ist eine vollständige visuelle Speicherung der Information möglich. Hier kann aber auf grammatikalisches und semantisches Langzeitwissen zurückgegriffen und es können szenische Vorstellungen gebildet werden. Auch lassen sich komplexe Bilder imaginär, praktisch vor dem „geistigen Auge“ erzeugen, die über einen bestimmten Zeitraum erhalten bleiben, ohne dass man aktiv versucht, diese in einem visuellen Notizblock zu

halten. Manche Menschen sind in der Lage, sich lange, scheinbar zusammenhangslose Zahlenreihen über die Vorstellung von Szenarien zu merken. Bei solchen Gedächtnisleistungen wären die bereits vorgeschlagenen Gedächtniskomponenten überfordert. Es ist daher festzustellen, dass dem ursprünglichen Modell eine Komponente fehlt, die Langzeit- und Kurzzeitwissen integriert und eine Schaltstelle zwischen den Gedächtniskomponenten darstellt. Baddeley schlug daher als Lückenschluss zwischen Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis das Vorhandensein des so genannten „episodischen Puffers“ („episodic buffer“) vor und ergänzte damit sein Arbeitsgedächtnismodell (Baddeley, 2000). Er versteht darunter ein Speichermodul, das unterschiedliche Inhalte aus dem episodischen Langzeitgedächtnis integrieren und modifizieren kann. Gleichzeitig untersteht es der Steuerung durch die zentrale Exekutive, wie auch die beiden anderen abhängigen Komponenten visuell-räumlicher Notizblock und phonologische Schleife, von denen es ebenfalls Eingänge erhält (s. Abb. 1).

Neben dem Baddeley'schen Modell, das in Arbeitsgedächtnis und Kurzzeitgedächtnis noch separate Komponenten sieht, existieren auch andere Modelle, von denen hier exemplarisch dasjenige von Nelson Cowan (1988) erwähnt sein soll. Im Zentrum von Cowans „Theorie der eingebetteten Prozesse“ werden Prozesse in einem Aufmerksamkeitsfokus gehalten, der durch eine zentrale Steuereinheit kontrolliert wird. Dieser stellt praktisch als aktiv gehaltener Anteil des Langzeitgedächtnisses das Pendant zu Baddeleys „abhängigen Komponenten“ dar. Da das Modell von Baddeley und die nachfolgenden Differenzierungen der Theorie im Hinblick auf visuelle Prozesse sehr viel spezifischer sind als die der „Einkomponentenmodelle“, werde ich bei der Interpretation von Studienergebnissen im folgenden Text Bezug zu Baddeleys Modell nehmen.

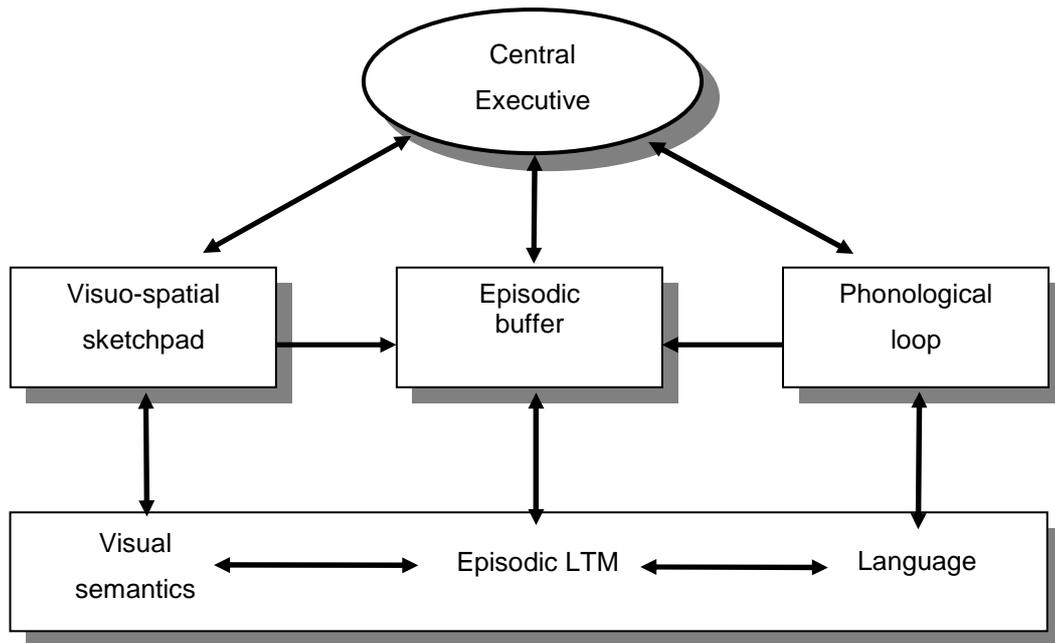


Abb. 1 - Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell in der überarbeiteten Version (2000)

(Abbildung nach Baddeley, Eysenck & Anderson (2009) „Memory“ – Kapitel 3 – Working Memory, Psychology Press: S. 58, Abb. 3.9)

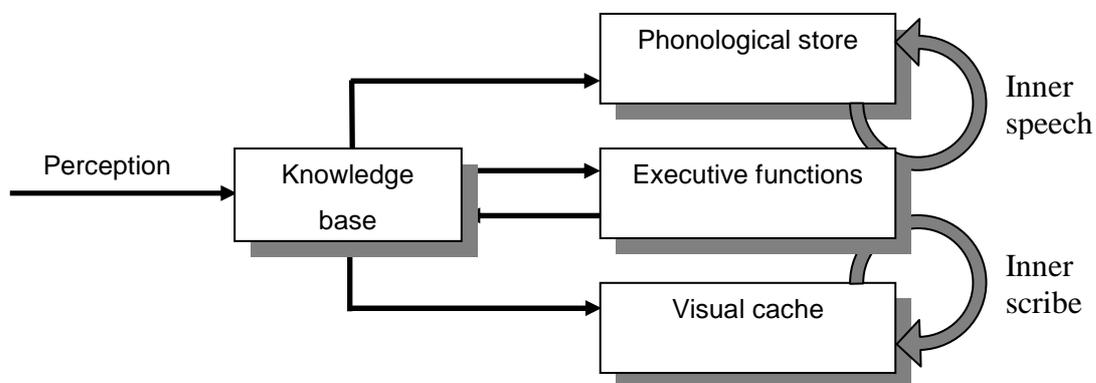


Abb. 2 - Version des Multikomponentenmodells des Arbeitsgedächtnisses nach Logie.

Aktive Prozesse sind als dunkelgraue, kreisförmig verlaufende Pfeile dargestellt.

(Abbildung nach Baddeley, Eysenck & Anderson (2009) „Memory“ – Kapitel 3 – Working Memory, Psychology Press: S. 52, Abb. 3.8)

Die von Baddeley eingeführte Unterscheidung zwischen aktiven Prozessen zur Aufrechterhaltung des Gedächtnisinhaltes und passiven Speichern, die dem bloßen

Halten von Information dienen, wurde später durch Logie modifiziert und floss in das „Multicomponent working memory model“ ein (Logie, 1986). Aus Untersuchungen hatte Baddeley zunächst den Schluss gezogen, dass es sich bei seiner abhängigen Komponente des „Visuo-spatial-sketchpad“ um einen räumlichen Speicher handelt. Visuell-räumliche Behaltensleistungen wurden durch auditorisch-räumliche Zusatzaufgaben gemindert (Baddeley & Lieberman, 1980). Logie hingegen ging aufgrund von Beobachtungen von einer getrennten Verarbeitung für aktiv durch einen Rehearsalprozess gehaltene räumliche Information und einen Passivspeicher für rein visuelle Information aus. Als Bezeichnung für diese beiden neu eingeführten Komponenten wählte er „inner scribe“ für den aktiven Rehearsalprozess und „visual cache“ für den passiven Speicheranteil, der visuelle Information wie etwa „Farbe“ halten sollte. Diese Beobachtungen korrespondieren mit den bereits in Baddeleys Modell enthaltenen Forderungen nach einem aktiven Rehearsalprozess bei der Speicherung phonologischer Information als „inner speech“. Logie ergänzte das Visual Working Memory Model um einen „Inner scribe“. Der „Inner scribe“ stellt die Speichermethode für dynamische, räumliche Aufgaben wie etwa den Corsi-Test dar, bei dem eine Abfolge von Bewegungen zwischen verschiedenen räumlichen Positionen zu behalten ist.

Für eine getrennte Betrachtungsweise räumlicher und visueller Information sprechen zahlreiche Studien, in denen die Probanden typischerweise eine visuell-räumliche Hauptaufgabe zu erfüllen hatten. Parallel sollte eine Nebenaufgabe bearbeitet werden. Bei räumlichen Nebenaufgaben zeigte sich eine starke Performanzabschwächung. Stellte man hingegen eine rein visuelle, nicht-räumliche Nebenaufgabe, wie etwa das Behalten kontextunabhängiger Bilder, sank die Performanz der Probanden bei der Hauptaufgabe kaum ab (Della Sala, Logie & Marchetti, 1991; Tresch, Sinnamon & Seamon, 1993; Vuontela et al., 1999).

Die Komponente des Arbeitsgedächtnisses, die der Speicherung von Objekten dient, wird offensichtlich auch bei mentalen Rotationsaufgaben verwendet, um eine Repräsentation des zu rotierenden Bildes zu halten (Hyun & Luck, 2007).

3.3 Haltedauer des visuellen Arbeitsgedächtnisses

Nach klassischer Darstellweise ist das visuelle Arbeitsgedächtnis ein Speicher, bei dem eine Retentionszeit, also Behaltensdauer von einigen Sekunden erreicht wird. In seinen zeitlichen Dimensionen lässt es sich daher zwischen dem „Ikonischen Gedächtnis“, einer Art sensorischem „Ultrakurzzeitspeicher“ und dem Langzeitgedächtnis einordnen. Das „Ikonische Gedächtnis“ bezeichnet die kurzzeitige Verfügbarkeit nahezu vollständiger Bildinformation. Es ist eine Art Nachwirkung der sensorischen Stimulation in frühen visuellen Verarbeitungsarealen und stellt im Gegensatz zum visuellen Arbeitsgedächtnis einen Teil der präattentiven Wahrnehmung dar (Dehaene, Sergent & Changeux, 2003). Diese Gedächtnisspuren sind bereits nach 100-250 ms nicht mehr zugänglich (Hollingworth & Luck, 2008). Zudem ist das ikonische Gedächtnis offenbar empfindlich für das Verschieben der Konfiguration von Objekten, während das Visuelle Arbeitsgedächtnis sehr robust gegenüber Veränderungen der absoluten Objektposition zu sein scheint (Zimmer & Kaernbach, 2006).

3.4 Quantifizierung der visuellen Arbeitsgedächtniskapazität

Eine Studie von Luck und Vogel war einer der ersten Versuche, das visuelle Arbeitsgedächtnis systematisch zu quantifizieren, indem die Kapazität abgeschätzt und durch den sog. K-Index ausgedrückt wird (Luck & Vogel, 1997). Dazu wurde auf eine Berechnungsweise von Pashler zurückgegriffen, die dieser zur Berechnung des K-Index aus der Rate der Hits (H) und der False Alarms (F) in einer Change-detection-Aufgabe entwickelt hatte (Pashler, 1988). In dieser Aufgabe gilt es zu entdecken, ob sich Teile eines Stimulus, den man kurze Zeit vorher gesehen hat, geändert haben, oder nicht (s. unten). Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass bei einer Arbeitsgedächtniskapazität von K Items (Objekten) alle Items aus einem Set bestehend aus $\leq K$ Items erkannt werden. Nach einer Bearbeitung durch Cowan (2001) ergibt sich eine Berechnung des K-Index aus der Rate der Hits (H) und der False Alarms (F) nach der Formel: $K = N (p(\text{Hit}) - p(\text{False Alarm}))$, wobei N die Menge der zu sehenden Items (Objekte) ist. N wird in folgenden Studien als „Setsize“ bezeichnet. Weiterhin wird für die Angabe von Arbeitsgedächtnisleistungen gelegentlich das sog. „PR-Maß“ berechnet.

PR errechnet sich nach der Formel $PR = p(\text{Hit}) - p(\text{False Alarm})$ und gibt die um Ratewahrscheinlichkeit bereinigte Arbeitsgedächtnisleistung an. Beide Einheiten lassen sich einfach ineinander umwandeln. Der K-Index entspricht dem Produkt aus PR-Maß und Setsize, das PR-Maß dem Quotienten aus K-Index durch Setsize. In meiner Studie wurde die Berechnung des PR-Maßes zur Quantifizierung der Arbeitsgedächtniskapazität herangezogen, was als probat erschien, um aus Verhaltensdaten eine objektive Aussage über die Kapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses der Probanden zu treffen.

3.5 „The Magical Number 4“ (Cowan, 2001) –

Die Begrenzung der Arbeitsgedächtniskapazität auf 4 Objekte

Um das Visuelle Arbeitsgedächtnis unter festgelegten Testbedingungen messen zu können, wurden in psychologischen Experimenten häufig Change-detection-Aufgaben gestellt. Phillips entwickelte 1974 ein Paradigma zur Messung der Kapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses, das in vielen Folgestudien Verwendung fand und daher heute als klassische Messmethode angesehen werden kann, das S1-S2-Paradigma: Den Probanden wurden Objekte in einer bestimmten Anordnung als Set präsentiert. Es folgte ein Retentionsintervall, während dessen die Objekte ausgeblendet wurden und im Gedächtnis gehalten werden mussten. Das daraufhin erscheinende Test-Set war dann mit dem Ausgangs-Set zu vergleichen (s. Abb. 3). Diese Einzeltestungen werden als „Trial“ bezeichnet und können so oft hintereinander stattfinden, bis eine repräsentative Teststärke erreicht ist. Typischerweise wurden in den Tests die Abbildung einfacher Objekte, schachbrettartiger Muster, oder bunte Farbplättchen als Stimulusmaterial verwendet. Anstelle von „Set“ wird in Studien häufig auch der Ausdruck „Array“ verwendet. Ich werde im Folgenden beide Begriffe analog verwenden.

Zur Klärung der Frage, wie viele Objekte aus einer festgelegten Testanordnung behalten werden können und inwieweit das Erinnern von unterschiedlichen Objekteigenschaften die Leistung des Behaltens beeinflusst, führten die Autoren Luck und Vogel mehrere Studien durch, von denen hier einige relevante Paradigmen aus dem Jahr 1997 vorgestellt werden sollen.

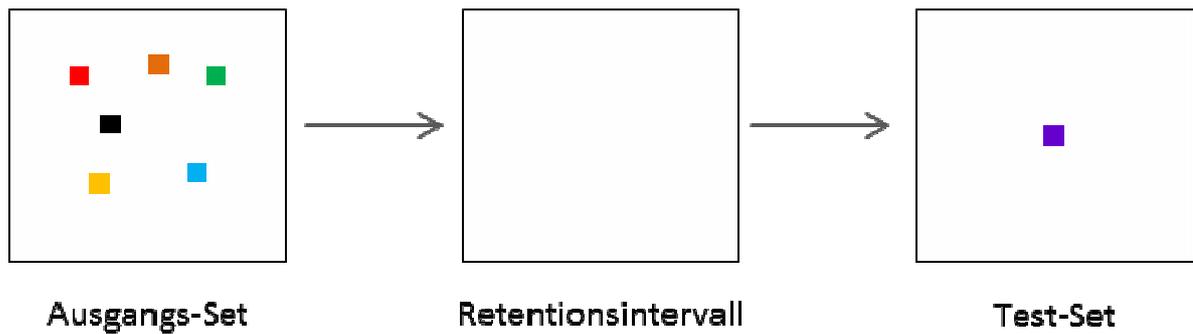


Abb. 3 – Schematische Darstellung des Ablaufes eines S1-S2-Trials einer Change-detection Aufgabe über die Zeit.

Insgesamt bestand die Studie aus 5 verschiedenen Change-detection Aufgaben. Die erste Aufgabe testete die Kapazität für einfache Farben; 1-12 Farbplättchen wurden für 100 ms eingeblendet und mussten nach einem Retentionsintervall von 900 ms erinnert und schließlich Test-Set und Ausgangs-Set miteinander verglichen werden. War eine Veränderung zwischen Test-Set und Ausgangs-Set gegeben, so betraf diese nur ein Farbplättchen. Die Probanden lösten die Aufgabe bei einem bis drei Items nahezu perfekt, zeigten jedoch bei mehr als 3 Items einen systematischen Leistungsabfall. Durch folgende Tests sollte zunächst sichergestellt werden, dass die gestellte Aufgabe tatsächlich nur die Leistung des Visuellen Arbeitsgedächtnisses misst und diese von einer Mitbeteiligung der phonologischen Schleife, rezeptionsbedingten Beschränkungen und Entscheidungsvorgängen unbeeinflusst war. Zunächst wurde eine Mitbeteiligung des verbalen Arbeitsgedächtnisses beim Erinnern der Farbplättchen durch eine Zusatzaufgabe (das Aufsagen von Zahlenreihen) ausgeschlossen, die gemäß dem Modell von Baddeley die Phonologische Schleife besetzen und eine mögliche Benennung der Farben verhindern sollte. Erwartungsgemäß führte diese Maßnahme nicht zu einer Veränderung der Behaltensleistung.

Der erste Schritt der Modifikation des Experiments bestand in einer Verlängerung der Enkodierzeit der Ausgangs-Sets von 100 ms auf 500 ms. Man wollte dadurch ausschließen, dass der Performanzabfall etwa auf eine unzureichend lange Präsentationsdauer zurückzuführen sei. Auch diese Maßnahme verbesserte die Leistungen bei höheren Setsizes nicht signifikant. Dieser Schritt liefert einen weiteren Anhaltspunkt dafür, in welchen Größenordnungen das visuelle Arbeitsgedächtnis anzusiedeln ist und lässt Schlüsse auf seine zeitliche Abgrenzung zum „ikonischen Speicher“ zu. Um auszuschließen, dass bei höheren Setsizes Entscheidungsvorgänge zu

einer höheren Fehlerrate geführt haben und die nachlassende Behaltensleistung auf diese Prozesse zurückzuführen wäre, wurde das Paradigma im darauf folgenden Test abgeändert: Es wurde lediglich ein einzelnes Item durch einen Rahmen (Cue) gekennzeichnet, bei dem eine Veränderung zu detektieren war. Während sämtliche bunten Quadrate im visuellen Arbeitsgedächtnis gehalten werden mussten, wurde die Zahl der Entscheidungsprozesse, so die Vorstellung, auf einen einzigen reduziert. Bemerkenswerterweise wurde auch durch diese Einschränkung kein signifikant besseres Ergebnis erzielt, als ohne den Cue, woraus die Autoren den Schluss zogen, dass die Anzahl der Entscheidungsprozesse die Arbeitsgedächtniskapazität nicht beeinflusste.

In den folgenden Tests wurden dann zusätzlich die Eigenschaften der einzelnen Items („Objekte“) modifiziert, wodurch der „load“, also die Gedächtnisbelastung, gesteigert werden sollte. Im ersten Schritt hatten die Versuchspersonen anzugeben, wenn sich entweder die Farbe der Items, oder deren Ausrichtung änderte. Zusätzlich wurde das verbale Arbeitsgedächtnis belastet. Auch hier waren die Ergebnisse mit einer Kapazität von ca. 4 Items für beide Modifikationen nahezu identisch. Im nächsten Schritt war es zudem möglich, dass sich beide Eigenschaften der Items gleichzeitig veränderten. Bei dieser Möglichkeit mussten dann, bei der relativ kleinen Anzahl von vier Items, acht verschiedene Eigenschaften, nämlich von jedem Item dessen Farbe und Ausrichtung behalten werden, Auch hier wurde eine nahezu identische Leistung bei Änderung nur einer Eigenschaft gegenüber der Veränderung beider Eigenschaften berichtet. Dies führte die Autoren zu dem Schluss, dass das visuelle Arbeitsgedächtnis eher integrierte Objektinformationen als Einzeleigenschaften eines Objektes speichert. Weitere Tests stützten diese Vermutung.

Man kombinierte in der dann folgenden Aufgabe die Plättchen so, dass sie aus jeweils zwei veränderlichen Anteilen (in diesem Fall die Farbe) bestanden. Der Vorstellung wurden sie dadurch zu integrierten Objekten kombiniert. Wie Abb. 4 zeigt, erbrachten die Probanden nahezu identische Leistungen für die Änderung einer einzelnen wie auch beider Farben gleichzeitig. Diese Beobachtung spricht zusätzlich für eine Verarbeitung von integrierten Objekten als Gesamteinheit, unabhängig von der Anzahl der zu verarbeitenden Objekteigenschaften. Auch in einer Folgestudie von Vogel, Woodman und Luck aus dem Jahr 2001 wurde die Anzahl von 4 maximal im Visuellen Arbeitsgedächtnis zu haltenden Objekten repliziert.

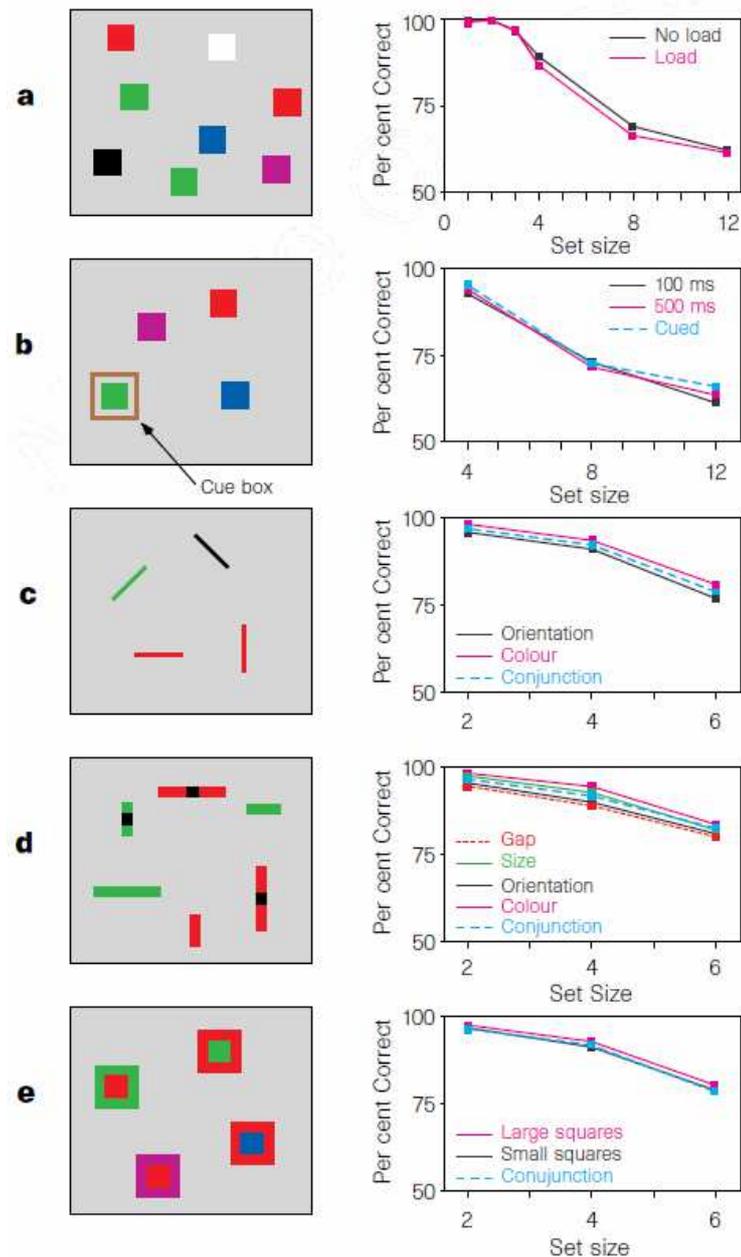


Abb. 4 - Luck & Vogel (1997).

Abbildung zeigt in der linken Spalte Beispiele der getesteten Items und in der rechten die dazugehörigen

Leistungen der Probanden. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE, copyright 1997) www.nature.com

Luck und Vogel verwendeten als Testmaterial mit farbigen Rechtecken relativ einfache Objekte. In weiteren Studien wurde untersucht, welchen Einfluss die Objektkomplexität auf die Kapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses hat. Alvarez und Cavanagh kamen 2004 zu dem Ergebnis, dass sowohl die Anzahl der gesehenen Objekte, als auch deren Komplexität die Arbeitsgedächtniskapazität beschränken (Alvarez & Cavanagh, 2004). Im Folgenden wird die Untersuchung kurz dargestellt. Bei diesem Experiment kamen sechs verschiedene Stimulusklassen zum Einsatz: Einfache Strichzeichnungen von

Objekten nach Snodgrass und Vanderwart (1980), Würfel, bei denen eine schwarze, eine weiße und eine graue Seite sichtbar ist, Zufallspolygone, chinesische Schriftzeichen, lateinische Großbuchstaben und bunte Quadrate. Um die Komplexität der genannten Objektklassen zu bestimmen, wurde die „visuelle Suchzeit“ („visual search slope“) bestimmt. Es wurde also die Zeitdauer ermittelt, die benötigt wurde, um ein Objekt zu speichern. Dazu mussten die Probanden möglichst schnell ein Target-Item aus einem Set, bestehend aus mehreren Objekten derselben Itemklasse, auffinden. In den anschließenden Change-detection-Aufgaben wurden 1,3,5,7,9,11,13 oder 15 Stimuli einer Itemklasse als Set präsentiert. Die darauf folgende Gedächtnisaufgabe zeigte einen linearen Zusammenhang zwischen dieser visuellen Suchzeit als Ausdruck der Objektkomplexität und der Anzahl der erinnerten Objekte (s. Abb. 5). Aus dieser Beziehung wurde der K-Index für die verwendeten Objektklassen ermittelt. K reicht von 1.7 bei Würfeln bis 3.6 bei farbigen Quadraten. Verfolgt man die angelegte lineare Funktionsachse in Richtung eines Maximalwertes von K, so lässt sich dieser bei 4 ermitteln. Diese Ergebnisse legen nahe, dass weniger Items mit hoher Komplexität behalten werden können, als niedrig komplexe und dass die Informationsbeladung die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses begrenzt. Gleichzeitig scheint in dieser Studie aber die Gesamtzahl der Objekte bei etwa 4-5 ihr Maximum zu erreichen, selbst bei niedriger Komplexität. Das Ergebnis der Studie von Alvarez und Cavanagh ähnelt insofern demjenigen der Luck und Vogel Studie von 1997. Tatsächlich scheint das menschliche Arbeitsgedächtnis bei 4-5 Objekten ein Limit zu besitzen.

An die Studie von Alvarez und Cavanagh anknüpfend untersuchten die Autoren Eng, Chen und Jiang 2005 in mehreren Tests die Zusammenhänge zwischen visueller Arbeitsgedächtniskapazität, visueller Suchzeit, Objektkomplexität, und Setsize. Als Testmaterial wurden auch hier, ähnlich wie bei Alvarez und Cavanagh (2004), Items aus sechs Komplexitätsklassen verwendet: Farben, Buchstaben, Polygone, „Squiggles“, Würfel und Gesichter (s. Abb. 6). Zunächst bestimmte man auch hier durch Ermittlung der visuellen Suchzeit die Komplexität der verschiedenen Objektklassen. Es zeigte sich ein ähnliches Ergebnis wie bereits in der Vorgängerstudie von Alvarez und Cavanagh (2004): Erhöhung der Objektkomplexität bei gleicher Setgröße führte zu einem Anstieg der visuellen Suchzeit, ebenso eine Vergrößerung des Sets bei gleicher Objektkomplexität (Ergebnisse siehe Abb. 7). Ebenso erscheint es mir für diesen ersten

Teil der Studie als berichtenswert, dass mit Verlängerung des Retentionsintervalls über 2000 ms die Leistungen der Probanden abfielen.

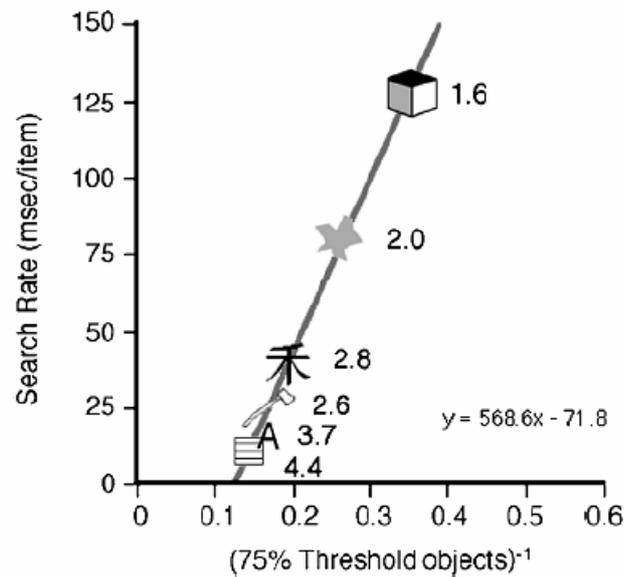


Abb. 5 - Alvarez, Cavanagh (2004); linearer Zusammenhang zwischen visueller Suchrate (Objektkomplexität) und visueller Arbeitsgedächtniskapazität. (With kind permission from SAGE Publications : Alvarez GA, Cavanagh P : The capacity of visual short-term memory is set both by visual information load and by number of objects. Psychological Science (2004) 15:106-11.)



Abb. 6 - Eng, Chen & Jiang (2005) (dort Abbildung 1): Die Abbildung zeigt Beispiele der getesteten Stimulustypen. (With kind permission from Springer Science+Business Media: Psychonomic bulletin & review (2005) 12:1127-33, Eng HY, Chen D, Jiang Y : Visual working memory for simple and complex visual stimuli. Figure 1.)

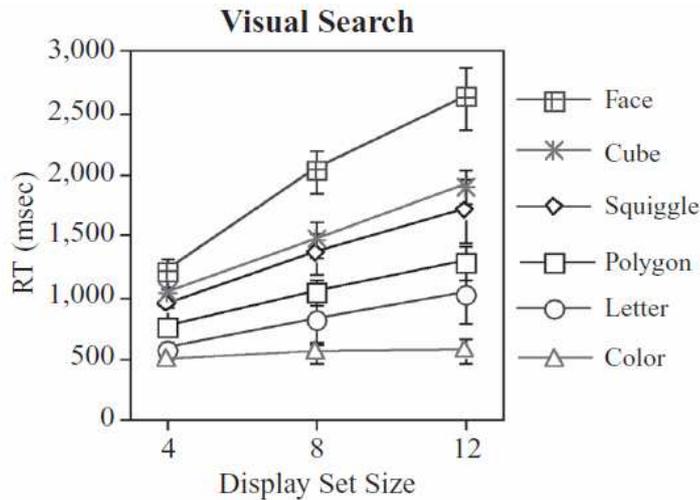


Abb. 7 - Eng, Chen & Jiang (2005); Ergebnisse Experiment 1A „Visual Search“-Teil: Zusammenhang zwischen Reaktionszeiten, Objektkomplexität und Setsize (Anzahl der dargebotenen Stimuli). (With kind permission from Springer Science+Business Media: Psychonomic bulletin & review (2005) 12:1127-33, Eng HY, Chen D, Jiang Y : Visual working memory for simple and complex visual stimuli. Figure 3.)

Der zweite Teil der Tests bestand aus Change-detection-Aufgaben, bei denen folgende Faktoren variiert wurden: Komplexität, Setgröße, Präsentationsdauer des Sets, sowie Dauer des Retentionsintervalls. Hier wurde ein Korrelationskoeffizient ermittelt, der das Verhältnis zwischen visueller Suchrate und Arbeitsgedächtniskapazität wiedergibt. Das Ergebnis (s. Abb. 8) deutet darauf hin, dass sich durch eine Verlängerung der Präsentationsdauer über 1000 ms keine Erhöhung der Arbeitsgedächtniskapazität erzielen lässt.

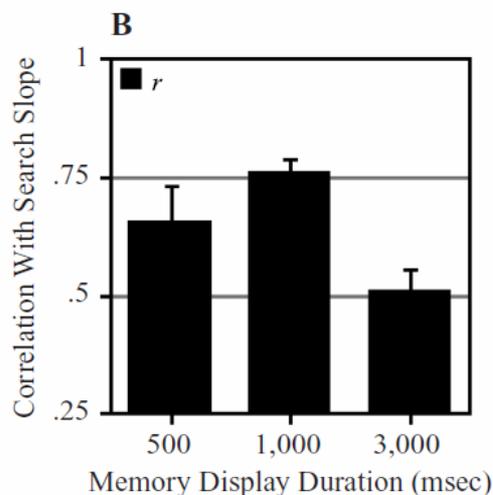


Abb. 8 - Eng, Chen & Jiang (2005); Veränderung der Korrelation von Arbeitsgedächtniskapazität und visueller Suchrate mit ansteigender Präsentationsdauer. (With kind permission from Springer Science+Business Media: Psychonomic bulletin & review (2005) 12:1127-33, Eng HY, Chen D, Jiang Y : Visual working memory for simple and complex visual stimuli. Figure 4B.)

