

Modalitätseffekte im räumlichen Arbeitsgedächtnis

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Philosophie
der Philosophischen Fakultäten der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Günther Lehnert

aus Saarbrücken

Saarbrücken, 2009

Dekan:

Prof. Dr. Jochen Kubiniok, Universität des Saarlandes

Berichterstatter:

Prof. Dr. Hubert D. Zimmer, Universität des Saarlandes

Prof. Dr. Axel Mecklinger, Universität des Saarlandes

Tag der Disputation: 31. Juli 2009

Road Bilong Science

Hans Peter Duerr, *Traumzeit*

Aber Seele ist auch Sehnsucht, und die ewige Sehnsucht der Seele geht immer zum Raum.

Max Bense, *Raum und Ich*

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Das Arbeitsgedächtnis	6
2.1 Vom Kurzzeitgedächtnis zum multimodalen Arbeitsgedächtnis.....	6
2.2 Exkurs: Forschungsmethoden der kognitiven Psychologie.....	9
2.2.1 Das Interferenzaufgaben-Paradigma.....	9
2.2.2 Die Kapazitätslogik.....	9
2.3 Das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis.....	10
2.3.1 Visuell oder räumlich?.....	12
2.3.2 Visual Cache und Inner Scribe.....	13
2.3.3 Rehearsal-Prozesse im räumlichen Arbeitsgedächtnis.....	14
2.4 Der Episodic Buffer.....	16
2.4.1 Zum Konzept der Bindung.....	17
2.4.2 Bindung im Episodic Buffer.....	19
2.4.3 Arbeitsgedächtnis als aktiviertes Langzeitgedächtnis.....	20
3 Neuropsychologie des Arbeitsgedächtnisses	22
3.1 Der dorsale und der ventrale Pfad.....	22
3.2 Arbeitsgedächtnis und Gehirn.....	24
3.2.1 Dissoziation von phonologischer Schleife und VSSP.....	24
3.2.2 Exkurs: Bildgebende Verfahren.....	25
3.3 Dissoziation von Ort und Objekt im visuellen Arbeitsgedächtnis.....	28
3.3.1 Bildgebende Studien.....	28
3.3.2 Slow Potential-Studien.....	31
3.4 Konsequenzen für das visuelle AG-Modell.....	34
4 Das auditiv-räumliche Arbeitsgedächtnis	37
4.1 VSSP und Modalität.....	37
4.2 Neuropsychologie der auditiven Verarbeitung.....	38
4.2.1 Auditive Wahrnehmung.....	39
4.2.2 Auditives Arbeitsgedächtnis.....	41

4.2.3 Elektrophysiologie.....	43
4.3 Bewertung.....	43
5 Elektrophysiologische Maße.....	45
5.1 Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP).....	45
5.2 Langsame Potentiale (LP).....	47
6 Behaviorale Experimente.....	50
6.1 Experiment 1.....	50
6.1.1 Einleitung.....	50
6.1.2 Methode.....	51
6.1.3 Ergebnisse.....	55
6.1.4 Diskussion.....	56
6.2 Experiment 2.....	59
6.2.1 Einleitung.....	59
6.2.2 Methode.....	60
6.2.3 Ergebnisse.....	61
6.2.4 Diskussion.....	62
6.3 Experiment 3.....	63
6.3.1 Einleitung.....	63
6.3.2 Methode.....	65
6.3.3 Ergebnisse.....	65
6.3.4 Diskussion.....	66
7 EKP Studien.....	68
7.1 Experiment 4.....	68
7.1.1 Einleitung.....	68
7.1.2 Methode.....	69
7.1.3 Ergebnisse.....	71
7.1.4 Diskussion.....	78
7.2 Experiment 5.....	80
7.2.1 Einleitung.....	80
7.2.2 Methode.....	82
7.2.3 Ergebnisse und Diskussionen.....	88
7.2.4 Gemeinsame Diskussion.....	98

8 Allgemeine Diskussion.....	100
8.1 Überblick.....	100
8.1.1 Fragestellung.....	100
8.1.2 Verhaltensdaten.....	100
8.1.3 Langsame Potentiale.....	101
8.2 Diskussion.....	103
8.2.1 Gemeinsame Betrachtung.....	103
8.2.2 Unterschiede im EKP.....	103
8.2.3 Zugrundeliegende Prozesse.....	105
8.2.4 Modelle: VSSP.....	106
8.2.5 Modelle: What & Where.....	108
8.3 Konklusion.....	110
Literatur.....	112
Abkürzungsverzeichnis.....	125
Anmerkung.....	126
Danksagung.....	127
Lebenslauf.....	128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relative Häufigkeit von Hits in Experiment 3.....	67
Tabelle 2: Ergebnisse der ANOVAs für die sechs Elektrodenregionen in Experiment 4.....	77
Tabelle 3: Design von Experiment 5.....	85
Tabelle 4: ANOVA der langsamen Potentiale in Experiment 5.....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Arbeitsgedächtnis-Modell von Baddeley und Hitch (1974).....	8
Abbildung 2: Visual Cache und Inner Scribe sensu Logie (1995).....	14
Abbildung 3: Baddeleys Modell des Arbeitsgedächtnis nach Einführung des Episodic Buffer.....	17
Abbildung 4: Langsame Potentiale bei Mecklinger und Pfeifer (1996).....	32
Abbildung 5: Das Bereitschaftspotential (BP) nach Kornhuber und Deecke (1965).....	47
Abbildung 6: Vier Haupttypen der cortikalen Aktivierung nach Mitzdorf (1985).....	48
Abbildung 7: Experiment 1, Beispiele für visuelles Stimulusmaterial.....	52
Abbildung 8: Experiment 1, Schema des Experimentalablaufs.....	54
Abbildung 9: Experiment 1, Relative Häufigkeit der Hits.....	56
Abbildung 10: Experiment 2, Beispiele für visuelle Stimuli.....	60
Abbildung 11: Experiment 2, Relative Häufigkeit der Hits.....	61
Abbildung 12: Experiment 4, EKPs der Lernphase für Listenlänge 4.....	72
Abbildung 13: Experiment 4, EKPs der Lernphase für Listenlänge 6.....	73
Abbildung 14: Experiment 4, Mittlere Aktivität der Lernphase.....	74
Abbildung 15: Experiment 4, Langsame Potentiale im Retentionsintervall.....	75
Abbildung 16: Experiment 4, Okzipitale Aktivierung am Ende des Retentionsintervalls.....	77
Abbildung 17: Experiment 5, Beispiele für visuelles Stimulusmaterial.....	83
Abbildung 18: Experiment 5, Schematische Darstellung des Experimentalaufbaus.....	84
Abbildung 19: Experiment 5, Trialschema.....	86
Abbildung 20: Experiment 5, Rekognitionsleistung.....	89
Abbildung 21: Experiment 5, Reaktionszeiten der Hits.....	90
Abbildung 22: Experiment 5, EKP des Hinweisreiz in den visuellen Bedingungen.....	93
Abbildung 23: Experiment 5, EKP des Hinweisreiz in den auditiven Bedingungen.....	93
Abbildung 24: Experiment 5, LP der visuellen Gruppe im Retentionsintervall.....	94
Abbildung 25: Experiment 5, LP der auditiven Gruppe im Retentionsintervall.....	94
Abbildung 26: Experiment 5, Load-Effekte im RI zwischen 4 und 5 s.....	96
Abbildung 27: Das Modell von Zimmer (2008).....	109

1 Einleitung

*So gewinnt also jedes Sinnesgebiet sein eigenes Gedächtnis mit seiner eigenen räumlichen Ordnung. Die intime gegenseitige biologische Anpassung einer **Vielheit** von zusammenhängenden Elementarorganen kommt eben in der Raumwahrnehmung besonders deutlich zum Ausdruck.*

Ernst Mach, *Die Analyse der Empfindungen*

Unter all den Eigenschaften, welche die Objekte unserer Wahrnehmung ausmachen, nimmt die räumliche Position eine herausragende Stellung ein. Man könnte geradezu sagen, dass diese Eigenschaft erst das Objekt konstituiert. Je genauer sein Ort im Raum umrissen ist, desto eher bezeichnet man etwas als ein Objekt und je weniger es eine umgrenzte räumliche Position einnimmt, desto weniger kann man es als ein Objekt bezeichnen. Man denke etwa an einen Stein, eine Wasserlache und schließlich einen Nebel. Die Extension, die Ausdehnung im Raum wurde von den Philosophen geradezu als definierendes Merkmal der Materie, der objektiven (also objekthaften) Realität angesehen. Die räumlichen Eigenschaften der Umwelt zu erkennen, Gegenstände gegeneinander abgrenzen zu können und ihre Veränderung im Raum wahrzunehmen sind wichtige Funktionen des menschlichen Geistes. Ihre Wichtigkeit zeigt sich auch darin, dass – wie das Zitat Machs hervorhebt – mehrere Sinnesmodalitäten daran beteiligt sind, eine räumliche Repräsentation der Umwelt aufzubauen. Objekteigenschaften wie Farbe, Geruch, Temperatur, Klang, Geschmack sind jeweils nur einem der Sinne zugänglich. Räumliche Eigenschaften, wie Ausdehnung oder Position, hingegen mehreren Sinnen zugleich. So kann die Ausdehnung eines Objektes gesehen oder ertastet werden, seine Position gehört oder gesehen. Die verschiedenen Sinnesmodalitäten liefern dabei sich ergänzende Daten, die nur selten redundant sind. Jede hat ihre Vorzüge gegenüber den anderen, etwa bezüglich ihrer Ausdehnung oder ihrer Auflösung. So kann eine Oberflächenstruktur genauer ertastet als gesehen werden und ein verstecktes Tier eher gehört als gesehen. Der Grund, warum für die räumliche Wahrnehmung so viele Ressourcen zur Verfügung stehen, dürfte darin zu finden sein, dass es sich bei der räumlichen Position eines Objekts um eine im höchsten Maße variable Eigenschaft handelt, die nachzuverfolgen dennoch wichtig ist. Zwar mag sich auch die Farbe eines Gegenstandes in jedem Augenblick mit den Beleuchtungsverhältnissen ändern, doch spielt

dies meist keine Rolle mehr, sobald die Farbe einmal dazu verholfen hat, den Gegenstand zu identifizieren. Diese Art der Objektkonstanz, die der menschlichen Wahrnehmung eine ständige Neubewertung erspart, ist bei der räumlichen Position beweglicher Gegenstände nicht möglich. Die Variabilität des Ortes ist auch die Ursache dafür, dass gerade das Arbeitsgedächtnis in hohem Maße räumliche Information verarbeiten muss. Sei es, dass eine Position für kurze Zeit gespeichert wird – etwa die Position eines Stuhls, bis man sich darauf (anstatt daneben) gesetzt hat – oder dass Bewegungsbahnen im Geiste weiterverfolgt werden – etwa wenn man eine Straße überquert und nicht alle sich nähernden Autos im Blick behalten kann. Im letzten Fall könnte es auch vorkommen, dass man Information über die Fahrzeuge außerhalb des Blickfeldes über den Hörsinn erhält – und diese ebenfalls im Arbeitsgedächtnis verarbeiten muss.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem kurzfristigen Halten räumlicher Information im Arbeitsgedächtnis. Dabei werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Behalten auditiver und visueller räumlicher Information untersucht. Die gängigen Modelle zum menschlichen Arbeitsgedächtnis (AG) befassen sich vorrangig mit verbaler und visuell-räumlicher Information. Dabei fand die verbale Information sowohl als gelesene, also visuelle, als auch gehörte und somit auditive, das Interesse der Forscher. Verbale Information aus beiden Modalitäten wurde einzeln und im Vergleich miteinander untersucht. Die visuell-räumliche Information hingegen wurde lange unter dem Vorzeichen ihres doppelten Attributs als visuelle *und* räumliche betrachtet. Zwar wurde auch die Verarbeitung von Information untersucht, die nur das Attribut visuell oder nur das Attribut räumlich verdient, jedoch meist unter der impliziten Annahme, dass beide den gleichen AG- Prozessen unterliegen. Erst seit Anfang der neunziger Jahre wurden systematisch die Unterschiede zwischen visueller und räumlicher Verarbeitung erforscht – zuerst in der Wahrnehmung, dann auch im AG. Schließlich erwachte auch ein größeres Interesse an der Verarbeitung auditiv-räumlicher Information, ausgehend von der Frage, ob sich die im Visuellen gefunden Unterschiede auch in anderen Modalitäten nachweisen lassen – was bestätigt werden konnte. Die Ausgangslage dieser Arbeit sieht, um ein vereinfachendes Bild zu benutzen, so aus, dass die Forschung zum AG ein Knäuel von Fäden entwirrt hat: Erst wurden die Unterschiede zwischen Informationen aus den einzelnen Sinnesmodalitäten untersucht, dann die Unterschiede zwischen Informationstypen innerhalb der Modalitäten. Diese Arbeit versucht, einige der losen Enden nun, da sie

entwirrt sind, für den Bereich des räumlichen AG wieder zusammen zu knüpfen. Einerseits bezüglich der räumlichen Information – mit der titelgebenden Fragestellung, in welchem Maße die räumliche Information, da sie ja nicht mehr als visuell-räumliche (oder auditiv-räumliche) auftritt, modalitätsspezifisch verarbeitet wird. Andererseits bezüglich der Informationstypen mit der Frage, welche Prozesse ein AG für Objektpositionen ermöglichen. Wenn Objekt- und Ortsinformation getrennt verarbeitet werden, muss das Gedächtnis dafür, an welchem Ort ein bestimmtes Objekt war, entweder die getrennte Information wieder zusammenführen oder eine andere Art der Verarbeitung nutzen. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt jedoch auf der ersten Frage, derjenigen nach der Modalitätsspezifität der Verarbeitung.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Forschungstradition zum Arbeitsgedächtnis vorgestellt und Befunde zur Neurophysiologie des räumlichen Gedächtnis berichtet. Das Arbeitsgedächtnis-Modell wird in seiner historischen Entwicklung vom rein zeitlich definierten Kurzzeitgedächtnis bis zum heute noch aktuellen multimodalen Arbeitsgedächtnismodell dargestellt, wobei besonders die Untersuchungen zum visuell-räumlichen System und mögliche Ansatzpunkte für ein auditiv-räumliches Erinnern berücksichtigt werden.

An neurophysiologischen Befunden werden sowohl diejenigen berücksichtigt, die aus der Forschung zum Arbeitsgedächtnis hervorgegangen sind und die Unterscheidung modalitätsspezifischer Subsysteme zu bestätigen suchen, als auch jene Arbeiten, welche die Unterscheidung zweier Systeme in der visuellen Wahrnehmung – eines für Objekte, eines für Orte – auf das Gedächtnis übertragen. Letztere sind in Hinblick auf auditiv-räumliche Information deshalb besonders interessant, weil sie die enge Verschränkung von räumlicher mit visueller Information, wie sie im Arbeitsgedächtnis-Modell auftritt, relativieren und die Möglichkeit einer gemeinsamen Komponente für räumliche Information beider Modalitäten eröffnen.

Da im empirischen Teil der Arbeit elektrophysiologische Befunde berichtet werden, folgt eine kurze Einführung in die Methodik der Messung ereigniskorrelierter Potentiale (EKP).

Das für die berichteten Experimente gewählte Untersuchungsparadigma nutzt die Tatsache, dass jedes Arbeitsgedächtnissystem eine beschränkte Kapazität aufweist. Es ist offenkundig, dass man sich ein oder zwei räumliche Positionen ohne weiteres für kurze

Zeit merken kann, während man bei zehn Positionen nur einen Bruchteil des Gesehenen wird erinnern können. In der Literatur wird für das visuell-räumliche Gedächtnis eine Spanne von etwa vier Objekten diskutiert (Luck & Vogel, 1997). Die Gedächtnisbelastung wurde in den berichteten Experimenten so gewählt, dass sie mit zwei bis acht Objekten den Bereich um diese Grenze herum abdeckt, so dass sich die möglicherweise unterschiedlichen Kapazitäten von visuell- und auditiv-räumlichem Gedächtnis auch in der Erinnerungsleistung zeigen können.

In Experiment 1 wurden Bilder oder Geräusche alltäglicher Objekte präsentiert, deren Positionen die Versuchspersonen erinnern und nach einem Behaltensintervall für jeweils zwei der Objekte wiedergeben sollten. Während des Experiments stieg die Gedächtnisbelastung von anfangs vier über sechs bis zu acht Objekten. Die einzelnen Durchgänge unterschieden sich darin, ob die jeweiligen Objekte nur als Bilder, nur als Töne oder gemischt – mal als Bild, mal als Ton – dargeboten wurden. Sollte räumliche Information für Töne in einem anderen System gespeichert werden, als für Bilder, so wäre für den Fall, dass beide Ressourcen genutzt werden können – den Fall der gemischten Listen – ein Vorteil zu erwarten. Solch ein Vorteil hat sich im Experiment nicht gezeigt, was als Hinweis darauf interpretiert wird, dass die Positionen unabhängig von der Darbietungsmodalität in einem gemeinsamen Gedächtnissystem erinnert werden.