Die von Eng, Chen und Jiang (2005) ermittelten Zeiten nahm ich als Anhaltspunkt für die Wahl der Dauer von Präsentation und Retentionsintervall in meiner eigenen Studie. Bei einer Setsize von 4 benötigten die Probanden bei den eher komplexen Stimuli (Cubes, Squiggles) ca. 1000 ms. zur Bearbeitung der Aufgabe. Die Komplexität der Items, die ich in der vorliegenden Studie verwendete, ist mit der der genannten Itemklassen bei Eng, Chen und Jiang (2005) in etwa vergleichbar. Für meine Studie, in der ich nur bis maximal Setsize 3 testete, wählte ich daher ebenso 1000 ms Präsentationszeit. Ebenso übernahm ich die Länge des Retentionsintervalles (1000 ms).

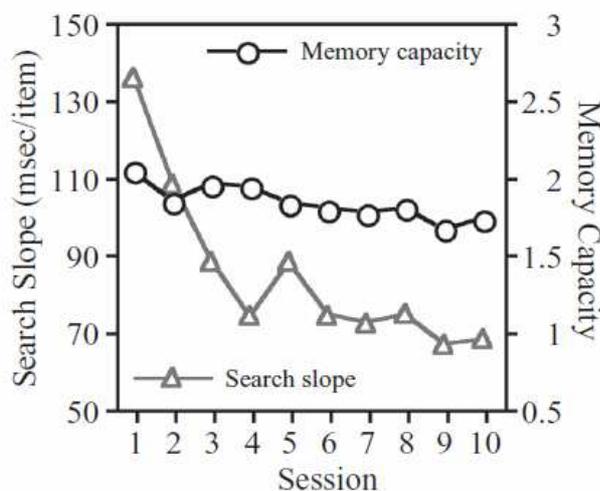


Abb. 9 - Eng, Chen & Jiang (2005); Verlauf von Gedächtniskapazität und visueller Suchzeit über die Trainingssitzungen. (With kind permission from Springer Science+Business Media: Psychonomic bulletin & review (2005) 12:1127-33, Eng HY, Chen D, Jiang Y : Visual working memory for simple and complex visual stimuli. Figure 5.)

Im dritten Teil der Studie untersuchte man den Verlauf der Arbeitsgedächtniskapazität über 10 Trainingssitzungen für alle Itemtypen. Abb. 9 zeigt die gemittelten Arbeitsgedächtniskapazitäten, als K-Index ausgedrückt. Während sich die visuelle Suchzeit verkürzte, also offenbar die trainierten Zeichen schneller erkannt wurden, blieb die Arbeitsgedächtniskapazität über alle Trainingssitzungen annähernd gleich. Dieses Ergebnis spricht gegen einen Trainingseffekt des visuellen Arbeitsgedächtnisses (s. a. Kap. 4.1). Außerdem wird von Eng, Chen und Jiang über eine starke interindividuelle Leistungsdifferenz in der Trainingsaufgabe berichtet. Dabei ließ sich interessanterweise eine negative Korrelation zwischen Suchzeit und Arbeitsgedächtniskapazität ermitteln. Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass hier die visuelle Suchzeit nicht als

Prädiktor für die Leistung des visuellen Arbeitsgedächtnisses geeignet ist, wie in der Studie von Alvarez und Cavanagh (2004) behauptet.

Da die Studienergebnisse darauf hin deuten, dass die Arbeitsgedächtniskapazität maßgeblich durch die Variablen Anzahl und Komplexität der präsentierten Items limitiert zu sein scheint, interessierte es einige Autoren, welche Strukturen auf eine Modulation dieser Variablen mit einer Aktivierungsänderung reagieren. So untersuchten 2006 Xu und Chun in einer f-MRT-Arbeit die genannten Zusammenhänge. Abb. 10 zeigt verschiedene Präsentationsweisen, die für die Testungen verwendet wurden. Die Studie bestand aus vier unterschiedlichen Tests, die als S1-S2-Aufgaben ausgeführt wurden. In 3 Tests wurden unterschiedliche Array- und Testanordnungen verwendet (s. Abb. 10, B). Bei der fMRT-Auswertung bestimmten die Autoren drei Regionen von Interesse (ROI): den superioren intraparietalen Sulcus (sIPS), den lateralen okzipitalen Sulcus (LOC) und den inferioren intraparietalen Sulcus (iIPS). Die ROIs zeigten unterschiedliches Verhalten bezüglich der getesteten Variablen. Auf eine komplexe Objektveränderung reagierten der LOC und der sIPS mit einer Aktivierungszunahme. Diese Areale waren in meiner Studie ebenso von großer Bedeutung, da ich mit komplexen visuellen Stimuli testete. Auf die Zunahme der Itemzahl reagierten bei Xu & Chun (2006) die neuronalen Strukturen in den ROIs unterschiedlich, je nach gewählter Präsentationsweise. Ich habe in meiner Studie die Präsentationsweise „Simultaneous off-centre“ verwendet.

Bei Xu und Chun (2006) nahm die Aktivierung in LOC und IPS (superiorer Anteil) mit steigender Itemzahl zu und zeigte einen Komplexitätseffekt. Die Studie weist zum einen darauf hin, dass die gegebenen Regionen eng mit der Verarbeitung visueller Repräsentationen verknüpft sind. Zum anderen wirft sie die Frage auf, ob die komplexitätssensiblen Areale möglicherweise einzelne Merkmale oder Untereinheiten der Objekte speichern, was für Komplexitätseffekt und ihre Aktivierungszunahme auf erhöhte Belastung des Arbeitsgedächtnisses (Visual Working Memory Load) ursächlich sein könnte.

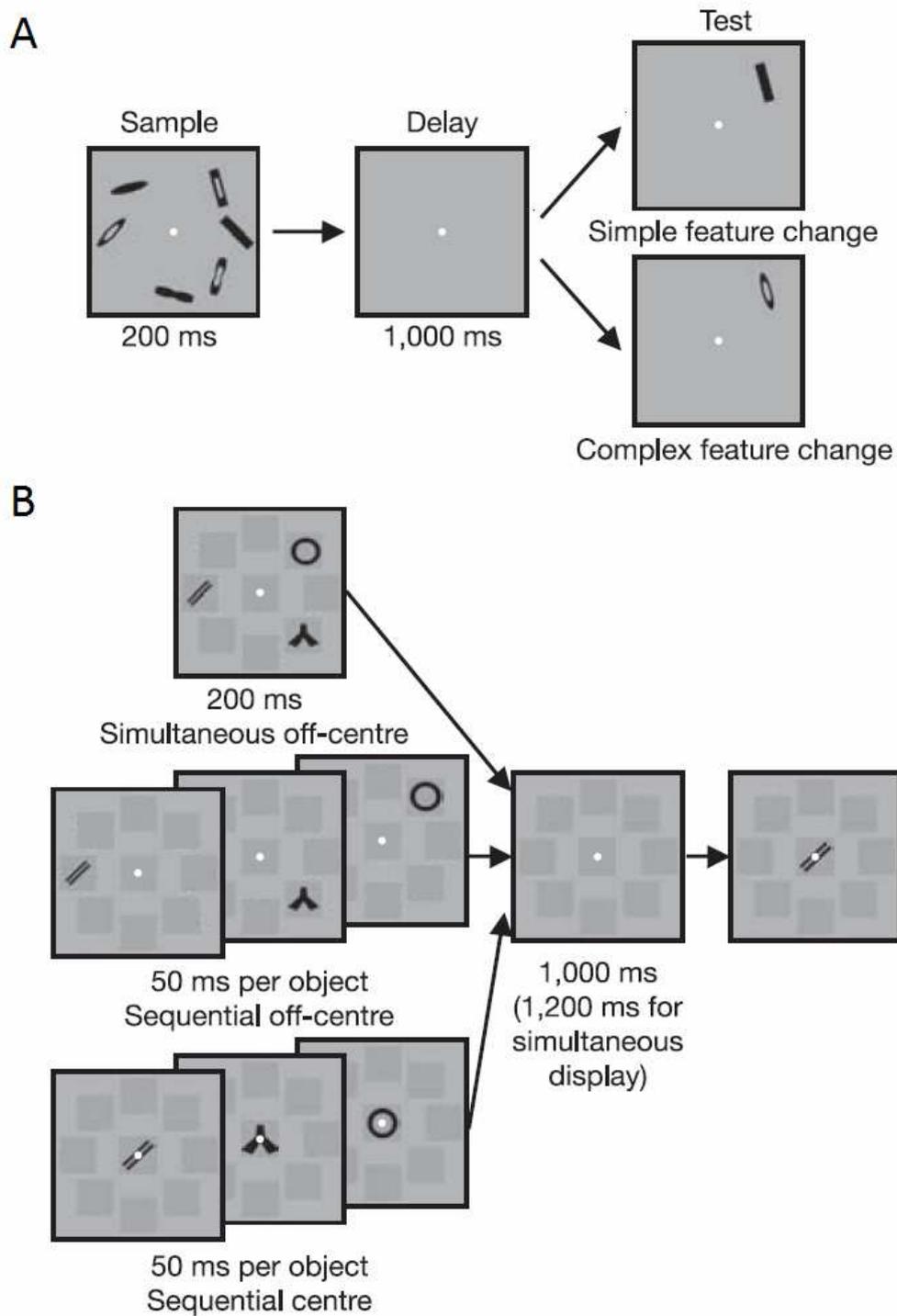


Abb. 10 - Xu & Chun (2006), modifiziert nach Fig. 2 der Originalstudie.

(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE, copyright 2006) www.nature.com

Die Abbildung zeigt die unterschiedlichen Testanordnungen in der Studie

(modifiziert nach Fig. 1 der Originalstudie).

A) Einfache und komplexe Objektveränderung;

B) unterschiedliche Präsentationsweisen. Die Anordnung „Simultaneous off-centre“ verwendete ich in meiner Studie.

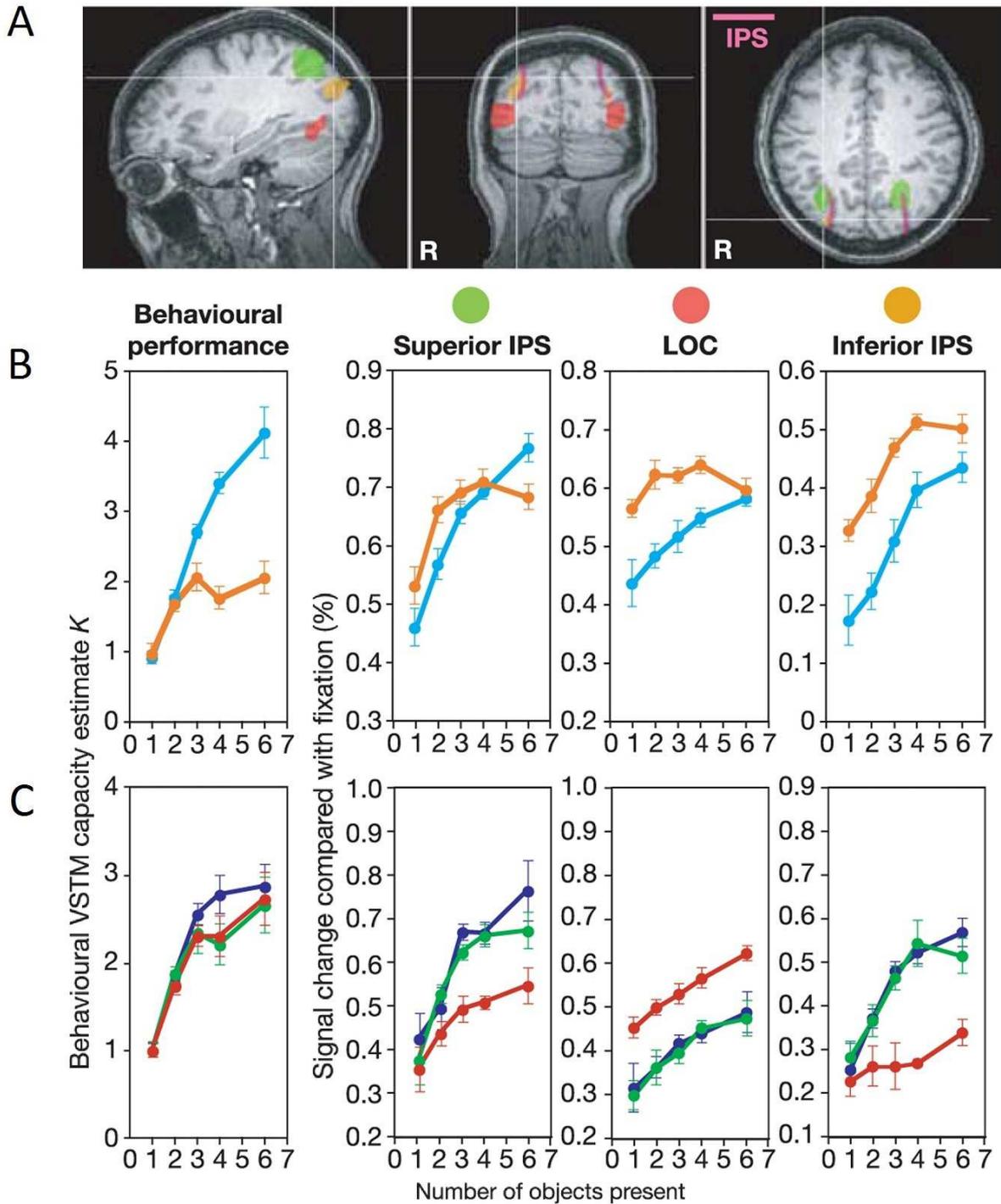


Abb. 11 - Xu & Chun (2006), modifiziert nach Fig. 2 der Originalstudie.

(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE, copyright 2006) www.nature.com

A) Lage der ROIs, lateraler okzipitaler Cortex (LOC), superiorer intraparietaler Sulcus, (sIPS) und inferiorer intraparietaler Sulcus (iIPS). **B)** Verhaltensleistungen (K-Index) und Aktivationsverlauf (Percent Signal Change) bei einfacher Objektveränderung (hellblau) und komplexer Objektveränderung (orange).

C) Verhaltensleistungen (K-Index) und Aktivationsverlauf (Percent Signal Change) bei unterschiedlichen Präsentationsweisen. Die Anordnung „Simultaneous off-centre“ verwendete ich in meiner Studie.

Max. der ROIs: rechts/links [MNI:] ● 22 -56 46 / -20 -70 42 ● 42 -68 0 / -44 -72 6 ● 26 -84 28 / 20 -88 24

3.6 Das ViAG und seine neuronalen Korrelate

Beginnt man mit Regionen, die der visuellen Perzeption nachgeordnet sind, so lässt sich feststellen, dass die Verarbeitung visueller Information grundsätzlich über zwei Pfade erfolgt. Diese Sichtweise ist weitgehend akzeptiert. Objektinformationen laufen demnach über den so genannten ventralen Pfad („ventral stream“), räumliche Aufgaben über den dorsalen („dorsal stream“), (Pinel, 2001). Genauer gesagt scheint der dorsale Pfad in Aktionsplanung, die Detektion von Bewegungen und die Lokalisierung von Objekten im Raum und deren Lagebeziehungen zueinander eingebunden zu sein, der ventrale ist anscheinend bei Objekt- und Formerkennung aktiv. Beide Pfade nehmen im primären visuellen Cortex (V1) ihren Ausgangspunkt. Der dorsale läuft durch V5 in den Parietallappen und erfährt dabei Verbindungen mit dem ventralen Pfad. Der ventrale verläuft, von V2 durch das Areal V4 in den inferioren Temporallappen (Pinel, 2001).

Bildgebende Studien zum visuellen Arbeitsgedächtnis betrachten mehrere unterschiedliche Hirnregionen. Eine viel beachtete Betrachtungsweise stammt von Fuster (1997). Danach kommt Arealen des posterioren Cortex eher die Funktion eines Informationsspeichers zu, während Anteile des präfrontalen Cortex Exekutivfunktionen übernehmen, die auch das Halten und Bearbeiten der Information umfassen (Fuster, 1997). Andere Autoren unternahmen den Versuch, den Komponenten der psychologischen Arbeitsgedächtnismodelle neuroanatomische Zuordnungen zuzuweisen. So finden sich beispielsweise in einer Übersichtsarbeit von Henson (2001) Anhaltspunkte für die neuroanatomischen Korrelate der Module des visuellen Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley und Logie. Der Visual Cache, also der postulierte Speicherort für optische Information, wird im inferior-temporalen Cortex und im anterioren Okzipitallappen vermutet. Visuell-räumlichen Funktionen wird der superiore Parietallappen zugeordnet. Den „inner scribe“ verortet man im Bereich des superioren Parietallappens (BA 7) und in den Arealen BA 6 sowie BA 47 im rechten inferioren Parietallappen (Henson, 2001).

Areale des posterioren Cortex scheinen als temporärer Speicherort optischer Information zu fungieren, vermutlich insbesondere der posterior-parietale Cortex (Todd & Marrois, 2004). Gemäß der Trennung in räumliche und Objektinformation lassen sich auch im posterioren Cortex verschiedene Areale für die Aufrechterhaltung der Repräsentation ausmachen. So findet sich bei räumlichen Aufgaben eher eine

Aktivierung im Parietalcortex, Objektaufgaben aktivieren den infratemporalen, lateral temporal-okzipitalen und Fusiformen Cortex. (Postle et al. 2000, 2003; Ranganath et al. 2004a, 2004b; Ventre-Dominey et al. 2005). Eine Studie von Song und Jiang (2006) gibt Hinweise darauf, dass die Zunahme der Komplexität einer visuellen Aufgabe zu einer neuronalen Aktivitätssteigerung in posterioren Arealen führt. Diese Studie spricht dafür, dass der superiore Parietalcortex integrierte Objekte speichert, da die neuronale Aktivität mit der Zahl der Objekte bis maximal 4 Items zunahm und für das Erinnern der Konjunktion von Farbe und Form höher war als für das Erinnern der Farbe, jedoch ebenso hoch wie jene für die Form. Im Gegensatz dazu war die Aktivität im lateralen Okzipitalcortex nicht von der Zahl der Objekte abhängig, aber sie veränderte sich mit den relevanten Merkmalen.

In anderen Studien wies der Intraparietale Sulcus bei Vergrößerung der Gedächtnislast eine verstärkte Aktivität auf. Xu und Chun (2006) zeigten, dass verschiedene Regionen unterschiedliche Sensibilität für Komplexität und Anzahl von Objekten aufweisen (s.o.). So scheint der inferiore IPS kaum, der superiore IPS und der LOC deutlich auf die Variation von Itemkomplexität anzusprechen. Demgegenüber spricht der inferiore IPS stark auf die Variation der Itemzahl an. Der laterale okzipitale Cortex ist aufgrund seiner Beteiligung an der Objekterkennung ebenso bei visuellen Gedächtnisaufgaben stärker aktiv als bei „noise images“, also optisch präsentierten Stimuli, in denen durch völlige Randomisierung der Pixel keine Konturen auszumachen sind (Xu & Chun, 2006).

Neben posterioren Cortexarealen nimmt der präfrontale Cortex (PFC). in der Informationsverarbeitung und beim kurzfristigen Behalten eine wichtige Rolle ein. In vielen bildgebenden Arbeitsgedächtnisstudien wird er daher ebenfalls betrachtet. Seine Rolle scheint in der Ausübung von Exekutivfunktionen zu bestehen. Auch scheint hier nochmals eine funktionelle Unterteilung in den dorsolateralen und den ventrolateralen PFC möglich zu sein. Einige Autoren beschreiben die Trennung nach Assoziation mit Raum- und Objektinformation, ähnlich der Theorie des dorsalen und ventralen Verarbeitungsweges optischer Information (s.o.). Für diese Betrachtungsweise sprechen Ergebnisse der Studien von Bor et al., 2001 und 2003; Constantinidis & Wang, 2004; D'Esposito et al.; 1999 und Rypma, 2006. Andere sehen die Trennung eher in der Assoziation mit unterschiedlichen Aufgabentypen. Demnach übernimmt der ventrolaterale PFC eher die Kontrolle des Haltens kürzlich encodierter Information, der dorsolaterale Teil steuert aktive Prozesse der Informationsbearbeitung und -

umstrukturierung und scheint bei Prozessen aktiv zu sein, die höhere Anforderungen an kognitive Kontrolle stellen (Petrides, 2005; Owen, 1997). Da mich besonders Areale interessieren, die nach aktueller Studienlage an der Speicherung visueller Stimuli beteiligt sind, werde ich in meiner Studie meine Beobachtungen auf posteriore Areale konzentrieren. Präfrontale Areale wurden zwar aktiv, sollen aber hier nicht im Mittelpunkt stehen und werden deshalb im Ergebnisteil nicht berücksichtigt.

Aus den Aussagen der Studienergebnisse zum Thema lässt sich schlussfolgern, dass am visuellen Arbeitsgedächtnis funktionell-neuroanatomisch eine Vielzahl von Regionen beteiligt sind (s.a. Ungerleider, Courtney & Haxby, 1998; Linden et al., 2003; Curtis & D'Esposito, 2003). Ich nehme daher an, dass es sich beim visuellen Arbeitsgedächtnis um ein Netzwerk verschiedener Hirnregionen handelt, in dem Informationen durch aktive Prozesse aufrechterhalten werden. Dabei sind posteriore Regionen offenbar für die Speicherung der visuellen Information verantwortlich. Das Augenmerk soll hier vor allem auf den okzipitalen und parietalen Regionen liegen, sowie auf Anteilen des Fusiformen Cortex des Temporallappens. In der vorliegenden Studie soll der Frage nachgegangen werden, wie sich durch Expertise die neuronale Architektur des visuellen Arbeitsgedächtnisses verändert. Hierzu wurde ein MRT-taugliches Paradigma erstellt. Zunächst soll festgestellt werden, auf welche Weise sich die neuronale Struktur beim Sehen der gegebenen Stimuli konfiguriert. Durch einen Vergleich zwischen trainierten und nicht trainierten Stimuli soll die Rekonfiguration des Netzwerkes durch Training getestet werden.

3.7 Kurzfristiges visuelles Behalten: Entwurf eines Modells

Versucht man ein Modell des Gedächtnisses zu entwerfen, dann stellt sich die Frage, wo hierin das Arbeitsgedächtnis seinen Platz findet. Zwei unterschiedliche Ansätze können hierbei unterschieden werden, die beide versuchen, den Zusammenhang zwischen Langzeit- und Kurzzeitgedächtnis zu klären. Das Arbeitsgedächtnis kann zum einen als eigenständige Einheit existieren, so wie im Modell nach Baddeley. Andere Darstellungsweisen sehen es als Teil eines Prozesses an, bei dem Langzeitwissen aktiviert und in einem Aufmerksamkeitsfokus gehalten wird. Hier ist besonders das

Modell von Nelson Cowan zu nennen. Cowan integriert das Kurzzeit- oder Arbeitsgedächtnis in ein Gedächtnismodell, das auch Langzeitspeicherung mit einbezieht (Cowan, 1988). Beide Darstellungen teilen jedoch die Ansicht, dass das Arbeitsgedächtnis zeit- und kapazitätsbeschränkt ist (Baddeley, 2009; Cowan 2001). Ich werde im Folgenden den Versuch unternehmen, meine Vorstellung von einem Arbeitsgedächtnismodell zu erläutern.

Ohne Frage muss es einen Informationsaustausch oder –abgleich zwischen visuellem Arbeitsgedächtnis und dem bereits in bestimmtem Kontext abgespeicherten Wissen geben, ohne die eine Orientierung in unserer visuellen Umwelt nicht möglich wäre. In Alltagshandlungen lässt sich leicht erkennen, dass dieser existieren muss. Wir kochen und behalten die Zutaten, die wir bereits verwendet haben. Wir merken uns die Anordnung von Gebäudeteilen auf einem Plan, um uns anschließend daran zu orientieren. Trotz seiner abstrahierten Wiedergabe der Realität bietet der Plan einen Anhaltspunkt, um uns in unserer wesentlich komplexeren Umwelt zurechtzufinden. Das Halten von Informationen im Arbeitsgedächtnis und der Abgleich mit bereits bekannten Inhalten ist die Grundvoraussetzung für diese Leistung. Dabei müssen die Aktionen nicht immer mit der vollen Aufmerksamkeit ausgeführt werden.

In der Übersichtsarbeit von Zimmer (2008) wird ein Modell vertreten, das das Visuelle Arbeitsgedächtnis in ein modalitätsübergreifendes Netzwerk integriert. Auch hier wird diskutiert, dass das Arbeitsgedächtnis als „aktiviertes Langzeitgedächtnis“ (Zimmer 2008) angesehen werden kann. Neben den erwähnten Modellvorstellungen (Cowan 1988; Zimmer 2008) existieren seit kürzerem auch Hinweise aus bildgebenden Studien, dass sich Langzeit- und Kurzzeitgedächtnis dieselben Areale teilen (Lewis-Peacock & Postle, 2008). Ich vermute, dass eine Unterteilung in eine visuell-objekteigenschaftenbezogene und räumliche Verarbeitung auch beim visuellen Arbeitsgedächtnis besteht und dass das Halten der Information entlang der visuellen Verarbeitungswege abläuft. Dafür spricht, dass Regionen des visuellen Arbeitsgedächtnisses sich entlang dieser Pfade befinden. Räumliche Information wird möglicherweise modalitätsübergreifend verarbeitet (Zimmer, 2008). Denkbar wäre ein eigenes Speichersystem für räumliche Information, analog zum „Inner scribe“ in Form eines Netzwerkes, das der Aufrechterhaltung gebildeter Repräsentationen dient. Auch hier kann von einer Verbindung zu Langzeitinformation ausgegangen werden, was räumliche Orientierung und dynamisches „Imagery“ (Bildung visuell-räumlicher Vor-

stellungen) erklären würde (s. dazu: Fleming, Steinar & Byblow, 2010; Péran et al., 2010). Diese Studien finden explizit Aktivierungen parietaler Areale während Imagery-Aufgaben. Präfrontale Areale übernehmen Kontrollfunktionen oder Funktionen der Aufmerksamkeitssteuerung die nötig ist, um Information zu speichern, abzurufen oder zu modifizieren (Linden et al., 2003; Soto et al., 2011). Als Speicher des visuellen Arbeitsgedächtnisses dienen Areale des posterioren Cortex (s. a. Kap. 3.6). Das Arbeitsgedächtnis umfasst also mehrere, räumlich getrennte Regionen. Daher erscheint es auch plausibler, von einem Netzwerk unterschiedlicher Regionen auszugehen, als von einem einzigen "Speichermodul" wie im Modell von Baddeley. Da Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis flüchtig sind und nach kurzer Zeit verblassen, gehe ich hier von einer aktiven Aufrechterhaltung der Information aus. Wenn Arbeitsgedächtnis und Langzeitgedächtnis dieselben Regionen teilen, werden auch Langzeitgedächtniseinträge dezentral gespeichert.

Inhalte des Arbeitsgedächtnisses können im Langzeitgedächtnis abgelegt werden, was unter anderem durch Training möglich ist. Denkbar ist auch der umgekehrte Weg: Langzeitgedächtniseinträge können das Visuelle Arbeitsgedächtnis unterstützen. Die Hypothese ist zulässig, dass durch Training und damit Schaffung von Langzeitgedächtniseinträgen auch die Leistung des Visuellen Arbeitsgedächtnisses steigerbar ist, da Langzeitgedächtnis und visuelles Arbeitsgedächtnis in wechselseitigem Austausch miteinander stehen. Einige Studien auf der Suche nach einem Trainingseffekt werden im folgenden Kapitel beschrieben.

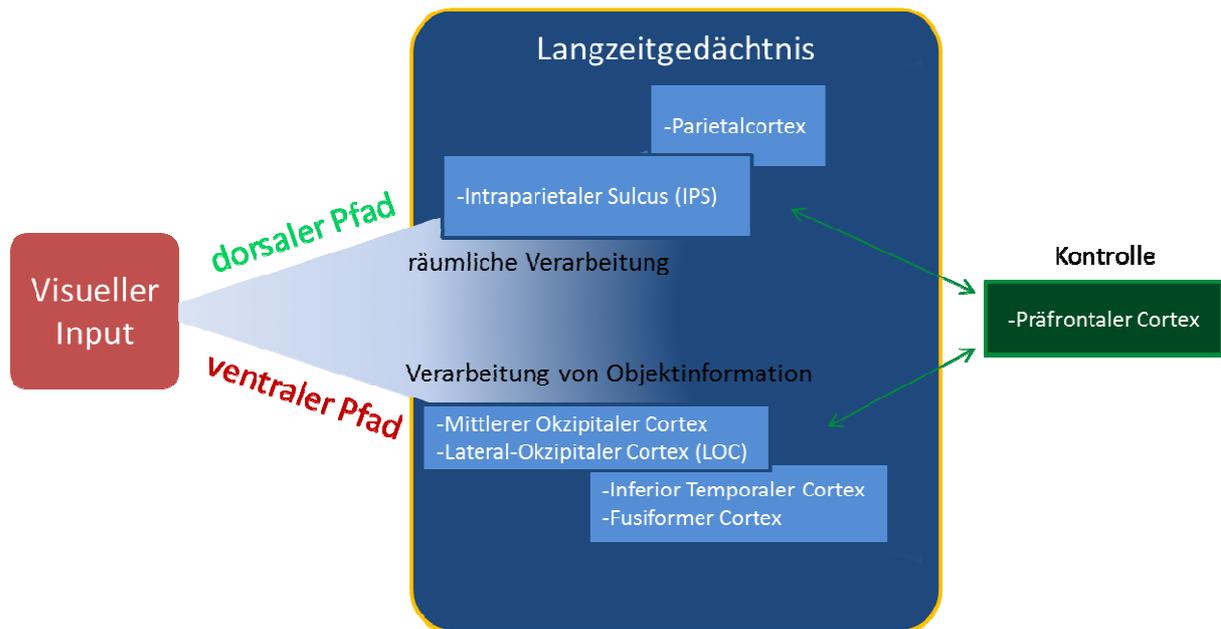


Abb. 12 - Eigener Entwurf eines Modells des visuellen Arbeitsgedächtnisses (ViAG):

Die Verarbeitung visueller Information läuft über den dorsalen und den ventralen Pfad. Auf diesen Pfaden liegen die Regionen, die das visuelle Arbeitsgedächtnis realisieren (in hellblau). Dabei bilden sich die Repräsentationen in denselben Arealen aus, in denen sie auch langfristig gespeichert werden. Der Präfrontale Cortex übt Kontrollfunktionen aus, die das (Wieder-)Herstellen und Halten der visuellen Information im Arbeitsgedächtnis ermöglichen. Das Modell orientiert sich an den Vorstellungen von Cowan (1988), und Zimmer (2008).

4 Training des Arbeitsgedächtnisses

4.1 Veränderung durch Training

Studien auf der Suche nach einem Trainingseffekt des visuellen Arbeitsgedächtnisses verwenden recht unterschiedliche Trainingsparadigmen. Daher stellt sich gelegentlich die Frage, ob tatsächlich „visuelles Arbeitsgedächtnis“ trainiert wurde, oder eher die Ausführung bestimmter Aufgabenstellungen im Sinne eines Automatisierungsprozesses (Schneider & Shiffrin, 1977). Dennoch sollen der Vollständigkeit halber hier einige Studien erwähnt werden, die einen Trainingseffekt verzeichnen und solche, die keinen Effekt finden. Zunächst kann zwischen reinen Verhaltensstudien, die den Trainingseffekt in einer Beschleunigung der Antwortlatenz und/oder Verbesserung der Antwortleistung beschreiben und bildgebenden Studien mit fMRT unterschieden werden. Letztere kombinieren Verhaltensmessungen und Bildgebung.