Experiment 2 erkundet den Einfluss des Objektgedächtnisses auf die Aufgabe. In Experiment 1 dienten Alltagsobjekte als Stimulusmaterial, die leicht zu merken sind, da sie sehr vertraut sind und leicht benannt werden können. Dass die im Experiment wirksame gemeinsame Komponente kein räumliches, sondern ein verbales Gedächtnis war, ist deshalb nicht auszuschließen. In Experiment 2 wurde bei ansonsten gleichem Vorgehen völlig neues Stimulusmaterial benutzt, das keine realen Objekte darstellt und somit keine einfache Benennung ermöglicht. Hier zeigte sich bei insgesamt schlechterer Gesamtleistung das gleiche Ergebnismuster wie beim ersten Experiment, was für einen additiven Einfluss des Objektgedächtnis auf die räumliche Aufgabe spricht und die Interpretation einer gemeinsamen räumlichen Komponente für beide Sinnesmodalitäten stützt.

Experiment 3 ging der Frage nach, warum in den beiden vorhergehenden Experimenten manche Durchgänge mit vier Objekten ein anderes Muster gezeigt haben, als jene mit sechs oder acht Objekten. Eine genaue Analyse der Aufgabe zeigt, dass nur in der

Bedingung mit vier Objekten jede Position genau einmal belegt wurde, so dass mit jedem gezeigten Objekt die Anzahl möglicher Positionen für das nächste Objekt kleiner wurde. Dies führte zu einer besseren Gedächtnisleistung, die das Ergebnismuster verzerrte. Experiment 3 zeigt, dass der Unterschied zu den längeren Listen verschwindet, wenn jedes der vier Objekten uneingeschränkt auf jeder der vier Positionen erscheinen kann.

Experiment 4 erweitert die Methodik um elektrophysiologische Maße. Der Experimentalablauf entsprach dem von Experiment 1, wobei nur unimodale Listen von vier und sechs Objekten dargeboten wurden. Die ereigniskorrelierten Potentiale von Stimuluspräsentation und Behaltensintervall wurden hinsichtlich Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen den beiden Modalitäten betrachtet. Während die EKP der Stimuluspräsentation deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Darbietungsmodalität zeigten, fand sich für die Langsamen Potentiale (LP) im Behaltensintervall eine auffällige Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit bei fehlender Differenzierung zwischen den Darbietungsmodalitäten. Die okzipitale Topologie der LP weist auf visuelle Imaginationsprozesse hin, mithin auf eine visuelle Rekodierung der auditiven Stimuli und gemeinsame Nutzung eines visuellen AG-Systems für beide Modalitäten.

In Experiment 5 wurde versucht, schon im Experimentaldesign stärker zwischen den Modalitäten zu unterscheiden. Dazu wurde die Modalität zwischen den Versuchspersonen variiert, statt wie bisher innerhalb. Um den Eigenheiten der auditiv-räumlichen Wahrnehmung gerecht zu werden, wurden die Töne nicht mehr (wie die Bilder) zentral vor der Versuchsperson dargeboten, sondern von Lautsprechern, die um sie herum im Kreis aufgestellt waren. Um spezifische Korrelate der räumlichen Verarbeitung besser identifizieren zu können, wurde die Positionsaufgabe mit einer nicht-räumlichen Rekognitionsaufgabe für die Objektidentität verglichen. Wieder fanden sich im Retentionsintervall deutliche Übereinstimmungen zwischen den beiden Modalitäten. In den LP zeigte sich die stärkste Aktivierung erneut über posterioren Regionen, diesmal jedoch parietal ohne Beteiligung okzipitaler Areale, was auf eine Verarbeitung im dorsalen Verarbeitungspfad ohne die Beteiligung von visuellem Imagery hinweist.

Im Anschluss an Experiment 5 werden die Ergebnisse aller Experimente gemeinsam hinsichtlich der Fragestellung und bezüglich ihrer Relevanz für die eingangs geschilderten Theorien des AG diskutiert.

2 Das Arbeitsgedächtnis

2.1 Vom Kurzzeitgedächtnis zum multimodalen Arbeitsgedächtnis

Die Einteilung des menschlichen Gedächtnis in ein Kurzzeit- und ein Langzeitgedächtnis besteht in ihrer einfachsten Form in der Feststellung, dass es dem Menschen einerseits möglich ist, gerade erst Wahrgenommenes noch kurze Zeit im Bewusstsein zu halten, dass er andererseits aber auch vergangene Wahrnehmungen wieder erinnern kann, die das Bewusstsein bereits verlassen hatten. Obwohl das Kurzzeitgedächtnis bereits bei William James (1890) als *elementares* oder *primäres Gedächtnis* von der eigentlichen Erinnerung unterschieden wird, war die Notwendigkeit, zwei Gedächtnissysteme zu unterscheiden in der kognitiven Psychologie bis in die siebziger Jahre umstritten.¹

Ende der fünfziger Jahre, als menschliche Kognition erstmals in Begriffe der Informationsverarbeitung gefasst wurde, zeigte George Miller (1956), dass das kurzzeitige Behalten neuer Information einer Kapazitätsbeschränkung von sieben Einheiten (z.B. Zahlen oder Wörtern) unterliegt, und lieferte somit Evidenz dafür, dass kurzfristige Gedächtnisprozesse sich von den Prozessen im Langzeitgedächtnis (LZG) unterscheiden, in welchem keine solche Kapazitätsbeschränkung herrscht.² Wenig später postulierte Donald Broadbent in seinem einflussreichen Buch *Perception and Communication* (Broadbent, 1958) die Notwendigkeit, zwischen einem Kurzzeit- und einem Langzeitspeicher zu unterscheiden. Im Kurzzeitgedächtnis würden die Gedächtnisspuren als Funktion der Zeit schwinden, sofern sie nicht durch Wiederholung (Rehearsal) aktiv gehalten werden; im LZG hingegen blieben die Gedächtniseinträge unbegrenzt erhalten, sofern sie sich nicht gegenseitig durch Interferenz, also eine Überlagerung der Information, stören.

In der Folge entstanden viele Gedächtnismodelle, die eine Einteilung in Kurz- und Langzeitspeicher vornahmen. Das einflussreichste unter ihnen war dasjenige von Atkinson

¹ Die hier geschilderte historische Entwicklung stützt sich als Zeitzeugen hauptsächlich auf Baddeley (1996) und das Kapitel *Short-term working memory* im Lehrbuch von Ashcroft (2006, S. 163-209).

² Zur Kapazitätslogik siehe unten, Seite 9.

und Shiffrin (1968), welches als das *modale Modell* bezeichnet wurde, da es mit ähnlichen Modellen deren häufigsten Charakteristika teilte. Das Modell unterscheidet drei Gedächtnissysteme: (1) Den sensorischen Speicher, der dem bewussten Erleben nicht zugänglich ist und die Information nur ausreichend lange hält, um sie für (2) das Kurzzeitgedächtnis zugänglich zu machen, welches wiederum die Einträge für (3) das Langzeitgedächtnis bereitstellt. Dabei sollte der Übergang ins LZG um so wahrscheinlicher erfolgen, je länger die Information durch Wiederholung im Kurzzeitgedächtnis gehalten wird. Schon in Broadbents (1958) Modell findet sich der Aspekt des *Arbeitsgedächtnis*, also eines Kurzzeitgedächtnis, das durch aktive Beschäftigung mit dem Material aufrecht erhalten wird. Allerdings lag die Akzentuierung auf der Behaltensdauer und erst nach der Integration der – von Broadbent als getrennt angenommenen – Aufmerksamkeitskomponente durch Atkinson und Shiffrin (1968) wurde der Kurzzeitspeicher zunehmend auch als System zur Manipulation von Gedächtnisinhalten gesehen.

Obwohl das Modell von Atkinson und Shiffrin (1968) die zu seiner Zeit vorliegenden Daten sehr gut erklären konnte, zeigten sich Anfang der siebziger Jahre zwei Schwachstellen. Einerseits war die Annahme nicht haltbar, dass der Übergang vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis durch reine Wiederholung stattfindet. Mehrere Studien zeigten, dass Rehearsal allein kein Garant für gutes Lernen der Information war. Vielmehr erwies sich die Art der Beschäftigung mit dem Material und die dadurch aufgenommene Information als wesentlich. So wird das gleiche Wort besser gelernt wenn sein Sinn beurteilt wird, als wenn Buchstaben oder Schriftart beurteilt werden. Diese Wirksamkeit der Verarbeitung wurde von Craik und Lockhart (1972) als *Verarbeitungstiefe* konzeptualisiert. Der Ansatz der Verarbeitungstiefe war sehr erfolgreich darin, die Gedächtniswirksamkeit unterschiedlicher Lernmethoden zu erklären. Seine Leistung bestand weniger darin, ein neues Gedächtnismodell zu entwerfen, als vielmehr eine neue Begrifflichkeit zur Verfügung zu stellen, indem er statt den statisch gedachten Speichern die stattfindenden Verarbeitungsprozesse unterschied (vgl. Engelkamp, 1994). Eine weitere Schwachstelle des Modells von Atkinson und Shiffrin (1968) zeigte sich darin, dass es nicht erklären konnte, warum einige neurologische Patienten mit starken Kurzzeitgedächtnisdefiziten trotzdem neue Informationen lernen konnten, da das Langzeitgedächtnis ja nur über ein intaktes Kurzzeitgedächtnis zugänglich sein sollte. Die

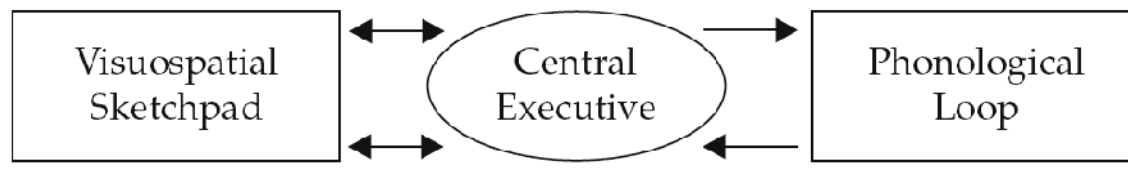


Abbildung 1: Das dreiteilige Arbeitsgedächtnis-Modell von Baddeley und Hitch (1974).

Studien von Alan Baddeley und Graham Hitch (1974) bestätigten diese Befunde auch bei gesunden Probanden und führten schließlich zur Formulierung des Modells eines dreiteiligen oder *multimodalen Arbeitsgedächtnis*.³ Baddeley und Hitch versuchten, bei gesunden Probanden die Kurzzeitgedächtnisdefizite der Patienten zu simulieren. Dazu sollten diese während der Bearbeitung verschiedener kognitiver Aufgaben, wie Lernen, Verstehen, oder Schlussfolgern, als Zweitaufgabe Ziffern im Gedächtnis behalten (Interferenzaufgabe, siehe nächsten Abschnitt). Überraschenderweise waren selbst bei einer Anzahl von Ziffern, die der maximalen Gedächtnisspanne entsprach, die Leistungen in der Primäraufgabe nicht wesentlich schlechter als in der Kontrollbedingung ohne Zweitaufgabe. Die Ergebnisse ließen sich nicht im Rahmen eines einheitlichen, generellen Arbeitsgedächtnis erklären. Baddeley und Hitch (1974) konzipierten das Arbeitsgedächtnis deshalb als ein fraktioniertes System mit den drei Subsystemen *Zentrale Exekutive*, *Phonologische Schleife* und *Visuell-räumlicher Skizzenblock* (Abbildung 1). Mit der zentralen Exekutive trennten Baddeley und Hitch das für Kontrollfunktionen zuständige Aufmerksamkeitssystem (erneut) von der Speicherfunktion des Gedächtnisses. Während die Exekutive für die meisten Aufgaben Verwendung finden sollte, die in der Studie als Primäraufgabe eingesetzt worden waren, konnte die Zweitaufgabe der phonologischen Schleife zugeschrieben werden, welche der Aufrechterhaltung und Manipulation sprachlicher Information dient und somit auch für die Ziffernspanne verantwortlich sein sollte. Von der visuell-räumlichen Komponente schließlich wurde angenommen, dass sie dem Behalten und der Manipulation von räumlicher und Objektinformation dient, sowie der visuellen Imagination. Die erwähnten Patienten, die trotz Kurzzeitgedächtnisdefiziten Informationen ins Langzeitgedächtnis enkodieren können, weichen nach diesem Modell auf ein anderes als das geschädigte Subsystem aus.

³ Das Wortspiel mit dem *modalen* Modell war dabei durchaus beabsichtigt (Baddeley, 1996).

2.2 Exkurs: Forschungsmethoden der kognitiven Psychologie

2.2.1 Das Interferenzaufgaben-Paradigma

Das Interferenzaufgaben-Paradigma stellt eines der wichtigsten und meist genutzten Forschungsparadigmen in der kognitiven Psychologie dar. Die Frage, wie viele verschiedene Funktionen oder Subsysteme des Arbeitsgedächtnis sich sinnvoll unterscheiden lassen, lässt sich nach der Interferenzlogik dadurch beantworten, dass Funktionen, die durch die gleiche Störaufgabe beeinträchtigt werden, sich in einem System zusammenfassen lassen, während Funktionen, die für unterschiedliche Störaufgaben anfällig sind, unterschiedlichen Systemen zugeordnet werden. Im Idealfall findet sich eine doppelte Dissoziation zweier Funktionen, d.h. jede wird durch eine spezifische Störaufgabe beeinträchtigt, welche die jeweils andere nicht beeinträchtigt. In der Praxis sind die differentiellen Effekte der Störaufgaben oft nur gering. Eine Schwierigkeit besteht darin, möglichst prozess-reine Aufgaben zu finden, die nur ein System selektiv beeinträchtigen. Eine andere Schwierigkeit besteht darin, dass das menschliche Gedächtnis sehr gut darin ist, alternative Verarbeitungswege zu nutzen und Stimulusmaterial zu rekodieren – sich etwa gelesene Wörter als Bildvorstellung des benannten Gegenstandes zu merken oder umgekehrt gesehene Bilder zu benennen und die Wörter im Gedächtnis zu behalten.

2.2.2 Die Kapazitätslogik

Die Gedächtniskapazität für verschiedene Arten von Stimulusmaterial gibt wichtige Hinweise darauf, wie das Gedächtnis funktioniert. So stellte Miller (1956) fest, dass die Menge des Materials, das im Gedächtnis gehalten werden kann, davon abhängt, ob das Material sinnvoll gruppiert werden kann. Bei den sieben Einheiten, die behalten werden können, kann es sich beispielsweise um sieben Buchstaben handeln. Lassen sich diese Buchstaben zu einem Wort kombinieren, so bilden sie gemeinsam eine Einheit – in Millers Terminologie ein *Chunk* (Stück). Daraus ergibt sich beispielsweise die Folgerung, dass das Kurzzeitgedächtnis – im Gegensatz zum sensorischen Speicher – mit sinnhaften Einheiten operiert, die bereits interpretiert sind. Mit Hilfe der Kapazitätslogik fanden Luck und Vogel (1997) Evidenz dafür, dass im visuellen Arbeitsgedächtnis integrierte Objekte gespeichert werden und nicht einzelne visuelle Merkmale. Sie fanden eine Kapazität für insgesamt vier Objekte, unabhängig davon ob von diesen nur ein

Merkmal (z.B. Farbe) oder mehrere Merkmale (z.B. Farbe und Orientierung) im Gedächtnis behalten werden sollten. Das Zusammenfassen (*Binding*) der Merkmale zu Objekten erhöhte die Menge der behaltene Information ähnlich dem *Chunking* bei Miller (1956).⁴ Während relative Kapazitätsunterschiede zwischen verschiedenen Stimulusmaterialien Auskunft über Unterschiede in der Art der Verarbeitung geben können, ist die Festlegung einer absoluten Kapazität selbst schwierig. So ist etwa schwer festzustellen, wie viele Chunks von den Versuchspersonen tatsächlich gebildet werden und auf welche Gedächtnissysteme diese – durch Rekodierung – verteilt werden (Cowan, 2001).

2.3 Das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis

Modelle eines Arbeitsgedächtnis, welches nur aus einer Aufmerksamkeits- und einer sprachlichen Komponente besteht, waren gut mit dem Anfang der siebziger Jahren vorherrschenden Strukturalismus vereinbar, der sich zur Aufgabe gemacht hatte, die Vielfalt der beobachtbaren Phänomene auf zugrunde liegende symbolische Strukturen zurückzuführen. Das sprachähnliche Format der phonologischen Schleife war eine symbolische Repräsentation und passte damit zu einer angenommenen einheitlichen "Sprache des Geistes," die allen kognitiven Funktionen zugrunde liegt.⁵

⁴ Für eine kritische Auseinandersetzung mit der Interpretation von Luck und Vogel siehe Wheeler und Treisman (2002), sowie Davis und Holmes (2005).

⁵ So etwa bei Chomsky (1968), der die einzelsprachlichen Ausdrücke auf eine grammatische *Tiefenstruktur* zurückführte und damit das Verhältnis nicht nur von gesprochener Sprache, sondern auch von bewussten Denkinhalten, zur zugrunde liegenden geistigen Repräsentation neu konzeptualisierte. Auch die neu entstandenen Computerwissenschaften und entsprechende Ansätze, menschliche Kognition als Computerprogramm zu modellieren (z.B. Anderson, 1983), verlangten nach einer einheitlichen, formalisierbaren Repräsentation. Erst die im Haupttext geschilderte Differenzierung kognitiver Systeme im Informationsverarbeitungsansatz und die von der kognitiven Neuropsychologie entdeckten Dissoziationen kognitiver Funktionen führten zu einer empirisch gestützten Unterscheidung verschiedener Repräsentationsformate. Diese orientiert sich an den unterschiedlichen Konsequenzen für das beobachtbare Verhalten (z.B. Interferenz, Kapazität), beziehungsweise an den beteiligten Hirnregionen (z.B. des What- und Where-Systems, siehe unten).