Veränderungen auf der Seite neuronaler Aktivierung finden beispielsweise Olesen, Westerberg und Klingberg (2004) in einer fMRT-Studie. Hier trainierten drei Teilnehmer über einen Zeitraum von 20, 24 und 30 Tagen drei verschiedene Arbeitsgedächtnisaufgaben, die der Corsi-Aufgabe ähnelten. Dabei muss die Sequenz präsentierter Punkte auf einer Matrix behalten und wiederholt werden. Vor und nach dem Experiment wurden funktionelle Kernspinnmessungen vorgenommen. Auf der Verhaltensseite ließ sich eine Verbesserung gegenüber der Kontrollgruppe, bestehend aus 11 Probanden, feststellen. Insgesamt wurden in der Studie zwei Experimente durchgeführt. Im ersten Experiment sollten die Probanden der Testgruppe ihr Arbeitsgedächtnis anhand von drei unterschiedlichen Aufgabentypen im Stil der Corsi-Aufgabe trainieren. Es handelte sich also um eine räumliche Arbeitsgedächtnisaufgabe. Jeweils vor und nach dem Training wurde eine Kernspinnmessung durchgeführt, wobei die Anforderungen dieser Tests bewusst niedrig gehalten wurden, um möglichst gute Testergebnisse zu produzieren. Im Training über einen Zeitraum von fünf Wochen waren pro Tag 90 Aufgaben zu bearbeiten. Im Vorher-nachher-Vergleich zeigte sich auf der Verhaltensseite gegenüber der Kontrollgruppe besonders eine verkürzte Reaktionszeit. Bei der fMRT-Auswertung bildete man Kontraste über die Zeit der Anfangs- gegen die Endmessung und der Kontrollbedingungen gegen die Arbeitsgedächtnisaufgaben. Es konnte eine erhöhte präfrontale und parietale Aktivität

bei der letzten gegenüber der ersten Messung festgestellt werden und eine Aktivierungsabschwächung zeigte sich im Cingulären Sulcus. In einem zweiten Experiment wurden die Probanden der Testgruppe fünfmal während der Trainingszeit einem Kernspinscan unterzogen. Im hier verwendeten Paradigma sollten sie sich die zeitliche Abfolge von für 900 ms rot hervorgehobenen Punkten auf einer 4x4 – Matrix merken. Während der Antwortphase sollten die Punkte in zeitlich richtiger Reihenfolge auf dem Bildschirm markiert werden. Hier konnten neben einer Verbesserung der zeitlichen Effizienz auf der Verhaltensseite auch trainingsbedingte Veränderungen im fMRT festgestellt werden. So zeigten sich Aktivierungszunahmen im parietalen und präfrontalen Cortex, in Thalamuskernen und Nuclei Caudati. Abnahmen zeigten Gyrus Cinguli, Inferiorer Frontalsulcus und Gyrus Postcentralis. Das Ergebnis lässt den Schluss zu, dass hier besonders Aufmerksamkeit (präfrontale Areale) und spatiale Verarbeitung (parietale Areale) trainiert wurden. Objektinformation spielte hier keine Rolle, da die „Objekte“ nur Platzhalter und visuell nicht unterscheidbar waren. Sie waren nur durch den Ort der Darbietung individualisiert.

Eine frühere fMRT-Studie von Jansma, Ramsey, Slagter und Kahn (2001) hatte die Zielsetzung, Änderungen der neuronalen Aktivität nachzuweisen, die durch das Training an sich zustande kommen. Zugrunde lag die Vorstellung, dass neuronale Prozesse durch Training derselben Aufgabe von einem kontrollierten in einen automatisierten Modus übergehen, wie von Schneider und Shiffrin (1977) behauptet. Man vermutete eine durch Automatisierung bedingte Aktivierungsabnahme in bestimmten neuronalen Arealen. Als Testparadigma wurde die sog. „Sternberg-Aufgabe“ verwendet. Dabei wird ein Target-Array, bestehend aus mehreren Konsonanten, gezeigt. In darauffolgenden Stimulus-Arrays müssen die Probanden durch Tastendruck bestätigen, ob der jeweils präsentierte Konsonant im zuvor gezeigten Target-Array enthalten war, oder nicht. Trainiert wurde immer mit konstantem Target-Set und konstantem Nontarget-Set, d.h. es gab sowohl für die Antwort „trifft zu“, als auch für die Antwort „trifft nicht zu“ feste Testanordnungen der Items. Genau wie in der später veröffentlichten Studie von Eng, Chen und Jiang (2005) wurde bereits hier ein Abfall der Reaktionszeit über den Verlauf der Trainingssitzungen berichtet. Die während der anschließend durchgeführten fMRT-Messung gewonnenen Verhaltensdaten zeigten eine signifikante Abnahme der Reaktionszeiten bei trainierten Testanordnungen, gegenüber untrainierten [$T = 11.2$; $df = 14$; $p < .001$]. Ebenso war die Fehlerwahrscheinlichkeit bei bekannten

gegenüber unbekanntem Testanordnungen reduziert [$T = 6.9$; $df = 14$; $p < .001$]. Bei der Auswertung der fMRT-Ergebnisse wurden drei Bedingungen gegen Baseline kontrastiert: Trained-Task, Novel-Task und Control-Task. Aus dem Kontrast der Novels gegen die Kontrollen wurden Regionen bestimmt, die dem Arbeitsgedächtnis zugehörig sein sollten. Auf diese Weise wurden der linke und rechte dorsolaterale präfrontale Cortex (dlPFC), das rechte supplementärmotorische Areal (SMA), der rechte Superiore Parietalcortex und Regionen im Bereich Cuneus und Præcuneus bestimmt. Trainingsbedingt zeigten sich neben einem signifikanten Overall-Effekt im Sinne einer Aktivierungsabnahme [$F(1,14) = 12.02$, $p = .004$] auch Trainingseffekte für einzelne Arbeitsgedächtnisregionen. Besonders erwähnenswert erscheint mir in diesem Zusammenhang die signifikante Aktivierungsabnahme im superioren Parietalcortex.

In beiden vorgenannten Studien wurden keine Einzelobjekte trainiert. Mich interessierten durch spezifisches Training bestimmter visueller Stimuli erzielte Veränderungen sowohl auf Verhaltens- als auch auf neuronaler Ebene. Eine Studie, die keinen Trainingseffekt findet, dennoch aber Einzelobjekte trainierte, war die bereits in Kap. 3.5 erwähnte von Eng, Chen und Jiang (2005). Es handelte es sich um eine reine Trainingsstudie ohne fMRT-Messungen. Hier bestimmte man, anknüpfend an die Studie von Alvarez und Cavanagh (2004, s.o.) die Visuelle Suchzeit („visual searchslope“) und deren Veränderung im Verlauf mehrerer Sitzungen. Diese hatte sich in der Vorgängerstudie als guter Prädiktor für die Abschätzung der Arbeitsgedächtniskapazität herausgestellt. Während bei Eng, Chen und Jiang (2005) die Visuelle Suchzeit über die Sitzungen einen nahezu kontinuierlichen Abwärtstrend zeigte [$F(9,45) = 2.45$, $p = .023$], konnte eine Steigerung der visuellen Arbeitsgedächtniskapazität nicht festgestellt werden [$F(9,45) < 1$, n.s.], (s. Abb. 9). Die Teilnehmer verblieben über das gesamte Training bei konstanter Gedächtnisleistung.

Olson und Jiang (2004) sprechen sich ebenso gegen einen Trainingseffekt aus. Auch hier handelte es sich um eine reine Verhaltensstudie. Ihre Studie, bestehend aus zwei Teilen, testete zum einen eine Verbesserung der Arbeitsgedächtniskapazität durch Training für räumliche Aspekte, hier die räumliche Verteilung gefüllter Quadrate auf einem Bildschirm. Im zweiten Teil, der für meine Studie relevanter ist, wurden unterschiedlich komplexe Items verwendet. Über den Verlauf des Trainings wurde auch in dieser Studie kein signifikanter Trainingshaupteffekt gefunden [alle $F_s < 1$]. Auch alle betrachteten Interaktionseffekte wurden nicht signifikant [alle $p_s > .20$]. In einem weiteren Teil der

Studie versuchte man, einen Trainingseffekt auf das Visuelle Kurzzeitgedächtnis in Bezug auf visuelle und räumliche Leistungen nachzuweisen. Durch die Schaffung von Langzeitgedächtniseinträgen für bestimmte Stimuli, sowie für unterschiedliche Lokalisationen sollte eine Verbesserung der Leistung des Arbeitsgedächtnisses erzielt werden. Dazu trainierten die Probanden in S1-S2-Aufgaben (s.o.) bestimmte räumliche Konstellationen von grünen Quadraten und visuelle Stimuli. Im der ersten Testreihe wurden also bestimmte Arrays gezeigt und nach einem Retentionsintervall sollte das Test Array mit dem Ausgangsarray verglichen werden. Die ersten beiden Experimente sollten zur Langzeitspeicherung räumlicher Repräsentationen führen. 6, 9 oder 12 grüne Quadrate wurden auf einer (für die Probanden unsichtbaren) Matrix des Bildschirms an bestimmten Positionen gezeigt. Während die Probanden über das Training eine Reduktion des Setsize - Effektes zeigten, sich also ihre Leistungen bei größeren Arrays im Verhältnis zum Beginn des Trainings verbesserten, stellte man keine signifikante Veränderung des Effektes für alte und neue Bedingungen fest. Das heißt, Aufgaben mit bereits „erlernten“ Konstellationen wurden etwa gleich gut gelöst wie neue, zuvor ungesehene. Um die Trainingseffizienz zu prüfen, wurde ein abschließender Test durchgeführt, in dem die Probanden „bekannte“ Konstellationen von „neuen“ unterscheiden sollten. Tatsächlich waren Langzeitgedächtniseinträge für bekannte Konstellationen vorhanden. Ein vergleichbares Ergebnis zeigte sich während der zweiten Testreihe für die präsentierten visuellen Objekte. Während diese zwar mit der Zeit gelernt wurden, brachte dies dennoch keinen Profit für die Arbeitsgedächtnisaufgabe. Auch hier konnte man keinen Unterschied zwischen Aufgaben feststellen, in denen gelernte, und solchen, in denen neue Objekte präsentiert wurden.

Die beiden letztgenannten Studien legen die Vermutung nahe, dass sich keine itemspezifischen Effekte durch Training erzielen lassen. Dies überrascht, denn die Alltagserfahrung, und auch Daten aus Studien mit Experten (s. unten) stehen im Gegensatz zu diesen Ergebnissen. Hier zeichnet sich ab, dass Experten für das ihnen geläufige Material – beispielweise chinesische Schriftzeichen für Schriftkundige – eine höhere Arbeitsgedächtniskapazität haben als Novizen. Diesen Sachverhalt habe ich mir für meine Trainingsstudie zu Nutze gemacht.

4.2 Die Verwendung chinesischer Schriftzeichen als Items

Soll die Leistung des visuellen Arbeitsgedächtnisses gemessen werden, muss eine Unterstützung des Arbeitsgedächtnisses durch andere Faktoren möglichst ausgeschlossen werden. In psychologischen Gedächtnistests werden zwar gerne Piktogramme, einfache geometrische Formen und bekannte Schriftzeichen verwendet, was in einer Studie zum visuellen Arbeitsgedächtnis aber zu folgenden Nachteilen führen könnte: Bei Piktogrammen handelt es sich um graphische Symbole, die Sachverhalte in abstrahierter Form wiedergeben (Das aktuelle wissen.de Lexikon, 2004), und deshalb auch semantisch und phonologisch verarbeitet werden könnten. Bekannte Schriftzeichen aus einer Alphabetschrift machen eine Mitbenutzung der phonologischen Schleife möglich. In der folgenden Studie sollen Items verwendet werden, die aus der chinesischen Schrift stammen. Chinesische Schriftzeichen entstammen einem Schriftzeichensystem, das völlig anders funktioniert als die Alphabetschriften. Die Einzelzeichen bestehen dabei zumeist aus einem Lautzeichen und einem Zeichen, das einen Hinweis auf die Semantik des Gesamtzeichens liefert. Noch kleinere Einheiten stellen die sogenannten Radikale dar, nach denen Schriftzeichen in chinesischen Wörterbüchern gelistet sind (Chen, 1999). Betrachtet man den formalen Aufbau dieser Radikale, so handelt es sich zunächst um Strichgebilde, deren unterschiedliche Komplexität sich hauptsächlich aus der verschiedenen hohen Anzahl Striche ergibt, aus denen sie aufgebaut sind (Sun, Zimmer & Fu, 2011). Ich habe mich für die Verwendung chinesischer Radikale aus zwei Gründen entschieden. Zum einen stellen sie für den Unkundigen „bedeutungsfreie“ und phonologisch nicht nutzbare Gebilde dar. Dadurch werden auch Strategien der Probanden, wie das Halten der Items in der phonologischen Schleife, oder das Benennen erschwert, wodurch eine möglichst rein formal-visuelle Verarbeitung erzielt werden soll. Andererseits entstammen die Radikale einem wirklich existierenden, erlernbaren Schriftzeichensystem, das von mehr als einer Milliarde Menschen beherrscht wird. Auf die Einflüsse von Expertise auf die Verarbeitung chinesischer Schriftzeichen wird im folgenden Kapitel eingegangen.

4.3 Expertiseeffekte

Um die chinesische Schrift zu beherrschen, muss eine Vielzahl von Schriftzeichen erlernt werden. Wie jede Sprache unterliegt auch die chinesische dabei Wortneuschöpfungen. Neben dem Erlernen der herkömmlichen müssen auch immer wieder neue Schriftzeichen erlernt werden, die man für aktuelle technische Entwicklungen kreiert hat. Chinesen eignen sich also durch Lernvorgänge im Laufe Ihres Lebens ein Expertenwissen an, das zur Speicherung bestimmter Schriftzeichen im Langzeitgedächtnis führt. Dabei werden Informationsanteile des Schriftsystems als Prototypen gespeichert und können bei Bedarf abgerufen werden (Tan et al., 2005). Dieses Expertenwissen bringt gegenüber Unkundigen offenbar im Umgang mit diesen Zeichen einen Vorteil, auch für Leistungen des Visuellen Arbeitsgedächtnisses. Darauf weist unter anderem eine Verhaltensstudie von Zimmer & Fu (2008) hin. Hier wurden die Erinnerungsleistungen von chinesisch schriftkundigen und –unkundigen Probanden, ausgedrückt durch den K-Index, für drei Itemgruppen miteinander verglichen. Als Material dienten chinesische Schriftzeichen, Pseudozeichen, die sich aus Radikalen chinesischer Schriftzeichen zusammensetzen, allerdings frei kombiniert, sowie Nonsensezeichen, im formalen Aufbau chinesischen Schriftzeichen ähnelnd, jedoch frei erfunden. Als Kontrollbedingung wurden Farbplättchen verwendet. Erwartungsgemäß zeigte sich bei den Chinesen eine stufenweise Abnahme des K-Index von den realen Schriftzeichen hin zu den Nonsensezeichen. Für Unkundige wurden ähnliche und schlechte Leistungen für alle drei Itemgruppen gefunden. Chinesen profitierten also offenbar von ihrem Langzeitwissen und ihre Leistungen brachen zunehmend ein, wenn immer weniger auf Langzeitwissen zur Lösung der Aufgabe zurückgegriffen werden konnte. Für die nicht Schriftkundigen, also Nicht-Experten, ergab sich die Schwierigkeit, Items aller drei Itemgruppen kurzzeitig zu speichern, ausschließlich aus äußeren Aspekten. Hier zeigte sich deutlich eine Abhängigkeit der Speicherkapazität von der Komplexität der Stimuli, d.h. es wurden mehr einfache als komplexe Zeichen erinnert. Im Gegensatz dazu ließ sich für die echten Schriftzeichen bei den Schriftkundigen kein Komplexitätseffekt ermitteln; die Kapazität des ViAG für komplexe und einfache Zeichen war identisch. In dieser Gruppe beschränkte sich dieser Effekt auf Nonsensezeichen. Dies veranlasste die Autoren, im Zusammenhang mit visuellen Stimuli oder Items von „exogener“ und „endogener“ Komplexität (Zimmer & Fu, 2008) zu sprechen. Unter

exogener Komplexität verstehen sie die äußerlich geometrischen Eigenschaften wie Symmetrie, spezifische Details oder Abgrenzbarkeit zu anderen Items. Exogen werden, so die Meinung der Autoren, Items verarbeitet, für die keine Langzeitgedächtnisrepräsentationen vorliegen. Im Gegensatz dazu stelle Endogene Komplexität eine Form dar, die von der Verfügbarkeit von Langzeitwissen über das Item oder seine Prototypen abhängig sei. Man könne dies auch als "wahrgenommene Komplexität" (Zimmer & Fu, 2008) bezeichnen. Fehlen Langzeitgedächtniseinträge vollständig, wie im Falle der Nonsenszeichen, dann wirkt alleine die exogene Komplexität. In Übereinstimmung hierzu zeigte sich für diese Stimuli auch bei Chinesen eine Abhängigkeit von der „exogenen“ Komplexität (Zimmer & Fu, 2008).

Es ist daher anzunehmen, dass die Gruppe der Schriftkundigen im Gegensatz zu der Gruppe der Unkundigen über eine Möglichkeit verfügt, sich ihr lexikalisches Langzeitwissen verfügbar zu machen und damit die Leistung des visuellen Arbeitsgedächtnisses zu verbessern. Sieht man das Arbeitsgedächtnis als eine Art im Zustand der Aktivierung gehaltenes Netzwerk an, wofür zum Beispiel in den Modellen von Cowan oder Zimmer plädiert wird (Cowan, 1988; Zimmer 2008), und deren Meinung ich mich anschließen möchte, so ist es auch wahrscheinlich, dass dieser Performanzunterschied zwischen schriftkundigen und -unkundigen Probanden ein Korrelat auf der Ebene neuronaler Aktivierung hat. Die Unterschiede könnten in der Rekrutierung unterschiedlicher Hirnareale, aber auch in unterschiedlicher Aktivierungsstärke derselben Module zu suchen sein. Langzeitwissen, welches letztlich offenbar als „Expertenwissen“ für das visuelle Arbeitsgedächtnis genutzt werden kann, kann durch Training erworben werden; üblicherweise das Ergebnis eines lang dauernden Lernprozesses. In der folgenden Untersuchung soll einerseits festgestellt werden, ob Training einen positiven Effekt im Sinne einer Leistungssteigerung auf das visuelle Arbeitsgedächtnis hat. Andererseits interessiert mich, wie sich die Rekonfiguration des ViAG durch Training gestaltet, und ob bereits der relativ kurze Übungszeitraum von vier Wochen zur Ausbildung von Langzeitgedächtniseinträgen führt. Dieser Fragestellung soll mit einer fMRT-Trainingsstudie nachgegangen werden, die einen Vergleich zwischen trainiertem und nicht trainiertem Material ermöglicht.

4.4 Einführung der Fragestellung

Die vorliegende Trainingsstudie sollte die These prüfen, ob bereits das reine Erlernen chinesischer Schriftzeichenbausteine (Radikale), durch Nicht-Experten ohne Kenntnis über den semantischen und phonologischen Kontext geeignet ist, ein Expertenwissen zu schaffen, von dem das visuelle Arbeitsgedächtnis profitiert. Neben diesen spezifischen Effekten, die sich auf das Erlernen spezieller Items beziehen, wurden auch allgemeine Übungseffekte erwartet. Da zur besseren Vergleichbarkeit während der gesamten Studie das gleiche Paradigma verwendet werden sollte, bestand die Möglichkeit einer „Einübung des Aufgabentypus“. Um diesen Effekt isolieren zu können, wurde in meiner Studie ein weiterer Itemtyp, so genannte „Fleckfiguren“ (Abb. s.u.) verwendet. Sie wurden in der gleichen Aufgabe bearbeitet, aber nie trainiert und sie haben auch andere strukturelle Eigenschaften als die trainierten Zeichen – Form und räumliche Verteilung von Flecken im Gegensatz zur Anordnung von Strichen in Schriftzeichen. Außerdem wurde eine Gruppe strukturell gleicher chinesischer Schriftzeichen gezeigt, die im Trainingsmaterial nicht vorkommt.

Das Ziel der Studie sollte es sein, die erwarteten Verhaltensänderungen im Sinne einer Performanzsteigerung des visuellen Arbeitsgedächtnisses für trainiertes Material mit Aktivierungsänderungen auf neuronaler Ebene zu korrelieren. Aus diesem Grund wurde in meiner Studie eine funktionelle Kernspinmessung vor und nach dem Training vorgenommen. Neben generellen arbeitsgedächtnisassoziierten Arealen des posterioren Cortex gilt dabei mein besonderes Augenmerk der sog. „Visual Word Form Area“ (VWFA). Hier sprechen Studien für eine Aktivierungsabnahme (Xue & Poldrack, 2007). Es soll daher getestet werden, ob bereits eine vergleichsweise kurze Übungsdauer eines unbekanntes lexikalischen Materials zu einer Aktivierungsabnahme in der VWFA führt. Diesem Areal, lokalisiert im linken Fusiformen Gyrus, wird eine Assoziation mit lexikalischer Prozessierung zugeschrieben (Cohen, 2000; Hillis et al., 2005; Kronbichler et al., 2004). Es wird aber auch mit der Prozessierung anderer, nichtlexikalischer visueller Objekte in Verbindung gebracht (Price & Devlin, 2003). Andere stellen in Frage, dass diese VWFA spezifisch für die Verarbeitung von Schrift ist. Die Autoren Xue & Poldrack behaupten in ihrer Studie aus dem Jahr 2007, dass es die Leistung des als VWFA bezeichneten Areales ist, durch Training charakteristische Untereinheiten eines ähnlich strukturierten Materials zu erfassen (Xue & Poldrack, 2007).

Beim Training in meiner Studie wurden innerhalb der S1-S2-Aufgabe unterschiedliche Setsizes verwendet, um eine unterschiedlich hohe Belastung des Arbeitsgedächtnisses zu erreichen. Daher war es auch von Interesse, die Frage nach dem neuronalen Korrelat dieser unterschiedlich hohen Gedächtnislast zu stellen. Zusätzlich sollte festgestellt werden, ob es durch Training in den genannten Regionen zu einer neuronalen Aktivitätsänderung kommt, im Sinne einer Aktivierungszu- oder -abnahme. Dabei erwarte ich aus folgendem Grund eher eine Aktivitätsabnahme.

In einer Arbeit von Wiggs und Martin (1998) stellen die Autoren einen Zusammenhang zwischen perzeptuellem Priming, also der wiederholten Exposition mit denselben visuellen Stimuli, und neuralen Veränderungen her. Perzeptuelles Priming führt zu einer erleichterten Verarbeitung von Stimuli, besserer und schnellerer Wiedererkennungslleistung und geht mit einer Verminderung der neuralen Antwort („Repetition Suppression“) einher. Die Ursache dieser Aktivitätsminderung wird einer „selektiveren Repräsentation“ visueller Stimuli vermutet, die ihrerseits auch die Ursache für die beobachteten Verhaltensänderungen sei (Wiggs & Martin, 1998; Modellvorstellung s. Abb. 13). Wiggs & Martin stützen ihr Modell auf schon früher aus Primatenstudien gewonnenen Erkenntnissen zur Rekonfiguration von Neuronenverbänden, die an der Repräsentation visueller Stimuli beteiligt sind (Desimone, 1996). Desimone beschreibt ein abnehmendes Feuern von Neuronen in Arealen, die an der visuellen Repräsentation von Stimuli beteiligt sind, bis hin zu deren Ausscheiden aus dem Verband der beteiligten Neurone. Begründet wird dies mit einer „Schärfung“ der Repräsentation (Desimone, 1996). Durch eine Vielzahl weiterer Studien wurde der Zusammenhang zwischen wiederholter visueller Darbietung und einer Abnahme neuronaler Antwort ebenso bestätigt (Vidyasagar, Stancak & Parkes, 2010; Parkes et al., 2004; Cabeza & Nyberg, 2000). Ich nehme an, dass das Training der visuellen Stimuli in der vorliegenden Studie ebenfalls dazu führt, dass diese leichter repräsentiert werden können. Damit einhergehend wären Effekte auf der Verhaltensseite zu erwarten. Anzunehmen wäre auch eine Aktivierungsabnahme („Repetition Suppression“) in beobachteten Regionen des visuellen Arbeitsgedächtnisses. Generelle Trainingseffekte könnten hingegen für Automatisierungsprozesse bestimmter Netzwerke sprechen, was aber nicht Gegenstand der Untersuchung sein soll.

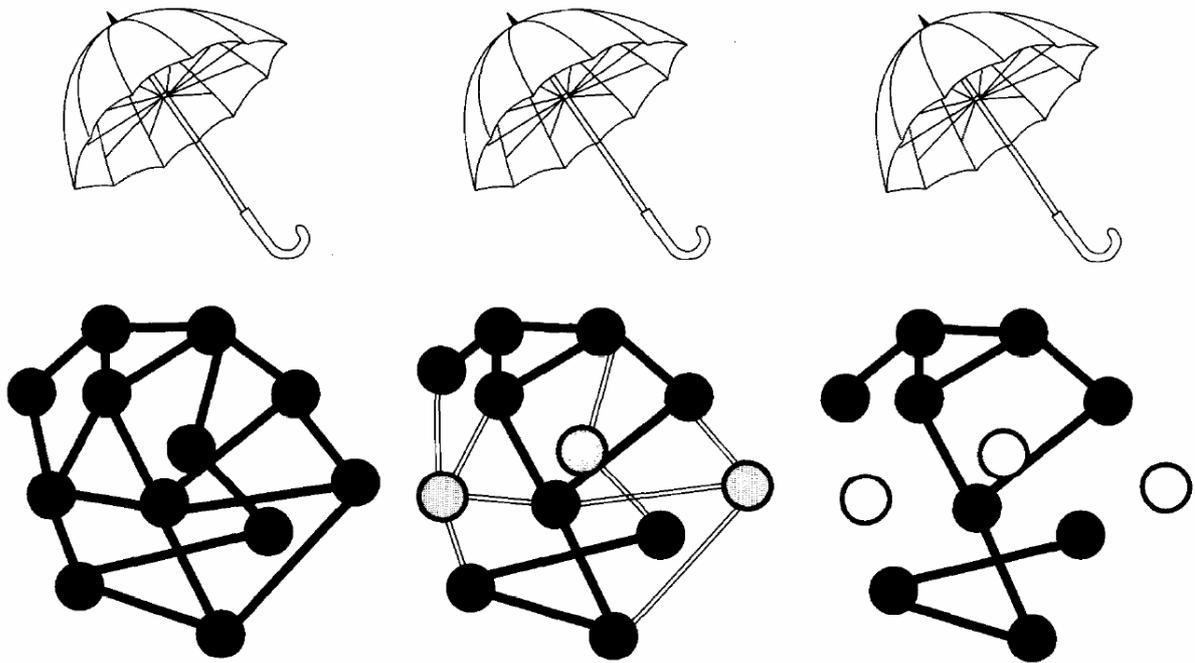


Abb. 13 – Veränderungen in einem neuronalen Netzwerk durch wiederholte Exposition mit demselben Stimulus. (Reprinted from "Current Opinion in Neurobiology" 8:227-33. Wiggs CL, Martin A : Properties and mechanisms of perceptual priming (1998), Figure 1, with permission from Elsevier.

5 Material und Methodik



Abb. 14 - Beispiele für verwendete Items; eine Abbildung des gesamten Materials findet sich im Anhang.

5.1 Material

In der vorliegenden Studie kamen zwei unterschiedliche Zeichentypen zum Einsatz: chinesische Schriftzeichen und Fleckfiguren. Um Zeichen gleicher Größe zu erzeugen, wurden alle verwendeten Items auf die Größe 60 x 60 Bildpunkte gebracht. 214 chinesische Radikale wurden aus einem frei im Internet zur Verfügung stehenden Zeichensatz entnommen und auf die gewünschten Maße skaliert. Bei den Fleckfiguren handelt es sich um monochrome, fleckmusterartige Gebilde, die mit einem Programm zufällig erzeugt wurden (Programmierung: Dr. Christoph Krick, Universitätsklinikum des Saarlandes, Abt. für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie). Ihrer Erzeugung liegt eine 4 x 4 Matrix zugrunde, Kanten wurden abgerundet („smoothing“). Hier wurde aus insgesamt 300 zufällig erzeugten Fleckfiguren eine Auswahl getroffen. Außerdem wurden für die MRT-Messung aus den jeweiligen Grauwerten einer jeden Fleckfigur, sowie eines jeden chinesischen Schriftzeichens, formatgleiche Items generiert. Dazu wurden für jedes Zeichen dessen schwarze und weiße Pixel zufällig auf einer Fläche von 60 x 60 Bildpunkten verteilt und so zusätzliche Items erzeugt, die im Grauwert den Ausgangsitems entsprechen. Diese werden im Folgenden als Grauwertitem oder „Grays“ bezeichnet.

5.1.1 Vorselektion der Items

Fleckfiguren

12 Psychologiestudenten nahmen an der Vorselektion der Fleckfiguren teil. Ziel war es, aus der Fülle der zur Verfügung stehenden Gebilde diejenigen auszuwählen, die am brauchbarsten für das Hauptexperiment erschienen und daraus einen Pool zu erstellen, aus dem für alle Teilnehmergruppen Items mit vergleichbar komplexem Aufbau und möglichst wenig subjektivem Bedeutungsinhalt zusammengestellt werden konnten. Ein von mir in E-Prime erstelltes Programm präsentierte die Figuren während eines begrenzten Zeitraumes (2 Sekunden) zentral auf dem Bildschirm. Danach erschien ein Auswahlfenster, um durch Anklicken von angezeigten Buttons Komplexität und Bedeutungsinhalt subjektiv zu beurteilen. Je Auswahlkriterium standen fünf Stufen (von „wenig komplex“ bis „sehr komplex“ und von „bedeutungsfrei“ bis „eindeutiger Bedeutungsinhalt“) zur Auswahl. Es wurden die Mittelwerte des Ratings über alle Testpersonen gebildet und die Fleckfiguren in einer Rangreihe entsprechend ihrer mittleren Ratingwerte gebracht. Diese Rangreihe wurde am Median geteilt und es wurden jeweils die 30 nächstliegenden Figuren in auf- und absteigender Richtung ausgewählt. Auf diese Weise wurden 60 Figuren mit mittlerer Komplexität bestimmt, die alle als weitgehend bedeutungsfrei gelten können.

chinesische Schriftzeichen

Bei den chinesischen Schriftzeichen wurde als Kriterium für die Bewertung der Komplexität eines Zeichens die Anzahl der Striche herangezogen, aus denen das Zeichen aufgebaut ist. Dadurch wurden ebenso 60 Schriftzeichen mittlerer Komplexität zum Einschluss in das Hauptexperiment ausgewählt.

5.2 Studiendesign

Die Studie wurde als Trainingsstudie konzipiert und vollständig als Messwiederholungsdesign realisiert. Sie bestand aus einer Vorhermessung zur Bestimmung der Ausgangsperformanz, einer Reihe von Trainingssitzungen und einer Nachhermessung.

Zu beiden Messzeitpunkten wurde eine Arbeitsgedächtnisaufgabe im funktionellen MRT bearbeitet. Die beiden MRT-Messungen fanden im Abstand von 4 Wochen statt. Im dazwischen liegenden Intervall führten die Probanden zu Hause ihre Trainingssitzungen mit chinesischen Zeichen durch.

Die Durchführung des Hauptversuchs als Pre-Post-Studie von zwei zeitlich getrennten MRT-Messungen ist notwendig, um einen Vergleich sowohl von Seiten der Verhaltensleistung, als auch seitens der funktionellen neuronalen Aktivationsänderungen zu ermöglichen. Neben dem trainierten Material wurde während der fMRT-Messungen auch nicht trainiertes Material bearbeitet, sodass jeder Proband auch Daten für seine eigene Kontrollbedingung erzeugte. Unspezifische Trainingseffekte oder Effekte der bloßen Retestung werden in Veränderungen in der Kontrollbedingung sichtbar. Verbesserungen im trainierten Material, die über jene der Kontrollbedingung hinausgehen, kann man folglich als trainingsbedingte Veränderung interpretieren. Das nicht trainierte Material der Wiederholungsmessung war entweder vom gleichen Typ wie das trainierte (ebenfalls chinesische Zeichen), aber die spezifischen Zeichen waren unbekannt, oder es war strukturell unterschiedlich. Im letzten Fall wurden die Fleck-Figuren genutzt. Bei den nicht trainierten Zeichen handelt es sich zwar um chinesische Schriftzeichen, aber diese spezifischen Zeichen kamen nicht im Training vor. Um die Performanz in der Arbeitsgedächtnisaufgabe zu messen, wurde die Anzahl der Reize auf dem Array (Setsize) variiert. Es waren zwischen 1 und 3 Zeichen zu sehen. In den Trainingssitzungen wurde zusätzlich eine Setgröße von 4 Reizen präsentiert, um die Anforderungen hoch zu halten.

Im Anschluss an die zweite Sitzung wurde eine Lernerfolgskontrolle durchgeführt. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Probanden tatsächlich Langzeitgedächtniseinträge für „ihre“ trainierten Schriftzeichen aufgebaut hatten (Beschreibung der Lernerfolgskontrolle s. in Kap. 5.3.4).