Mit der visuell-räumlichen Komponente führte das dreiteilige Arbeitsgedächtnismodell jedoch ein zusätzliches Gedächtnissystem ein, das seine Information in einem bildähnlichen Format speichert, welches der visuellen Sinneswahrnehmung sehr nahe ist. Die Annahme unterschiedlicher Repräsentationsformate für verbales und bildhaftes Material führte innerhalb der Kognitionswissenschaften zu einer Debatte darüber, ob auch visuelle Repräsentationen in propositionaler, d.h. sprach-analoger Form gespeichert werden, oder aber in einem eigenen, non-verbalen Format (vgl. Paivio, 1986). Nicht zuletzt die oben genannten Forschungsergebnisse zur selektiven Interferenz zeigten, dass es zumindest für den Bereich des Arbeitsgedächtnis sinnvoll ist, zwischen sprachlicher und nicht-sprachlicher Information zu unterscheiden.

Die nicht-sprachliche Subkomponente des Arbeitsgedächtnis wurde von Anfang an als visuell-räumlich bezeichnet. Die Evidenz für dieses System war anfangs eher indirekt; sie bestand darin, dass Gedächtniseffekte, die bei verbalen Aufgaben auftraten, sich nicht zeigten wenn die Wörter visuell präsentiert wurden und die Artikulation verhindert wurde (vgl. Baddeley, Grant, Wight, & Thomson, 1975). So beispielsweise der Wortlängeneffekt, der darin besteht, dass man sich mehr kurze Wörter als lange Wörter merken kann – was sich dadurch erklären lässt, dass in der gleichen Zeit mehr kurze als lange Wörter artikuliert werden können (Baddeley, Thomson, & Buchanan, 1975). Dass dieser Wortlängeneffekt mit dem visuellen Material nicht auftrat deutete somit darauf hin, dass die geschriebenen Wörter nicht sequenziell wiederholt wurden, sondern simultan repräsentiert waren. Statt zeitlich sollten sie räumlich repräsentiert sein. Umgekehrt zeigte sich auch, dass eine visuell-räumliche Störaufgabe größeren Einfluss auf die Gedächtnisleistung hatte, wenn die Hauptaufgabe visuell-räumliche Anteile hatte, als wenn sie verbal gelöst werden musste. Baddeley, Grant, Wight und Thomson (1975) präsentierten ihren Versuchspersonen eine Brooks-Matrixaufgabe, wobei sie eine visuell-räumliche Interferenzaufgabe ausführen mussten. Die Hauptaufgabe, welche von Brooks (1967) entwickelt wurde, besteht darin, dass die Versuchsperson eine mit Ziffern gefüllte Matrix von 4 x 4 Feldern beschrieben bekommt. Ihre Aufgabe besteht darin, sich möglichst viele Sätze der Beschreibung zu merken. In der visuell-räumlichen Version der Aufgabe beschreiben die Sätze einen Pfad durch die Matrix ausgehend von einem Startfeld (*"In the starting square put a 1; in the square to the right put a 2; in the square beneath put a 3"* etc.) Davon werden durchschnittlich acht Sätze erinnert, die meisten Versuchspersonen

berichten, dass sie die verbale Beschreibung in eine Vorstellung des Pfads durch die Matrix rekodieren. In der zweiten Version der Aufgabe sind die räumlichen Beschreibungen durch unsinnige Angaben ersetzt ('rechts' oder 'links' werden beispielsweise durch Angaben wie 'schnell' oder 'langsam' ersetzt). Dadurch wird eine visuell-räumliche Rekodierung verhindert. Durchschnittlich werden sechs der Sätze erinnert. Die Versuchspersonen von Baddeley, Grant, Wight und Thomson (1975) mussten gleichzeitig mit der Brooks-Matrixaufgabe eine Interferenzaufgabe bearbeiten, die darin bestand, ein sich kreisförmig bewegendes Licht mit den Augen zu verfolgen. Diese Störaufgabe verschlechterte die Leistung nur dann, wenn die Matrix leicht zu visualisieren war, nicht jedoch wenn die Aufgabe nur verbal gelöst werden konnte. Die Autoren folgerten daraus, dass tatsächlich zwei unterschiedliche Gedächtnissysteme genutzt wurden – im ersten Fall das visuelle und im zweiten Fall das verbale Arbeitsgedächtnis.

2.3.1 Visuell oder räumlich?

In späteren Experimenten versuchten Baddeley und Lieberman (1980), die Art der Interferenz im visuell-räumlichen Gedächtnis näher zu bestimmen und trennten die Störaufgabe nach ihren visuellen und räumlichen Anteilen. Wiederum bearbeiteten die Versuchspersonen die beiden Versionen der Brooks-Matrixaufgabe. Wenn die Störaufgabe rein visuell war – die Versuchspersonen mussten Helligkeitsurteile abgeben – zeigte sich kein Störeffekt auf die visuell-räumliche Matrixaufgabe, jedoch auf die Nonsense-Aufgabe. Eine auditiv-räumliche Interferenzaufgabe störte umgekehrt die visuell-räumliche Matrixaufgabe, nicht jedoch die Nonsense-Aufgabe. Die auditiv-räumliche Störung bestand darin, dass die Versuchspersonen mit verbundenen Augen die Bewegung eines Pendels mit einer Taschenlampe nachverfolgen mussten, wobei sie akustische Rückmeldung bekamen: Wenn das Licht der Taschenlampe das Pendel traf, sendete es eine Folge kurzer Töne aus, anderenfalls einen kontinuierlichen Ton. Baddeley und Lieberman (1980) schlossen aus diesen Ergebnissen, dass das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnissystem nicht auf visueller, sondern auf räumlicher Information beruht. Sie schlossen allerdings nicht aus, dass visuelle und räumliche Information entweder zwei unterschiedliche Dimensionen darstellen, die beide im selben Arbeitsgedächtnissystem verarbeitet werden, oder dass neben dem räumlichen ein separates nicht-räumliches visuelles Gedächtnissystem existiert – eine Trennung, für die damals schon Evidenz aus ersten tierexperimentellen Studien zum *Where*-System vorlag (z.B. Ingle, 1967).

Vor allem Logie (1986) stellte die rein räumliche Natur des *Visuo-spatial sketchpad* (VSSP) in Frage und bemühte sich um eine weitere Ausdifferenzierung des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses. Er konnte zeigen, dass das Lernen von Wortlisten mit Hilfe von visuell-räumlicher Vorstellung (*Imagery*) durch die Präsentation von visuellem Material gestört wurde, welches relativ wenig räumliche Anteile hatte, wie Strichzeichnungen oder Farbflächen (Irrelevant Picture Effect, Logie, 1986; Quinn & McConnell, 1996). Martha Farah argumentierte, dass die Debatte über die Natur mentaler Bilder auf der falschen Prämisse beruhe, diese könnten entweder nur visuell oder nur räumlich sein. Tatsächlich existiere beides in Form von zwei getrennten Komponenten. Sie stellte einen Patienten mit einer Hirnverletzung vor, der nur räumliche, nicht jedoch visuelle Aufgaben lösen konnte (Farah, Hammond, Levine, & Calvanio, 1988) und verwies auf unterschiedliche zerebrale Aktivierungen für visuelles (okzipitales) und räumliches (parietales) Imagery (Farah, 1988; siehe auch Uhl, Goldenberg, Lang, & Lindinger, 1990).⁶ Logie und Marchetti (1991; Tresch, Sinnamon, & Seamon, 1993) demonstrierten eine behaviorale doppelte Dissoziation zwischen räumlicher und visueller Information. Während Armbewegungen im Retentionsintervall das Gedächtnis für räumliche Muster, nicht jedoch für Farbtöne, störten, wirkte sich umgekehrt irrelevanter visueller Input nur auf die Farbaufgabe aus.

2.3.2 Visual Cache und Inner Scribe

Logie (1995) unterteilte das VSSP in zwei Subkomponenten (Abbildung 2): Die räumliche Komponente oder *Inner Scribe* dient der Aufrechterhaltung (*Rehearsal*) von Bewegungsinformation und Pfaden zwischen Objekten. Sie ist nicht auf visuelle Information angewiesen – die räumliche Repräsentation kann auch durch Hören, Berührung oder Armbewegung entstehen. Die visuelle Komponente, der *Visual Cache* (VC) hält hingegen statische visuelle Information. Bei ihm handelt es sich nicht um einen Puffer, in dem die rohen visuellen Sinnesdaten zwischengespeichert werden, vielmehr ist

⁶ Gegen die oben implizierte Gleichsetzung der von Farah untersuchten Imagery-Komponente mit dem VSSP des Arbeitsgedächtnis spricht sich Pearson (2001) aus. In seinem Modell beinhaltet der *Visual Cache* des AG keine bewussten Bilder, diese werden in einem getrennten *Visual Buffer* erzeugt. Baddeley (2002) hingegen weist dem zum AG gehörenden *Episodic Buffer* (siehe unten) eine wesentliche Rolle beim Imagery zu, da Baddeley und Andrade (2000) sowohl Einflüsse des AG, als auch des Langzeitgedächtnis, auf visuelles und auditives Imagery fanden.

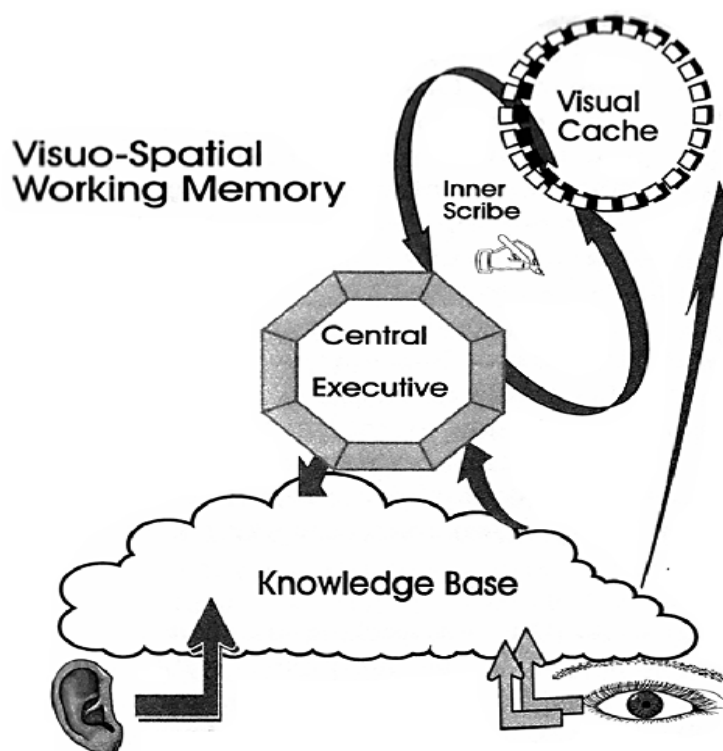


Abbildung 2: Visual Cache und Inner Scribe sensu Logie (1995).

die Information bereits durch Vergleich mit Langzeitgedächtnis-Inhalten interpretiert (siehe Logie, 2003). Für das Behalten räumlicher Information ist der VC insofern relevant, als die gehaltene visuelle Information beispielsweise aus einer statischen Konfiguration von Objekten bestehen kann (Zimmer & Lehnert, 2006). Die Orte der einzelnen Objekte sind dann implizit als relative Positionen innerhalb der Gesamtkonfiguration gespeichert. Letztere kann man auch als globales Objekt betrachten, das auf die gleiche Weise wie die lokalen Objekte gespeichert wird (vgl. Navon, 1977). Allerdings findet hier kein räumliches Rehearsal und keine Aufrechterhaltung von Bewegungsinformation statt. Die Binnengliederung des VSSP in Inner Scribe und VC wird durch neuropsychologische Evidenz gestützt, der zufolge okzipitale Aktivierung die visuelle Komponente widerspiegelt, parietale Aktivierung die räumliche Komponente und frontale Aktivierung Koordinations- und Kontrollfunktionen (Jonides et al., 1993; Smith & Jonides, 1998).

2.3.3 Rehearsal-Prozesse im räumlichen Arbeitsgedächtnis

Während weitgehende Einigkeit darüber besteht, dass sich visuelle und räumliche Anteile des VSSP unterscheiden lassen, wird die spezifische Rehearsal-Funktion der Inner Scribe von Baddeley (2002) in Frage gestellt. Er hält es für wahrscheinlicher, dass solch ein

nonverbales Rehearsal von der Zentralen Exekutive über Aufmerksamkeitssteuerung geleistet wird (vgl. auch Awh, Jonides, & Reuter-Lorenz, 1998; Smyth & Scholey, 1994), während alleine die Funktion der Phonologischen Schleife relativ unabhängig von zentralen Kontrollprozessen abläuft, da dieser eine Sonderrolle im Dienste der Sprachverarbeitung zukommt. Ursprünglich favorisierte Baddeley (1986) die Konzeption eines motorischen Rehearsals durch verdeckte Augenbewegungen. Smyth und Scholey (1994) präsentierten hingegen Evidenz dafür, dass räumliche Aufmerksamkeitsprozesse beteiligt sind, wenn eine Reihenfolge von Positionen im Gedächtnis behalten wird.⁷ In ihren Experimenten wurde das Gedächtnis für eine Abfolge von Positionen (*Corsi*-Aufgabe) sowohl durch visuelle als auch durch auditive Distraktoren beeinträchtigt, die räumlich verteilt links oder rechts dargeboten wurden. Auch nach Awh und Kollegen (Awh, Anllo-Vento, & Hillyard, 2000; Awh & Jonides, 2001; Awh et al., 1998; Awh et al., 1999) findet das Rehearsal für räumliche Positionen durch Aufmerksamkeitsprozesse statt. Die Aufmerksamkeit wird demnach an die jeweiligen Positionen gelenkt, um diese im Gedächtnis zu behalten. Awh, Jonides und Reuter-Lorenz (1998) konnten zur Stützung dieser These zeigen, dass visuelle Stimuli, die während des Retentionsintervalls einer räumlichen AG-Aufgabe dargeboten wurden, dann schneller verarbeitet wurden, wenn sie an der memorierten Positionen gezeigt wurden: Ein Vorteil, wie er bei erhöhter Aufmerksamkeitszuwendung zu erwarten ist. Die Versuchspersonen hatten in diesem Experiment die Aufgabe, während des Behaltensintervalls einer AG-Aufgabe buchstabenähnliche Stimuli in einer Wahlreaktionsaufgabe zu identifizieren. War die AG-Aufgabe räumlich, so identifizierten die Versuchspersonen die Stimuli der Sekundäraufgabe dann schneller, wenn sie an den memorierten Orten präsentiert wurden, als wenn sie an nicht memorierten Orten präsentiert wurden. Bei einer ähnlichen, aber nicht-räumlichen AG-Aufgabe, die von einer zweiten Gruppe von Versuchspersonen bearbeitet wurde, hatten die Stimuluspositionen keinen Einfluss auf die Antwortgeschwindigkeit in der Sekundäraufgabe. Die schnellere Verarbeitung an den memorierten Positionen wurde als Evidenz dafür betrachtet, dass die Versuchspersonen räumliche Aufmerksamkeit auf die Positionen richten, welche sie im AG halten. Es zeigte sich auch, dass umgekehrt eine Ablenkung der räumlichen Aufmerksamkeit durch die Sekundäraufgabe zu Leistungseinbußen in der Gedächtnisaufgabe führte. Wenn die

⁷ Für eine Position, die nicht-räumliche Aufmerksamkeitsprozesse betont, siehe Klauer und Stegmaier (1997).

Versuchspersonen im Behaltensintervall eine Farbdiskrimination durchführten, so verschlechterte sich ihre Leistung in der Hauptaufgabe dann, wenn die Farbtafeln an diskreten Positionen dargeboten wurden, welche sich von den memorierten Positionen unterschieden – im Vergleich zu einer großflächigen Präsentation der Farbtafeln, welche die memorierten Positionen mit einschloss. Im fMRI fanden Awh et al. (1999; Postle, Awh, Jonides, Smith, & D'Esposito, 2004) eine erhöhte Aktivierung visueller Areale (BA 18, 19) kontralateral zu der jeweils memorierten Position, was die Autoren als Modulation früher visueller Prozesse durch Aufmerksamkeit interpretieren.⁸ Die Autoren betonen, dass sie keine frontale Aktivierung, etwa der frontalen Augenfelder (*Frontal Eye Fields*, FEF), fanden. Ein wesentlicher Beitrag verdeckter Augenbewegungen am Rehearsal-Prozess kann damit als alternative Erklärung zur Aufmerksamkeitsverlagerung ausgeschlossen werden.

2.4 Der Episodic Buffer

Baddeley (2000, 2002) führte schließlich eine vierte Arbeitsgedächtnis-Komponente ein: Den *Episodic Buffer*, ein kapazitätsbeschränktes System, welches Informationen verschiedener Modalitäten in einer einheitlichen Repräsentation bindet. Zudem postulierte er explizit Verbindungen der Subsysteme zum Langzeitgedächtnis (Abbildung 3). Baddeley begegnete damit Mängeln des multimodalen AG-Modells vor allem im Bereich der Interaktion von Zentraler Exekutive und LZG, etwa beim *Chunking*, der Verbesserung der Gedächtnisleistung durch Bildung von größeren Einheiten (siehe oben, Miller, 1956). Da die Zentrale Exekutive selbst keine Speicherfunktion besitzt, ist im dreiteiligen AG Modell unklar, wo diese Leistung vollbracht wird. Der visuelle Ähnlichkeitseffekt (Logie, Della Sala, Wynn, & Baddeley, 2000), bei dem sich die visuelle Ähnlichkeit von Wörtern oder Buchstaben störend auf den seriellen Abruf verbaler Information auswirkt, legt außerdem nahe, dass verbale und visuelle Informationen im Arbeitsgedächtnis miteinander verbunden werden. Aus diesem Grund nimmt Baddeley an, dass der Episodic Buffer multimodalen oder "multi-dimensionalen Code" (Baddeley, 2000) nutzt und damit als Schnittstelle zwischen Systemen dient, die unterschiedliche Codes verwenden. Allerdings bleibt in Baddeleys Darstellung offen, ob der Episodic Buffer selbst multimodale Information speichert oder ob er reine Verbindungen zwischen den Informationen anderer

⁸ Die Aufmerksamkeitsprozesse selbst würden frontale und parietale Aktivierung erwarten lassen (siehe Hagler Jr. & Sereno, 2006; Kanwisher & Wojciulik, 2000).

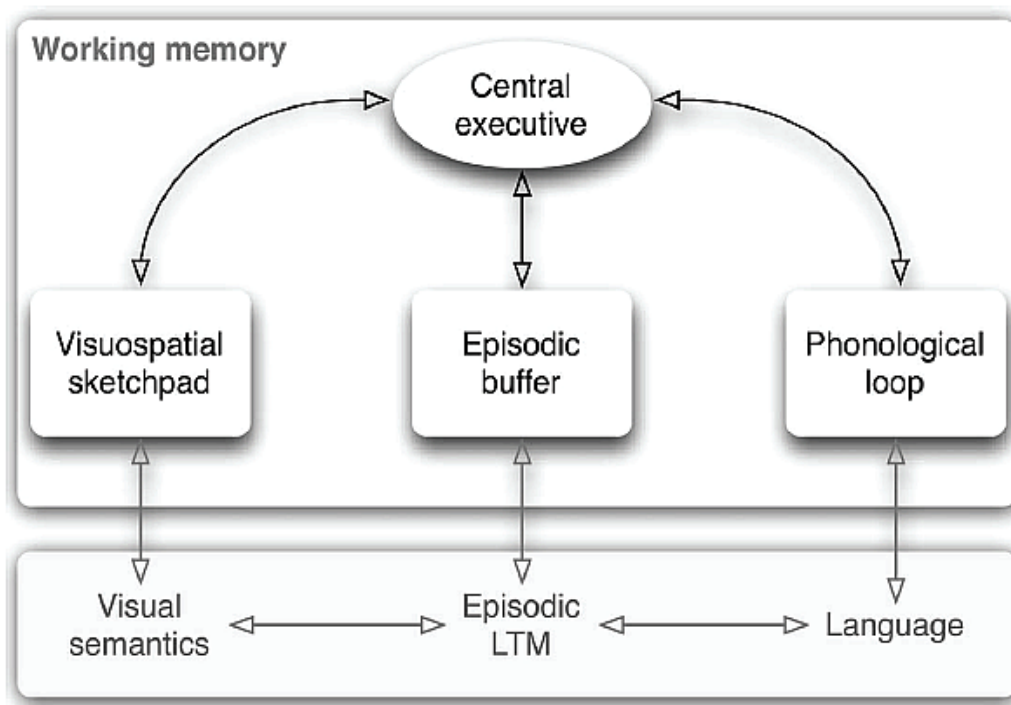


Abbildung 3: Baddeleys Modell des Arbeitsgedächtnis und seiner Beziehungen zu kristallinen Gedächtnisstrukturen nach Einführung des Episodic Buffer (aus Repovš & Baddeley, 2006).

Systeme herstellt. Eine solche 'Pointer'-Struktur selbst wäre eher als amodal denn als multimodal zu bezeichnen.

2.4.1 Zum Konzept der Bindung

Die Funktion, Informationen unterschiedlicher Verarbeitungssysteme in einer gemeinsamen Repräsentation zu integrieren, wird als Bindung (*Binding*) bezeichnet. Die Notwendigkeit eines solchen Mechanismus ergibt sich aus der neuronalen Realisierung der Informationsverarbeitung im Gehirn. Da die Verarbeitung unterschiedlicher Objektmerkmale – in der visuellen Wahrnehmung beispielsweise Farbe, Form und Orientierung – in getrennten Hirnregionen erfolgt, müssen die Ergebnisse der Verarbeitung auf irgendeine Weise wieder zusammengeführt oder zumindest als zusammengehörig erkannt werden. Dies muss nicht notwendig in bestimmten Hirnarealen geschehen, sondern kann etwa auch durch die Synchronität oszillatorischer neuronaler Aktivität geschehen (vgl. Varela, Lachaux, Rodriguez, & Martinerie, 2001). Die *Feature Integration Theory* (FIT) von Treisman und Gelade (1980) beschreibt die Bedingungen, unter denen Bindung von Objektmerkmalen stattfindet. Danach definiert sich die Zusammengehörigkeit der Objektmerkmale über ihre gemeinsame räumliche Position. Auf der Seite des

wahrnehmenden Subjekts ist Aufmerksamkeit nötig, um die an einer Position vorhandenen Merkmale zu einem Objekt zu binden. Eine Wahrnehmung einzelner Merkmale ist hingegen auch ohne Ausrichtung der Aufmerksamkeit möglich.⁹ Werden mehrere Objekte wahrgenommen, so kommt es bei Ablenkung der Aufmerksamkeit zu Fehlbindungen, das heißt zu falscher Enkodierung, welche Merkmale zu welchem Objekt gehören. Das wahrgenommene Objekt als eine Sammlung von Merkmalen wird in der FIT als *Object File* (Objektdatei) bezeichnet. Solche *Object Files* könnten auch die grundlegenden Einheiten des visuellen Arbeitsgedächtnis darstellen (Schneider, 1999; Treisman, 2006). Für die vorliegende Arbeit ist die Rolle der räumlichen Position im Bindungsprozess von Interesse. Da die Bindung der Objektmerkmale über den Ort erfolgt, wird dieser möglicherweise automatisch mitkodiert, so dass integrierte Objekte-an-Positionen im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden.¹⁰ So zeigte sich in einem Experiment von Treisman und Zhang (2006) ein Vorteil ortskongruenter Darbietung für das Wiedererkennen gebundener Objekte, obwohl der Ort nicht aufgabenrelevant war. Dieser Vorteil zeigte sich interessanterweise nur bei der Präsentation mehrerer Objekte – ein Hinweis darauf, dass die Positionen nicht in absoluten Koordinaten, sondern als Konfiguration der Objekte abgespeichert wurden.¹¹

⁹ Damit nimmt die Theorie (wie auch schon Treisman, 1960) eine mittlere Position ein zwischen Theorien, welche eine frühe Selektion unbeachteter Stimuli noch vor der Wahrnehmung annehmen (Broadbent, 1958) und solchen, welche eine späte Selektion annehmen, bei der alle Stimuli wahrgenommen aber selektiv weiterverarbeitet werden (Deutsch & Deutsch, 1963), insofern als in der FIT eine frühe Selektion gebundener Objekte, nicht aber ungebundener Objektmerkmale stattfindet.

¹⁰ Genau genommen wird der Ort gemäß der FIT nicht einfach mitkodiert, sondern aufgrund seiner Sonderstellung in einer separaten Ortskarte abgespeichert, die mit den Eigenschaftskarten (*feature maps*) verbunden wird und diese dadurch integriert. Die Wichtigkeit des Ortes lässt nach, wenn die Object Files im Laufe der weiteren Verarbeitung über andere Adressen, etwa verbale Labels, angesprochen werden können (Treisman & Zhang, 2006).

¹¹ Siehe auch die Diskussion zum Visual Cache, S. 13.

2.4.2 Bindung im Episodic Buffer

Visuelle Merkmalsbindung

Die FIT beschreibt Merkmalsbindung mit relativ wenigen theoretischen Vorannahmen – als einen aufmerksamkeitsgesteuerten Prozess, der auf visuellen Repräsentationen operiert. Während der Episodic Buffer als AG-Komponente beschrieben wurde, die Informationen aus unterschiedlichen Quellen in einer einheitlichen Repräsentation binden kann, ist eine Merkmalsbindung innerhalb einer Modalität, wie sie die FIT beschreibt, auch innerhalb des VSSP ohne Beteiligung des Buffers denkbar. Ein wesentliches Merkmal des Buffers ist, dass der Zugriff auf ihn und seine Bindungsfunktion von bewusster Aufmerksamkeitszuwendung durch die Zentrale Exekutive abhängig ist (Baddeley, 2002). Eine Beteiligung des Episodic Buffer an Bindungsprozessen sollte somit auch immer mit Aufmerksamkeitsprozessen einhergehen. In einer Serie von Experimenten untersuchten Allen, Baddeley und Hitch (2006) den Einfluss von Interferenzaufgaben, welche Aufmerksamkeit benötigen, auf die Rekognitionsleistung für visuelle Objekte. Sie verglichen Bedingungen, in denen nur ein einzelnes Merkmal (Farbe oder Form) von jedem Objekt im Gedächtnis gehalten werden musste, während das jeweils andere Merkmal über den gesamten Experimentalblock konstant blieb, mit einer Bedingung, in der für jedes Objekt die Kombination beider Merkmale erinnert werden musste. Die verwendeten Störaufgaben, Rückwärts zählen und Ziffern nachsprechen, übten den gleichen Einfluss auf die Rekognitionsleistung für einzelne Merkmale aus, wie auf die Leistung für Merkmalskombinationen. Aus der Additivität der Störeffekte schließen die Autoren, dass die Bindung von Merkmalen im Arbeitsgedächtnis keine zusätzliche Aufmerksamkeit gegenüber dem Gedächtnis für Einzelmerkmale benötigt. Entsprechend den Modellvorstellungen, wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind, bedeutet dies, dass die Bindung einfacher visueller Merkmale im VSSP selbst geschieht - ohne Mitwirken des Episodic Buffer. Denn ein Zusammenspiel von VSSP und Episodic Buffer sollte über die Zentrale Exekutive geschehen und darum zusätzliche Aufmerksamkeit benötigen. Die Autoren schließen allerdings auch nicht aus, das Modell in Zukunft zu modifizieren und eine direkte Verbindung zwischen den modalitätsspezifischen Teilsystemen und dem Episodic Buffer einzuführen, so dass nicht mehr alle Interaktion über die zentrale Exekutive läuft (Allen et al., 2006; Baddeley, 2002). Das Experiment zeigt die Schwierigkeit, eine Beteiligung des Episodic Buffers zu operationalisieren. Hätte sich

umgekehrt gezeigt, dass die Bindung visueller Merkmale zentrale Ressourcen benötigt, so hätte dies nicht zwingend für eine Beteiligung des Buffers gesprochen – auch eine direkte Interaktion von VSSP und zentraler Exekutive könnte dies erklären.

Bindung zwischen den Modalitäten

Im Experiment von Allen et al. (2006) wurde die Bindung von Merkmalen innerhalb der visuellen Modalität untersucht. Für die vorliegende Arbeit ist hingegen von besonderem Interesse, ob der Episodic Buffer benötigt wird (oder optional genutzt werden kann), um Verbindungen von Orten und Objekten im Arbeitsgedächtnis zu halten. Andererseits ist er für die vorliegende Fragestellung aufgrund des angenommenen multimodalen Codes interessant. So kann man beispielsweise auch eine Bindung von auditiven Objekten an visuell repräsentierte Positionen als Funktion des Episodic Buffer konzeptualisieren. Beides, Bindung von Ort und Objekt und Bindung zwischen den Modalitäten, lässt sich als Funktion des Buffers beschreiben. Der Buffer ist aber insofern als erklärendes Konstrukt problematisch, als seine Beteiligung an einem bestimmten Prozess kaum empirisch bestimmt werden kann, wie man an dem Experiment von Allen und Kollegen sieht. Er kann Informationen aus allen Modalitäten verarbeiten und könnte somit theoretisch an jedem AG-Prozess beteiligt sein. Außerdem ist das Konzept des Buffers relativ neu und empirisch nicht so gut fundiert, wie die anderen Komponenten, so dass es, wo es doch einmal nicht passt, nachträglich modifiziert werden kann. Somit stellt sich die Frage: "Warum nicht alles Gedächtnis dem Episodic Buffer zuschreiben [...]?" (Baddeley, 2000, übersetzt von mir, GL). Aus Gründen der theoretischen Sparsamkeit kommt der Episodic Buffer vorerst nur da als erklärendes Konstrukt in Frage, wo die anderen, empirisch besser bestätigten, Subsysteme keine einfache Erklärung erlauben (oder aufgrund der im EEG beobachteten Topographie unwahrscheinlich sind) und dennoch Eigenschaften eines AG-Prozesses, wie etwa begrenzte Kapazität oder Abhängigkeit von aktivem Rehearsal, gegeben sind.

2.4.3 Arbeitsgedächtnis als aktiviertes Langzeitgedächtnis

Indem Baddeley (2000, 2002) explizit Verbindungen zwischen den Komponenten des multimodalen AG und Langzeitgedächtnis-Strukturen einführte, näherte er sich Modellen an, die das Arbeitsgedächtnis als aktivierte Repräsentationen innerhalb des LZG ansehen (z.B. Anderson, 1983; Cowan, 1988). Während die zuletzt genannten keine

modalitätsspezifischen Systeme annehmen, vereinen neuere, neuropsychologisch orientierte Modelle beide Aspekte, indem sie auch für das LZG die Aktivierung modalitätsspezifischer Areale annehmen. Wahrnehmung, Verarbeitung und Langzeitspeicherung nutzen demnach partiell die selben Strukturen. Modalitätsspezifische Aktivierungen finden sich im Gehirn in posterioren Arealen, während der präfrontale Cortex (PFC) modalitätsübergreifende Kontrollfunktionen übernimmt (Fuster, 2006; Ruchkin, Grafman, Cameron, & Berndt, 2003). Die Ähnlichkeit zum multimodalen Modell mit seiner a-modalen zentralen Exekutive ist augenfällig und zeigt den Einfluss des AG-Modells auch im Bereich der neuropsychologischen Forschung.¹² Allerdings zeigt sich eine Tendenz zur weiteren Differenzierung der AG-Komponenten aufgrund der gewonnenen behavioralen und neuropsychologischen Erkenntnisse, zum Beispiel bezüglich des VSSP (für ein Review siehe Zimmer, 2008) und der zentralen Exekutive (Postle, 2006). Es ergibt sich das Bild eines modular aufgebauten kognitiven Systems, bei dem die einzelnen Verarbeitungsmodule material- und aufgabenabhängig genutzt werden. Welche Module von KZG und LZG gemeinsam genutzt werden, oder welche Module sich zwischen zwei verschiedenen Aufgaben unterscheiden, sind dabei letztlich Fragen, die empirisch beantwortet werden können und müssen. Die vorliegende Arbeit versucht dies für die Frage der Modalitätsspezifität des räumlichen AG zu leisten.

¹² Die Ergebnisse zur Lokalisierung der AG-Komponenten im Gehirn werden in Kapitel 3.2 im Detail vorgestellt.

3 Neuropsychologie des Arbeitsgedächtnisses

Die Erforschung der neuronalen Korrelate des räumlichen Arbeitsgedächtnisses ist von zwei verschiedenen Forschungstraditionen beeinflusst: Der Forschung zum Arbeitsgedächtnis selbst, welche von Anfang an auch nach den neuronalen Korrelaten von AG-Komponenten fragte (siehe oben), und der Forschung zur Dissoziation von räumlicher und Objekt-Verarbeitung, welche aus der tierexperimentellen Wahrnehmungsforschung hervorgegangen ist und im Folgenden kurz vorgestellt wird.

3.1 Der dorsale und der ventrale Pfad

Mechanismen für die räumliche Lokalisierung visueller Stimuli einerseits und für die visuelle Mustererkennung andererseits wurden seit den 60er Jahren in tierexperimentellen Studien unterschieden (Ingle, 1967; Schneider, 1967). Ungerleider und Mishkin (1982) belegten eine Dissoziation von Identifikation versus Lokalisierung visueller Stimuli bei Primaten, welche sich auch beim Menschen als sehr ähnlich herausstellte (Ungerleider, Courtney, & Haxby, 1998). Die der Identifikation dienende visuelle Objektinformation wird in einem ventral verlaufenden Pfad verarbeitet, der vom okzipitalen zum inferior temporalen Cortex führt. Die Lokalisierung nutzt hingegen einen weiter dorsal gelegenen Verarbeitungsweg vom okzipitalen Cortex zum inferior parietalen Cortex.¹³ Die beiden Pfade werden nach der verarbeiteten Information auch als *What-* und *Where-*System bezeichnet. Die Frage, warum das Gehirn diese beiden Arten von Information unterscheidet, wurde von Goodale und Milner (1992) folgendermaßen beantwortet: Die Wahrnehmung von Raum- und Objektinformation dient unterschiedlichen Zielen. Während die Rauminformation für die Handlungssteuerung, z.B. von Greifbewegungen, genutzt wird und somit effektiv den visuellen Input in motorischen Output übersetzen muss, dient die Objektinformation der Identifikation und dem Aufbau einer inneren

¹³ Bereits vor der Verarbeitung im okzipitalen Cortex findet eine Dissoziation zwischen räumlicher und Objektinformation statt, nämlich im Sehnerv, in dem das magnozelluläre (M-) System, nicht jedoch das parvozelluläre (P-) System Positionsinformation verarbeitet (Kessels, Postma, & de Haan, 1999; Tassinari et al., 1994). Bei einigen räumlichen Aufgaben ist nur das M-System, bei anderen sind beide Systeme aktiv. Anderson und Yamagishi (2000) beispielsweise fanden eine Beteiligung des P-Systems bei einer visuell-motorischen Aufgabe (Zeigebewegungen), nicht aber bei Lokalisierung relativ zu anderen Objekten.