Tab. 1 - Studiendesign

	Pre-training-Messung (t1)	Training	Post-training-Messung (t2)
	Run 1 → Anatomie → Run 2		Run 1 → Run 2
Trainierte chinesische Zeichen	Pre-training-Leistung	Dauer : 4 Wochen	Itemspezifische Post-training-Leistung
Untrainierte chinesische Zeichen		----	Material- aber itemunspezifische Post-training-Leistung
Fleckfiguren	Pre-training-Leistung	----	Unspezifische Trainingseffekte auf Post-training-Leistung
			Lernerfolgskontrolle

5.3 Aufbau der einzelnen Experimentalphasen

5.3.1 Die Arbeitsgedächtnisaufgabe

Das Paradigma wurde in allen Abschnitten der Studie als S1-S2-Paradigma ausgeführt. Die Steuerung erfolgt mittels eines PC durch das Programm E-Prime (E-Prime 2.0, Psychology Software Tools, Inc). Dabei lief jeder Durchgang („Trial“) nach folgendem Schema ab: Die Probanden sehen kurz ein Array, das sie sich merken sollen. Auf dem Array ist eine unterschiedliche Anzahl von Symbolen zu sehen. Kurze Zeit später wird ein Testreiz eingeblendet, der dahingehend zu beurteilen ist, ob er eben bereits gesehen wurde, oder nicht. Im Falle eines Non-Matches handelt es sich um ein Item, das in diesem Durchgang nicht zu sehen war. Im Folgenden wird die Bezeichnung „Ausgangs-Set“ für das erste Array benutzt, während ich „Test-Set“ für das zu beurteilende zweite Array nutze. Die Versuchspersonen sollten bei jedem Trial die Entscheidung treffen, ob ein präsentiertes Item im Ausgangs-Set enthalten war. Ein Ausgangs-Set konnte aus minimal einem, maximal drei Items bestehen. Dabei wurde jedes Zeichen pro Array nur einmal gezeigt. Alle Items in einem Set gehörten der gleichen Kategorie an. Der Hintergrund des Bildschirms wurde als Präsentationsfläche in mittlerem grau (50%) gewählt. Bei der Anordnung der Items auf dem Bildschirm entschied ich mich für eine

Kombination aus einer dezentralen Anordnung der Items in dem Array und einer zentralen Darbietung des Targets, ähnlich wie die Anordnung in der vergleichbaren Studie von Xu & Chun (2006). Die Items wurden an maximal drei (im Training vier) von acht belegbaren Positionen gezeigt, die um den Mittelpunkt herum angeordnet waren. Der Mittelpunkt wurde durch einen Fixationspunkt markiert, der bis auf den Zeitraum der Darbietung des Test-Sets während des gesamten Trials sichtbar war. Der Punkt war in der Zeit des Intertrial-Intervalls schwarz und er veränderte 250 ms vor dem Erscheinen eines Arrays seine Farbe zu Rot, um den unmittelbar bevorstehenden Trialbeginn anzukündigen. Mit Ablauf des Antwortfensters wechselte er zu schwarz. Alle Trials waren im zeitlichen Ablauf immer gleich aufgebaut. Auf die Vorankündigung durch den Farbwechsel des Mittelpunkts folgte nach 250 ms die Präsentation des Ausgangs-Sets. Dieses blieb für 1000 ms sichtbar und es folgte ein Retentionsintervall von 1000 ms Dauer. Im Retentionsintervall war lediglich der rote Mittelpunkt im Zentrum der Präsentationsfläche sichtbar. Im Retentionsintervall war lediglich der rote Mittelpunkt im Zentrum der Präsentationsfläche sichtbar.

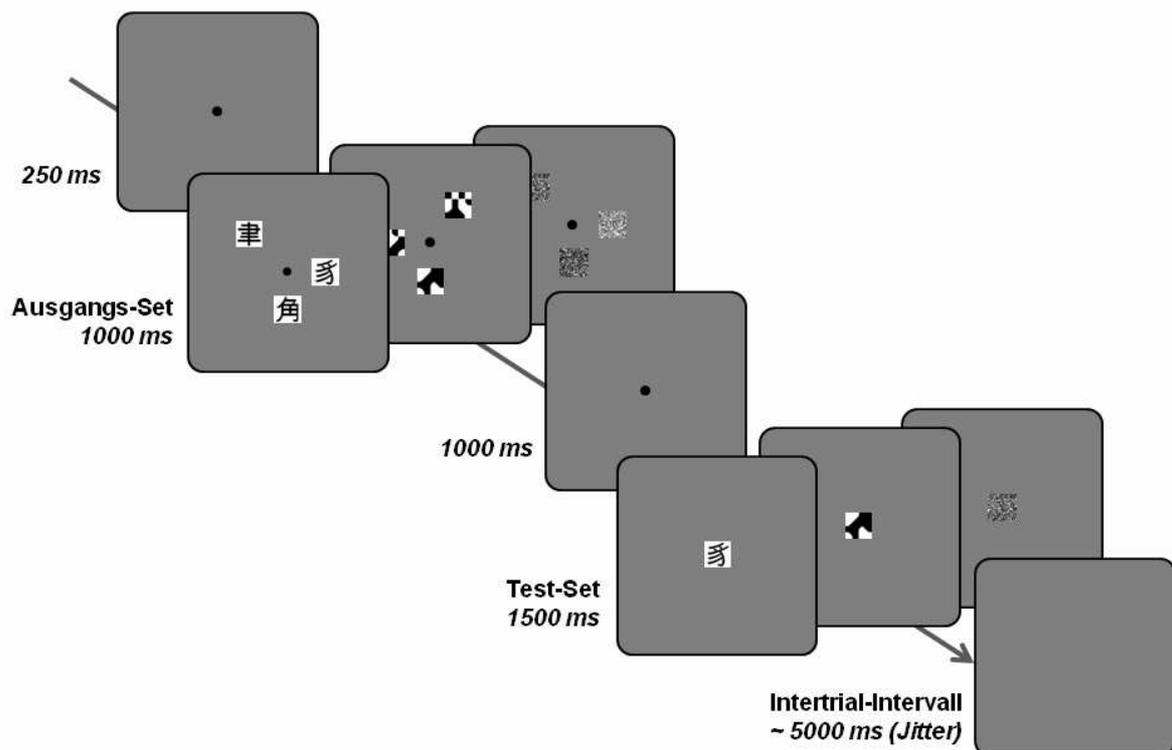


Abb. 15 – Ablauf eines Trials am Beispiel eines 3er-Sets für die verwendeten Itemtypen. (v. links nach rechts: Chinesische Schriftzeichen, Fleckfiguren, Grauwertitems.)

Nach Ablauf des Intervalls erfolgte die Präsentation des Targets. Das Target wurde zentral präsentiert und es ersetzte den Fixationspunkt. Während der Präsentation des Targets musste der Proband entscheiden, ob der Reiz in dem Set zuvor enthalten gewesen war, oder nicht. Das Urteil wurde durch Tastendruck abgegeben. Anschließend wurde der nun schwarze Mittelpunkt wiederum eingeblendet und zeigte den Beginn des Interstimulus-Intervalls an. Dieses war im Mittel 5000 ms lang. Die variable Länge für das ISI wurde gewählt, um die Trials zu jittern und dadurch eine bessere Trennung der BOLD-Antworten zu erreichen. Daraus ergibt sich eine Gesamtdauer eines Trials von maximal 8750 ms.

Die Versuchsteilnehmer gaben ihre Antwort durch einen Tastendruck ab. Während der Versuchsteile, die außerhalb des MRT am PC stattfanden, nutzten sie die PC Tastatur. Zur Antwortgabe dienten die Tasten „c“ und „m“ auf der Standardtastatur des Versuchsrechners. Die Zuordnung der Tasten zu Ja- und Nein-Antworten wurde ausbalanciert. Während der MRT-Messungen wurde die Antwortgabe mittels zweier Taster ermöglicht, die über Lichtleiterkabel mit dem Steuerrechner in Verbindung standen (Response Grips der Firma NordicNeuroLab, Bergen, Norwegen). Die Tasten konnten die Probanden in der linken und rechten Hand halten und die Antwort wurde durch Drücken der Daumentasten abgegeben. Die Händigkeit der Antwortgabe wurde in der ersten MRT-Session so zugeordnet, dass sie zwischen den Probanden ausbalanciert war, und wurde während der folgenden Teile der Studie für die entsprechende Versuchsperson beibehalten. Bestätigte also eine VPN einen „match“ – Fall durch Drücken des linken Tasters im MRT, dann war auch während der Trainingssessions ein „match“ – Fall mit der linken Hand zu bestätigen; durch Drücken der „c“ – Taste auf der Tastatur. Entsprechend war für diesen Proband ein „non-match“ – Fall in den MRT-Sessions mit rechts, in den Trainingssitzungen mit der rechten Hand, durch Drücken der „m“ – Taste zu bestätigen. Ein anderer Proband hatte die spiegelbildliche Zuordnung.

Die Trials, in denen „Grays“ gezeigt wurden, liefen in exakt gleicher Weise ab, wie die übrigen Trials. Die Teilnehmer wurden zuvor angewiesen, bei solchen „Gray-Trials“ immer denselben Drücker ihrer Wahl zu betätigen. Bei den „Grays“ sollte keine „Match – Non- Match - Entscheidung“ getroffen werden. Sie bildeten die Baseline für alle Trials, um bei der Auswertung frühe sensorische Aktivität, die auf die visuelle Stimulation zurückgeht, und jene Aktivität, die auf den motorischen Reaktionen beruht, aus den MRT-Ergebnissen zu entfernen.

5.3.2 Das Training

Ziel des Trainings sollte es sein, Langzeitgedächtniseinträge für Items vom Typ der chinesischen Schriftzeichen zu bilden. Die verwendete Trainingsmethode sollte also geeignet sein, die gesehenen Zeichen zu erlernen, ohne eine intensivere Beschäftigung damit zu ermöglichen. Die zu trainierenden Items sollten mindestens jeden zweiten Tag gesehen werden. Ziel war es, eine Repräsentation des visuellen Zeichens aufzubauen, ohne dass die dazugehörige Semantik gelernt wurde. Diese Voraussetzungen ließen sich am besten erfüllen, wenn man die Trials in den Trainingssitzungen ebenso wie in den MRT-Sessions als S1-S2-Paradigmen ausführte. Dadurch wird sowohl die Aufgabe selbst geübt, als auch die Zeichen gelernt. Um den Studienteilnehmern ein selbst gesteuertes Training mit geringem Zeitverlust zu ermöglichen, erstellte ich ein E-Prime Programm, das am privaten PC ausgeführt werden konnte. Nach dem Starten des jeweiligen Trainingsprogramms lief dieses automatisch ab. Insgesamt gab es für jeden Teilnehmer/in eine CD, auf der sich 12 Trainingseinheiten befanden. Die Einheiten sollten fortlaufend abgearbeitet werden, da sie mit steigendem Schwierigkeitsgrad konzipiert waren. Zwischen den einzelnen Trainingseinheiten lag eine Pause von 2 Tagen. Nach Beendigung einer Trainingssitzung erzeugte E-Prime automatisch eine Datei, welche die Trainingsergebnisse enthielt. Die Versuchsteilnehmer hatten mir diese Datei nach jeder Trainingssitzung als E-Mail-Anhang zuzusenden, was aber zu unvollständigen Datensätzen führte. Dieses Vorgehen erwies sich daher zwar als praktikabel zur Kontrolle der Durchführung der Trainingseinheiten, aber die Daten konnten letztlich nicht ausgewertet werden.

Durch das Training wurde in den auf die erste Kernspin-Session folgenden vier Wochen eine definierte Zeichengruppe erlernt. Jeder Proband trainierte ein Drittel der Zeichen. Über alle Probanden wurden alle 60 Zeichen trainiert. Die Probanden wurden dazu in drei Gruppen eingeteilt, die jeweils andere Trainingseinheiten erhielten. Aus den nicht trainierten Zeichen wurden die Kontrollreize selektiert. Die Probanden absolvierten 12 Trainingssitzungen, wobei alle 3 Sitzungen ein anderes Programm verwendet werden musste. Die Programme hatten einen ansteigenden Schwierigkeitsgrad. Dies wurde einerseits dadurch erreicht, dass mehr Trials mit größeren Setsizes dargeboten wurden und die Zahl der Arrays mit niedrigen Setsizes immer mehr reduziert wurde. In den letzten drei Trainingssitzungen wurden zudem 40 Arrays der Setsize 4 präsentiert.

Andererseits wurde auch die Präsentationsdauer der Arrays schrittweise von anfänglich 1750 ms auf letztlich 1000 ms verkürzt. Die Trainingsprogramme bestanden, je nach Schwierigkeitsgrad, aus 100 bis 160 Trials. Durch das Design wurde eine massive Exposition der Probanden mit den zu lernenden Zeichen erreicht, indem jedes Item vielfach innerhalb einer Sitzung auftrat. Letztlich wurde dadurch das gesamte Material insgesamt 273 mal gesehen, wobei jeder Reiz 84 mal Target war. Eine genaue Darstellung der verwendeten Listen findet sich in Tab. 2. Um die Probanden während des Trainings zu möglichst akkurater Antwortgabe zu motivieren, wurde das Programm mit einer Feedback-Funktion ausgestattet. Bei richtig gegebener Antwort wurde der Fixationspunkt zu einem grünen Kreuz, bei falsch gegebener zu einem roten Querbalken. Blieb eine Antwort aus, so startete nach 4 Sekunden ein neuer Trial.

Tab. 2 - Listen der Präsentierten Items

Trainings-sitzung	Präsentationsdauer Array (ms)	Anzahl Trials	Setsize	Präsentationshäufigkeit	
				Item	Target
1-3	1750	80	1	4 x	4 x
		40	2	4 x	2 x
		40	3	6 x	2 x
4-6	1500	40	1	2 x	2 x
		80	2	8 x	4 x
		40	3	6 x	2 x
7-9	1250	20	1	1 x	1 x
		40	2	4 x	2 x
		80	3	12 x	4 x
10-12	1000	20	1	1 x	1 x
		20	2	2 x	1 x
		20	3	3 x	1 x
		40	4	8 x	2 x

5.3.3 Erste Kernspinmessung (t1)

Aus den verfügbaren Items wurden 3 Gruppen gebildet: A, B und C. Dabei wurde darauf geachtet, dass allen Gruppen gleich viele Items aus den unterschiedlichen Komplexitätsstufen zugeteilt wurden. Auf diese Weise ergab sich für jede Gruppe eine Grundmenge von 40 Items, 20 chinesischen Schriftzeichen und 20 „Fleckfiguren“. Zusätzlich wurde in jedem der beiden Runs die Hälfte der aus den jeweiligen Items erzeugten „Grays“ gezeigt. Die andere Hälfte wurde in Trials des 2. Runs verwendet. Jede Versuchsperson wurde einer der drei Itemgruppen fest zugeordnet, d.h. es wurden ebenso drei Probandengruppen gebildet, der Einfachheit halber ebenso mit A, B und C bezeichnet. Die Gesamtzahl der Trials eines Runs lässt sich wie folgt errechnen: In den Trials der MRT-Session wurden die Items so präsentiert, dass jedes Item aus der entsprechenden Itemgruppe in jeder Setsize einmal zum Target wurde. Da pro Zeichentyp 20 Items in einer Gruppe enthalten sind, wurden 10 Match-Fälle und 10 Non-Match-Fälle gebildet. Daraus ergibt sich über beide Zeichentypen, die chinesischen Schriftzeichen und die „Fleckfiguren“, zuzüglich der Hälfte der dazugehörigen „Grays“ pro Run eine Gesamtzahl von 60 Fällen, die jeweils einmal in allen drei getesteten Setsizes gezeigt wurden. Dies führt zu einer Gesamtzahl von 180 Trials. Beispielsweise wurde ein bestimmtes Item je Run einmal Target, also „Match-Fall“ für Setsize 1, 2 und 3 und einmal „Non - Match - Fall“ für Setsize 1, 2 und 3. Die zum Auffüllen des Arrays benötigten Items wurden aus dem Materialpool der beiden anderen Gruppen gestellt. Bei einer durchschnittlichen Triallänge von 8,75 Sekunden dauert ein Run der Session 1 also 26 Minuten und 15 Sekunden. Im zweiten Run wurde das Schema des ersten Runs wiederholt, wodurch zum zweiten Mal jedes Zeichen in jeder Setsize einmal zum Target wurde.

5.3.4 Zweite Kernspinmessung (t2)

Bei der zweiten MRT Messung kann nun zwischen gelernten, und nicht gelernten Items unterschieden werden. Alle Items wurden so präsentiert, dass sie je einmal das Target der S1-S2-Aufgabe stellten. Dadurch erhöhte sich die Gesamtzahl der Trials um die Anzahl der „neuen“, nicht trainierten Items. Für Gruppe A waren dies diejenigen der Gruppe C, für Gruppe B diejenigen der Gruppe A und für C diejenigen der Gruppe B. In der zweiten fMRT-Messung befanden sich also Trials mit „alten“ Target-Items, im

Folgenden als „repeats“ bezeichnet und mit neuen, „novels“. Dadurch ist es möglich, die Leistungen für trainierte („repeats“) mit denen der nicht trainierten („novels“) zu vergleichen. Die Gesamtzahl der Items bei Session 2 beträgt also pro Run 20 chinesische Schriftzeichen „novels“ + 20 chinesische Schriftzeichen „repeats“ + 20 „Fleckfiguren“ + die Hälfte der vorhandenen, also 30 „grays“, insgesamt also 90 Items, die je einmal pro Setsize Target wurden: Somit wurden in der Post-training-Messung 270 Trials geschaffen. Die Gesamtlänge eines Runs der 2. Session beträgt somit 39 Minuten, 26 Sekunden.

5.3.5 Lernerfolgskontrolle

Nach dem Training der Zeichen stellte sich die Frage, ob diese tatsächlich erlernt wurden, ob also Langzeitgedächtniseinträge für die Trainingsitems vorhanden waren. Dazu überprüfte ich, ob die Teilnehmer in der Lage waren, die Zeichen der „eigenen“ Gruppe, also Ihre Trainingsitems, sicher von anderen Items zu unterscheiden. In diesem Fall wäre der Beweis für einen Trainingserfolg erbracht. Im Anschluss an die 2. Kernspinnmessung fand dazu eine Lernerfolgskontrolle statt, die mithilfe eines ebenfalls von mir mit E-Prime erzeugten Programmes realisiert wurde. Pseudorandomisiert wurden Schriftzeichen aus drei Kategorien nacheinander für 2 Sekunden präsentiert. Die Teilnehmer sollten aus folgenden Zuordnungen wählen und innerhalb eines selbst abbrechenden Zeitfensters von maximal 5 Sekunden eine Auswahl durch Anklicken eines beschrifteten Buttons treffen: 1) „Alt“ bezeichnete trainierte Items, 2) „Neu“ bezeichnete untrainierte und zuvor nie gesehene Items. 3) „gesehen, untrainiert“ bezeichnete die Items die in der Kernspinnmessung gezeigt wurden, aber nicht im Trainingsmaterial vorhanden waren. Insgesamt wurden 60 Zeichen gezeigt, 20 stammten aus jeder der drei Kategorien. Das Ergebnis der Lernerfolgskontrolle ist in Tab. 3 dargestellt.

5.4 Teilnehmer des Experiments

Die Teilnehmer der Vorexperimente wurden im Rahmen der Vorlesungen in den Fächern der allgemeinen Psychologie an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken angeworben. An Vorexperimenten beteiligte Personen wurden von einer Teilnahme am folgenden Hauptexperiment ausgeschlossen. Am Hauptexperiment, den zwei MRT-Messungen und dem dazwischen liegenden Training, nahmen Studenten der Fachrichtung Psychologie sowie der Medizin teil, die über Aushänge auf dem Campus der Uniklinik und der Universität des Saarlandes über Zweck, Ablauf und Teilnahmebedingungen der Studie informiert worden waren. Die Teilnahme war freiwillig und wurde mit einem Betrag von 30 €, sowie einer CD-ROM mit den gewonnenen anatomischen Aufnahmen des eigenen Gehirns honoriert. Die Probanden unterschrieben vor den Kernspinnmessungen einen standardisierten Patientenaufklärungsbogen, der auch bei Messungen zu diagnostischen Zwecken verwendet wird. Alle Teilnehmer am Hauptexperiment waren zwischen 18 und 45 Jahre alt, 4 männlichen und 8 weiblichen Geschlechts. Als Ausschlusskriterien wurden Kenntnis der chinesischen Schrift oder vorherige Beschäftigung mit der Bedeutung chinesischer Schriftzeichen bestimmt. Es wurden sowohl Rechts- als auch Linkshänder zugelassen, da die Studienlage keinen Einfluss der Händigkeit auf die spezifische Fragestellung erkennen ließ. Auf einen geeigneten Visusausgleich während der Durchführung der MRT-Messungen wurde jeweils geachtet. Insgesamt wurden 12 Personen in die Studie eingeschlossen. Zwei weitere teilnehmende Personen wurden aus der Auswertung ausgeschlossen, da aufgrund einer Software-Fehlfunktion DICOM-Bilder der Kernspinsitzungen nicht vollständig gespeichert worden waren.

5.5 MRT-Messungen

Die Kernspin-Bilder wurden in der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie des Universitätsklinikums des Saarlandes in Homburg erhoben. Verwendet wurde ein Kernspin-Scanner des Typs Sonata, der Firma Siemens, Erlangen, Deutschland mit einer Feldstärke von 1.5 Tesla und einer Standard-Kopfspule.

5.5.1 Daten der Kernspin-Messung

Insgesamt wurden die Kernspindaten pro Teilnehmer in zwei Sessions, einer Pre-training-session (t1) und einer Post-training-session (t2), erhoben. Die Sessions wurden unterteilt in zwei Runs gefahren. Bei Session 1, also dem ersten Messzeitpunkt, wurde die Zwischenzeit für die Erhebung der Anatomischen Messdaten genutzt. Bei Session 2 war sie als kurze messfreie Pause angelegt. Bilder aus 22 Schichten wurden mithilfe einer T2*-gewichteten transversalen, echo-planaren Sequenz mit den folgenden Parametern erstellt: TR 1.86 s, TE 50 ms, Flip-Winkel = 90°, Schichtdicke = 5 mm, 22 axiale Schichten, parallel zur anterior-posterioren Kommissur, Voxelgröße 3,6mm x 3,6mm x 5mm, interslice gap = 1,25 mm. Es wurden Bilder auf Grundlage einer Matrix von 64 x 64 Pixel erzeugt. Verworfen wurden jeweils die ersten vier Bilder, die während der Äquilibration des Magnetfeldes erstellt wurden. Die Studie wurde als Event-Related-Design durchgeführt. Um ein Zusammenfallen der HRF aufeinander folgender Trials zu verhindern, wurden die Intervalle zwischen den Trials gejittert. Hierzu wurden die Zeiten aus einer Normalverteilung mit einem Mittelwert von 5 s und einer Standardabweichung von 2 s per Zufall gezogen und daraus eine pseudozufällige Abfolge erzeugt. Bedingt durch die unterschiedliche Dauer von Pre-training-Messung und Post-training-Messung differiert die Anzahl der Scans für die Sessions. Zum ersten Testzeitpunkt wurden 2x 847, In der zweiten Session 2x 1127 Scans gefahren. Die Zeitspanne zwischen den Runs wurde zur Gewinnung anatomischer Bilder genutzt, um bei der späteren Auswertung eine individuelle Registrierung der funktionellen Bilder vornehmen zu können. Dazu wurde eine Standard-T1-gewichtete MPRAGE-Sequenz verwendet, welche hoch auflösende Bilder des gesamten Kopfes auf Grundlage einer Matrix von 256 x 256 Pixel erzeugte. Bei der Anatomischen Vermessung wurden folgende Parameter verwendet: TR 1.9 s, TE 3.93 ms, TI 1100 ms, Flip-Winkel = 15°, Schichtdicke = 0,9 mm.

5.5.2 Statistische Aufbereitung der fMRT Daten

Die Vorverarbeitung der gewonnenen Bilder und anschließende statistische Analysen realisierte ich mit Statistical Parametric Mapping (SPM 5; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK), einer MATLAB-basierten Anwendung. Die funktionellen Aufnahmen wurden phasenkorrigiert (slice-timing), realigned, die

anatomische Aufnahme auf die mittlere funktionelle koregistriert, unter Verwendung eines Standard-Templates normalisiert und mit einem 8-mm Gauss-Filter in allen drei Ebenen geglättet. Zur Auswertung der gewonnenen Daten rechnete ich Analysen auf First- und Second-Level-Ebene. Zur Aufstellung des Modells fand individuell auf Probandenebene das „General linear Model“ Anwendung. Für beide Sessions definierte ich jeweils Prädiktoren für auftretende Bedingungen. Da bei Falschantworten der Probanden nicht sicher von einer Verarbeitung der Items in gedächtnisassoziierten Arealen ausgegangen werden kann, wurden generell Falschantworten von Richtigantworten getrennt.

6 Ergebnisse

6.1 Behaviorale Ergebnisse

6.1.1 Ergebnisse der Lernerfolgskontrolle

Wie die Tabelle zeigt, konnten 238 von 240 der gelernten Items auch der Kategorie „gelernt“ zugeordnet werden. Damit waren die Probanden nahezu perfekt im Wiedererkennen des trainierten Materials. Die Fehlerhäufigkeit nahm deutlich zu bei der Zuordnung zu den Kategorien „kam vor“ und „neu“.

Tab. 3 - Die Kreuztabelle zeigt in absoluten Zahlen, wie viele Items von den Probanden insgesamt der jeweiligen Kategorie zugeordnet worden sind. Dunkelgrau hinterlegt die Anzahl „Hits“ (richtig kategorisierte Items).

tatsächlich	kategorisiert als		
	gelernt	kam vor	neu
gelernt (Repeats)	238	1	1
kam vor (Neue aus t2)	9	185	45
neu (völlig neu)	6	106	128

6.1.2 Unspezifische Übungseffekte

Zur Auswertung der Richtigkeit der gegebenen Antworten wurden PR-Maße berechnet, um die Antworten von Einflüssen unterschiedlicher Antworttendenzen zu bereinigen. In Abbildung 14 sind die PR-Maße für beide Zeitpunkte dargestellt. Für den zweiten Messzeitpunkt wurden hier nur Stimuli berücksichtigt, die nicht trainiert waren („Novels“ der Schriftzeichen und Fleckfiguren). In den Vergleichen werden deshalb allein Unterschiede in der Wirkung der Itemklassen deutlich (nicht trainierte Schriftzeichen versus Fleckfiguren) in Abhängigkeit von der Setsize und beim Vergleich der Testzeitpunkte t1 und t2 unspezifische Übungseffekte. Zunächst wurden die beiden Messzeitpunkte getrennt analysiert. In der Pre-training-Messung zeigte sich ein Itemeffekt und, wie zu erwarten war, ein Setsize-Effekt. Der Itemeffekt wird am deutlichsten bei größeren Setsizes. Bei nahezu identischen PR-Maßen bei Setsize 1 um 0.9 fallen die Zufallsfiguren für Setsize 2 auf 0.5 ab und erreichen schließlich 0.35. Die

chinesischen Schriftzeichen zeigen einen flacheren Abfall auf 0.7 bei Setsize 2 und liegen bei Setsize 3 bei 0.5. Beide Stimulustypen liegen jedoch selbst bei der höchsten Setsize noch deutlich oberhalb des Zufallsniveaus ($PR = 0$). In einer Varianzanalyse mit den Faktoren Itemtyp (Schriftzeichen, Fleckfiguren) und Setsize (1, 2, 3) ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Itemtyp, $F(1,11) = 26.13$, $p < .001$, $MSE = .009$, $\eta_p^2 = .70$, die Setsize, $F(2,22) = 89.19$, $p < .001$, $MSE = .017$, $\eta_p^2 = .89$ sowie für die Interaktion, $F(2,22) = 5.63$, $p < .05$, $MSE = .009$, $\eta_p^2 = .34$. Die Genauigkeiten beim Beantworten zum zweiten Testzeitpunkt zeigen ein ähnliches Muster, allerdings verschwinden die Unterschiede zwischen den Fleckfiguren und den Schriftzeichen.

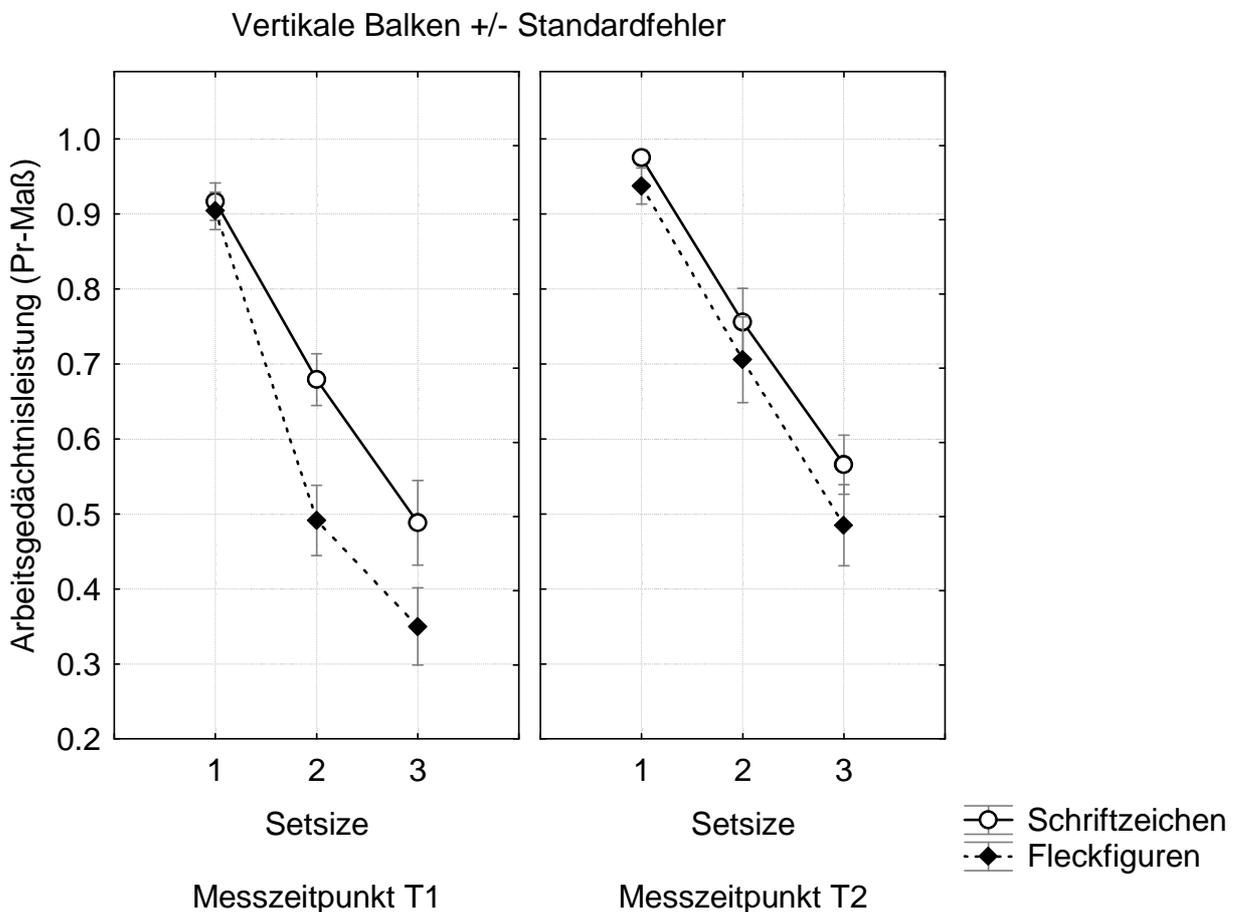


Abb. 16 - Dargestellt sind die Pr-Maße der gegebenen Antworten zu den Testzeitpunkten t1, der fMRT-Messung vor dem Training, und t2, der fMRT-Messung nach dem Training. Es wurden nur neue Items berücksichtigt.

In einer getrennten Analyse für den zweiten Messzeitpunkt ergab sich nur ein signifikanter Haupteffekt für Setsize, $F(2,22) = 122.45.19$, $p < .001$, $MSE = .009$, $\eta_p^2 = .92$. Analysiert man beide Zeitpunkte gemeinsam, dann erlaubt dies eine Beurteilung der

Auswirkung des Übens der Aufgabe unabhängig von den Zeichen. Keines der Zeichen, das in diese Analyse einging, wurde trainiert. In dieser Analyse ergibt sich ein signifikanter Effekt des Messzeitpunkts, $F(1,11) = 8.58, p < .01, \text{MSE} = .041, \eta_p^2 = .44$, des Itemtyps, $F(1,11) = 31.87, p < .001, \text{MSE} = .008, \eta_p^2 = .75$, der Setsize, $F(2,22) = 179.62, p < .001, \text{MSE} = .014, \eta_p^2 = .94$. Zusätzlich zeigte sich eine Interaktion zwischen Itemtyp und Setsize, $F(2,22) = 4.85, p < .01, \text{MSE} = .011, \eta_p^2 = .31$. Weitere Interaktionen werden nicht signifikant, $p > .10$.

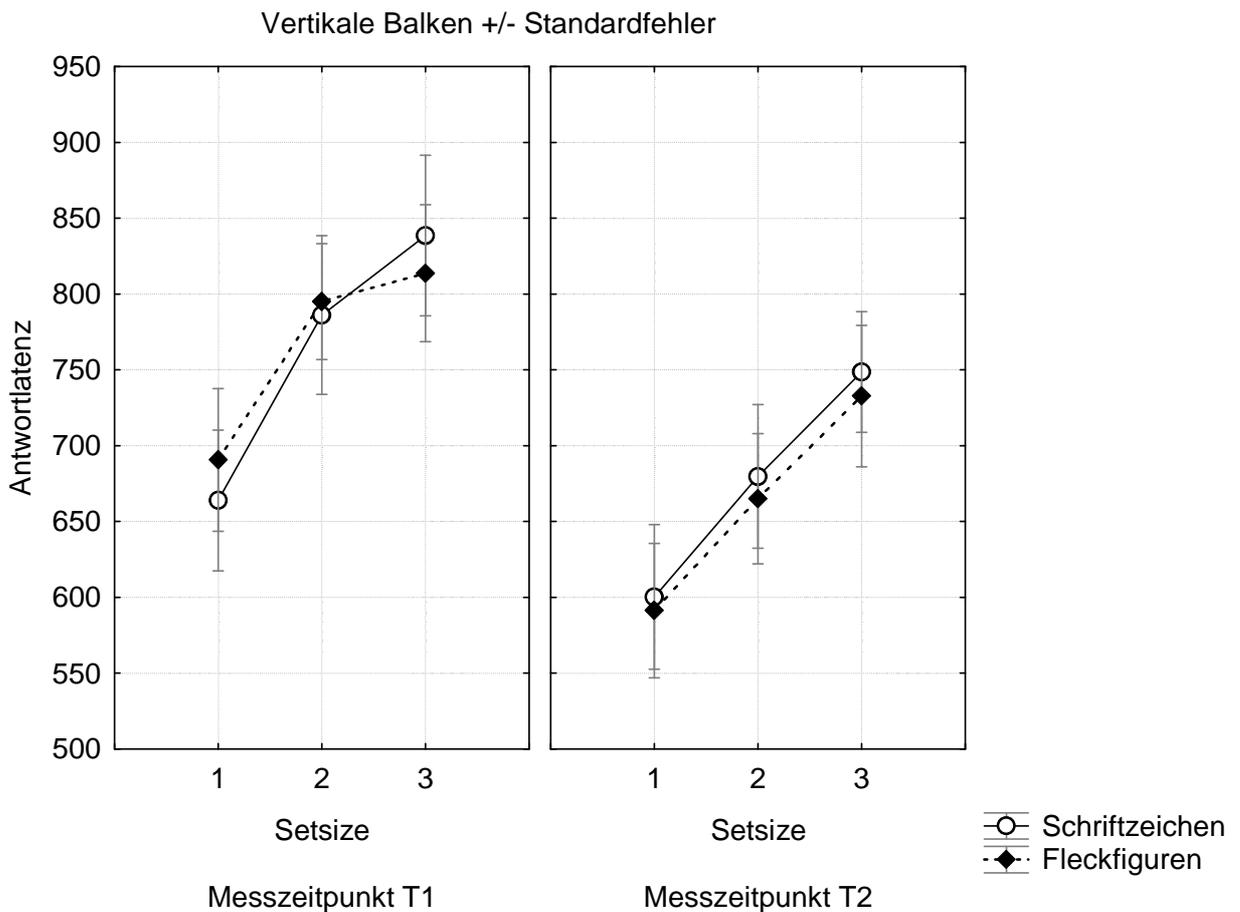


Abb. 17 - Dargestellt sind die Reaktionszeiten zu den Testzeitpunkten t1, der fMRT-Messung vor dem Training, und t2, der fMRT-Messung nach dem Training. Es wurden nur neue Items berücksichtigt.

Die Reaktionszeiten waren für korrekte Ja-Antworten und korrekte Nein-Antworten nicht unterschiedlich und es gab keine Wechselwirkungen mit anderen Faktoren, weswegen ich die Daten über beide Antworttypen zusammengefasst habe. Die mittleren Antwortlatenzen sind in Abb. 17 berichtet. Die Antwortzeiten waren für beide Zeichentypen, chinesische Schriftzeichen und „Fleckfiguren“ nicht signifikant unterschiedlich, während sie über die Setsize deutlich stiegen. In einer Varianzanalyse

mit den Faktoren Itemtyp und Setsize gab es nur einen signifikanten Effekt der Setsize, $F(2,22) = 30.16, p < .001, \text{MSE} = 9626, \eta_p^2 = .73$.

Analysiert man die Reaktionszeiten der beiden Testzeitpunkte t1 und t2 für die korrekt gegebenen Antworten, so zeigt sich ein eben signifikanter Effekt des Messzeitpunktes, $F(1,11) = 4.68, p = .05, \text{MSE} = 1390, \eta_p^2 = .3$, und des Setsize, $F(2,22) = 54.58, p < .001, \text{MSE} = 9766, \eta_p^2 = .83$. Außerdem zeigte sich eine Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Antwortgabe, $F(1,11) = 8.65, p < .05, \text{MSE} = 7612, \eta_p^2 = .44$.

6.1.3 Spezifischer Trainingseffekt

Um spezifische, trainingsbedingte Effekte ermitteln zu können, wurden die Ergebnisse der zweiten Kernspinmessung getrennt nach Itemtyp in trainierte und untrainierte chinesische Schriftzeichen betrachtet. Zum Vergleich wurden außerdem die Verhaltensdaten für die (nicht trainierten) Fleckfiguren ausgewertet. Es ergibt sich dann folgendes Bild: Die Post-training-Leistung zeigte einen Itemeffekt und einen Setsize-Effekt. Liegen die PR-Maße für die Richtigkeit der gegebenen Antworten für Setsize 1 noch für alle Items nahe zusammen um 0.95, zeigte sich bei Setsize 2 ein je nach Itemtyp unterschiedlicher Verlauf. Hier differieren sie zwischen im Mittel 0.85 für Repeats, 0.75 für Novels und 0.7 für Fleckfiguren. Dieser itemabhängige Unterschied verschwindet für Setsize 3.

Die Ergebnisse legen nahe, dass es tatsächlich einen itemspezifischen Trainingseffekt gibt, der allerdings nur für Setsize 2 sichtbar ist. Setsize 1 ist noch so einfach, dass die Aufgabe von allen Probanden und für alle Items gelöst werden kann, während Setsize 3 schon wieder so schwer ist, dass itemspezifische Übungseffekte nicht mehr sichtbar werden. In einer Varianzanalyse mit den Faktoren Itemtyp (Repeats, Novels, Fleckfiguren) und Setsize (1, 2, 3) lag der Haupteffekt für den Itemtyp gerade auf der Signifikanzgrenze, $F(2,22) = 3.34, p = 0.054, \text{MSE} = 0.021, \eta_p^2 = 0.23$, und der Effekt der Setsize war hoch signifikant, $F(2,22) = 123.85, \text{MSE} = 0.013, p < .01$. Sonstige Interaktionen wurden nicht signifikant.

Kontrastiert man allein die Leistungen für die Repeats mit jenen der Novels bei Set Size 2, dann ergibt sich ein signifikanter Unterschied zu Gunsten der Repeats, $T(11) = 2.11, p < .05$. Abb. 18 veranschaulicht das gefundene Datum.

Erwartungsgemäß verhielten sich die gemessenen Reaktionszeiten (Abb. 19) ebenso, gemäß der Vermutung, proportional zum Setsize, und somit zum „Image Load“ der Probanden, wobei sich insbesondere bei den „correct rejections“ (Non-match - Fall wird korrekt erkannt) dabei kein itemspezifischer Effekt zeigte. Die Mittelwerte lagen bei Setsize 1 um 620 ms, bei Setsize 2 um 670 und stiegen schließlich bei Setsize 3 auf Werte um 750 ms an. Bei den „Hits“ (match – Fall wird korrekt erkannt) zeigte sich ein etwas anderes Bild: Bei Setsize 1 lagen alle Items nicht deutlich unterschiedlich im Mittel um ca. 570 ms. Die „Repeats“ steigen auf 650 ms bei Setsize 2 und 700 ms bei Setsize 3, die untrainierten Items vom Typ „Novels“ und „Fleckfiguren“ steigen auf 700/720 ms bei Setsize 2 und 750/770 ms bei Setsize 3.

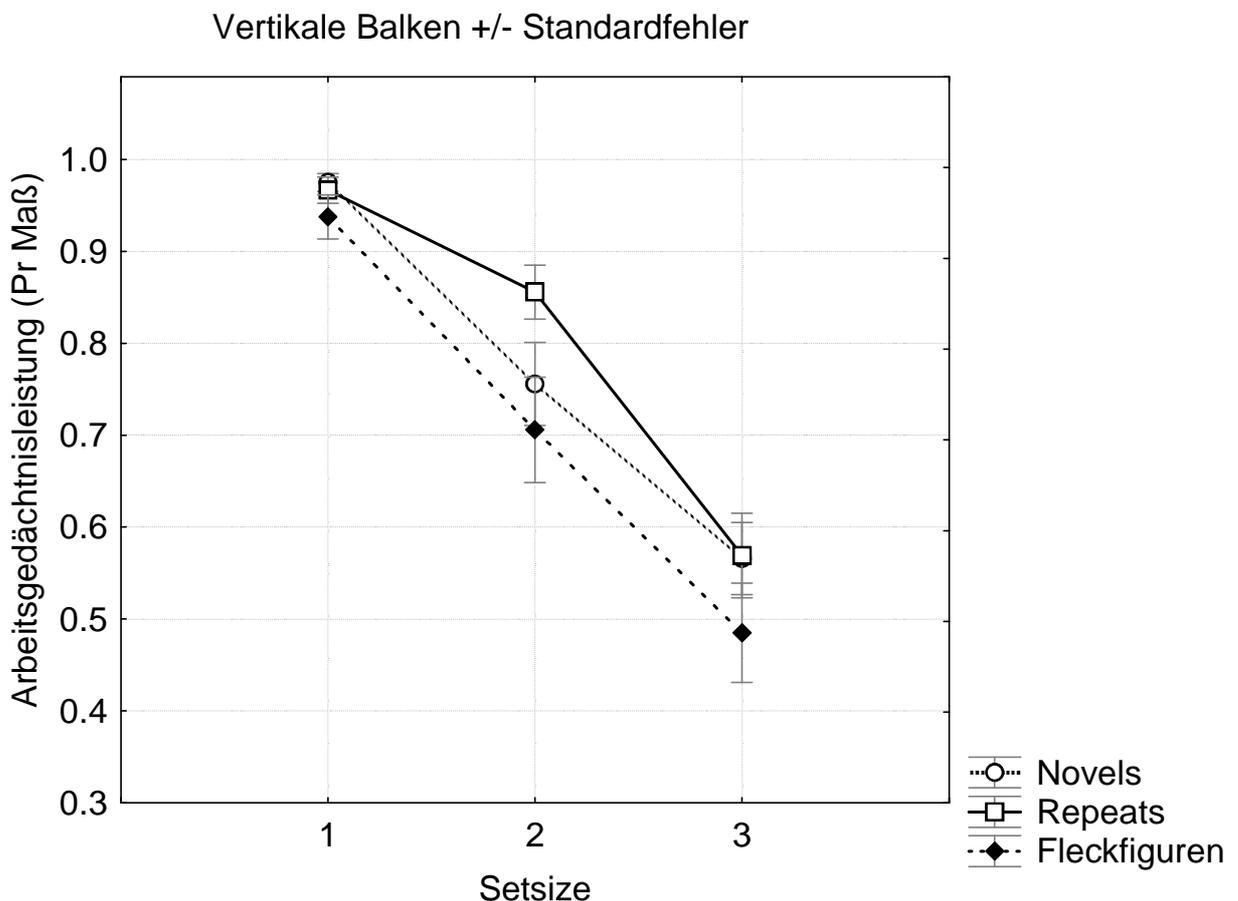


Abb. 18 - Die Grafik veranschaulicht die gefundenen Leistungen der Probanden zum Testzeitpunkt t2, während der zweiten fMRT-Messung nach dem Training.

In einer Varianzanalyse mit den Faktoren Itemtyp, Setsize und Antwortgabe ergab sich ein Haupteffekt für den Itemtyp, $F(2,22) = 5.73$, $p < .01$, $MSE = 3175$, $\eta_p^2 = .34$, und Setsize, $F(2,22) = 41.69$, $p < .001$, $MSE = 9861$, $\eta_p^2 = .79$, sowie die Interaktion Setsize

und Antwortgabe, $F(2,22) = 7.76$, $p < .01$, $MSE = 1712$, $\eta_p^2 = .41$. Der deutlichste Unterschied zwischen den Itemtypen zeigt sich im Antwortverhalten für die „Hits“: Hier kommt ein signifikanter Unterschied zwischen trainierten Typen und nicht trainierten Typen zum Vorschein. Im Zusammenhang der schon für die Ergebnisrichtigkeit ermittelten Daten lässt sich ein itemspezifischer Trainingseffekt vermuten.

Betrachtet man Pre- und Post-training-Leistungen der PR-Maße im Vergleich, so ergibt sich folgendes Bild: Es konnte ein genereller Trainingseffekt beobachtet werden, von dem alle Itemklassen profitieren. Ein materialspezifischer, itemunabhängiger Trainingseffekt ließ sich nicht feststellen. Für Setsize 1 zeigt sich ein Deckeneffekt für alle Itemklassen.

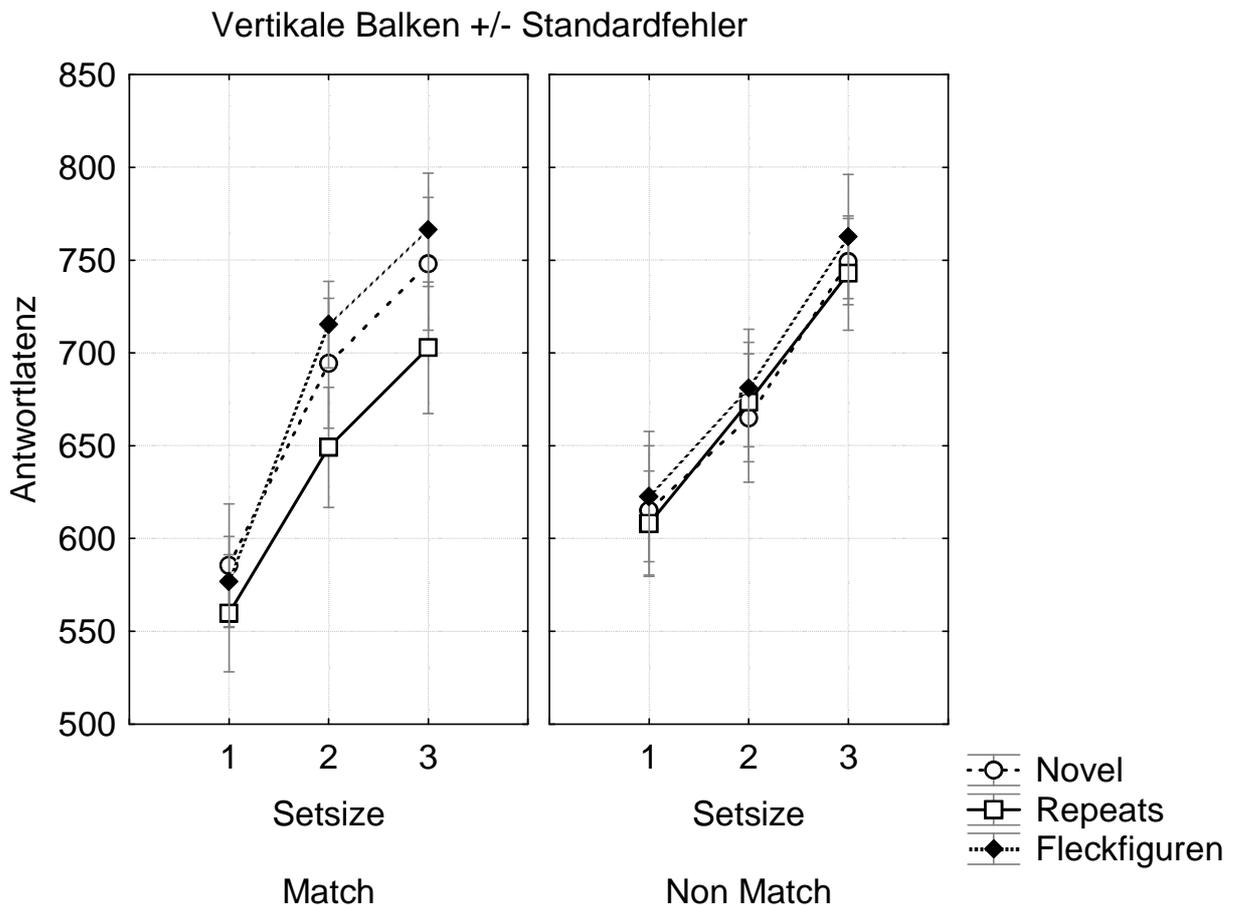


Abb. 19 - Dargestellt sind die Reaktionszeiten der Probanden während der zweiten fMRT-Messung für korrekt gegebene Antworten. Die Grafik links zeigt „Hits“, Grafik rechts die „Correct rejections“.

Ein signifikanter itemspezifischer Trainingseffekt kann nur bei Setsize 2 beobachtet werden. Auch der Verlauf der Reaktionszeiten korrespondiert mit den beobachteten

Effekten. Alle Itemklassen profitieren vom Training: Insgesamt ergibt sich ein genereller, signifikanter Abfall der korrespondierenden Zeiten von Testzeitpunkt 1 und Testzeitpunkt 2. Ebenso tritt der itemspezifische Trainingseffekt für Setsize 2 auch bei den Reaktionszeiten zu Tage.

6.2 fMRT - Ergebnisse

Bei der fMRT-Auswertung mit SPM 5 wurden Designmatrices in einer First-Level-Analyse auf Einzelkopfebene erstellt. Die Prädiktoren wurden durch eine Faltung der Standard-HRF mit dem Onset der jeweiligen Reizbedingung gebildet. Zusätzlich wurden die Parameter der individuellen Bewegungskorrektur als Regressoren aufgenommen, um diese Varianz aus dem Fehler zu entfernen. Kontraste wurden zunächst auf Einzelkopfebene erstellt und anschließend auf Gruppenlevel gerechnet.

Für Kontraste der Vergleiche 1-3 wurden die Itemtypen als Prädiktoren definiert. Für die Pre-training-Messung waren dies: Chinesische Schriftzeichen, Antwort korrekt gegeben; Fleckfiguren, Antwort korrekt gegeben; Grays; Falschantworten. Für die Post-training-Messung t2 wurden folgende Prädiktoren definiert: Chinesische Schriftzeichen (Novels), Antwort korrekt gegeben; chinesische Schriftzeichen (Repeats), Antwort korrekt gegeben; Fleckfiguren, Antwort korrekt gegeben; Grays; Falschantworten.

Für Kontraste der Vergleiche 4 und 5 wurden jeweils neue individuelle Designmatrices für jeden Probanden erstellt. In Vergleich 4 wurde die unabhängige Variable „Setsize“ als Kovariate zusätzlich zu jedem Itemtyp in die Designmatrices aufgenommen. Dabei wurde von einem linearen Einfluss der Variable „Setsize“ ausgegangen.

In Vergleich 5 bildete jeweils die Kombination aus Itemtyp und Setsize einen eigenen Prädiktor. In einer Second-Level Analyse wurden Kontraste auf Gruppenebene erstellt. Bei den Gruppenvergleichen innerhalb einer Messung wurden dazu t-Tests gerechnet. Zum Vergleich von Pre- zu Postmessung wurden gepaarte t-Tests gerechnet, wobei jeweils ein Kontrastpaar eines Probanden gewählt wurde. Bei der Zuordnung der gefundenen Kontraste zu den entsprechenden anatomischen Strukturen wurde die „SPM5 Anatomy Toolbox, Version 1.7“ auf Matlab, und ebenso ein hirnanatomischer Atlas verwendet (J.K. Mai, J. Assheuer, G. Paxinos: Atlas of the Human Brain, Second

Edition, ELSEVIER, 2004). Zur Erstellung der Abbildungen 18, 19 und 23 wurden die ermittelten Areale auf die Oberfläche eines Standardgehirn-Templates gerendert, für die Abbildungen 20-22 und 24-30 auf Schnittbilder eines dafür vorgesehenen Standardgehirn-Templates gelegt. Beide Templates stammten aus „SPM 5“.

Prinzipiell beschränkte ich mich auf die Auswertung der posterioren Areale (Fusiformer Cortex, LOC, IPS), da in diesen Arealen die Reize repräsentiert werden sollten und ich dort Veränderungen durch das Training erwartet hatte. In diesen Arealen wurden in Vergleichsstudien bei visuellen Arbeitsgedächtnisaufgaben systematische Aktivierungen gefunden (Xu & Chun 2006; Xue & Poldrack, 2007).

Tab. 4 - Übersicht über alle auf First- und Second-Level gebildeten Kontraste.

<p>Vergleich 1a („Zeichen“ > Baseline)</p> <ul style="list-style-type: none"> - chinesische Schriftzeichen (t1) > Grays - Fleckfiguren (t1) > Grays 	<p>Vergleich 1b (Zeichentypen gegeneinander)</p> <ul style="list-style-type: none"> - chinesische Schriftzeichen (t1) > Fleckfiguren - Fleckfiguren > chinesische Schriftzeichen (t1) 	<p>Vergleich 2 (unspezifische Trainingseffekte)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zeichen(neu) t1 > Zeichen(neu) t2; z.B.: chinesische Schriftzeichen (t1) > chinesische Schriftzeichen „Novels“ (t2)
<p>Vergleich 3 (Spezifischer Trainingseffekt)</p> <ul style="list-style-type: none"> - chinesische Schriftzeichen „Novels“ (t2) > chinesische Schriftzeichen „Repeats“ (t2) 	<p>Vergleich 4 (Linearer Kontrast für Setsize)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Setsize der chinesischen Schriftzeichen (t1) > Setsize der Grays - Setsize der Fleckfiguren (t1) > Setsize der Grays - Setsize der chinesischen Schriftzeichen „Novels“ (t2) > Setsize der Grays - Setsize der chinesischen Schriftzeichen „Repeats“ (t2) > Setsize der Grays 	
<p>Vergleich 5 (Paarweiser Vergleich benachbarter Setsizes der chinesischen Schriftzeichen getrennt für Testzeitpunkte)</p> <ul style="list-style-type: none"> - z.B.: Setsize 3 der chinesischen Schriftzeichen (t1) > Setsize 2 der chinesischen Schriftzeichen (t1); Setsize 2 der chinesischen Schriftzeichen (t1) > Setsize 1 der chinesischen Schriftzeichen (t1) 		

Vergleich 1a: „Zeichen“ > Baseline

Um die grundlegende visuelle Verarbeitung der beiden Itemtypen chinesische Schriftzeichen und Fleckfiguren zu zeigen, wurden beide Itemtypen zunächst gegen Baseline aus Grauwertitems (Grays) kontrastiert und die Analyse ohne Korrektur aber mit einer hohen Signifikanzschwelle ($p < 1e-005$ uncorrected) gerechnet. Im Folgenden werden die Aktivierungscluster beschrieben, die unter Zuhilfenahme der „Anatomy Toolbox“ (s.o.) auf dem Standardgehirn-Templete gefunden wurden.

Der Vergleich chinesische Schriftzeichen > Grays (Baseline) weist ein Aktivierungsmuster entlang des dorsalen und des ventralen Verarbeitungsweges optischer Information (s.o.) auf, mit beidseitiger, ventral betonter Verarbeitung. In beiden Hemisphären zeigt sich ein Aktivierungscluster, der vom mittleren inferioren Okzipitalcortex bis in den Temporallappen reicht. Hier werden der inferiore Temporallappen und der Fusiforme Gyrus aktiv. Ein weiterer Aktivierungscluster zeigt ein Maximum im linken, mittleren okzipitalen Gyrus.

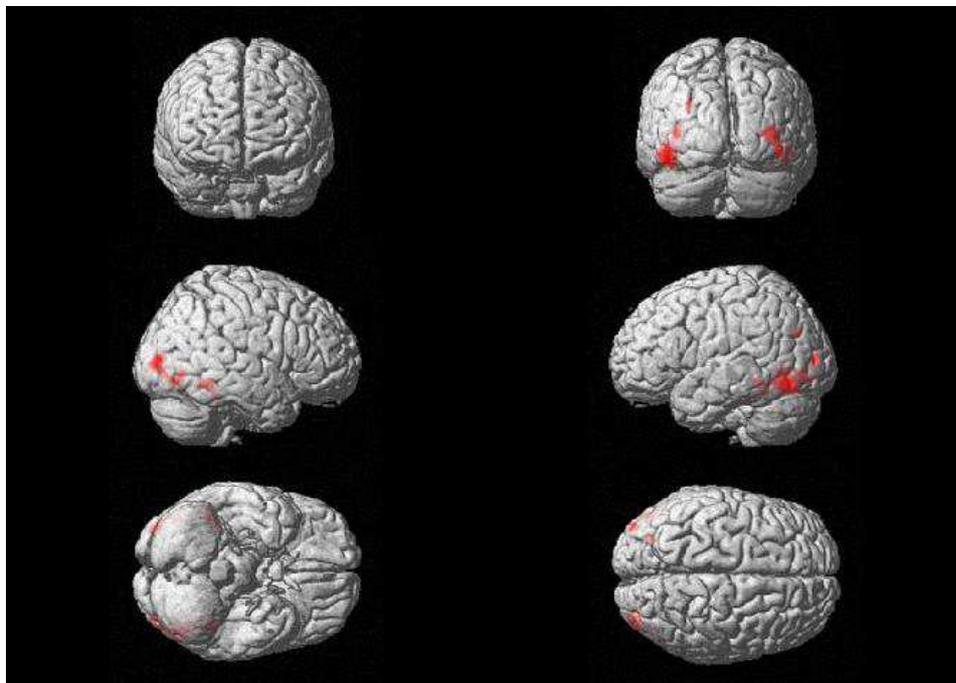


Abb. 20 - Pre-training-Messung (t1): chinesische Schriftzeichen > Grays; $p < 1e-005$ uncorrected; Extent threshold $k = 10$ Voxels.

Tab. 5 - Chinese > Grays t1

$p < 1e-005$, uncorrected

Extent threshold: $k = 10$ voxels

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.000	558	0.000	0.004	0.001	13.20	5.48	0.000	-42 -44 -10
			0.005	0.001	12.97	5.44	0.000	-48 -68 -16
			0.099	0.001	9.41	4.83	0.000	-42 -66 -6
0.000	52	0.000	0.043	0.001	10.46	5.04	0.000	-28 -74 28
0.000	173	0.000	0.052	0.001	10.28	5.00	0.000	44 -44 -10
			0.065	0.001	10.01	4.95	0.000	36 -40 -22
			0.229	0.001	8.23	4.56	0.000	38 -46 -16
0.000	271	0.000	0.062	0.001	10.09	4.97	0.000	42 -72 -10
			0.063	0.001	10.07	4.96	0.000	34 -90 4
			0.143	0.001	8.89	4.72	0.000	42 -86 -2
0.000	52	0.000	0.114	0.001	9.21	4.79	0.000	-38 -92 8
			0.452	0.002	7.23	4.30	0.000	-32 -84 0

Anatomische Zuordnung nach „Anatomy toolbox“, dahinter jeweils equivZ-Wert:

-42 -44 -10	--	5.48
-48 -68 -16	linker inferior okzipitaler Cortex	5.44
-42 -66 -6	linker inferior okzipitaler Cortex	4.83
-28 -74 28	linker mittlerer Okzipitalcortex	5.04
44 -44 -10	--	5.00
36 -40 -22	rechter Fusiformer Cortex	4.95
38 -46 -16	rechter Fusiformer Cortex	4.56
42 -72 -10	rechter inferior okzipitaler Cortex	4.97
34 -90 4	rechter mittlerer Okzipitalcortex	4.96
42 -86 -2	rechter inferior okzipitaler Cortex	4.72
-38 -92 8	linker mittlerer Okzipitalcortex	4.79
-32 -84 0	linker mittlerer Okzipitalcortex	4.30

Nimmt man die schärfste Korrektur (FWE auf Voxel Ebene), werden immer noch zwei Maxima links als signifikant ausgewiesen, von denen das posteriore MNI: [-48 -68 16] mittels „Anatomy Toolbox“ dem okzipito-temporalen Übergang zugeordnet wurde und das anteriore MNI: [-42 -44 10] im mittleren Temporallappen liegt.

Da ich aufgrund der Literaturbefunde Aktivierungen im linken Fusiformen Cortex erwartet hatte, wurde Mithilfe des „WFU Pickatlas Tool Version 2.4“ als ROI der linke Fusiforme Cortex definiert. Hier finden sich in dieser Auswertung bei den chinesischen Schriftzeichen drei Maxima, die in der folgenden Tabelle aufgeführt sind.

Tab. 6 - Chinese > Grays t1, Maxima der Aktivierung im Fusiformen ROI (linker Fusiformer Cortex definiert nach Pickatlas),

$p < .001$, uncorrected

Extent threshold: $k = 10$ voxels

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.000	556	0.000	0.000	0.000	12.66	5.40	0.000	-48 -70 -18
			0.000	0.000	9.61	4.87	0.000	-40 -46 -16
			0.003	0.000	7.98	4.50	0.000	-44 -60 -16

Bei den Fleckfiguren findet sich im Vergleich zu den chinesischen Schriftzeichen ein etwas deutlicher dorsal ausgeprägtes Aktivierungsmuster. Beidseits umfasst ein großer Aktivierungscluster Anteile des mittleren und inferior-okzipitalen Cortex, ebenso finden sich Maxima im inferioren Temporallappen. Der Fusiforme Cortex wird weniger aktiviert, als bei den chinesischen Schriftzeichen. In dorsaler Richtung findet sich beidseits eine Aktivierung entlang des intraokzipitalen Sulcus in den superioren Okzipitallappen und weiter entlang des intraparietalen Sulcus in Richtung des superioren Parietallappens.

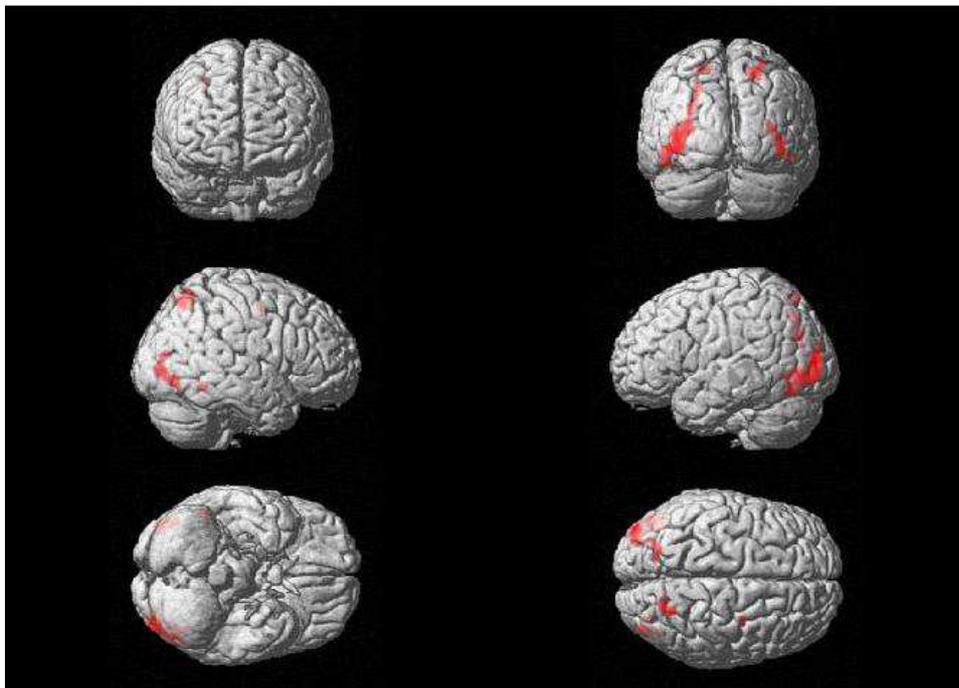


Abb. 21 : Pre-training-Messung (t1): Fleckfiguren > Grays; $p < .1e-005$ uncorrected; Extent threshold $k = 10$ Voxels.