Repräsentation. Somit muss sie mit den bereits vorhandenen Repräsentationen abgeglichen werden und dafür den Zugriff auf Gedächtnisinhalte auslösen.¹⁴ Wegen seiner Funktion, die Handlung an die räumlichen Eigenschaften des Objekts anzupassen, wurde der dorsale Pfad von Goodale und Milner (1992) statt als *Where*-System als *How*-System bezeichnet.

Die beiden Pfade unterscheiden sich in dieser Sichtweise also nicht so sehr nach der Art der verarbeiteten Information, als vielmehr nach dem Ergebnis der Verarbeitung. Räumliche Information wird von beiden Systemen verarbeitet: Die dorsale Verarbeitung führt zu einer Anpassung der Effektoren an die Position und Ausrichtung eines Objekts, während die ventrale Verarbeitung zu einer verbal berichtbaren Repräsentation dieser räumlichen Eigenschaften führt¹⁵. Die Dissoziation zwischen motorischer und verbaler Reaktion auf die selben (räumlichen) Eigenschaften eines Objekts zeigt sich beispielsweise beim Störungsbild der optischen Ataxie, bei der Patienten Probleme haben, visuell geleitete Greifbewegungen auszuführen, auch wenn sie die Position eines Objekts sehr genau beschreiben können (Perenin & Vighetto, 1988). Der umgekehrte Fall findet sich bei der visuellen Form-Agnosie (Goodale, Milner, Jakobson, & Carey, 1991), aber auch bei gesunden Versuchspersonen, wenn sie motorisch auf eine Positions- oder Größenveränderung reagieren, obwohl sie diese nicht bewusst wahrnehmen und berichten können weil sie während einer Sakkade stattfindet (Bridgeman, Lewis, Heit, & Nagle, 1979). Auch bei optischen Täuschungen wurde gezeigt, dass sie zwar die bewusste

¹⁴ In der Philosophie wird zwischen zwei Funktionsmodi des menschlichen Geistes unterschieden. Diese dienen der Handlungssteuerung, bzw. dem Gedächtniszugriff und können somit in Analogie zu den beiden Pfaden der visuellen Verarbeitung gesehen werden. Nietzsche (1872) etwa exemplifiziert seine Termini des *Apollinischen* und *Dionysischen* anhand des Traumes und des Rausches. Im Traum ist der Mensch ganz Erinnerung ohne Handlung. Es werden nur innere Repräsentationen ohne die zugehörige Motorik aktiviert, während im Extrem des Rausches (eines dissoziativen Trancezustandes) reines Handeln beobachtbar ist, das keine Erinnerungsspur hinterlässt. Kuno Lorenz (1990) unterscheidet Aspekte des Ausführens und des Anführens, die bei jeder Handlung gemeinsam auftreten. Auch die visuelle Wahrnehmung beinhaltet als Wahrnehmungshandlung beide Aspekte. Das Ausführen betont den motorischen Aspekt und die Instanziierung eines vorhandenen Schemas. Das Anführen bezeichnet umgekehrt die gedächtniswirksame Neubildung (oder Modifikation) eines Schemas.

¹⁵ Für eine weitergehende Diskussion von Dissoziationen unter dem Aspekt verbaler Berichtbarkeit siehe Mohr (1997).

Wahrnehmung, nicht jedoch Greifbewegungen beeinflussen (Aglioti, DeSouza, & Goodale, 1995; vgl. Coello, Danckert, Blangero, & Rossetti, 2007; van Doorn, van der Kamp, & Savelsbergh, 2007). Wurde die Greifbewegung allerdings erst nach Ausblenden des Zielstimulus initiiert, so unterlag auch die Handlungssteuerung der optischen Illusion (Westwood & Goodale, 2003), woraus man folgern kann, dass das dorsale System nur der unmittelbaren, visuell geleiteten Handlungssteuerung zur Verfügung steht, während verzögerte Handlungen auf die Information des ventralen Systems angewiesen sind.

Während die beiden Funktionen der Objektidentifikation einerseits und der Anpassung der Handlung an die räumlichen Eigenschaften des Objekts andererseits auch für verzögert ausgeführte Handlungen – und somit für das visuelle Arbeitsgedächtnis – nötig sind, folgt aus der Theorie von Goodale und Milner (1992) jedoch, dass für beide Funktionen alleine die bewusst wahrgenommene Information des ventralen Pfads genutzt wird. Die Information des dorsalen Pfads soll nur für unmittelbare Auge-Hand-Koordination, nicht aber für das Arbeitsgedächtnis zur Verfügung stehen (Goodale & Westwood, 2004). Dessen ungeachtet haben die Befunde zu *What* und *Where* in der Wahrnehmung von Anfang an auch die Forschung zum Arbeitsgedächtnis beeinflusst, welche schon früh zwischen visuellem Orts- und visuellem Objektgedächtnis unterschieden hat. Auch wenn die Frage noch nicht beantwortet ist, wie genau die Verarbeitungspfade der visuellen Wahrnehmung einerseits und des visuellen Arbeitsgedächtnis andererseits übereinstimmen, findet sich doch auch für das Arbeitsgedächtnis eine ähnliche Dissoziation zwischen den kortikalen Arealen für räumliches Gedächtnis und Objektgedächtnis.

3.2 Arbeitsgedächtnis und Gehirn

3.2.1 Dissoziation von phonologischer Schleife und VSSP

Phonologische Schleife und VSSP lassen sich, wie bereits im Kapitel über das Arbeitsgedächtnis erwähnt, anhand ihrer physiologischen Korrelate unterscheiden. So fanden Ruchkin und Kollegen (Ruchkin, Johnson, Grafman, Canoune, & Ritter, 1992) im ereigniskorrelierten Potential (EKP, siehe unten, S. 45) Unterschiede zwischen einer phonologischen und einer visuell-räumlichen Aufgabe, welche während der Enkodierung begannen und während des 5 Sekunden dauernden Retentionsintervalls anhielten. In der phonologischen Aufgabe merkten sich die Versuchspersonen aussprechbare Nicht-Wörter aus drei, vier oder fünf Silben und gaben im Test an, ob der Zielreiz identisch war, oder ob

sich ein Buchstabe geändert hatte. In der räumlichen Aufgabe bestanden die Stimuli aus drei, vier oder fünf räumlich verteilten Buchstabenpaaren; in der Testphase beurteilten die Versuchspersonen ob sich die räumliche Position eines der Elemente geändert hatte. Die Anzahl der Elemente führte bei beiden Aufgaben zu Load-Effekten im EKP: Eine Erhöhung der Gedächtnisbelastung führte jeweils zu einem negativeren Verlauf der Potentiale. Die Topographie der Load-Effekte unterschied sich jedoch nach Aufgabentyp: Die Load-Effekte der phonologischen Aufgabe traten an präfrontalen und frontalen Elektroden auf, während die der räumlichen Aufgabe ihr Maximum an parietalen Elektroden hatten. Die Ergebnisse unterstützen damit die Annahme unterschiedlicher Rehearsal-Systeme für verbales und visuell-räumliches Material.

3.2.2 Exkurs: Bildgebende Verfahren

Die meisten der im Folgenden geschilderten Untersuchungen nutzen eines von zwei Verfahren, um Aktivität im Gehirn sichtbar zu machen: PET und fMRI. Bei beiden Verfahren wird die regionale Veränderung des Blutflusses (*regional cerebral bloodflow*, rCBF), die mit neuronaler Aktivität einhergeht, gemessen. Bei der Positronen-Emissions-Tomografie (PET) geschieht dies über einen in die Blutbahn injizierten radioaktiven Marker, der beim Zerfall Positronen freigibt. Diese sind sehr kurzlebig, da sie sich unmittelbar mit jeweils einem ihrer Antiteilchen, den Elektronen, gegenseitig aufheben. Dabei wird ein Paar Photonen (Gamma-Quanten) frei, welche in genau entgegengesetzte Richtung ausgesendet werden und von der Messapparatur erfasst werden. Die daraus errechneten Aktivierungsmuster geben Auskunft darüber, welche Gehirnregionen aktiv waren. Bei der funktionellen Magnetresonanz-Tomografie (fMRT) wird nicht die absolute Änderung des Blutflusses gemessen, sondern der relative Anteil von sauerstoffreichem zu sauerstoffarmem Blut, welche unterschiedliche magnetische Eigenschaften besitzen. In Hirnarealen mit erhöhter Aktivität entsteht durch den Sauerstoffverbrauch eine BOLD- (*blood oxygen level dependent*) Antwort, welche vom Scanner gemessen wird.

Da nicht die gesamte Aktivität des Gehirns, sondern nur die Änderung dieser Aktivität mit einer bestimmten kognitiven Aufgabe von Interesse ist, werden jeweils mehrere experimentelle Bedingungen miteinander verglichen. Meist geschieht dies dadurch, dass von dem Aktivierungsmuster der interessierenden Aufgabe das Aktivierungsmuster einer

Kontrollaufgabe subtrahiert wird, die mit jener bis auf den interessierenden Prozess identisch ist. In den Arbeiten von Smith und Jonides (1997) etwa bestanden die Arbeitsgedächtnis-Aufgaben darin, ein Lerndisplay und einen verzögert dargebotenen Teststimulus miteinander zu vergleichen, während in den Kontrollaufgaben die selben Elemente in geänderter Abfolge dargeboten wurden, so dass erst die Verzögerung und dann ein simultaner Vergleich erfolgte. Somit unterscheiden sich die Aufgaben in der Gedächtnisanforderung, nicht jedoch in den wahrgenommenen Objekten oder den motorischen Anforderungen der Antwort. Eine andere Möglichkeit der Isolierung relevanter Prozesse durch experimentelle Manipulation stellt die parametrische Variation dar, etwa eine stufenweise Erhöhung der Gedächtnisbelastung (z.B. Jonides et al., 1997). Im Gegensatz zu einer qualitativ verschiedenen Kontrollaufgabe zeigt eine solche quantitative Variation nur Prozesse auf, die auch tatsächlich Load-abhängig sind. Gedächtnisprozesse, die nicht mit der Belastung variieren, werden herausgerechnet. Während im Kontrollaufgaben-Paradigma die relevante Aktivität eher überschätzt wird (wenn sich doch mehr als nur die interessierenden Prozesse unterscheiden), wird sie im parametrischen Paradigma eher unterschätzt.

Die Gruppe um Edward E. Smith und John Jonides von der *University of Michigan* untersuchte das Arbeitsgedächtnis mit Positronen-Emissions-Tomografie (PET), wobei sie räumliche Information (Jonides et al., 1993), Objektinformation (Smith & Jonides, 1995) und verbale Information (Awh et al., 1996) zwar in getrennten Studien untersuchte, jedoch das gleiche Untersuchungsparadigma verwendete, so dass sich die Ergebnisse direkt miteinander vergleichen lassen (Smith & Jonides, 1997). In der (visuell-)räumlichen Aufgabe (Jonides et al., 1993) bestand das Lerndisplay aus einem Fixationskreuz und drei Punkten, die verschiedene Positionen markierten. Nach 200 ms Darbietung folgte ein Retentionsintervall von 3000 ms und schließlich der Zielreiz – ein Kreis, von dem die Versuchspersonen angeben sollten, ob er eine der Lernpositionen einschließt. In der Kontrollbedingung wurde zuerst das Fixationskreuz für 3000 ms eingeblendet, dann erst das Lerndisplay für 200 ms und schließlich der Kreis, welcher in diesem Fall zusätzlich zum Lerndisplay eingeblendet wurde. Im Tomogramm zeigten sich nach Subtraktion der Kontrollaufgabe Aktivierungen in mehreren Regionen der rechten Hemisphäre.¹⁶ Im

¹⁶ Der Übersichtlichkeit halber werden hier nur jene Aktivierungen aufgeführt, welche mit

Gedächtnisfunktionen in Zusammenhang gebracht werden oder die Gedächtnisaufgaben von einander

hinteren Bereich des Gehirns war eine Region im posterioren Parietallappen aktiv (Brodmann-Areal [BA] 40), welche mit räumlicher Verarbeitung und Gedächtnis in Zusammenhang gebracht werden kann. Des weiteren eine Region im anterioren Okzipitallappen (BA 19), die vermutlich der Aufrechterhaltung eines visuellen Bildes dient. Weitere Aktivierungen im präfrontalen (BA 47) und im prämotorischen Cortex (BA 6) wurden von den Autoren mit Rehearsalprozessen in Zusammenhang gebracht. Solches räumliches Rehearsal basiert nach Ansicht von Awh et al. (1998) auf dem selben Mechanismus wie räumliche Aufmerksamkeit, wobei sich die Rolle frontaler Areale im Rehearsal allerdings nicht bestätigt hat (Postle et al., 2004).

Drei Jahre vor der Studie zum räumlichen Arbeitsgedächtnis hatten Awh und Kollegen (Awh et al., 1996) bereits eine PET-Studie zum verbalen Arbeitsgedächtnis veröffentlicht, in der das gleiche Untersuchungsparadigma Anwendung fand. Anstatt der räumlich verteilten Punkte wurden vier Großbuchstaben oben, unten, rechts und links des Fixationskreuzes präsentiert. Im Test wurde in der Mitte ein Kleinbuchstabe eingeblendet, von dem anzugeben war, ob er mit einem der Lernreize identisch ist. Auch diesmal wurde die Aktivierung einer Kontrollaufgabe subtrahiert, in der das Lerndisplay erst am Ende des Retentionsintervalls gezeigt wurde. Die verbale Aufgabe ging mit linkshemisphärischen Aktivierungen des posterioren Parietallappens (BA 40) einher, sowie mit ebenfalls links lateralisierten Aktivierungen frontaler Areale – einschließlich des Broca-Areals (BA 44), des prämotorischen Cortex und des supplementären motorischen Areals (beide BA 6). Diese Areale sind auch beim Sprechen aktiv und dienen im Zusammenhang mit dem Arbeitsgedächtnis sehr wahrscheinlich dem verbalen Rehearsal, während die posterioren Areale der Speicherung oder dem Abruf von Information dienen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mittels neurophysiologischer Methoden unterschiedliche Hirnareale für verbales und visuell-räumliches Arbeitsgedächtnis identifiziert wurden. Beim verbalen AG sind frontale Strukturen, vor allem das Sprachzentrum (Broca-Areal) involviert, beim visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis sind parietale und okzipitale Areale beteiligt. Eine Gemeinsamkeit der beiden Gedächtnissysteme besteht darin, dass für beide Modalitäten angenommen wird, dass Speicherung und Abruf posterior, Rehearsal- und Kontrollprozesse frontal stattfinden (Ruchkin et al., 2003; Smith & Jonides, 1998).

unterscheiden.

3.3 Dissoziation von Ort und Objekt im visuellen Arbeitsgedächtnis

Auch die Dissoziation von visueller Orts- und Objektinformation im menschlichen Arbeitsgedächtnis wurde seit Mitte der 90er Jahre mit bildgebenden und elektrophysiologischen Verfahren untersucht. Im Folgenden werden exemplarisch zwei PET-Studien zur Trennung von dorsalem und ventralem Verarbeitungsweg im Arbeitsgedächtnis vorgestellt. Anhand der Ergebnisse dieser Studien, sowie einer Meta-Analyse über 60 Einzelstudien wird ersichtlich, welche Hirnareale am visuellen Arbeitsgedächtnis für Orte, beziehungsweise Objekte, beteiligt sind. Anschließend werden EKP-Studien vorgestellt, um zu zeigen, wie sich die Dissoziation von Orts- und Objektinformation in elektrischen Potentialänderungen an der Kopfoberfläche widerspiegelt.

3.3.1 Bildgebende Studien

Smith und Jonides (1995) führten neben den Studien zum verbalen und zum räumlichen Arbeitsgedächtnis auch eine PET-Studie zum visuellen Objektgedächtnis durch, welche das gleiche Untersuchungsparadigma nutzte. In diesem Fall wurden zwei Objekte (unregelmäßige geometrische Figuren) für 400 ms präsentiert. Nach 3000 ms Retentionsintervall wurde ein Test-Stimulus präsentiert, der entweder mit einem der Lernstimuli identisch war oder nicht. Die Kontrollaufgabe beinhaltete auch in diesem Fall die gleichen Elemente in einer anderen Abfolge, so dass Lernstimuli und Test-Stimulus am Ende des Trials gleichzeitig zu sehen waren. Unter den Regionen, die in der Gedächtnisaufgabe im Gegensatz zur Kontrollaufgabe aktiv waren, fanden sich das posterior parietale (BA 40) und das prämotorische Areal (BA 6), die wie in der verbalen Aufgabe linkshemisphärisch aktiv waren. Darüber hinaus aber auch eine – ebenfalls linkshemisphärische – Aktivierung des inferotemporalen Cortex in einer Region, die der Objekt-Rekognition zugeschrieben wird (BA 37).¹⁷ Smith und Jonides (1995; 1998)

¹⁷ Es fragt sich, warum die inferotemporale Region nicht auch in der Kontrollaufgabe aktiv war, wenn sie dem Erkennen der Objekte dient. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Versuchspersonen in der Kontrollaufgabe die Objekte nicht so vollständig verarbeiten müssen, wie in der Gedächtnisaufgabe, sondern der Vergleich einzelner Eigenschaften zum Lösen der Aufgabe ausreicht.

interpretieren diese Daten so, dass die Versuchspersonen nach einer anfänglichen Identifikation des Objekts zumindest teilweise verbales Rehearsal nutzen.