Tab. 7 - Fleckfiguren > Grays t1 $p < .1e-005$, uncorrectedExtent threshold: $k = 10$ voxels

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.000	501	0.000	0.046	0.002	10.39	5.03	0.000	-40 -92 4
			0.087	0.002	9.63	4.88	0.000	-48 -70 -18
			0.126	0.002	9.10	4.77	0.000	-50 -74 -10
0.000	97	0.000	0.073	0.002	9.89	4.93	0.000	-26 -74 30
			0.254	0.002	8.12	4.54	0.000	-22 -70 44
0.000	166	0.000	0.094	0.002	9.53	4.86	0.000	42 -84 -4
			0.163	0.002	8.74	4.69	0.000	42 -72 -6
			0.278	0.002	7.99	4.50	0.000	32 -80 12
0.000	143	0.000	0.116	0.002	9.22	4.79	0.000	26 -60 60
			0.157	0.002	8.80	4.70	0.000	22 -68 56
0.005	23	0.007	0.165	0.002	8.73	4.68	0.000	34 -4 44
0.002	29	0.003	0.223	0.002	8.30	4.58	0.000	52 -48 -14
0.006	21	0.009	0.240	0.002	8.20	4.56	0.000	-12 -74 60
			0.318	0.002	7.79	4.46	0.000	-20 -72 58

Anatomische Zuordnung der Clustermaxima nach „Anatomy toolbox“, dahinter jeweils equivZ-Wert:

-40 -92 4	--	5.03
-48 -70 -18	linker Inferior -okzipitaler Cortex	4.88
-50 -74 -10	linker Inferior -okzipitaler Cortex	4.77
-26 -74 30	linker mittlerer Okzipitalcortex	4.93
-22 -70 44	linker superiorer Parietallappen	4.54
42 -84 -4	rechter Inferior -okzipitaler Cortex	4.86
42 -72 -6	rechter inferior-temporaler Cortex	4.69
32 -80 12	rechter mittlerer Okzipitalcortex	4.50
26 -60 60	rechter superiorer Parietallappen	4.79
22 -68 56	rechter superiorer Parietallappen	4.70
34 -4 44	--	4.68
52 -48 -14	rechter inferior-temporaler Cortex	4.58
-12 -74 60	linker Precuneus	4.56
-20 -72 58	linker superiorer Parietallappen	4.46

Um auch hier eine Aktivierung des linken Fusiformen Cortex zu überprüfen, wurde dieser mittels „WFU Pickatlas Tool Version 2.4“ als ROI definiert, wie bereits für die chinesischen Schriftzeichen geschehen. Im Ergebnis zeigten sich drei Maxima, von denen dasjenige mit dem höchsten T-Wert identische Koordinaten mit demjenigen der chinesischen Schriftzeichen aus der gleichen Analyse aufweist.

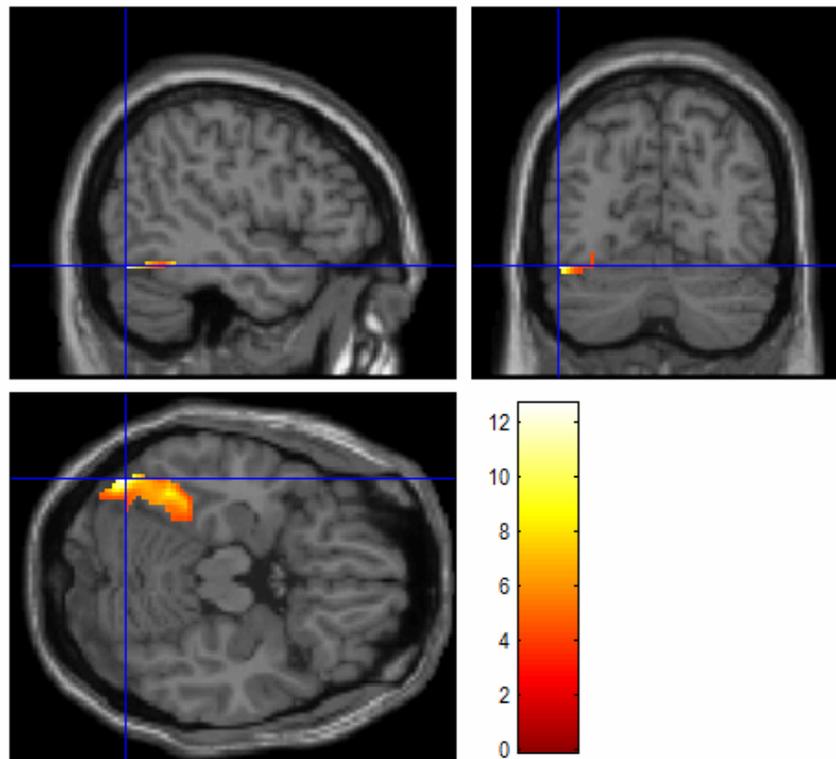


Abb. 22 - Pre-training-Messung (t1) : Fleckfiguren > Grays; ROI: linker Fusiformer Gyrus; $p < .001$ uncorrected; Extent threshold $k = 10$ Voxels. Maximum bei MNI: [-48 -70 -18]

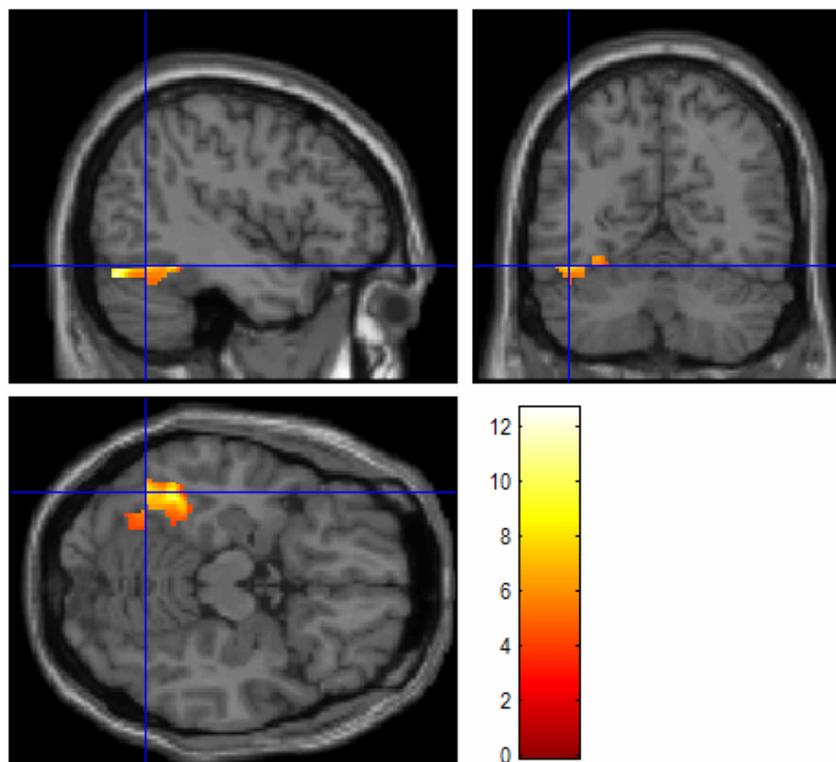


Abb. 23 - Pre-training-Messung (t1) : Fleckfiguren > Grays; ROI: linker Fusiformer Gyrus; $p < .001$ uncorrected; Extent threshold $k = 10$ Voxels. Maximum bei MNI: [-44 -60 -16]

Tab. 8 - Fleckfiguren > Grays t1

ROI : linker Fusiformer Cortex

 $p < .001$, uncorrectedExtent threshold: $k = 10$ voxels

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.001	161	0.003	0.000	0.000	9.63	4.88	0.000	-48 -70 -18
			0.015	0.001	6.29	4.02	0.000	-46 -60 -16
			0.018	0.001	6.08	3.95	0.000	-42 -80 -18

Beide Itemtypen aktivieren Areale im Fusiformen Cortex, in dem von einigen Autoren die „Visual Word Form Area“ (VWFA) vermutet wird. Dabei zeigt sich eine deutliche Nähe der bestimmten Koordinaten für die VWFA bei der Verarbeitung westlicher Schriftzeichensysteme und fernöstlicher Schriften. Cohen et al. (2002) finden eine erhöhte Aktivierung alphabetischer Stimuli gegenüber einer Kontrolle aus Schachbrettmustern bei MNI: [-39 -58 -14]. Vigneau et al. (2005) mittelten in einer Metaanalyse die Maxima aus 16 Studien westlicher Schriften und bestimmten die Lage der VWFA bei MNI: [-44 -58 -15]. Bolger et al. (2005) berichten von einer Beteiligung der VWFA an der Verarbeitung chinesischer Schriftzeichen, die bei MNI: [-49 -54 -15] bestimmt wurde. Bei der ROI-Analyse des linken Fusiformen Cortex findet sich für beide Itemtypen jeweils ein Maximum in der Nähe der beschriebenen Koordinaten. Für die chinesischen Schriftzeichen liegt es bei MNI: [-44 -60 -16], für die Fleckfiguren bei MNI: [-46 -60 -16]. Ich habe als ROI eine Sphere mit Durchmesser 8.0 mm um die Koordinaten von Bolger et al. (2005) und ebenso um die Koordinaten von Vigneau et al. (2005) gelegt. Das so bestimmte ROI wird für beide Itemtypen (chinesische Schriftzeichen > Grauwertitems, $p < .001$ und Fleckfiguren > Grauwertitems, $p < .001$) hoch signifikant ($p < .01$, $T = 9.63$ für das ROI von Bolger et al., 2005). Auch die Aktivationsstärken der beiden Itemtypen unterscheiden sich in diesen ROIs nicht signifikant. In diesen Analysen ließ sich also eine signifikant unterschiedliche Verarbeitung nicht erkennen. Dass die chinesischen Schriftzeichen offenbar dennoch im Fusiformen Cortex stärkere Aktivierungen hervorrufen, zeigte sich im direkten Vergleich der Itemtypen gegeneinander (Vergleich 1b), der im folgenden Abschnitt dargestellt wird.

Vergleich 1b: Zeichentypen (chinesische Schriftzeichen, Fleckfiguren) gegeneinander

Beide Itemtypen wurden zunächst auf Whole-brain-level gegeneinander verglichen. Dabei erbrachte der Kontrast chinesische Schriftzeichen > Fleckfiguren bei gleicher Korrekturstufe wie in den vorangehenden Vergleichen ($p < 1e-005$ uncorrected) keine signifikanten Voxel. Im Vergleich Fleckfiguren > chinesische Schriftzeichen wird bei Korrektur $p < 1e-005$ uncorrected ein Cluster (26 Voxel, Maximum bei MNI: [22 -72 56], $p < .01$, $T = 9.72$) im rechten superioren Parietallappen (BA 7P) signifikant.

Auch bei Lockerung des Korrekturniveaus werden im Kontrast chinesische Schriftzeichen > Fleckfiguren keine Cluster in posterioren Arealen signifikant. Für die Fleckfiguren zeigt sich dann ein zusätzlicher Cluster im lateral okzipitalen Cortex bei MNI: [36 -84 20]. Die Aktivierung in dieser Region scheint beidseitig zu sein, wobei bei dieser Korrekturstufe nur der rechtsseitige Cluster nach Korrektur noch signifikant bleibt.

Aufgrund der Literaturbefunde (Bolger et al., 2005; Nakamura et al., 2005; Vigneau et al., 2005) war zu vermuten, dass die chinesischen Schriftzeichen aufgrund ihres Zeichencharakters im Fusiformen Cortex anders als die Fleckfiguren verarbeitet werden. Um speziell diese Hypothese zu testen, habe ich als ROI zunächst den Fusiformen Cortex beidseits definiert und in diesen Arealen auf Signifikanz für die chinesischen Schriftzeichen geprüft. Dabei ergab sich ein Cluster im linken Fusiformen Cortex (15 Voxel, Maximum bei MNI: [-30 -40 -24], $p < .01$, $T = 4.85$).

Vergleich 2: Unspezifische Trainingseffekte

Die unspezifischen Trainingseffekte wurden, analog zur Auswertung der Verhaltensdaten, als Vergleich Zeichen(neu) t1 > Zeichen(neu) t2 geprüft. Bei gleicher Korrekturstufe wie in den vorangehenden Vergleichen ergeben sich in diesem Vergleich auf Whole-brain-level keine Signifikanzen. Auch bei Lockerung des Signifikanzniveaus auf $p < .0001$ werden keine posterioren Areale signifikant. Lediglich für den Vergleich chinesische Schriftzeichen t1 > chinesische Schriftzeichen „Novels“ t2 wird noch ein, allerdings anterior gelegener Cluster gefunden, der auch korrigiert noch annähernd Signifikanzniveau ($p = .07$) erreicht. Dieser erstreckt sich über einen Bereich, dem das

linke Pallidum/Putamen zugeordnet wird. (Maximum bei MNI: [-24 -10 0], $T = 8.55$). Im Vergleich Fleckfiguren $t_2 >$ Fleckfiguren t_1 werden entsprechende Areale nicht signifikant.

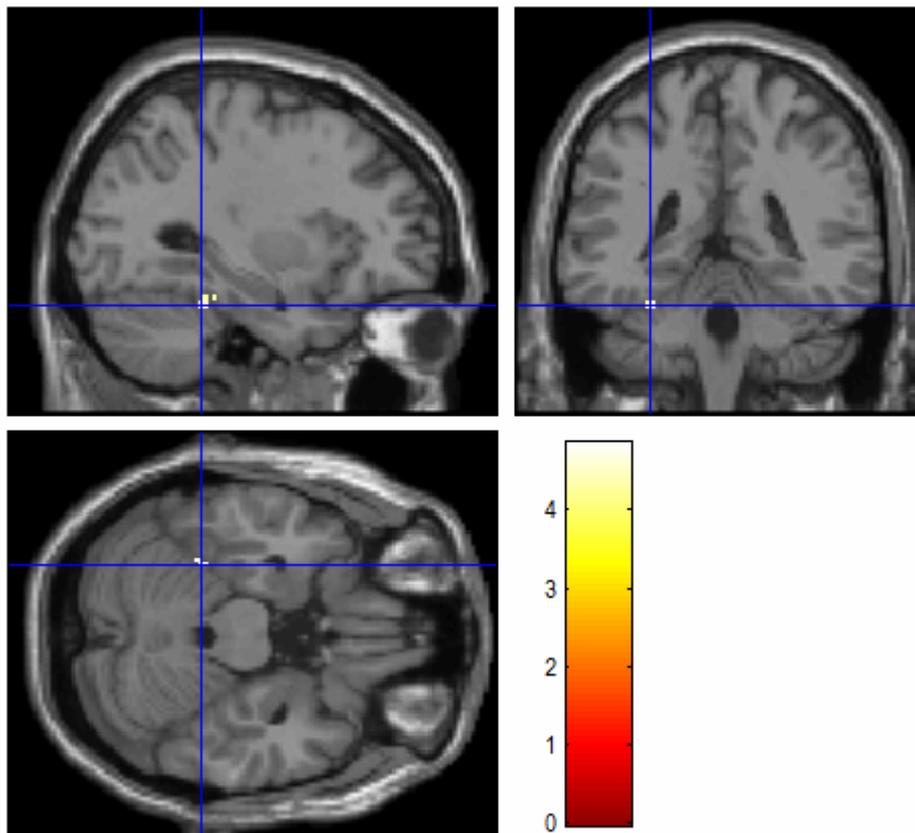


Abb. 24 - Pre-training-Messung (t_1): chinesische Schriftzeichen $>$ Fleckfiguren; ROI: linker Fusiformer Gyrus; $p < .001$ uncorrected; Extent threshold $k = 10$ Voxels. Maximum bei MNI: [-30 -40 -24]

Vergleich 3: Spezifischer Trainingseffekt

Auch hier wurde das Signifikanzniveau gelockert, um eventuelle schwächere Effekte nicht zu verpassen. Eine Whole-brain-analyse mit Level $p < .001$ übersteht auf Cluster-Ebene ein Aktivationscluster rechts, der sich vom mittleren okzipitalen Cortex in den rechten Temporalcortex erstreckt. Dabei ergeben sich Aktivationsmaxima im rechten mittleren Okzipitalcortex und im rechten inferior-temporalen Cortex im Bereich des okzipito-temporalen Überganges. Unkorrigiert erreicht noch ein Cluster am linken okzipito-temporalen Übergang annähernd Signifikanzniveau ($p = .066$). Die nach Korrektur auf Cluster-level signifikanten Areale sind in Tabelle 9 dargestellt.

Um auf das Vorliegen einer Aktivierungszunahme zu testen, wurde auch der gegenteilige Kontrast gebildet („Repeats“ > „Novels“). Hierfür wurden jedoch, auch unkorrigiert, keine Voxel signifikant.

Tab. 9 - Chinese „Novels“ t2 > Chinese „Repeats“ t2

$p < .001$, uncorrected

Extent threshold: $k = 10$ voxels

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.000	404	0.000	0.804	0.380	6.75	4.16	0.000	42 -82 12
			0.962	0.380	6.00	3.92	0.000	44 -70 -4
			0.969	0.380	5.94	3.90	0.000	36 -86 2
0.784	29	0.066	1.000	0.380	5.00	3.54	0.000	-42 -72 -2

Anatomische Zuordnung der Clustermaxima nach „Anatomy toolbox“, dahinter jeweils equivZ-Wert:

42 -82 12	rechter mittlerer Okzipitalcortex	4.16
44 -70 -4	rechter inferior temporaler Cortex	3.92
36 -86 2	rechter mittlerer Okzipitalcortex	3.90
-42 -72 -2	linker mittlerer Okzipitalcortex	3.54

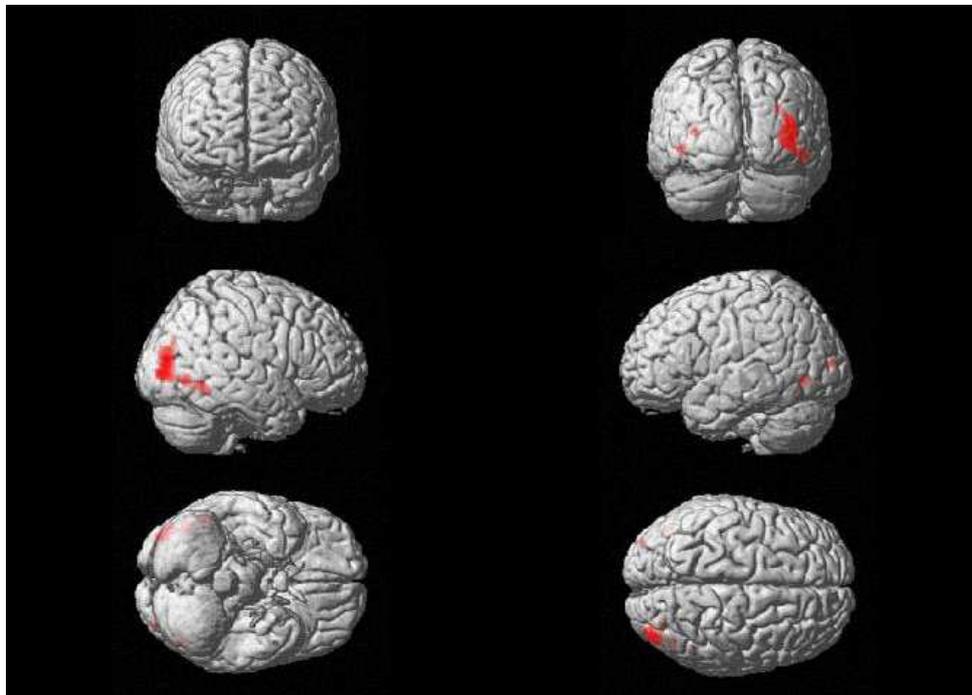


Abb. 25 - Chinese „Novels“ t2 > Chinese „Repeats“ t1; Extent threshold: $k = 10$ voxels; $p < .001$, uncorrected: Areale, die weniger Aktivität für trainierte, als für untrainierte Stimuli zeigten (spezifischer Trainingseffekt)

In einer Studie von Xue et al. (2006) trainierten Chinesen eine artifizielle Schrift, basierend auf dem für sie unbekanntem koreanischen Schriftzeichensystem. Unter anderem wurde hier geprüft, in welchen Arealen das Training der visuellen Form der Schriftzeichen zu einer Aktivierungsabnahme führt. Die Autoren fanden einen solchen trainingsbedingten Repetitioneffekt im linken Fusiformen und linken mittleren okzipitalen Cortex, sowie in einem rechtsseitigen inferio-temporalen und Fusiformen Areal. Eine Ähnlichkeit zu meinen Daten ergibt sich zum einen für das rechtsseitige temporale Areal. Zur Überprüfung habe ich eine Sphere mit Radius 8 mm bei MNI: [39 -60 -9] gelegt und erhalte ein signifikantes Ergebnis ($p < .05$).

Vergleich 4: Generelle Setsizeeffekte

Eine weitere Analyse testete auf Aktivierungsänderungen durch die Modulation der Setsize. Dahinter steht die Vermutung, dass mit zunehmender Setsize die Anforderungen an das visuelle Arbeitsgedächtnis steigen (Xu & Chun, 2006). Dazu wurde zunächst die Korrelation der Aktivierung mit einem linear ansteigenden Prädiktor überprüft und anschließend die Veränderungen zwischen einzelnen Setsizes getestet. Auch hier beschränkte ich mich auf die Auswertung posteriorer Areale. Im Folgenden sind nur Cluster aufgeführt, die korrigiert signifikant werden ($p < .05$).

Bei der Pre-training-Messung wurden für die chinesischen Schriftzeichen zwei Cluster signifikant, ein linksparietales mit drei Maxima und eines im lateral okzipitalen Cortex. Beide liegen relativ nahe bei den Maxima, die auch in der Vergleichsstudie von Xu und Chun (2006) angegeben wurden. Mittelt man die Koordinaten der drei parietalen Maxima, so erhält man einen Punkt bei MNI: [-27 -61 45]. Die genaue Entfernung des Vektors zwischen diesen gemittelten Maxima und dem Maximum des ROI „superiorer IPS“ (intraparietaler Sulcus) der Studie von Xu und Chun (MNI: [-21 -70 42]) beträgt 11,2 mm. Da das Areal viele Voxel umfasst, kann vermutet werden, dass es sich in beiden Studien um dasselbe Areal handelt, mit verschiedenen lokalen Maxima. Die Vermutung konnte dadurch unterstützt werden, dass eine kleine Sphere (3 mm Durchmesser) als ROI um die Koordinaten der Xu und Chun – Studie definiert, auf Voxel- und Clusterlevel als signifikant ausgewiesen wird (je $p < .01$).

Bei dem zweiten, lateral okzipitalen Areal liegt das gefundene Maximum mit dem höchsten T-Wert 7,1 mm entfernt, weiter ventral von dem Maximum, das bei Xu und

Chun für den LOC angegeben wurde. Mittelt man die Koordinaten beider Maxima, so resultiert ein Punkt bei MNI: [32 -66 -10]. Dieser liegt 12,1 mm von dem bei Xu und Chun gegebenen Punkt für den LOC entfernt. Tabelle 10 zeigt die gefundenen Koordinaten, Abb. 27 und 28 eine Darstellung auf dem Standardgehirn.

Bei den Fleckfiguren folgte kein Areal signifikant der angenommenen linearen Abhängigkeit mit der Setsize.

Für die Post-training-Messung ließ sich folgendes Ergebnis ermitteln: Die chinesischen Schriftzeichen Typ „Novels“ aktivieren in posterioren Hirnarealen zwei Cluster. Derjenige mit den höchsten T-Werten liegt im Parietalcortex. Mittelt man hier die Koordinaten der Maxima, so erhält man mit MNI: [-24 -66 43] einen Punkt, der nur 5,1 mm vom IPS der Studie von Xu und Chun (2006) entfernt liegt. Zu dem gemittelten Punkt der Pre-training-Messung im IPS ergibt sich eine Entfernung von nur 6,2 mm. Hier zeigt sich zudem Aktivität in einem rechtsseitigen parietalen Areal bei MNI: [22 -60 52], es handelt sich mit großer Wahrscheinlichkeit um das rechtsseitige Pendant. Die Entfernung zum ROI „rechter IPS“ der Studie von Xu und Chun (MNI: [23 -56 46]) beträgt 7,2 mm.

Tab. 10 - Chinese > Grays t1; Abhängigkeit von Setsize

$p < .001$, uncorrected

Extent threshold: $k = 10$ voxels

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.000	216	0.000	0.564	0.130	6.72	4.15	0.000	-34 -60 44
			0.881	0.130	5.73	3.82	0.000	-26 -58 44
			0.938	0.130	5.46	3.72	0.000	-20 -64 48
0.016	95	0.001	0.730	0.130	6.23	4.00	0.000	-38 -66 -10
			0.974	0.130	5.18	3.61	0.000	-26 -66 -10

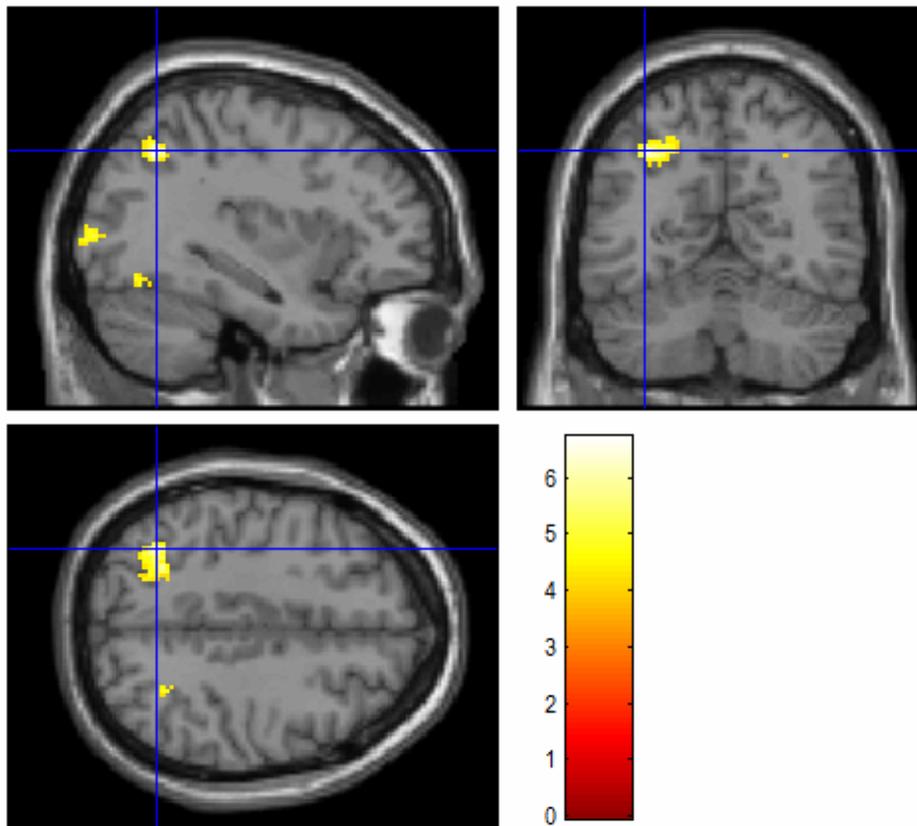


Abb. 26 - Chinese > Grays t1; parietales Maximum des Setsize-Effektes bei MNI: [-34 -60 44]

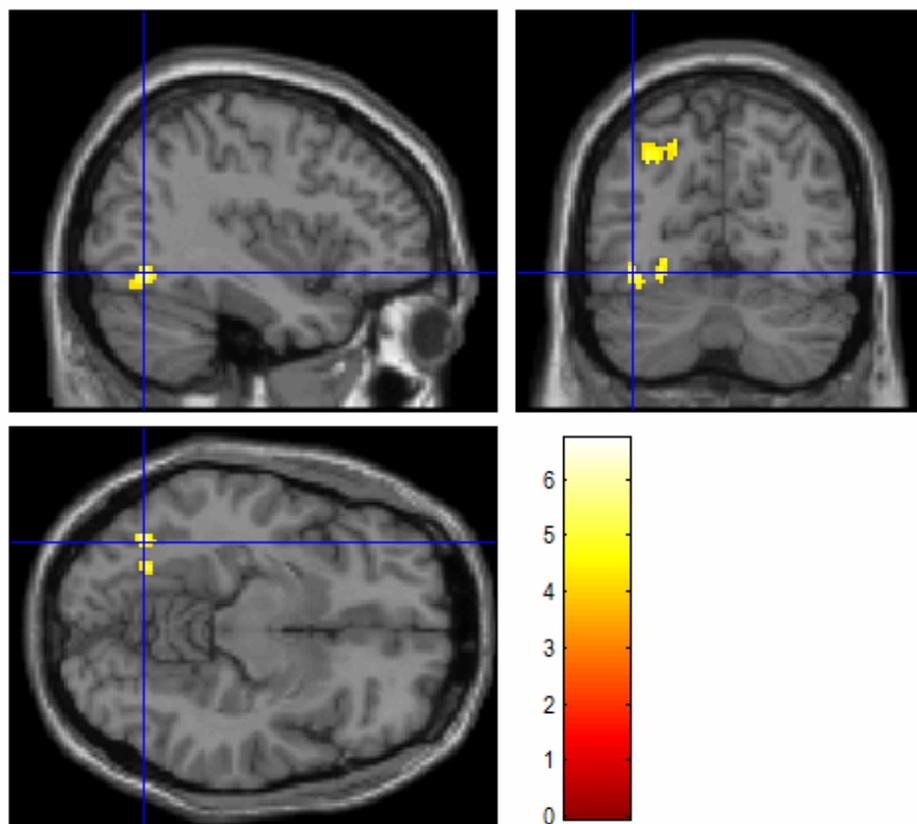


Abb. 27 - Chinese > Grays t1; lateral okzipitales Maximum des Setsize-Effektes bei MNI: [-38 -66 -10]

Auf Clusterlevel zeigt sich unkorrigiert noch ein lateral okzipitales Areal (LOC). Mittelt man hier die Koordinaten, ergibt sich ein Punkt bei MNI: [-40 -62 -12], 14,2 mm entfernt von dem ROI-Maximum „LOC“ bei Xu und Chun (MNI: [-44 -71 -5]), aber nur 4,9 mm vom Aktivierungsmaximum im LOC, das durch die chinesischen Schriftzeichen in der Pre-training-Messung erzeugt wurde. Es ist also sehr wahrscheinlich, dass die für LOC und IPS ermittelten Maxima in Pre- und Post-training-Messung jeweils in denselben Arealen liegen. Tab. 12 zeigt die gefundenen Maxima, Abbildungen 26-28 eine Darstellung auf dem Standardgehirn.