Eine weitere frühe PET-Studie zum visuellen Arbeitsgedächtnis für Orte und Objekte stammt von Courtney et al. (Courtney, Ungerleider, Keil, & Haxby, 1996). Bei ihnen lernten die Versuchspersonen entweder die Positionen oder die Identitäten von je drei (von insgesamt 24) Gesichtern,¹⁸ die ähnlich wie beim Memory-Spiel nacheinander an drei (von 24) Positionen aufgedeckt wurden. Der vierte Stimulus musste jeweils danach beurteilt werden, ob das Gesicht oder seine Position einem der drei Lernstimuli entsprach. In der Kontrollaufgabe wurden die Gesichter "scrambled", also unkenntlich, präsentiert und auf den vierten Stimulus wurde von Trial zu Trial wechselnd eine der beiden Antworttasten gedrückt. In der Ortsaufgabe zeigte sich Aktivierung des rechten dorsolateralen Okzipitallappens (BA 19/7) und bilateral im oberen Parietallappen (BA 7). Im direkten Vergleich zur Objektaufgabe (statt zur Kontrollaufgabe) zeigte sich außerdem höhere Aktivität im superioren frontalen Sulcus (BA 6 oder 8) und bilateral im inferioren Parietallappen (BA 40). In der Objektaufgabe zeigten sich okzipito-temporale Aktivierungen bilateral im fusiformen Gyrus (BA 19) und im okzipito-temporalen Cortex (BA 18), die sich in der rechten Hemisphäre nach anterior erstreckten bis zum Temporallappen (BA 37) und dem parahippocampalen Gyrus (BA 20/36).

Zwar betonen die Autoren die Gemeinsamkeit mit der von Jonides et al. (1993) gefundenen Aktivierung von BA 6 in der räumlichen Aufgabe, jedoch haben diese auch in der verbalen und der Objektaufgabe Aktivierungen von BA 6 gefunden. Das unterscheidende Merkmal der räumlichen Aufgabe war bei diesen Autoren die rechtshemisphärische Lateralisierung. Bei Courtney et al. (1996) ist diese Aktivierung tendenziell links höher. Eine andere Gemeinsamkeit der räumlichen Bedingungen ist die

¹⁸ Unter den visuellen Objekten kommt den Gesichtern möglicherweise ein besonderer Status zu, insofern als eine für das Gesichtserkennen zuständige Region innerhalb des Fusiformen Gyrus (FG) identifiziert wurde, die *Fusiform Face Area* (FFA; Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997). Diese Region zeigt allerdings auch für andere Objekte erhöhte Aktivierung, für die eine Person ein vergleichbares Unterscheidungsvermögen (Expertise) entwickelt hat (Gauthier, Tarr, Anderson, Skudlarski, & Gore, 1999). Mittlerweile wurden sowohl Areale im FG außerhalb der Face Area (Rhodes, Byatt, Michie, & Puce, 2004), als auch Neuronenverbände in der FFA selbst identifiziert (Grill-Spector, Sayres, & Ress, 2006), die teilweise sehr spezifisch auf einzelne Objektkategorien ansprechen (für einen Überblick siehe Haxby, 2006).

von beiden Arbeitsgruppen gefundene okzipitale Aktivierung im mittleren Okzipitallappen (BA 19). In der Objektaufgabe ist als Gemeinsamkeit die inferior temporale Aktivierung in BA 37 hervorzuheben. Insgesamt ist das Datenmuster, das sich beim Vergleich der Studien ergibt, inkonsistent. In den Aktivierungen, die räumliche und Objektinformation dissoziieren, finden sich über die beiden Studien hinweg nur wenige Gemeinsamkeiten. Diese in beiden Studien gefundenen Aktivierungen bestätigen die Trennung von räumlicher und Objektinformation, nicht aber die Unterscheidung zwischen visuellem und räumlichem AG (Logie, 1995), wie sie Farah (1988) für visuelles und räumliches Imagery gefunden hatte. Danach sollten die räumlichen Aufgaben parietale Prozesse nutzen, die visuellen Aufgaben hingegen okzipitale. Hingegen scheint es eher so, dass gerade in der räumlichen Aufgabe eine visuelle Strategie genutzt wird (okzipitale Aktivierung), in der Objektaufgabe hingegen nicht-visuelle Strategien, wie Identifikation, Bedeutungszuschreibung und Benennung (temporale Aktivierung).

In einer Meta-Analyse von 60 PET- und fMRI-Studien zum Arbeitsgedächtnis fanden Wager und Smith (2003) die Trennung von dorsalem und ventralem Verarbeitungsweg bestätigt. Räumliche AG-Aufgaben führten danach am häufigsten zu Aktivierungen im posterioren Parietallappen, nicht-räumliche Aufgaben aktivierten am häufigsten die inferioren Temporallappen. Während die parietale Aktivierung nicht exklusiv bei räumlichen Aufgaben auftrat, sondern in geringerem Ausmaß auch bei verbalen und Objektaufgaben, war die temporale Aktivierung spezifisch für Objektaufgaben. Eine Aktivierung des rechten Frontallappens (hauptsächlich BA 9) war ebenfalls spezifisch für die Objektaufgaben. Dieser Befund widerspricht der von Smith und Jonides (1997) gefundenen hemisphärischen Lateralisierung, wonach Objekte links und Orte rechts verarbeitet werden. Insgesamt ließ sich diese Asymmetrie in der Metaanalyse von Wager und Smith (2003) nicht bestätigen. Die Aktivierung von BA 9 in den Objektaufgaben steht auch im Gegensatz zu der Hypothese, dass im präfrontalen Cortex (PFC) eine materialspezifische Verarbeitung stattfindet. Danach sollte in dieser Region, dem dorsolateralen präfrontalen Cortex (DLPFC), Ortsinformation verarbeitet werden, Objektinformation aber im ventralen Frontallappen (Courtney, Petit, Maisog, Ungerleider, & Haxby, 1998; Sala, Rämä, & Courtney, 2003; Ungerleider et al., 1998; Ventre-Dominey et al., 2005; Wilson, Scialidhe, & Goldman-Rakic, 1993). Die Autoren schließen sich der alternativen Auffassung an, dass die frontalen Aktivierungen von den benötigten

exekutiven Prozessen abhängen (D'Esposito et al., 1998; Owen, 1997; Owen et al., 1999; Petrides, 1994). Ihre Ergebnisse stützen die Hypothese, dass Speicherung ohne weitere exekutive Prozesse den ventralen PFC aktiviert, wohingegen jede Form von Manipulation der Information den DLPFC aktiviert, wobei die jeweils beteiligten Prozesse aber auch mit dem verarbeiteten Material kovariieren können oder von strategischen Prozessen beeinflusst werden (siehe auch Mecklinger, Bosch, Gruenewald, Bentin, & von Cramon, 2000; Sala & Courtney, 2007).

Schließlich fanden Wager und Smith (2003) in den räumlichen Aufgaben auch eine Aktivierung des primären visuellen Cortex (BA 17), die zwar gering war, jedoch ausschließlich in räumlichen Aufgaben auftrat. Diese Aktivierung lässt sich möglicherweise auf eine räumliche Rehearsal-Strategie zurückführen, die mit Augenbewegungen und somit Änderungen des retinalen Abbildes einhergeht. Dieser Interpretation widerspricht allerdings, dass sich keine höheren Aktivierungen der frontalen Augenfelder im Vergleich zu nicht-räumlichen Aufgaben fanden. Möglicherweise handelt es sich um eine Top-down-Aktivierung durch visuelles Imagery.

3.3.2 Slow Potential-Studien

Die informationsspezifische Verarbeitung von Ort und Objekt im Arbeitsgedächtnis zeigt sich auch im ereigniskorrelierten Potential (EKP).¹⁹ In den meisten Studien dazu wurden die langsamen Potentiale (LP) gemessen, die sich während des Behaltensintervalls entwickeln. Ähnlich der beiden Paradigmen für bildgebende Verfahren (siehe oben, S. 25) wurden die gemessenen LPs für räumliche und Objektinformation entweder direkt miteinander verglichen (z.B. Bosch, Mecklinger, & Friederici, 2001; Ruchkin, Johnson, Grafman, Canoune, & Ritter, 1997) oder es wurde für jede Aufgabe die Änderung des Potentials mit steigender Gedächtnisbelastung untersucht (Load-Effekte, Mecklinger & Pfeifer, 1996).

Bei Mecklinger und Pfeifer (1996) lernten die Versuchspersonen in getrennten Sitzungen das eine Mal horizontal angeordnete geometrische Figuren (Objektaufgabe), das andere Mal zweidimensionale Anordnungen von Quadraten (Raumaufgabe). In beiden Bedingungen wurde die Gedächtnisbelastung variiert, indem in aufeinanderfolgenden Experimentalblöcken drei, vier und schließlich fünf Objekte dargeboten wurden. Nach

¹⁹ Zur Methodik der EKP siehe Kapitel 5, S. 45.

einer Präsentation der jeweiligen Stimulusanordnung für 1800 ms folgte ein Retentionsintervall von insgesamt 5000 ms, nach welchem die Versuchspersonen eine Alt/Neu-Entscheidung zu einem Testdisplay trafen. Bei den neuen Items der Objektaufgabe war eines der Objekte in seiner Breite verändert, bei denen der Raumaufgabe war die Position eines der Elemente leicht variiert. Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) ab Präsentationsbeginn des Lernstimulus wurden für die drei Load-Bedingungen in beiden Aufgaben gemittelt. In der Raumaufgabe entwickelten sich schon ab Stimuluspräsentation negative langsame Potentiale an parietalen und okzipitalen Elektroden, in der Objektaufgabe entwickelten sich post-stimulus signifikante Negativierungen an frontalen Elektroden (Abbildung 4 zeigt Elektroden der Mittellinie für beide Aufgaben.) Die Load-Variation führte in der Objektaufgabe ebenfalls an frontalen Elektroden zu einer höheren Negativierung und an links-temporalen Elektroden zu einer Positivierung mit höherem Load. In der Raumaufgabe führte die Zunahme der Gedächtnisbelastung zu einer Negativierung an posterioren Elektroden.

Schaut man sich statt der Load-Effekte die Unterschiede zwischen Objekt- und Raumaufgabe an, so führte die Objektaufgabe zu negativeren LPs an frontalen und an rechts-temporalen Elektroden. Die Raumaufgabe ging mit parietal und okzipital

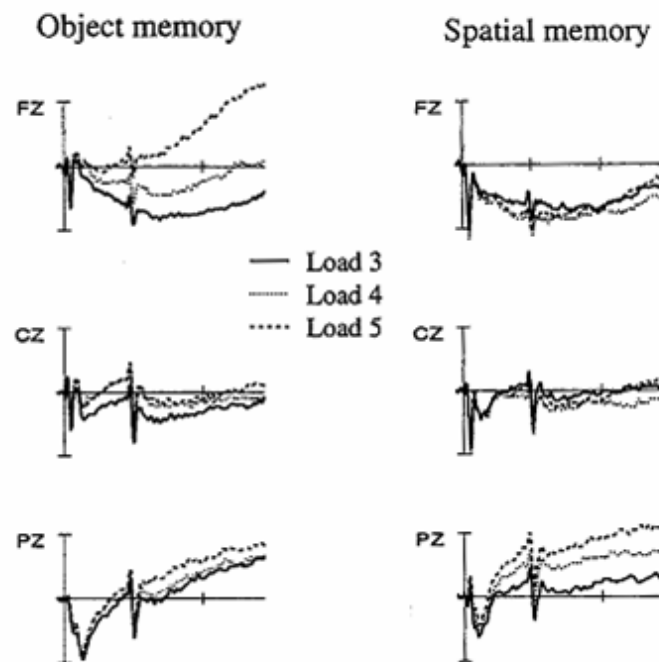


Abbildung 4: Langsame Potentiale bei Mecklinger und Pfeifer (1996, Fig. 3 und 4, Ausschnitte).

negativeren Verläufen einher als die Objektaufgabe. Die parietale Aktivierung sowohl in den Load-Effekten als auch im Vergleich mit der Objektaufgabe lässt sich erwartungskonform mit der Aktivierung des dorsalen Pfades erklären. Die links-temporalen Aktivierungen in der Objektaufgabe können mit der Nutzung einer verbalen Strategie erklärt werden; der positive Verlauf der höheren Load-Bedingungen bedeutet mithin, dass diese Strategie nur für kleinere Itemsets angewandt wurde. Die frontale Aktivierung in der Objektaufgabe wird von Mecklinger und Pfeifer (1996) ähnlich wie von Wager und Smith (2003) nicht mit material-spezifischen, sondern mit exekutiven Prozessen in Zusammenhang gebracht. Die Identifikation braucht demzufolge mehr Aufmerksamkeit oder mehr exekutive Kontrolle als die Lokalisierung. Im Sinne eines Zwei-Stufen-Modells kann angenommen werden, dass Objekte in einem ersten Schritt lokalisiert werden müssen, bevor sie in einem zweiten Schritt identifiziert werden können. Identifizierung ist somit per se anspruchsvoller. Die rechts-temporale Aktivierung der Objekt- gegenüber der Raumaufgabe schließlich weist auf eine Rolle des Temporallappens bei der (nicht-verbalen) Verarbeitung von Objekteigenschaften hin (vgl. auch Uhl et al., 1990). Diese Region lässt sich allerdings nicht mit dem angenommenen ventralen Pfad identifizieren, bei dem die Verarbeitung von Objektmerkmalen im inferioren Temporallappen stattfindet (z.B. Ranganath, DeGutis, & D'Esposito, 2004), nahe des Hippocampus und somit nicht unmittelbar unter den temporalen Elektroden gelegen. Spekulativ kann die temporale Aktivierung im EEG mit der von Neggers und Kollegen (Neggers, Van der Lubbe, Ramsey, & Postma, 2006) im fMRI gefundenen Aktivität des superioren Temporallappens (STL) bei allozentrischen Raumaufgaben in Zusammenhang gebracht werden (siehe auch Karnath, 2001). Demnach werden die räumlichen Beziehungen von Objekten oder Objektteilen relativ zueinander im STL verarbeitet, während eine egozentrische parietale Repräsentation der Handlungssteuerung dient. Die Art der Objektaufgabe (Einschätzung der Objektbreite benachbarter Objekte) bei Mecklinger und Pfeifer (1996) hat möglicherweise eine solche allozentrische Raumrepräsentation gefördert.

Die Studie von Mecklinger und Pfeifer (1996) zeigt exemplarisch, dass langsame ereigniskorrelierte Potentiale geeignet sind um Arbeitsgedächtnisprozesse nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich aufzulösen. Die Potentiale entwickelten sich über jenen Arealen, die auch mit bildgebenden Verfahren für das Arbeitsgedächtnis identifiziert

wurden. Ähnliche Ergebnisse fanden sich auch in weiteren Slow Potential Studien. Die parietale Negativierung für Ortsinformation findet sich im Retentionsintervall von AG-Aufgaben (Bosch et al., 2001, Exp. 1; Ruchkin et al., 1992; Ruchkin et al., 1997) genauso wie in Slow Potentials von Lernitems (Khader, Heil, & Rösler, 2005; Mecklinger & Mueller, 1996) und Abruf-Cues (Mecklinger, 1998; Mecklinger & Meinshausen, 1998), beim Langzeitgedächtnis-Abruf (Khader, Heil et al., 2005; Rösler, Heil, & Hennighausen, 1995) oder während räumlichem Imagery (Uhl et al., 1990). Die langsamen Potentiale bei der Verarbeitung visueller Objektinformation sind nicht so einheitlich. In den genannten Studien finden sich für die Objektaufgaben häufig frontale Aktivierungen (Bosch et al., 2001; Khader, Heil et al., 2005; Mecklinger, 1998; Mecklinger & Meinshausen, 1998; Mecklinger & Pfeifer, 1996; Ruchkin et al., 1997), aber auch temporale Negativierungen (Mecklinger & Pfeifer, 1996; Uhl et al., 1990), okzipitale Negativierungen (Uhl et al., 1990) oder parietal-okzipitale Positivierungen (Bosch et al., 2001; Farah, Weisberg, Monheit, & Peronnet, 1989). Dies mag daran liegen, dass die Variabilität sowohl der Aufgaben über die Studien hinweg, als auch der möglichen Strategien innerhalb der Studien bei den visuellen Objektaufgaben sehr hoch ist. Einerseits gibt es vielfältige Möglichkeiten, Objektinformation im Experiment zu variieren (bspw. Farbe, Form, Größe oder Textur von geometrischen Objekten; Identität von Gesichtern), andererseits sind viele dieser Dimensionen leichter verbal zu rekodieren als räumliche Positionen (siehe Postle, D'Esposito, & Corkin, 2005). Die unterschiedlichen LPs der Objektaufgaben können somit als Korrelate ganz unterschiedlicher Prozesse angesehen werden, wie zum Beispiel visuellem Imagery (okzipital), Kategorisierung (temporal) und Verbalisierung (links-frontal), sowie Aufmerksamkeits- und Kontrollprozessen (präfrontal).