Tab. 11 - Chinese „Novels“ > Grays t2; Abhängigkeit von Setsize

Extent threshold: k = 10 voxels

$p < .001$, uncorrected

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.000	235	0.000	0.006	0.004	11.49	5.22	0.000	-26 -64 50
			0.980	0.070	5.17	3.61	0.000	-22 -68 36
0.020	85	0.002	0.049	0.006	9.31	4.81	0.000	22 -60 52
0.003	124	0.000	0.595	0.027	6.69	4.14	0.000	-34 -48 34
			0.895	0.050	5.73	3.82	0.000	-32 -50 42
			0.976	0.068	5.22	3.63	0.000	-28 -58 30
0.138	49	0.012	0.977	0.069	5.20	3.62	0.000	-44 -66 -10
			0.994	0.080	4.91	3.50	0.000	-36 -58 -14

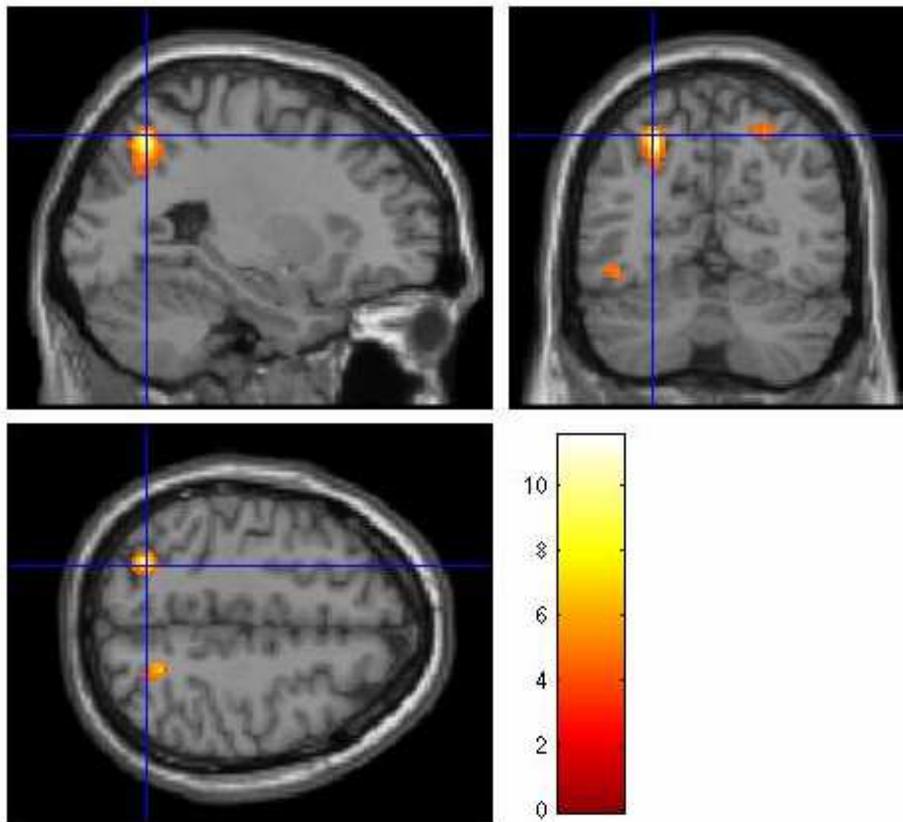


Abb. 28 - Chinese „Novels“ > Grays; parietales Maximum bei MNI: [-26 -64 50]

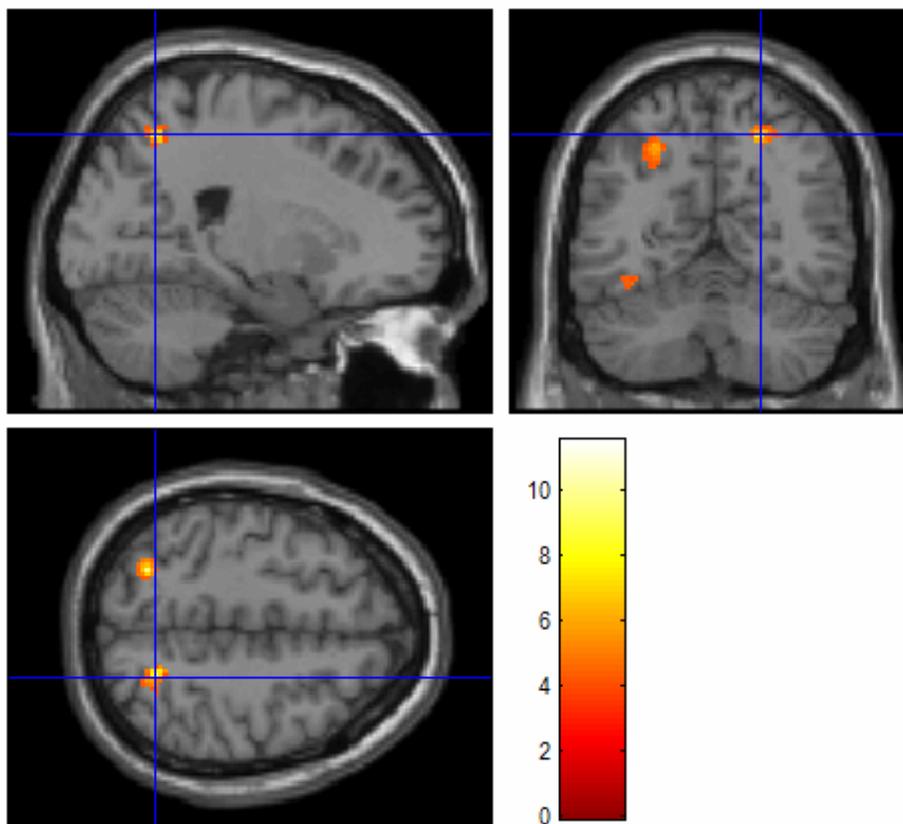


Abb. 29 - Chinese „Novels“; parietales Maximum bei MNI: [22 -60 52]

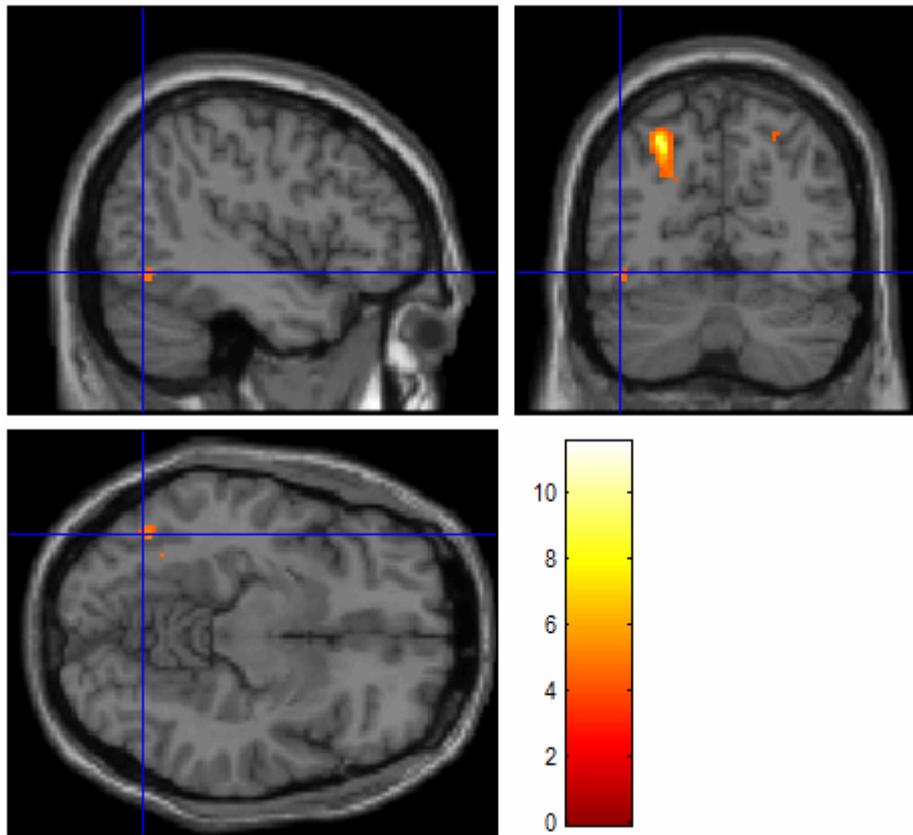


Abb. 30 - Chinese „Novels“ > Grays; lateral okzipitales Maximum des Setsize-Effektes bei MNI: [-44 -66 -10]

Tab. 12 - Chinese „Repeats“ > Grays t2; Abhängigkeit von Setsize

Extent threshold: $k = 10$ voxels

$p < .001$, uncorrected

cluster p(cor)	cluster equivk	cluster p(unc)	voxel p(FWE-cor)	voxel p(FDR-cor)	voxel T	voxel equivZ	voxel p(unc)	x,y,z {mm}
0.001	192	0.000	0.081	0.023	8.84	4.71	0.000	26 -62 52
			0.996	0.072	4.64	3.38	0.000	26 -64 34
0.000	248	0.000	0.554	0.047	6.60	4.12	0.000	-18 -90 -4
			0.979	0.067	4.99	3.54	0.000	-26 -88 10
			0.986	0.067	4.89	3.49	0.000	-38 -82 0
0.224	46	0.024	0.615	0.047	6.42	4.06	0.000	26 -90 10
0.032	89	0.003	0.750	0.049	6.03	3.93	0.000	-26 -60 52
0.061	74	0.006	0.928	0.062	5.38	3.69	0.000	-46 -58 -12
			0.930	0.062	5.37	3.69	0.000	-42 -48 -16

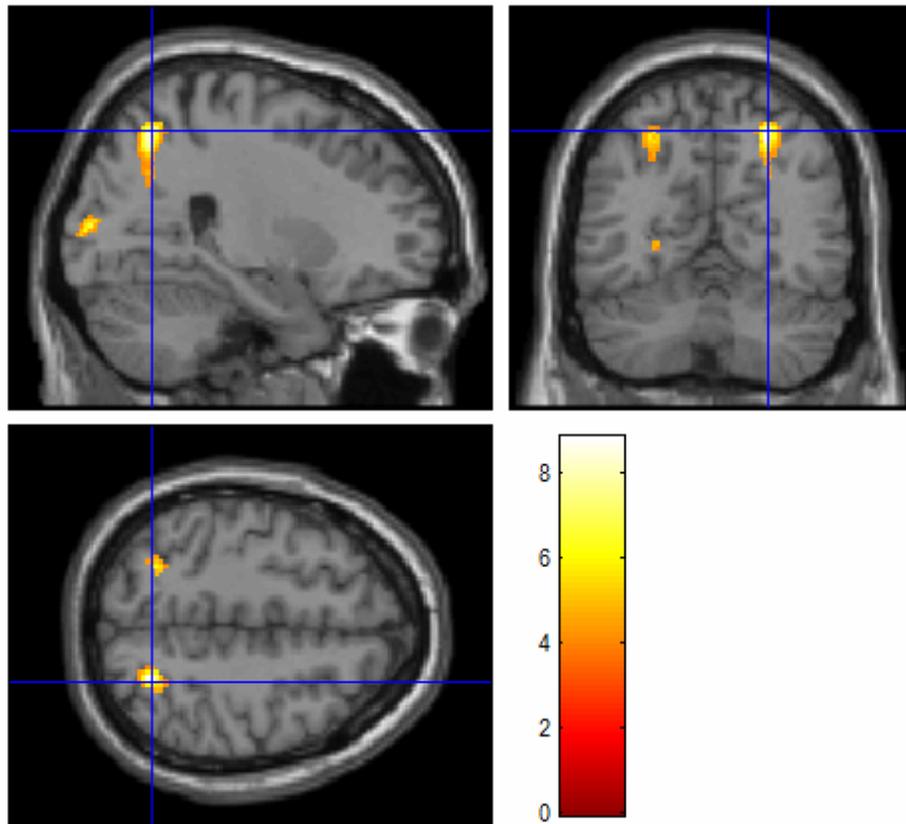


Abb. 31 - Chinese „Repeats“ > Grays; parietales Maximum des Setsize-Effektes rechts bei MNI: [26 -62 52]

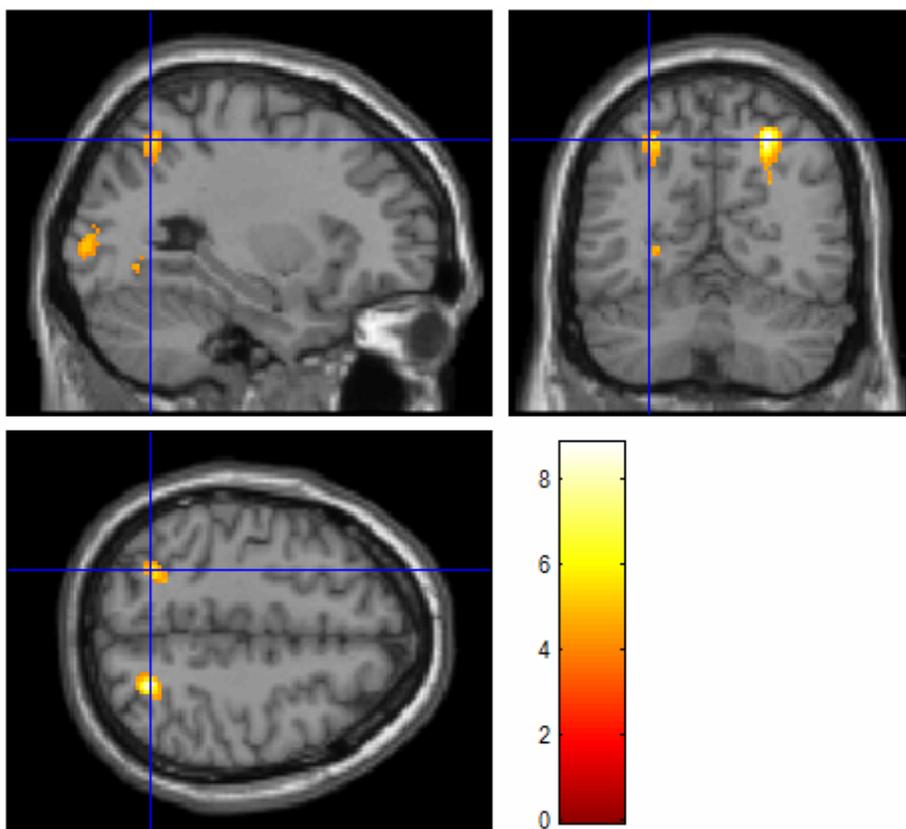


Abb. 32 - Chinese „Repeats“ > Grays; parietales Maximum des Setsize-Effektes links bei MNI: [-28 -62 50]

Die trainierten chinesischen Schriftzeichen („Repeats“) aktivieren wiederum beidseits parietale Areale, deren gemittelte Maxima bei MNI: [-26 -60 52] links und MNI: [26 -63 43] rechts liegen. Die Nähe zu den Koordinaten der Punkte der vorherigen Vergleiche lassen den Schluss zu, dass es sich um dieselbe Struktur handelt.

Desweiteren wird auch hier wiederum ein Cluster im linken lateral okzipitalen Cortex signifikant. Mitteln der Maxima ergibt einen Punkt bei MNI: [-44 -53 -14]. Tabelle 12 und die Abbildungen 29 und 30 stellen die Befunde dar.

Vergleich 5: Paarweiser Vergleich benachbarter Setsizes getrennt für Zeichentypen

Aufgrund der deutlichen Übereinstimmung der Koordinaten, die für die chinesischen Schriftzeichen in unterschiedlichen Bedingungen und Sitzungen gefunden wurden vermutete ich, dass es sich um dieselben Areale handelt, die setsizeabhängige Veränderungen zeigen. Im Folgenden wurde die Percent Signal Change für einzelne Setsizes in diesen Arealen ermittelt, um eine setsizeabhängige Veränderung der Aktivierungsstärke in diesen Arealen darstellen zu können. Die Runs einer fMRT-Messung wurden getrennt betrachtet, da es sich um getrennte Messungen handelt. In den Abbildungen 33-36 sind die Runs jeweils nebeneinander dargestellt, schwarze Balken kennzeichnen Standardfehler.

Für den IPS wurden die Koordinaten gemittelt aus den Kontrasten Chinese „Novels“ > Grays und Chinese „Repeats“ > Grays. Dadurch ergaben sich die Koordinaten MNI: [-25 -63 48] für den IPS links und MNI: [24 -62 48] für den IPS rechts.

In der Studie von Xu und Chun (2006) wurde der laterale okzipitale Cortex (LOC) als Areal definiert, das mit ansteigenden Anforderungen an das visuelle Arbeitsgedächtnis mit einer Aktivierungszunahme reagiert. Wie das Ergebnis der vorherigen Analyse zeigt, ist auch in diesem Areal eine Korrelation der Aktivierungsstärke mit der Setsize festzustellen. Die Nähe des Aktivationsmaximums, das in meiner Studie den spezifischen Trainingseffekt aufwies und dem Maximum des LOC aus der Studie von Xu und Chun (2006) kann festgestellt werden.

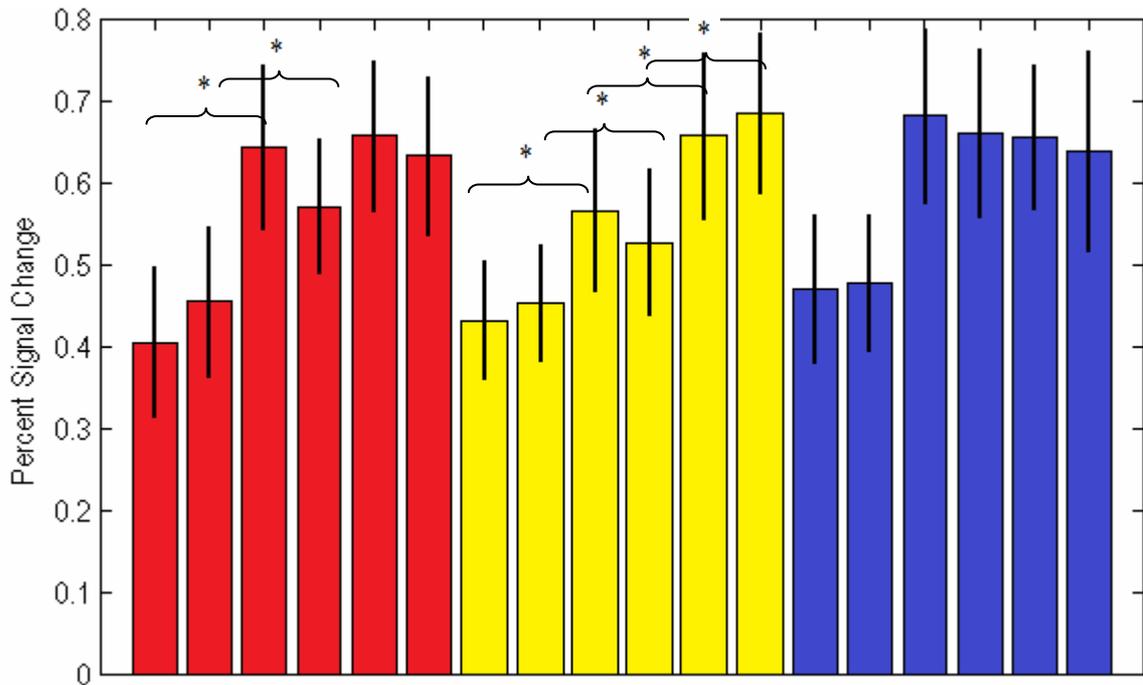


Abb. 33 – **Post-training-Messung**: Percent Signal Change; **ROI: Intraparietaler Sulcus (IPS) links** bei MNI: [-25 -63 48], Sphere-Durchmesser: 8 mm; Rote Balken: chinesische Schriftzeichen (Novels) , Setsize 1,2,3; Gelbe Balken: chinesische Schriftzeichen (Repeats), Setsize 1,2,3; Blaue Balken: Fleckfiguren, Setsize 1,2,3. Für jede Setsize sind die Runs einer Session getrennt aufgeführt. * kennzeichnet signifikante Differenzen, $p < .05$

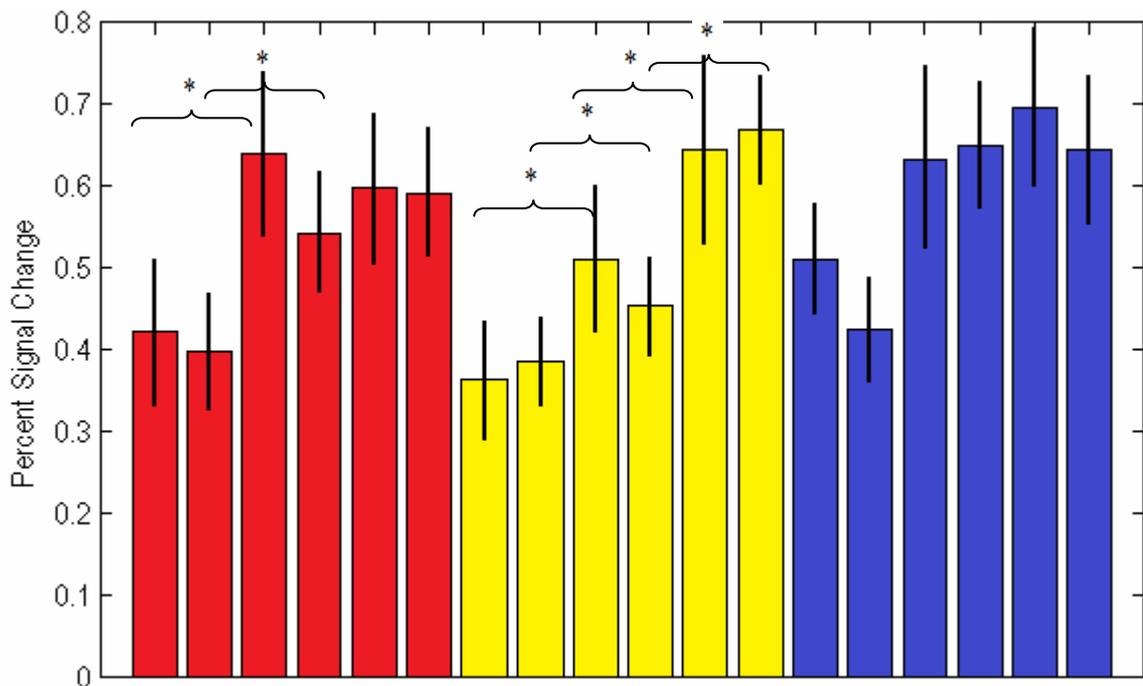


Abb. 34 - **Post-training-Messung**: Percent Signal Change; **ROI: Intraparietaler Sulcus (IPS) rechts** bei MNI: [24 -62 48], Sphere-Durchmesser: 8 mm; Rote Balken: chinesische Schriftzeichen (Novels); Gelbe Balken: chinesische Schriftzeichen (Repeats); Blaue Balken: Fleckfiguren. Für jede Setsize sind die Runs einer Session getrennt aufgeführt. * kennzeichnet signifikante Differenzen, $p < .05$

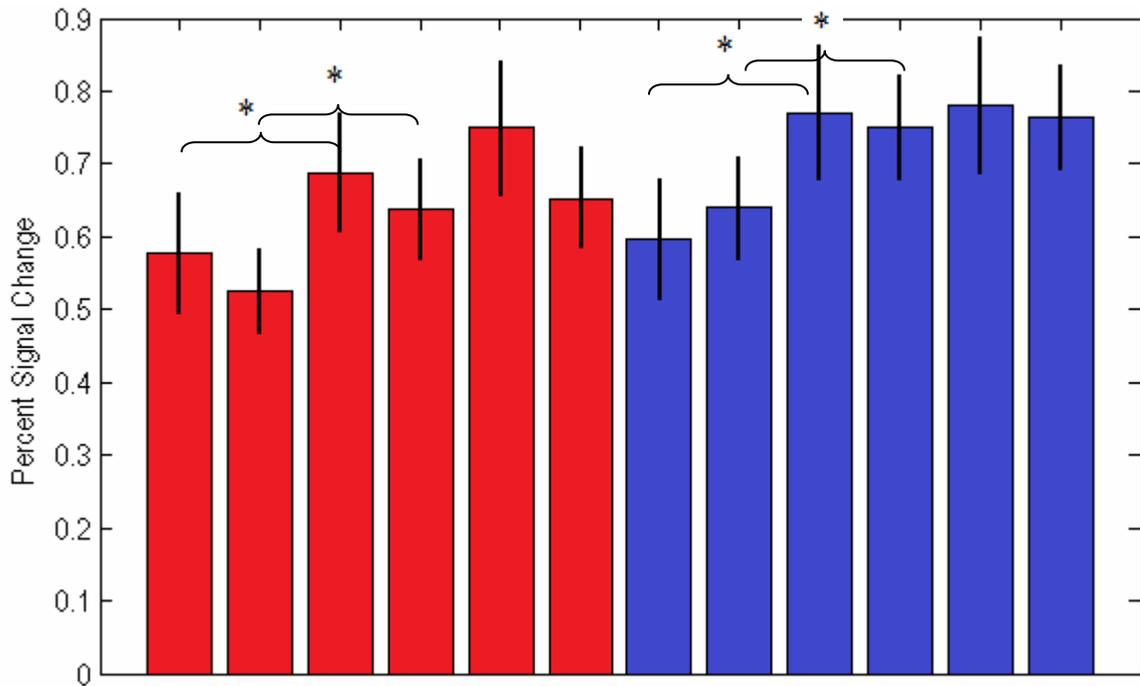


Abb. 35 - **Pre-training-Messung**: Percent Signal Change; ROI: **eigenes Maximum im mittleren okzipitalen Cortex rechts** aus dem Befund: spezifischer Trainingseffekt bei MNI: [42 -82 12], Durchmesser: 8 mm, Rote Balken: chinesische Schriftzeichen (c), Setsize 1,2,3; Blaue Balken: Fleckfiguren, Setsize 1,2,3. Für jede Setsize sind die Runs einer Session getrennt aufgeführt. * kennzeichnet signifikante Differenzen, $p < .05$

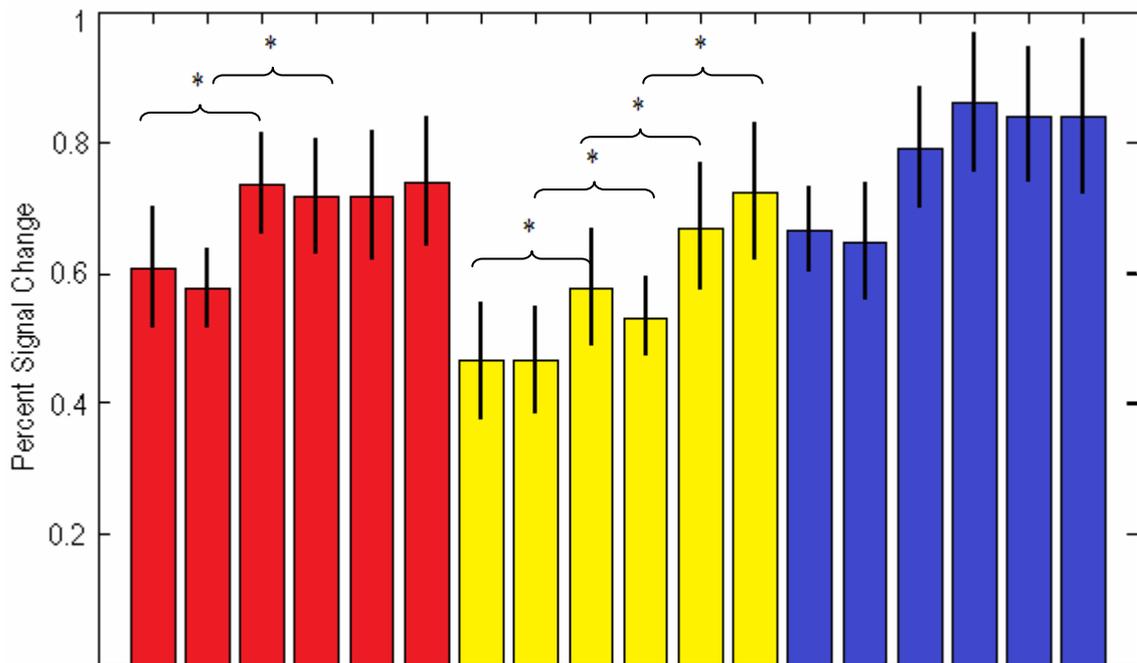


Abb. 36 - **Post-training-Messung**: Percent Signal Change; ROI: **eigenes Maximum im mittleren okzipitalen Cortex rechts** aus dem Befund: spezifischer Trainingseffekt bei MNI: [42 -82 12], Durchmesser: 8 mm, Rote Balken: chinesische Schriftzeichen „Novels“, Setsize 1,2,3; Gelbe Balken: chinesische Schriftzeichen „Repeats“, Setsize 1,2,3; Blaue Balken: Fleckfiguren, Setsize 1,2,3. Für jede Setsize sind die Runs einer Session getrennt aufgeführt. * kennzeichnet signifikante Differenzen, $p < .05$

Um den hier vermuteten spezifischen Trainingseffekt genauer, getrennt für einzelne Setsizes zu betrachten, bestimmte ich die Percent Signal Change im Aktivationsmaximum des Kontrasts chinesische Schriftzeichen „Novels“ (t2) > chinesische Schriftzeichen „Repeats“ (t2). Abbildungen 33 und 34 veranschaulichen die gefundenen Daten. Es ließ sich feststellen, dass die Region die den spezifischen Trainingseffekt zeigt bereits bei zwei neuen Items (blaue und rote Balken) die maximale Aktivationsstärke erreicht hat. Die Anstiege zwischen Setsize 2 und 3 werden hier nicht mehr signifikant. Vergleicht man trainierte (Repeats, gelb), mit nicht trainierten Schriftzeichen (Novels, rot) der Post-training-Messung, so fällt auf, dass für beide Itemtypen bei Setsize 3 die neuronale Aktivität nicht signifikant unterschiedlich hoch ist. Für die trainierten Schriftzeichen findet man jedoch ein signifikant niedrigeres Einstiegsniveau und hier werden die Aktivierungsunterschiede zwischen allen drei Setsizes signifikant.

6.3 Übersicht über die fMRT-Ergebnisse

Tab. 13 – Visuelle Verarbeitung der Itemtypen

chinesische Schriftzeichen	Fleckfiguren
<ul style="list-style-type: none"> - linker mittlerer okzipitaler Gyrus - linker inferior okzipitaler Gyrus - rechter mittlerer okzipitaler Gyrus - rechter inferior okzipitaler Gyrus - rechter Fusiformer Gyrus 	<ul style="list-style-type: none"> - linker superiorer Parietallappen - linker Precuneus - linker mittlerer okzipitaler Gyrus - linker inferior okzipitaler Gyrus - rechter superiorer Parietallappen - rechter mittlerer okzipitaler Gyrus - rechter inferior okzipitaler Gyrus - rechter inferior temporaler Cortex

Tab. 14 – Spezifischer Trainingseffekt

<ul style="list-style-type: none"> - linker mittlerer Okzipitallappen - rechter mittlerer Okzipitallappen - rechter inferior temporaler Cortex

Tab. 15 – lineare Setsizeeffekte

	chinesische Schriftzeichen (Novels)	chinesische Schriftzeichen (Repeats)
Prätrainings- messung (t1)	<ul style="list-style-type: none"> - linker intraparietaler Sulcus - linker lateral okzipitaler Cortex 	
Posttrainings- messung (t2)	<ul style="list-style-type: none"> - linker intraparietaler Sulcus - linker lateral okzipitaler Cortex - rechter intraparietaler Sulcus 	<ul style="list-style-type: none"> - linker intraparietaler Sulcus - linker lateral okzipitaler Cortex - rechter intraparietaler Sulcus

7 Diskussion

In der vorliegenden Studie konnte nachgewiesen werden, dass das Training bestimmter visueller Stimuli zu reizspezifischen Trainingseffekten führt, die mit neuronalen Aktivationsänderungen korrelieren. Auf der Verhaltensseite zeigte sich eine Zunahme der Behaltensleistung und damit der Arbeitsgedächtniskapazität für trainierte gegenüber nicht trainierten Objekten (Zeichen), wenn die Anzahl der Objekte nicht die maximal mögliche Behaltensleistung überstieg. Zudem wurden bekannte Objekte schneller verarbeitet als unbekannte, was aus Reaktionszeitverkürzungen bei der Antwortgabe auf trainierte Reize im Vergleich zu nicht trainierten Reizen geschlossen werden kann. Mit diesem spezifischen Trainingseffekt gingen Aktivationsabnahmen in Regionen des Visuellen Arbeitsgedächtnisses einher. Darüber hinaus ergab sich eine generelle Reaktionszeitverbesserung und Zunahme der Performanz vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt unabhängig von der Art der bearbeiteten Zeichen. Dies belegt einen generellen Trainingseffekt für trainierte und nicht trainierte visuell ähnliche Zeichen, aber auch für völlig neue Items, die andere visuelle Charakteristiken aufweisen als die trainierten. Die Ursache für diesen Übungseffekt ist folglich im Üben der Aufgabe und nicht in der Art des geübten Materials zu sehen.

Als Trainingsmaterial dienten Bestandteile chinesischer Schriftzeichen, sog. Radikale. Bei den Probanden lagen weder phonologische, noch semantische Kenntnisse zu diesen Stimuli vor. Im Training und den Messungen wurde ein „Change detection“ – Paradigma verwendet, das keine tiefere Beschäftigung mit den Items zuließ. Dadurch konnte von einer weitestgehend formal-visuellen Verarbeitung ausgegangen werden. Im Mittelpunkt der Betrachtungen standen Areale des posterioren Cortex, die in Studien immer wieder mit dem visuellen Arbeitsgedächtnis in Verbindung gebracht wurden. Dazu zählen der Parietalcortex, hier insbesondere der intraparietale Sulcus, der lateral-okzipitale Cortex, der okzipito-temporale Übergang und der Fusiforme Cortex, Teil des Temporallappens (s. a. Todd & Marrois, 2004; Song & Jiang 2006; Xu & Chun, 2006).

Ich ging von folgenden Annahmen aus: (1) Visuelle Objektrepräsentationen im Arbeitsgedächtnis und visuelle Repräsentationen im Langzeitgedächtnis werden im gleichen neuronalen Netzwerk realisiert (Lewis-Peacock & Postle, 2008; Zimmer, 2008). (2) Repräsentationen im Langzeitgedächtnis sind längerfristig verfügbare „Spuren“

früherer temporärer Objektrepräsentationen (Zimmer, 2008). Es konnte vermutet werden, dass Langzeitgedächtniseinträge das Arbeitsgedächtnis unterstützen (Zimmer & Fu, 2008). Daher ging ich von der Hypothese aus, dass das Arbeitsgedächtnis vom Lernen und speziell auch durch Training spezifischer Inhalte profitiert. Durch Training würde das neuronale System effizienter werden, da wahrgenommene Reize auf vorkonfigurierte Netzwerke treffen und dadurch leichter oder sparsamer repräsentiert werden können (Kelly & Garavan, 2005).

FMRT-Trainingsstudien fanden in Arealen des visuellen Arbeitsgedächtnisses Aktivationsänderungen (Olesen, Westerberg & Klingberg, 2004; Jansma, Ramsey, Slagter und Kahn, 2001; Xue et al., 2006; Xue & Poldrack, 2007), sodass solche auch in der vorliegenden Studie erwartet werden konnten. Dabei fand die Mehrzahl vergleichbarer Studien Aktivations**abnahmen** durch Training, besonders in posterioren Cortexarealen (z.B.: Jansma, Ramsey, Slagter & Kahn, 2001; Xue et al., 2006; Xue & Poldrack, 2007). In meiner Studie wurden Langzeitgedächtniseinträge für einen festgelegten Satz visueller Stimuli durch Training geschaffen. Zusätzliche Information, wie etwa Semantik, wurde dabei nicht trainiert. Auch die Komplexität wurde nicht moduliert. Dies sprach dafür, eine Abnahme neuraler Aktivität in den betrachteten Regionen zu erwarten.