Trotz der Variationen in den Objektaufgaben tritt eine Dissoziation langsamer Potentiale von Orts- und Objektverarbeitung zuverlässig auf. Für die Verarbeitung von Ortsinformation verlaufen die Potentiale parietal negativer, für Objektinformation zeigen sich überwiegend frontale und temporale Negativierungen.

3.4 Konsequenzen für das visuelle AG-Modell

Die Dissoziation von Orts- und Objektverarbeitung, wie sie für die visuelle Wahrnehmung gilt, hat auch im Bereich des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis fruchtbare Ergebnisse geliefert. Allerdings bestätigen die neuropsychologischen Erkenntnisse nur scheinbar die

Unterscheidung von visuellem und räumlichen Gedächtnis, wie sie etwa im Arbeitsgedächtnismodell von Logie (1995) als *Visual Cache* und *Inner Scribe* konzeptualisiert sind. Bei genauerem Hinsehen bestehen die Stimuli jener räumlichen Aufgaben, welche dem *Where*-System zugeordnet wurden, zumeist aus statischen räumlichen Konfigurationen, die nach Logie zusammen mit der visuellen Objektinformation im *Visual Cache* gespeichert sein sollten. Die *Inner Scribe* hingegen sollte bei dynamisch-räumlichen Aufgaben wie dem Corsi-Test aktiv sein, welche Bewegungs- oder Abfolgeinformation beinhalten. Weiterhin haben Awh und Kollegen den Rehearsal-Mechanismus durch räumliche Aufmerksamkeit, der von Smith und Scholey (1994) für dynamisch-räumliche Information postuliert wurde, auch für statische Positionen aufgezeigt. Es gibt somit keine neuropsychologische Evidenz dafür, dass statisch-räumliche Information per se zusammen mit visueller Objektinformation im *Visual Cache* gespeichert wird. Andererseits ist es schwer vorstellbar, dass visuelle Objekte völlig ohne räumliche Information gespeichert werden, denn während sich an einer bestimmten Position kein klar erkennbares Objekt befinden muss, besitzen zwei- oder dreidimensionale Objekte *per definitionem* räumliche Eigenschaften wie Position und Ausdehnung.

Dem tragen Postma und de Haan (1996) Rechnung, indem sie, einer Unterscheidung von Kosslyn et al. (1989) folgend, zwischen reinem Positionsgedächtnis und dem Gedächtnis für Objektpositionen unterscheiden. Sie ordnen dem Gedächtnis für Objektpositionen eine kategoriale Verarbeitung zu, welche sich, wie das Gedächtnis für Objekte selbst, stark auf die Semantik stützt. Das Gedächtnis für reine Positionen erfolgt hingegen in Form von räumlichen Relationen oder Koordinaten ohne Nutzung von semantischen Codes (vgl. dazu auch Postle et al., 2005). Die kategoriale Information wird dabei in stärkerem Maße linkshemisphärisch verarbeitet, die Information räumlicher Koordinaten rechtshemisphärisch (Kessels, Kappelle, de Haan, & Postma, 2002; Kosslyn et al., 1989; Postma, Huntjens, Meuwissen, & Laeng, 2006). Andere Befunde deuten in die gleiche Richtung einer impliziten Kodierung von Objektpositionen gemeinsam mit den Objekten. So fanden Finke und Kollegen (Finke, Bublak, Neugebauer, & Zihl, 2005), dass sich für das Objektgedächtnis kein Nachteil ergab wenn zusätzlich die Orte der Objekte im Gedächtnis gehalten werden mussten; hingegen zeigten sich gegenüber dem reinen Ortsgedächtnis starke Einbußen, wenn zusätzlich die Objekte mit behalten wurden.

Zimmer und Lehnert (2006) zeigten in einer Serie von Experimenten, dass räumlich angeordnete Objekte im Rekognitionstest schneller beurteilt werden, wenn sie in der gleichen Anordnung dargeboten werden, als wenn sich die Anordnung ändert (*Spatial Mismatch Effect*, Santa, 1977). Der Vorteil trat in geringerem Maße auch dann auf, wenn die Objekte nicht an identischen Orten, sondern in einer ähnlichen Beziehung zueinander dargeboten wurden, etwa indem das Layout der Objekte erhalten, aber gedehnt oder gedreht wurde. Das visuelle Objektgedächtnis scheint somit in der Lage, Konfigurationen von Objekten in Form einer globalen Figur aufrecht zu erhalten. Zwischen der räumlichen Ausdehnung eines einzelnen Objekts und den räumlichen Beziehungen einer Konfiguration von Objekten besteht kein wesentlicher Unterschied, kann man doch die Konfiguration als ein größeres Einzelobjekt betrachten (vgl. Navon, 1977).

Zusammengenommen weisen die geschilderten Ergebnisse zwei unterschiedliche Gedächtnismechanismen für Positionen auf: (1) Als räumliche Beziehungen zwischen Objekten sind Objektpositionen im visuellen Objektgedächtnis mitgespeichert. (2) Durch Ausrichtung räumlicher Aufmerksamkeit können reine Orte ohne visuelle Objektinformation aufrechterhalten werden. Dabei kann durch Aufmerksamkeits-Shifts auch dynamische (Abfolge- oder Bewegungs-) Information aufrechterhalten werden. Unterschiede zur *Inner Scribe* bei Logie (1995) bestehen darin, dass einerseits auch statische Positionen mit Aufmerksamkeit belegt werden können und dass der Mechanismus andererseits nicht dem Auffrischen einer visuellen Repräsentation dient.

4 Das auditiv-räumliche Arbeitsgedächtnis

4.1 VSSP und Modalität

Wie oben ausgeführt, sahen Baddeley und Hitch (1974) die visuell-räumliche Komponente des AG zu Beginn als in erster Linie räumliche Komponente an. Dennoch wurde fast ausschließlich die visuell-räumliche Verarbeitung untersucht. Wenn die Verarbeitung auditiv-räumlicher Information untersucht wurde, geschah dies als Sekundäraufgabe, etwa um auditiv-räumliche Interferenz bei einer visuellen Primäraufgabe zu zeigen (siehe oben, S. 12). Mit der weiteren Ausdifferenzierung des VSSP in Visual Cache und Inner Scribe wurde die räumliche Komponente von der visuellen Modalität unabhängig. Die Beobachtung, dass das Rehearsal im räumlichen Arbeitsgedächtnis auf Aufmerksamkeitsprozessen beruht, hat die Konsequenz, dass die Inner Scribe nicht zwingend als visuelles System gedacht werden muss. Forschung zur modalitätsübergreifenden räumlichen Aufmerksamkeit (z.B. Driver & Spence, 1999; Spence & Driver, 1996) bezeugt, dass räumliche Aufmerksamkeit nicht modalitätsspezifisch ist und darum auch als Rehearsalmechanismus unabhängig von der Eingangsmodalität zur Verfügung stehen sollte. Der selbe aufmerksamkeitsbasierte Rehearsalprozess sollte somit für visuelle wie für auditive räumliche Information zur Verfügung stehen. Die Tatsache, dass viele der angeführten Interferenz-Studien nicht-visuellen Input, wie Armbewegungen (Baddeley & Lieberman, 1980) oder räumlich verteilte Geräusche (Smyth & Scholey, 1994) in der Zweitaufgabe genutzt haben, stimmt damit gut überein. Wenn räumliches Rehearsal auf Aufmerksamkeit beruht und Aufmerksamkeit modalitätsübergreifend ist, dann sollte diese aufmerksamkeitsbasierte Form des räumlichen AG für beide Modalitäten auf den selben Strukturen beruhen. Wie oben gezeigt, handelt es sich beim räumlichen Rehearsal durch Aufmerksamkeits-Shifts nur um eine von mindestens zwei Möglichkeiten, räumliche Information im AG zu halten. Während aufmerksamkeitsbasiertes Rehearsal räumliche Abfolgeinformation aufrechterhalten kann, wie sie etwa in der Corsi-Aufgabe benötigt wird, ist für die Zuordnung von Objekten zu Positionen ein anderer Mechanismus notwendig (vgl. Zimmer, Speiser, & Seidler, 2003). Diese Funktion lässt sich im AG-Modell dem Visual Cache zuordnen, der die Möglichkeit bietet, räumliche Information als Eigenschaft visueller Objekte (wie Ausdehnung, Anordnung, etc.) und somit im visuellen Objektgedächtnis zu

speichern. Ein analoger AG-Mechanismus für auditiv-räumliche Information wäre denkbar, doch gibt es bisher kein theoretisches Modell dafür. Wenn auditiv-räumliche Information mit im auditiven Objektgedächtnis gespeichert würde, könnte sich das etwa so darstellen, dass ein Ton erinnert wird, der 'sich *anhört*, als käme er von rechts', d.h. räumliche Information wäre auch als eine Objekteigenschaft kodiert.

Im Folgenden wird berichtet, was über die Verarbeitung auditiv-räumlicher Information in Wahrnehmung und AG bekannt ist.

4.2 Neuropsychologie der auditiven Verarbeitung

Während die Repräsentation visueller Stimuli im okzipitalen Cortex retinotopisch erfolgt und damit die räumlichen Relationen der Umwelt, wie sie auf der Netzhaut repräsentiert sind, erhält, ist die frühe auditive Verarbeitung tonotopisch entlang der Frequenz organisiert. Zwar erhält auch der primäre auditive Cortex die Topik seines Sinnesorgans aufrecht – allerdings ist bereits dieses tonotopisch organisiert. Die Basilarmembran des Innenohrs wird nach innen dünner und flexibler, um für zunehmend tiefe Töne empfindlich zu sein, die aufgrund ihrer höheren Wellenlänge tiefer ins Innenohr eindringen. Sie wird somit vorne durch höhere, hinten durch tiefere Frequenzen zum Schwingen gebracht. Dadurch wird Frequenzinformation in eine räumliche Topologie umkodiert. Informationen über die tatsächliche räumliche Position, Ausdehnung oder Bewegungsrichtung der Geräuschquelle sind überwiegend in Frequenz- und Laufzeitdifferenzen der beiden Signale erhalten, welche linkes und rechtes Ohr erreichen. Die Unterschiede entstehen durch die unterschiedliche Nähe zur Geräuschquelle und durch Abschattung und Reflektion der Schallwellen durch Kopf und Körper (für eine Übersicht siehe Middlebrooks & Green, 1991). Die solchermaßen zeit- und frequenzkodierte räumliche Information muss im auditiven Cortex wieder dekodiert werden.²⁰ Auch hier lässt sich in der weiteren

²⁰ Wie bei der visuellen Wahrnehmung (siehe oben, S. 22, Fußnote) werden auch im auditiven Fall sehr frühe Verarbeitungsschritte diskutiert, welche eine Analyse des Signals nach 'What' und 'Where' noch vor Erreichen des Neocortex vollziehen. Im auditiven Fall findet diese Vorverarbeitung im Hirnstamm statt – durch eine Analyse binauraler Unterschiede, was eine einfache Links-Rechts-Positionierung ermöglicht (Krumbholz, Schönwiesner, Rübsamen et al., 2005), oder möglicherweise auch schon durch eine frühe Analyse des Frequenzspektrums (Kraus & Nicol, 2005).

Informationsverarbeitung eine Dissoziation der räumlichen von der auditiven Objektinformation nachweisen.

4.2.1 Auditive Wahrnehmung

Wie bei der visuellen Wahrnehmung lässt sich auch beim Hören eine Trennung der kortikalen Verarbeitung in zwei Pfade nachweisen. Basierend auf Tierstudien wurde ein der visuellen Modalität analoges Modell postuliert, bei dem ein dorsaler Pfad räumliche Information verarbeitet und ein ventraler Pfad Objektinformation (Rauschecker & Tian, 2000). Beide Pfade führen vom auditiven Cortex zum Frontallappen; der dorsale Pfad über den parietalen Cortex, der ventrale Pfad über den rostralen Teil des superioren Temporallappens. Diese Teilung hat sich mittlerweile auch beim Menschen vielfach bestätigt – so etwa durch Patientendaten (Adriani et al., 2003; Clarke & Thiran, 2004; Clarke et al., 2002), die eine doppelte Dissoziation zwischen der Fähigkeit, Geräusche räumlich zu lokalisieren, und der Fähigkeit, Geräusche zu identifizieren, zeigen. Es gibt jeweils Patienten mit fokaler Läsion in einem der beiden Verarbeitungspfade, bei welchen die dementsprechende Fähigkeit verloren gegangen, die jeweils andere aber erhalten geblieben ist. Diese informationsspezifische Unterteilung der Verarbeitungswege wird durch bildgebende Verfahren bei gesunden Personen bestätigt (Arnott, Binns, Grady, & Alain, 2004; Maeder et al., 2001; Warren & Griffiths, 2003a). Neuere Arbeiten haben eine Dissoziation auch im (nicht-primären) auditiven Cortex selbst gefunden (Ahveninen et al., 2006; Barrett & Hall, 2006; Hart, Palmer, & Hall, 2004). Allerdings ist, ähnlich wie bei der visuellen Wahrnehmung, umstritten, ob die Funktion der beiden Pfade durch die Begrifflichkeit von 'What' und 'Where' richtig wiedergegeben wird. Im auditiven Fall wird diskutiert, ob die Trennung nicht vielmehr der Unterscheidung von überdauerndem Objekt und aktuellem Ereignis dient, also zum Beispiel von Sprecher und Nachricht oder von Instrument und Melodie (siehe z.B. Belin & Zatorre, 2000). Versucht man, einen gemeinsamen Nenner für die jeweiligen Dissoziationen in visueller und auditiver Wahrnehmung zu finden, so bietet sich eine Unterscheidung an zwischen invarianten Objekteigenschaften einerseits, welche zur Rekognition genutzt werden können (What-Pfad), und variablen Objekteigenschaften andererseits, welche nur für die spezifische Situation Gültigkeit besitzen und bei der Handlungssteuerung Berücksichtigung finden (Where-Pfad). Während in der visuellen Modalität der Ort die offensichtlichste und bedeutsamste variable Eigenschaft eines Objekts darstellt, dominieren in der auditiven

Modalität die variablen Inhalte von artspezifischen Äußerungen. Auch hier wird die Ortsinformation im dorsalen Pfad verarbeitet – aber eben nicht *nur* die Ortsinformation. Für Experimente, die eine Dissoziation von auditiver Orts- und Objektinformation zeigen wollen, ist es deshalb entscheidend, Stimulusdimensionen zu manipulieren, die als auditive Objektinformation gelten können (Griffiths & Warren, 2004). Eine reine Tonhöhenmanipulation scheint ungeeignet, da Tonhöhe den veränderlichen Eigenschaften eines Instruments oder einer Stimme zuzuordnen ist, während die Identifikation eines Objekts nur über strukturelle Invarianzen geschehen kann – akustische Eigenschaften wie Timbre oder Hüllkurve, die unabhängig von aktueller Tonhöhe, -dauer, Lautstärke und Ort sind (Smith, Delgutte, & Oxenham, 2002).²¹

Der Verlauf der auditiven Verarbeitungspfade lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:²² Der primäre auditive Cortex und laterale Bereiche des Heschl'schen Gyrus zeigen Aktivität bei auditiver Stimulation. Diese ist bei komplexen Stimuli (Akkorden, modulierten Tönen) höher als bei einfachen Tönen oder Rauschen. Posterior davon befindet sich das Planum Temporale (PT), das bei räumlicher Bewegung von Tönen, aber auch bei Überlagerung stationärer Töne erhöhte Aktivität zeigt. Griffiths und Warren (2002) schlugen die Interpretation vor, dass das PT als 'Computational Hub' einer Disambiguierung sowohl von überlagerten Tönen als auch von Raum- und Objektinformation dient, indem Geräusche hinsichtlich spektraler und zeitlicher Muster analysiert werden. Anschließend trennt sich die Verarbeitung aufgabenabhängig für Rekognition und Lokalisierung. Die räumliche Informationsverarbeitung folgt einem caudomedial verlaufenden Weg vom posterioren Temporallappen über das parieto-temporale Operculum zum inferioren Parietallappen (IPL). Sowohl im auditiven Cortex, als auch im IPL wurden kontralateral zur Stimulusposition größere Aktivierungen gefunden, mit einer Tendenz zu rechtshemisphärischer Dominanz (Fujiki, Riederer, Jousmaki, Makela, & Hari, 2002; Krumbholz, Schönwiesner, von Cramon et al., 2005; Weeks et al., 1999). Die Aktivierung des IPL wurde in allen bildgebenden Studien mit

²¹ Zur unterschiedlichen Verarbeitung von Tonhöhe und Timbre siehe z.B. Münzer, Berti und Pechmann (2002)

²² Die Zusammenfassung beruht, wo keine Einzelstudien genannt werden, auf der Metastudie von Arnott et al. (2004), sowie dem Literaturüberblick bei Warren und Griffiths (2003a) inklusive des Web-Supplements (Warren & Griffiths, 2003b).

räumlichen Aufgaben berichtet, in rund der Hälfte der Studien findet sich außerdem eine Aktivierung im Bereich des superioren frontalen Sulcus (SFS), anterior der frontalen Augenfelder. Die Verarbeitung von auditiver Objektinformation hingegen erfolgt rostralateral, mit erhöhter Aktivität im lateralen Heschl'schen Gyrus, im anterioren Teil des superioren Temporallappens und im inferioren Frontallappen. Frontale Aktivität wurde in den Brodmann-Arealen 45 und 47 berichtet, nicht aber in BA 44, dem Broca-Areal. Die Aktivität lässt sich somit nicht rein auf verbale Effekte zurückführen (Arnott et al., 2004).²³

4.2.2 Auditives Arbeitsgedächtnis

Auch im Bereich des auditiven Arbeitsgedächtnis konzentrieren sich die neuropsychologischen Studien auf die Dissoziation von räumlicher und Objektinformation. Im Folgenden werden zwei der fMRI-Studien zum auditiven Arbeitsgedächtnis vorgestellt; beide fanden Aktivierungen, welche mit den angenommenen Verarbeitungspfaden übereinstimmen. Rämä et al. (2004) untersuchten das auditive Arbeitsgedächtnis unter Verwendung gesprochener abstrakter Wörter. Die Versuchspersonen merkten sich entweder die Identität der Sprecherstimme oder die (virtuell im Kopfhörer simulierte) räumliche Position der Satzdarbietung. Nach einem Retentionsintervall von 4,5 s wurde ein zweiter Begriff präsentiert, der von der Versuchsperson auf der jeweils relevanten Dimension als gleich oder unterschiedlich zum ersten beurteilt wurde. Von den Aktivierungen wurden diejenigen einer passiven Kontrollbedingung subtrahiert, in der die Begriffe unter Beibehaltung des Frequenzspektrums unkenntlich gemacht ('scrambled') waren. Im Behaltensintervall ging die Positions-Bedingung mit erhöhter Aktivität im IPL und im superioren Parietallappen (SPL) einher, die Sprecher-Bedingung hingegen mit höherer Aktivität im superior temporalen Gyrus (STG) und Sulcus (STS). Frontale Aktivität trat in beiden Bedingungen auf. Im direkten Kontrast der beiden Gedächtnisbedingungen zeigte sich in der Positions-Bedingung außer der SPL-Aktivität erhöhte Aktivität in dorsalen präfrontalen Regionen um den SFS, in der Sprecher-Bedingung dagegen Aktivität im ventralen präfrontalen Cortex.