Für diese Erwartung spricht die Theorie der „Repetition Suppression“. Perzeptuelles Priming, die wiederholte Präsentation derselben visuellen Stimuli, führte in Versuchen zu Reaktionszeitverbesserung und besserer Wiedererkennensleistung für die trainierten Items. Mit diesen Verbesserungen ging eine Aktivationsabnahme in den betrachteten visuellen Arealen einher (Vidyasagar, Stancak & Parkes, 2010; Parkes et al., 2004; Cabeza & Nyberg, 2000). Der Zusammenhang zwischen perzeptuellem Priming und Reduktion neuronaler Aktivität wird von Wiggs und Martin (1998) in ihrer Studie dargestellt. Die Modellvorstellung dieser „Einsparung“ neuronaler Aktivität geht auf Erkenntnisse einer Studie von Desimone aus dem Jahr 1996 zurück, in der die „Repetition Suppression“ bei Primaten beschrieben wurde: Wiederholte Exposition mit visuellen Stimuli führte zu einer Reorganisation beteiligter Neuronenverbände, die an der Codierung der visuellen Stimuli beteiligt waren (Desimone, 1996). Zunehmende Exposition mit dem visuellen Material führte zu vermehrtem Ausscheiden von Neuronen aus dem Verband, die nicht unmittelbar an der Verarbeitung des visuellen Inputs beteiligt waren, was als Effizienzsteigerung bei der neuronalen Codierung betrachtet wurde (Wiggs & Martin, 1998).

Zur Kontrolle eines Transfereffektes des Trainings auf eine visuell differente Zeichengruppe verwendete ich „Fleckfiguren“, softwaregenerierte Items gleicher Größe wie die chinesischen Schriftzeichen. Im fMRT zeigten sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede der verwendeten Stimulustypen: In der Whole-brain-Analyse der Pre-training-Messung stellten sich die chinesischen Schriftzeichen zunächst ähnlich wie die Fleckfiguren dar. Über weite Bereiche aktivierten beide Itemklassen ein gemeinsames Netzwerk entlang des dorsalen und ventralen Pfades visueller Informationsverarbeitung (Pinel, 2001). Fleckfiguren weisen einen eher räumlichen Charakter auf. Sie sind durch Verteilung schwarzer und weißer Flecken bzw. Aussparungen charakterisiert, die in räumlichem Bezug zueinander stehen. So fand sich bei den Fleckfiguren auch ein eher dorsal dominantes Aktivierungsmuster, das sich über den dorsalen Okzipitallappen in den intraparietalen Sulcus erstreckte. Mehrere Studien beschreiben eine Beteiligung des intraparietalen Sulcus bei räumlicher visueller Aufmerksamkeit (Liu et al., 2003; Thakral & Slotnick, 2009). Es ist daher anzunehmen, dass dies auf stärkere räumliche Anforderungen der Probanden bei der Verarbeitung der Items zurückgeführt werden kann. Außerdem stellten die Fleckfiguren offenbar höhere Anforderungen an die visuelle Verarbeitung, worauf eine beidhemisphärische Mehraktivierung der lateralen Okzipitalgyri hinweist. Chinesische Schriftzeichen hingegen stellten sich eher ventral dominant dar und führten zu einer etwas stärkeren Aktivierung im Bereich des linken Temporallappens, insbesondere des Gyrus Fusiformis.

Chinesische Schriftzeichen und Fleckfiguren aktivierten beide den linken Fusiformen Gyrus. Hier aktivierten beide ein Areal, das als Visual Word Form Area (VWFA) bekannt ist (Cohen, 2000). Offenbar spielt dieses Areal eine wichtige Rolle bei der Verarbeitung von Schrift(-zeichen). Studien wiesen dort erhöhte Aktivität bei der Verarbeitung von Schrift gegenüber anderen visuellen Kategorien wie Häusern oder Gesichtern nach (Baker et al., 2007; Hasson et al., 2002; Puce et al., 1996). Dabei hat die VWFA kultur- und Sprachsystem übergreifend immer eine ähnliche Lokalisation im Fusiformen Gyrus (s. Metaanalyse von Bolger, Perfetti & Schneider, 2005). Man argumentierte, dass das Lesen lernen für die spezifische funktionelle Ausformung dieses Areales verantwortlich sei (Cohen & Dehaene, 2003). Andere sehen dessen Spezifität für die Verarbeitung (bekannter) Schrift kritisch. Xue und Poldrack (2007) fanden in ihrer Studie mit bei englischsprachigen Probanden, denen koreanische Schriftzeichen präsentiert wurden, Aktivationen im Bereich der VWFA, die ebenso hoch waren wie für englische

geschriebene Worte. Dieser Effekt wird damit erklärt, dass ein gemeinsames Merkmal beider Zeichengruppen, ihr Aufbau aus Untereinheiten (Strichen) in bestimmter Konstellation zueinander, erlernt wurde. Auch Fleckfiguren weisen den Charakter von Zeichen auf, die aus einer bestimmten Konstellation von Untereinheiten aufgebaut sind, was erklären kann, weshalb auch diese eine Aktivierung in diesem Areal zeigen. Offenbar findet innerhalb des Fusiformen Cortex eine Verarbeitung bestimmter Objektkategorien an spezifischen Orten statt. (s. Metaanalyse in Dehaene & Cohen, 2007). Zeichen, die Schriftzeichen ähneln, werden dabei linkshemisphärisch repräsentiert.

Der spezifische Trainingseffekt wurde aus der Post-Training-Messung im direkten Vergleich des nicht trainierten Materials (Chinesische Schriftzeichen „Novels“) gegen das trainierte (Chinesische Schriftzeichen „Repeats“) bestimmt. Dies hatte gegenüber einem Vergleich desselben Materials aus den beiden Testzeitpunkten den Vorteil, dass Trainingseffekte, die auf das Einüben der Aufgabenstellung zurückgehen, ausgeschlossen wurden. In der Whole-brain-Analyse zeigte sich für Regionen, die an der Verarbeitung der trainierten chinesischen Schriftzeichen beteiligt sind, wie erwartet eine trainingsbedingte Aktivierungsabnahme (Repetition Suppression). Einen ähnlichen itemspezifischen Trainingseffekt stellten auch Xue und Kollegen (Xue et al., 2006; Xue & Poldrack, 2007) für rein visuelles Training von Schriftzeichen fest. In der vorliegenden Studie trat die Aktivierungsabnahme im Bereich des rechten Okzipitalcortex und des rechten okzipito-temporalen Übergangs auf. Es ist zu vermuten, dass Teile, oder bestimmte diskriminative Merkmale, die die verwendeten chinesischen Schriftzeichen aufweisen, in diesen Arealen verarbeitet werden.

Die Verhaltensdaten wiesen den spezifischen Trainingseffekt für zwei Items nach, das heißt, zwei trainierte Items konnten signifikant besser gehalten werden, als zwei nicht trainierte Items aus den anderen Kategorien (Chinesische Zeichen, nicht trainiert; Fleckfiguren). Ein unspezifischer Trainingseffekt zeigte sich in den Reaktionszeiten, d.h. Probanden sind für alle Itemkategorien nach dem Training schneller. Unabhängig vom Itemtyp wurden auch alle Aufgaben bei der Post-Training-Messung besser gelöst, als vor dem Training. Die stärkste Verbesserung von Pre-Training-Messung zu Post-Training-Messung konnte sogar bei den Fleckfiguren beobachtet werden. Dieser unspezifische Trainingseffekt könnte durch zunehmende Einübung der Aufgabe erklärt werden. Denkbar wäre auch zunehmende Konzentration auf die Aufgabenstellung oder strategisches Vorgehen, was allerdings in dieser Studie nicht Gegenstand der

Untersuchungen war; der Fokus sollte ausschließlich auf posterioren Arealen liegen, die dem visuellen Arbeitsgedächtnis zugeschrieben werden können.

Als Regionen, die setsizeabhängige Aktivationsunterschiede aufwiesen, stellten sich der superiore intraparietale Sulcus (sIPS) und der lateral okzipitale Sulcus (LOC) dar. Diese Strukturen sollten Teil des neuronalen Netzwerkes sein, welches das visuelle Arbeitsgedächtnis realisiert. Die Autoren Xu und Chun berichteten in ihrer bereits erwähnten Studie (Xu & Chun, 2006) in diesen Arealen eine Erhöhung der neuronalen Aktivität sowohl mit der Zahl der Objekte als auch über einen Komplexitätseffekt. Der neuronale Komplexitätseffekt zeigt sich bei ihnen in LOC und superiorem IPS. Die von mir in der vorliegenden Studie ermittelten Koordinaten zeigen eine deutliche Nähe zu den Arealen von Xu und Chun, sodass davon ausgegangen werden kann, dass es sich um die gleichen Strukturen handelt, die aktiv sind. Die verwendeten Hilfsmittel zur anatomischen Zuordnung (WFU Pickatlas Tool Version 2.4; Atlas of the Human Brain, s.o.) bestätigten diese Vermutung. Die gefundenen Setsize Effekte stimmen mit diesem Befundmuster überein: Mit zunehmender Setgröße (Setsize) nahm die Aktivierung in den betrachteten Regionen signifikant zu.

Eine genauere Betrachtung der Aktivierungen als Funktion der Setsize lieferte weitere Erklärungen für die gefundenen Verhaltensdaten. Die Regionen von Interesse (ROI) wurden bei den Koordinaten der Maxima bestimmt, die den spezifischen Trainingseffekt aufwiesen, da vor allem das Aktivationsverhalten in Bezug zur Setgröße und damit Anforderungen an das visuelle Arbeitsgedächtnis zu erwarten waren. Zum anderen galt das Interesse dem superioren intraparietalen Sulcus, für den bereits lineare Setsizeeffekte gefunden worden waren. Zur Bestimmung der Lage der Koordinate, die betrachtet werden sollte, wurden die Maxima für trainierte und nicht trainierte chinesische Schriftzeichen im Bereich des LOC gemittelt. Für alle bestimmten Koordinaten ergab sich ein einheitliches Bild: Bei drei Items erreichten die Aktivierungen einen Höchstwert, das Halten von drei Items schien zu schwierig zu sein. Der K-Index lag auch bei drei Items rechnerisch zwischen 1.5 und 1.7. Entsprechend ließ sich auch bei drei Items kein spezifischer Trainingsgewinn mehr ausmachen. Demgegenüber konnte ein Item leicht gehalten werden. Auch hier war kein Trainingsgewinn mehr möglich; die Aufgabe war zu leicht. In einem Bereich, in dem die ermittelte Kapazität der rechnerisch maximal möglichen nahe kommt (K-Index für 2 Items bei 1.4 für Fleckfiguren, 1.5 für nicht trainierte Schriftzeichen „Novels“, 1.7 für trainierte Schriftzeichen „Repeats“)

wiesen die betrachteten Areale LOC und sIPS je nach Itemtyp signifikante Aktivationsunterschiede auf: Bereits bei zwei nicht trainierten Zeichen war die maximale Aktivierung erreicht, bei zwei trainierten Zeichen lag sie signifikant darunter. Für den LOC, also das Areal, in dem offenbar spezifisch die trainierten Zeichen repräsentiert werden, ließ sich zudem ein niedrigeres Einstiegsniveau bei den trainierten Schriftzeichen feststellen. Die Aktivierung lag bereits bei Setsize 1 signifikant unter dem Niveau der anderen Typen. Die Fleckfiguren wurden hier auch mit deutlich höherem Aufwand repräsentiert bzw. gehalten, als die anderen Kategorien.

Die Reduktion neuronaler Aktivierung kann als Effizienzsteigerung interpretiert werden, die durch Training erzielt worden ist. Chinesische Zeichen können ohne Zweifel als komplexer visueller Input gelten und sie sollten deshalb im LOC und sIPS hohe Aktivierung auslösen. Es ist denkbar, dass durch Training Unterscheidungsvorgänge auf eine kleinere Anzahl kritischer Eigenschaften der Objekte begrenzt werden. Auf diese Weise würde die visuelle Komplexität trainingsbedingt sinken. Folglich sollten auch in diesen „komplexitätsabhängigen“ Regionen trainingsbedingte Veränderungen erwartet werden können. Repetition Suppression weist dabei zum einen die Region auf, die spezifisch die Zeichen repräsentiert (itemspezifischer Trainingseffekt), zum anderen komplexitätssensible Areale (LOC und sIPS). Die Einsparung neuronaler Aktivität könnte somit als eine „Vereinfachung“ auf dem Weg der visuellen Objektrepräsentation interpretiert werden. Die Beobachtungen deuten darauf hin, dass es itemspezifische Expertiseeffekte des Arbeitsgedächtnisses gibt. Objekte, die bekannt sind, werden mit weniger neuralem Aufwand repräsentiert und im Arbeitsgedächtnis gehalten als Objekte, die unbekannt sind. Dies könnte auch erklären, warum das Arbeitsgedächtnis von Experten für Reize, für die sie Expertise haben, besser ist als das von Novizen, obwohl sich beide Gruppen beim Behalten von Material außerhalb des Bereichs der Expertise nicht unterscheiden.

Literaturverzeichnis

1. Altmann CF, Bledowski C, Wibral M, Kaiser J (2007) Processing of location and pattern changes of natural sounds in the human auditory cortex. *Neuroimage* 35:1192–1200.
2. Alvarez GA, Cavanagh P (2004) The capacity of visual short-term memory is set both by visual information load and by number of objects. *Psychol Sci* 15:106-11.
3. Arnott SR, Grady CL, Hevenor SJ, Graham S, Alain C (2005) The functional organization of auditory working memory as revealed by fMRI. *J Cogn Neurosci* 17:819–831.
4. Atkinson RC, Shiffrin RM (1971) The control of short-term memory. *Sci Am* 225:82-90.
5. Baddeley AD, Hitch G (1974) Psychology of Learning and Motivation. *Advances in Research and Theory* 8:47-89.
6. Baddeley AD, Lieberman K (1980) Spatial working memory. In: Nickerson R (ed.) *Attention and Performance*, vol. VI, London: Academic Press.
7. Baddeley AD (1986) *Working Memory*. Oxford University Press, Oxford.
8. Baddeley AD (2000) The episodic buffer: A new component of working memory?. *Trends in Cognitive Sciences* 4:417-423.
9. Baddeley AD, Eysenck MW, Anderson MC (2009) *Memory*. Psychology Press, Hove.
10. Bolger DJ, Perfetti CA, Schneider W (2005) Cross-cultural effect on the brain revisited: universal structures plus writing system variation. *Hum Brain Mapp* 25:92-104.
11. Bor D, Duncan J, Owen AM (2001) The role of spatial configuration in tests of working memory explored with functional neuroimaging. *Scand J Psychol* 42:217.
12. Bor D, Duncan J, Wiseman RJ, Owen AM (2003) Encoding strategies dissociate prefrontal activity from working memory demand. *Neuron* 37:361.
13. Brener R (1940) An experimental investigation of memory span. *Journal of Experimental Psychology* 26:467-482.
14. Cabeza R, Nyberg L (2000) Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *J Cogn Neurosci* 12:1- 47.
15. Chen P (1999) *Modern Chinese: History and sociolinguistics*. Cambridge University Press.

16. Constantinidis C, Wang X (2004) A neural circuit basis for spatial working memory. *Neuroscientist* 10:553–565.
17. Cohen L, Dehaene S, Naccache L, Lehéricy S, Dehaene-Lambertz G, Hénaff MA, Michel F (2000) The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain* 123:291-307
18. Cohen L, Lehéricy S, Chochon F, Lemer C, Rivaud S, Dehaene S (2002) Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain* 125:1054-1069.
19. Cohen L, Dehaene S (2004) Specialization within the ventral stream: the case for the visual word form area. *Neuroimage* 22:466-76
20. Cowan N (1988) Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychol Bull* 104:163-91.
21. Cowan N (2001) The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences* 24:87-185.
22. Curby KM, Glazek K, Gauthier I (2009) A visual short term memory advantage for objects of expertise. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 35:94-107.
23. Curtis CE, D’Esposito, M (2003) Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Sciences* 9:415–423.
24. Das aktuelle wissen.de Lexikon (2004) Wissen Media Verlag GmbH, Gütersloh/München. Band 17, p111
25. D’Esposito M, Postle BR, Ballard D, Lease J (1999) Maintenance versus manipulation of information held in working memory: an event-related fMRI study. *Brain Cogn* 41:66–86.
26. De Renzi E, Nichelli P (1975) Verbal and non-verbal short-term memory impairment following hemispheric damage. *Cortex*. 11:341-54.
27. Dehaene S, Sergent C, Changeux JP (2003) A neuronal network model linking subjective reports and objective physiological data during conscious perception. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.* 100:8520-5.
28. Dehaene S, Cohen L (2007) Cultural recycling of cortical maps. *Neuron* 56:384-98.
29. Della Sala S, Logie RH, Marchetti C, Wynn V (1991) Case studies in working memory: a case for single cases?. *Cortex* 27:169-91.

30. Desimone R (1996) Neural mechanisms for visual memory and their role in attention. *Proc Natl Acad Sci USA* 93:13494-13499.
31. Eickhoff SB, Stephan KE, Mohlberg H, Grefkes C, Fink GR, Amunts K, Zilles K (2005) A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage* 25:1325-35.
32. Eng HY, Chen D, Jiang Y (2005) Visual working memory for simple and complex visual stimuli. *Psychon Bull Rev* 12:1127-33.
33. Fleming MK, Stinear CM, Byblow WD (2010) Bilateral parietal cortex function during motor imagery. *Exp Brain Res* 201:499-508
34. Fuster JM (1997) Network memory. *Trends Neurosci* 20:451-9.
35. Grill-Spector K, Henson R, Martin A (2006) Repetition and the brain: neural models of stimulus-specific effects. *Trends Cogn Sci* 10:14-23.
36. Henson R (2001) Neural Working Memory. In: Andrade J (ed) *Working Memory in Perspective*. Psychology Press, Hove 7:151-173.
37. Hillis AE, Newhart M, Heidler J, Barker P, Herskovits E, Degaonkar M (2005) The roles of the "visual word form area" in reading. *Neuroimage* 24:548-59.
38. Hollingworth A, Luck SJ (2008) Visual Memory Systems. In: Hollingworth A, Luck SJ (eds) *Working Memory*. Oxford University Press, Oxford
39. Hyun JS, Luck SJ (2007) Visual working memory as the substrate for mental rotation. *Psychon Bull Rev* 14:154-8.
40. Jansma JM, Ramsey NF, Slagter HA, Kahn RS (2001) Functional anatomical correlates of controlled and automatic processing. *J Cogn Neurosci* 13:730-43.
41. Kelly AM, Garavan H (2005) Human Functional Neuroimaging of Brain Changes Associated with Practice. *Cereb Cortex* 15:1089-102.
42. Kronbichler M, Hutzler F, Wimmer H, Mair A, Staffen W, Ladurner G (2004) The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. *Neuroimage* 21:946-53.
43. Lehnert G, Zimmer HD (2006) Auditory and visual spatial working memory. *Mem Cognit* 34:1080–1090.
44. Lewis-Peacock JA, Postle BR (2008) Temporary activation of long-term memory supports working memory. *J Neurosci* 28:8765-71.

45. Linden DEJ, Bittner RA, Muckli L, Waltz JA, Kriegeskorte N, Goebel R, et al. (2003) Cortical capacity constraints for visual working memory: Dissociation of fMRI load effects in a fronto-parietal network. *Neuroimage* 20:1518–1530.
46. Liu T, Slotnick SD, Serences JT, Yantis S (2003) Cortical mechanisms of feature-based attentional control. *Cereb Cortex* 13:1334-43.
47. Logie RH (1986) Visuo-spatial processing in working memory. *The Quarterly journal of experimental psychology A* 38:229-247.
48. Luck SJ, Vogel EK (1997) The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature* 390:279-81.
49. Maldjian JA, Laurienti PJ, Burdette JB, Kraft RA (2003) An Automated Method for Neuroanatomic and Cytoarchitectonic Atlas-based Interrogation of fMRI Data Sets. *NeuroImage* 19:1233-1239.
50. Maldjian JA, Laurienti PJ, Burdette JH (2004) Precentral Gyrus Discrepancy in Electronic Versions of the Talairach Atlas. *Neuroimage* 21:450-455.
51. Morrell RW, Park DC (1993) The effects of age, illustrations, and task variables on the performance of procedural assembly tasks. *Psychol Aging* 8:389-99.
52. Nakamura K, Dehaene S, Jobert A, Le Bihan D, Kouider S (2005) Subliminal convergence of Kanji and Kana words: further evidence for functional parcellation of the posterior temporal cortex in visual word perception. *J Cogn Neurosci* 17:954-68.
53. Olesen PJ, Westerberg H, Klingberg T (2004) Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nat Neurosci* 7:75–79.
54. Olson IR, Jiang Y (2004) Visual short-term memory is not improved by training. *Mem Cognit* 32:1326–1332.
55. Owen AM (1997) The functional organization of working memory processes within lateral frontal cortex: the contribution of functional neuroimaging. *Eur J Neurosci* 9:1329–1339.
56. Parkes LM, Fries P, Kerskens CM, Norris DG (2004) Reduced BOLD response to periodic visual stimulation. *Neuroimage* 21:236-43.
57. Pashler H (1988) Familiarity and visual change detection. *Percept Psychophys* 44:369-78.
58. Péran P, Démonet JF, Cherubini A, Carbebat D, Caltagirone C, Sabatini U (2010) Mental representations of action: the neural correlates of the verbal and motor components. *Brain Res* 1328:89-103

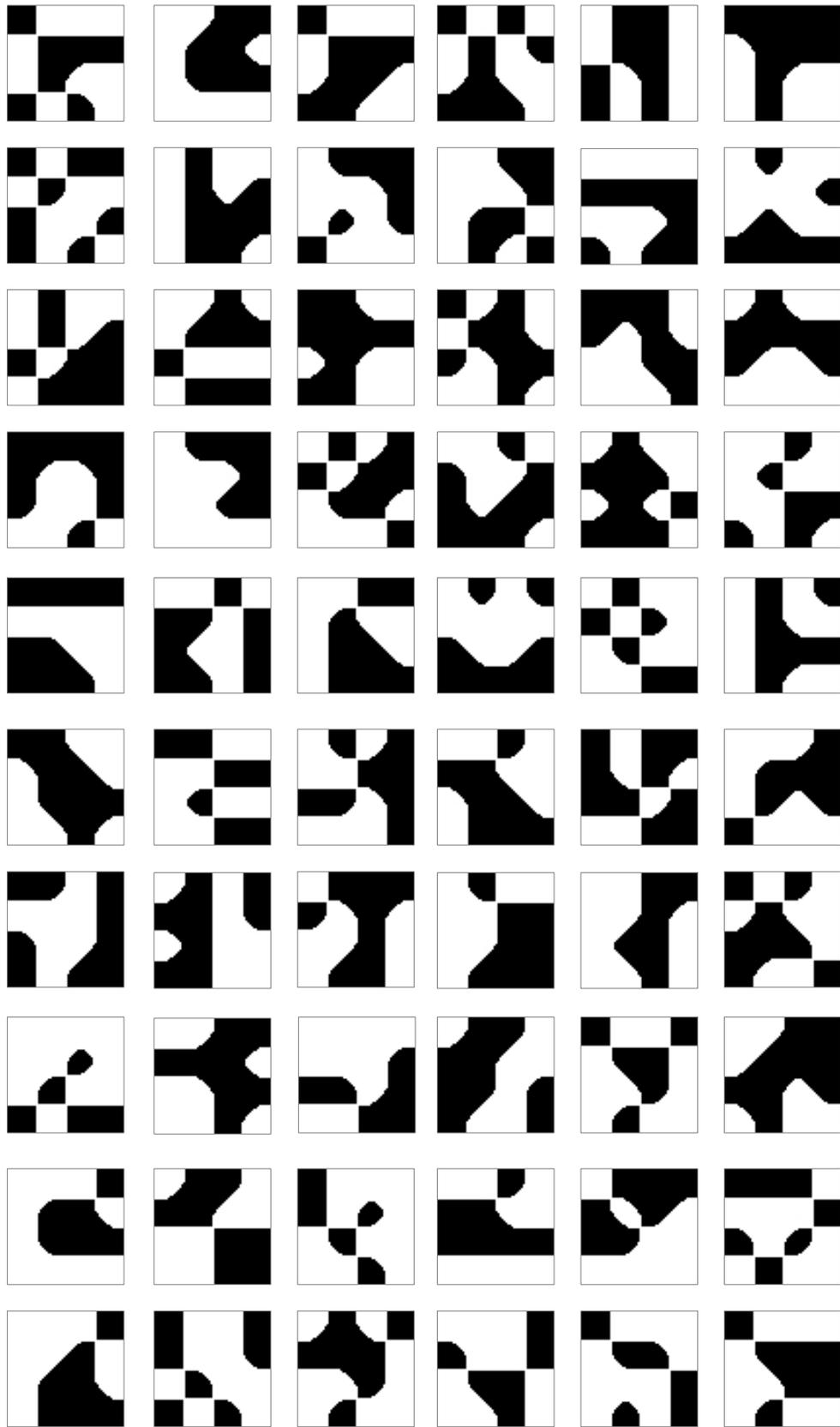
59. Petrides M (2005) Lateral prefrontal cortex: architectonic and functional organization. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 360:781–795.
60. Phillips WA (1974) On the distinction between sensory storage and short-term visual memory. *Perception & Psychophysics* 16, 283–290.
61. Pinel JPJ (2001). *Biopsychologie*, Heidelberg: Spektrum (Herausgegeben von W. Boucsein)
62. Postle BR, Zarahn E, D’Esposito M (2000) Using event-related fMRI to assess delay-period activity during performance of spatial and nonspatial working memory tasks. *Brain Res Protoc* 5:57–66.
63. Postle BR, Druzgal TJ, D’Esposito M (2003) Seeking the neural substrates of visual working memory storage. *Cortex* 39:927–946.
64. Rämä P (2008) Domain-dependent activation during spatial and nonspatial auditory working memory. *Cognitive Proc* 9:29–34.
65. Ranganath C, Cohen M, Dam C, D’Esposito M (2004a) Inferior temporal, prefrontal and hippocampal contributions to visual working memory maintenance and associative memory retrieval. *J Neurosci* 24:3917–3925.
66. Ranganath C, DeGutis J, D’Esposito M (2004b) Category-specific modulation of inferior temporal activity during working memory encoding and maintenance. *Cogn Brain Res* 20:37–45.
67. Rypma B (2006) Factors controlling neural activity during delayed-response task performance: testing a memory organization hypothesis of prefrontal function. *Neuroscience* 139:223–235.
68. Saults JS, Cowan N (2007) A central capacity limit to the simultaneous storage of visual and auditory arrays in working memory. *J Exp Psychol Gen* 136:663–684.
69. Scarborough DL (1972) Stimulus modality effects on forgetting in short-term memory. *J Exp Psychol* 95:285-9.
70. Schneider W, Shiffrin RM (1977) Controlled and automatic human information processing: 1. Detection, search, and attention. *Psychological Review* 84:1-66.
71. Snodgrass JG, Vanderwart M (1980) A standardized set of 260 pictures: norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. *J Exp Psychol Hum Learn* 6:174-215.
72. Song JH, Jiang Y (2006) Visual working memory for simple and complex features: an fMRI study. *Neuroimage* 30:963–972.

73. Soto D, Mok AY, McRobbie D, Quest R, Waldman A, Rotshtein P (2011) Biasing visual selection: functional neuroimaging of the interplay between spatial cueing and feature memory guidance. *Neuropsychologia* 49:1537-43
74. Sun H, Zimmer HD, Fu X (2011) The influence of expertise and of physical complexity on visual short-term memory consolidation. *Q J Exp Psychol (Hove)* 64:707-29.
75. Tan LH, Laird AR, Li K, Fox PT (2005) Neuroanatomical correlates of phonological processing of Chinese characters and alphabetic words: a meta-analysis. *Hum Brain Mapp* 25:83-91.
76. Thakral PP, Slotnick SD (2009) The role of parietal cortex during sustained visual spatial attention. *Brain Res* 1302:157-66.
77. Todd JJ, Marrois R (2004) Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature* 428:751-4.
78. Tresch MC, Sinnamon HM, Seamon JG (1993) Double dissociation of spatial and object visual memory: evidence from selective interference in intact human subjects. *Neuropsychologia* 31:211-9.
79. Ungerleider LG, Courtney SM, Haxby JV (1998) A neural system for human visual working memory. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.* 95:883–890.
80. Ventre-Dominey J, Bailly A, Lavenne F, Lebars D, Mollion H, Costes N, Dominey PF (2005) Double dissociation in neural correlates of visual working memory: a PET study. *Brain Res Cogn Brain Res* 25:747–759.
81. Vidyasagar R, Stancak A, Parkes LM (2010) A multimodal brain imaging study of repetition suppression in the human visual cortex. *Neuroimage* 49:1612-21.
82. Vigneau M, Jobard G, Mazoyer B, Tzourio-Mazoyer N (2005) Word and non-word reading: what role for the Visual Word Form Area? *Neuroimage* 27:694-705.
83. Vogel EK, Woodman GF, Luck SJ (2001) Storage of features, conjunctions and objects in visual working memory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 27:92-114.
84. Vuontela V, Rämä P, Raninen A, Aronen HJ, Carlson S (1999) Selective interference reveals dissociation between memory for location and colour. *Neuroreport* 2 10:2235-40.
85. Wiggs CL, Martin A (1998) Properties and mechanisms of perceptual priming. *Curr Opin Neurobiol* 8:227-33.
86. Woodman GF, Vogel EK, Luck SJ (2001) Visual search remains efficient when visual working memory is full. *Psychol Sci* 12:219-24.

87. Woodman GF, Luck SJ (2004) Visual search is slowed when visuospatial working memory is occupied. *Psychon Bull Rev* 11:269-74.
88. Xu Y, Chun MM (2006) Dissociable neural mechanisms supporting visual short-term memory for objects. *Nature* 440:91-5.
89. Xue G, Chen C, Jin Z, Dong Q (2006) Language experience shapes Fusiform activation when processing a logographic artificial language: an fMRI training study. *Neuroimage* 31:1315-26.
90. Xue G, Poldrack RA (2007) The neural substrates of visual perceptual learning of words: implications for the visual word form area hypothesis. *J Cogn Neurosci* 19:1643-55.
91. Zimmer HD & Kaernbach C (2006) Ikonischer und auditiver Speicher. In J. Funke & P. A. Frensch (eds) *Handbuch der Allgemeinen Psychologie: Kognition* (pp. 334-339). Göttingen, Hogrefe.
92. Zimmer HD (2008) Visual and spatial working memory: from boxes to networks. *Neurosci Biobehav Rev* 32:1373-95.
93. Zimmer HD, Fu X (2008) Working memory capacity and culture-based expertise. Paper presented at the XXIV International Congress of Psychology, Berlin.
94. Zimmer HD (2010) Visuo-spatial working memory: An emergent feature of representing stimuli in the processing network for visual information. *Psychologische Rundschau* 61:25-32.

Anhang: Verwendete Items

角	黍	五	左	豸	出
疋	犬	寸	車	厶	承
支	爿	气	止	瓜	皿
舛	老	色	衣	舟	身
缶	廾	屮	戶	聿	穴
糸	麦	乐	证	何	宰
业	呂	卡	匪	至	团
兴	齐	任	手	攴	斗
次	公	动	弓	鬥	弋
廴	又	疒	臣	肉	隶



Danksagung

Mein besonderer Dank für seine Betreuung gilt Prof. Dr. Hubert Zimmer.

Weiter danke ich Dr. Christoph Krick, sowie für ihre Unterstützung in technischen Fragen den Mitgliedern des Graduiertenkollegs „Adaptive Minds“, Dr. Sarah Brieber, Katja Umla-Runge und René Liesefeld.

Publikation

Auf Ergebnissen der vorliegenden Arbeit basiert das Manuskript:

„Hubert D. Zimmer, Christian Popp, Wolfgang Reith, Christoph Krick: Gains of Item-specific Training in Visual Working Memory and their Neural Correlates“, das zur Publikation beim Journal BrainResearch eingereicht wurde, und sich zum Zeitpunkt des Drucks der Dissertation in Revision befindet.

Lebenslauf

Christian Popp

- 1990 – 1999 Ludwigsgymnasium, Saarbrücken
1999 Abitur
- 1999 – 2000 Zivildienst – Ökumenische Sozialstation St. Johann, Saarbrücken
- 2000 – 2007 Studium der Medizin – Universitätsklinik des Saarlandes, Homburg
2003 Physikum
- 2006 – 2007 Praktisches Jahr – Knappschaftsklinik Sulzbach
- 2006 – 2007 Lehrauftrag an der Hochschule der Bildenden Künste Saar, Saarbrücken,
Kurs zur Sinnesphysiologie des Menschen mit Schwerpunkt Sehen.
- 2007 2. Ärztliche Prüfung (neue Prüfungsordnung)
- 2007 Hospitanz – Kinderklinik Kohlhof, Neunkirchen
- 2008 – 2011 Promotionsstudium