²³ Auch wenn diese Frage in der Literatur zur auditiven Verarbeitung relativ wenig diskutiert wurde (z.B. bei Arnott, Grady, Hevenor, Graham, & Alain, 2005; Rämä, 2008), sei hier nochmal auf die (oben, S. 30, geschilderte) Diskussion hingewiesen, ob die Verarbeitung in frontalen Arealen materialspezifisch erfolgt (z.B. Wilson et al., 1993) oder unterschiedliche exekutive Anforderungen widerspiegelt (z.B. Petrides, 1994).

In einer Studie von Arnott et al. (2005) wurde Breitbandrauschen als Stimulusmaterial verwendet. Die Identität der Geräusche wurde durch eine rhythmische Veränderung manipuliert, nämlich über den Zeitpunkt einer kurzen Unterbrechung. In jedem Durchgang wurde der Versuchsperson die relevante Stimulusdimension (Identität, Ort oder passiv) mitgeteilt und dann als S1 eine von fünf Varianten des Geräusches auf einer von fünf Positionen präsentiert. Sechs bis zehn Sekunden später erfolgte die Testphase, in der die Versuchspersonen erst eine Frage zur Relation von S1 zu S2 gestellt und dann den zweiten Stimulus präsentiert bekamen. Die Frage hatte die Funktion, eine Antwortvorbereitung schon während des Behaltensintervalls zu verhindern, da die Versuchsperson erst in der Testphase erfuhr, worauf sie antworten soll. In der räumlichen Aufgabe konnten die vier möglichen Fragen lauten: "Welches Geräusch war weiter innen [außen, rechts, links]?", in der Identitätsaufgabe: "Welches Geräusch hatte das kürzere [längere] erste [zweite] Segment?" In der passiven Kontrollbedingung sollten die Versuchspersonen S1 ignorieren und bekamen statt der Frage direkt mitgeteilt, welche Taste sie auf S2 hin drücken sollten. Beide Gedächtnisbedingungen zeigten stärkere frontale und parietale Aktivierungen als die Kontrollbedingung. Die Ortsbedingung zeigte gegenüber der Identitätsbedingung in posterior temporalen und parietalen Regionen (unter anderem im rechten IPL), sowie im SFS höhere Aktivität. Die Identitätsaufgabe ging mit höherer Aktivität in linken STG einher. Bemerkenswert ist, dass während des Behaltensintervalls erhöhte Aktivität nur in der Identitätsbedingung auftrat, während der Testphase hingegen nur in der Ortsbedingung. Möglicherweise förderte oder erforderte die zeitliche Information der Identitätsaufgabe eine Rehearsalstrategie, während die räumliche Information geringe Anforderungen an die Speicherung, aber hohe Anforderungen an die Vergleichsaufgabe stellte. In einer weiteren fMRI-Studien der selben Arbeitsgruppe um Claude Alain in Toronto (Alain, Yu, & Grady, 2008; siehe auch Grady, Yu, & Alain, 2008), in denen diesmal bedeutungshaltiges Stimulusmaterial verwendet wurde (Tiere, Musikinstrumente), konnten die rechts-dorsalen Aktivierungen in IPL und SFS bei räumlichen Aufgaben und im linken STG repliziert werden. Zusätzlich fand sich in der Objektaufgabe Aktivität im linken inferioren Frontallappen.

In einer fMRT-Studie zum (nicht-räumlichen) auditiven AG fanden Brechman et al. (2007) Aktivierungen im auditiven Cortex. Während das rechte Planum Temporale sowohl während einer perzeptuellen Aufgabe (0-back-task), als auch einer AG-Aufgabe (2-back-

task) aktiv war, zeigte das linke PT nur in der AG-Aufgabe Aktivität. Diese korrelierte positiv mit den Leistungen der Versuchspersonen.

4.2.3 Elektrophysiologie

Was die elektrophysiologischen Korrelate des auditiven Arbeitsgedächtnis betrifft, sind die vorliegenden Befunde uneinheitlich. Chao und Knight (1996) fanden eine anhaltende frontale Aktivierung ab etwa 400 ms während einer auditiven Arbeitsgedächtnisaufgabe. In zwei Studien, die auditives und visuelles Arbeitsgedächtnis direkt verglichen haben, waren in den auditiven Aufgaben die frontalen Negativierungen größer, in den visuellen die posterior temporalen und parieto-okzipitalen Negativierungen (Barceló, Martín-Loeches, & Rubia, 1997; Lang, Starr, Lang, Lindinger, & Deecke, 1992). Eine Einteilung nach Strategien zeigte in der Studie von Lang et al. (1992), dass – unabhängig von der Ausgangsmodalität – Artikulation mit frontaler Negativierung und visuelles Imagery mit parieto-okzipitaler Negativierung einher ging. Es scheint also, dass die Versuchspersonen in der auditiven Aufgabe häufiger verbalisierten, in der visuellen Aufgabe häufiger visuelles Imagery nutzten, d.h. die Eingangsmodalität war nicht kausal für die gefundenen Aktivierungen verantwortlich, sondern vermittelt über die Strategien der Versuchspersonen. Rämä und Kollegen (2000; Anurova et al., 2003) fanden in verschiedenen auditiven AG-Aufgaben mit zunehmender Gedächtnisbelastung (Load) parieto-okzipitale Negativierung und frontale Positivierung. Die Aktivierungen zeigten keine informationsspezifischen Unterschiede zwischen der Verarbeitung von Tonhöhe und Ort. Alain et al. (2001) fanden hingegen höhere fronto-temporale Positivierung bei der Verarbeitung von Tonhöhe und höhere zentro-parietale Positivierung bei der Verarbeitung von Orten.

4.3 Bewertung

Während auf der funktionalen Ebene für das auditiv-räumliche AG kein Arbeitsmodell vorliegt, das den Modellen zum visuell-räumlichen AG etwa von Logie oder Pearson entspricht, liegen doch ausreichend Daten aus neuropsychologischen Studien vor, um die Verarbeitung räumlicher Information im AG zu skizzieren. Es zeichnet sich das Bild eines auditiven AG ab, das ebenso wie sein visuelles Gegenstück diejenigen dorsalen und ventralen Areale nutzt, welche auch in der Wahrnehmung aktiv sind, und räumliche bzw. Objektinformation verarbeiten. Hinzu treten wiederum für das AG spezifische frontale

Prozesse, die als exekutive oder Kontrollfunktionen beschrieben wurden. Für die Verarbeitung der Objektinformation im ventralen Pfad finden sich Unterschiede zur visuellen Modalität – besonders deutlich etwa bei der Aktivität im auditiven Cortex (Brechman et al., 2007). Am AG für auditiv-räumliche Information hingegen sind Areale im posterioren Parietallappen (IPL und SPL) beteiligt und damit – zumindest bei dieser Korngröße der Betrachtung – die gleichen Areale, die auch den wesentlichen Bestandteil des visuellen 'Where'-Pfads ausmachen. Damit stellt sich die Frage, ob räumliche Informationen aus der auditiven und visuellen Modalität dorsal in zwei nahe beieinander liegenden, parallelen Systemen verarbeitet werden, oder ob es sich um ein gemeinsames, amodales AG-System handelt. Bei den frontalen Prozessen schließlich wird diskutiert, wie weit sie mit der Art der Aufgabe variieren und wie weit mit der Art der verarbeiteten Information. Interessanterweise gibt es auch hier Hinweise, dass es in dem vermuteten Areal für Objektinformation, dem ventralen präfrontalen Cortex, Modalitätsunterschiede gibt (für ein Review siehe Rämä, 2008).

5 Elektrophysiologische Maße

Die elektrische Aktivität des Gehirns lässt sich zwischen zwei Punkten an der Skalpoberfläche als Potentialdifferenz im Mikrovoltbereich messen und als Funktion der Zeit abtragen. Dieses Elektroenzephalogramm (EEG) bildet postsynaptische Aktivierungen ab, die hauptsächlich von den senkrecht zur Cortexoberfläche ausgerichteten Pyramidenzellen der cortikalen Schichten stammen (vgl. Skandries, 2002). Allerdings ist der Cortex selbst vielfach gefaltet, weshalb der durch die aktiven Zellen gebildete elektrische Dipol nur im Ausnahmefall senkrecht zur Kopfoberfläche ausgerichtet ist und zu maximaler Aktivität an direkt darüber gelegenen Elektroden führt. Eine einfache Zuordnung im EEG gemessener Aktivität zum darunter liegenden Cortex ist deshalb nicht möglich. Dieses Problem wird dadurch verstärkt, dass ein gemessenes Potential nicht nur durch einen, sondern durch das Zusammenspiel mehrerer cortikaler Generatoren erzeugt wird. Während eine bestimmte Kombination aktiver Dipole zu einem eindeutigen Aktivitätsmuster an der Kopfoberfläche führt, lässt sich nicht umgekehrt von einem bestimmten Aktivitätsmuster eindeutig auf die zugrundeliegenden Dipole schließen, da das selbe Muster von mehreren Dipolkombinationen erzeugt werden kann (sog. 'inverses Problem'). Hinzu kommt, dass im EEG nur ein Teil der cortikalen Aktivität messbar ist. Voraussetzung ist nicht nur die synchrone Aktivität eines hinreichend großen Neuronenverbandes, sondern auch eine Ausrichtung dieses Verbandes in Form eines elektrisch offenen Feldes, dessen Aktivität sich nach außen bemerkbar macht, im Gegensatz zum geschlossenen Feld, welches sich wegen fehlender Gerichtetheit bei Aktivität im Innern nach außen hin elektrisch neutral verhält.

Während das EEG den Aktivitätszustand des Gehirns oder auch nur des Neocortex weder vollständig abbilden kann, noch eine einfache Lokalisierung der zugrundeliegenden Generatoren erlaubt, hat es jedoch eine sehr hohe zeitliche Auflösung im Millisekundenbereich, welche der zeitlichen Auflösung von PET und fMRI (Minuten-, bzw. Sekunden-Bereich) weit überlegen ist.

5.1 Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP)

Beim EEG lassen sich mehrere Arten von beobachtbarer Aktivität unterscheiden. Die Spontanaktivität des EEG gibt Hinweise auf globale Hirnzustände und erlaubt es

beispielsweise, zwischen Epileptikern und Gesunden oder zwischen verschiedenen Schlafstadien zu unterscheiden. Daneben gibt es die durch diskrete Ereignisse ausgelöste Aktivität, welche sich wiederum in evozierte und ereigniskorrelierte Aktivität unterteilen lässt. Als evozierte Aktivität wird die Änderung der elektrophysiologischen Prozesse in Reaktion auf ein Ereignis bezeichnet, welche nicht in einem gesetzmäßigen zeitlichen Abstand erfolgt. Ereigniskorrelierte Aktivität hingegen bezeichnet ein elektrisches Potential, welches *time-locked*, also in fester zeitlicher Beziehung zu dem Ereignis, auftritt. Operational definiert bezeichnet das ereigniskorrelierte Potential (EKP) die Aktivität, welche sichtbar wird, wenn man über eine große Anzahl von Potentialen mittelt, die in Reaktion (oder in Vorbereitung) auf einander gleiche Ereignisse gemessen wurden. Nicht ereigniskorrelierte Aktivität, also Rauschen im weitesten Sinne (Spontanaktivität, evozierter Aktivität, technisches Rauschen durch Messapparatur und Störquellen) strebt bei Mittelung über eine zunehmend große Anzahl von EEG-Epochen dem Erwartungswert Null zu. Ein ausreichendes Signal-Rauschen-Verhältnis wird mit etwa 30 Epochen erzielt. Das EKP bildet nunmehr die Aktivität ab, die regelhaft und in festem zeitlichen Zusammenhang mit dem interessierenden Ereignis erfolgt.

Man unterscheidet im EKP exogene und endogene Komponenten. Die exogenen Komponenten bis etwa 80 ms sind abhängig von physikalischen Reizeigenschaften wie Sinnesmodalität und Intensität, nicht jedoch von kognitiven Verarbeitungsprozessen wie etwa Aufmerksamkeit. Die nachfolgenden endogenen Komponenten hingegen zeigen eine Abhängigkeit von psychologischen Variablen. Sie werden aufgrund ihrer zeitlichen Latenz (in Millisekunden oder als Ordnungszahl) und elektrischen Polarität unterschieden. So wird etwa die erste positive Komponente als P1 bezeichnet, eine Negativierung bei 170 ms als N170. Als weiteres diskriminatives Merkmal kann noch die Lokalisierung auf der Kopfoberfläche hinzutreten, wie etwa bei der FN400, einer Negativierung mit frontalem Maximum.

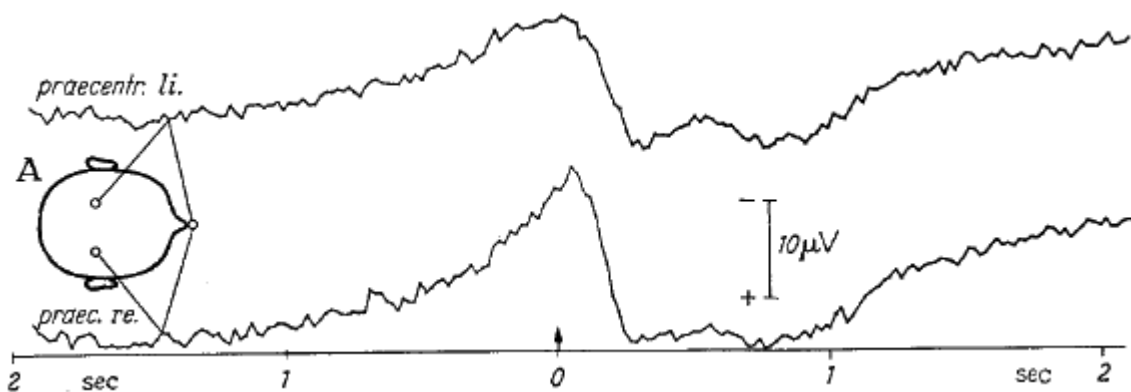


Abbildung 5: Das Bereitschaftspotential (BP) nach Kornhuber und Deecke (1965, Abbildung 1). Zum Zeitpunkt 0 wird eine Bewegung der linken Hand initiiert. Das vorausgehende BP zeigt eine kontralateral größere Amplitude.

5.2 Langsame Potentiale (LP)

EKP Potentiale welche sich später als ca. 500 ms entwickeln und sich über einige hundert Millisekunden bis zu mehreren Sekunden erstrecken, werden als Slow Potentials oder Langsame Potentiale (LP) bezeichnet (Ruchkin, Johnson, Mahaffey, & Sutton, 1988). Die bekanntesten und am besten untersuchten LP sind das Bereitschaftspotential (BP, siehe Abbildung 5, Kornhuber & Deecke, 1965) und die *Contingent Negative Variation* (CNV, Walter, Cooper, Aldridge, McCallum, & Winter, 1964). Funktional betrachtet handelt es sich bei diesen beiden LPs nicht um Reaktionen auf den dargebotenen Stimulus, sondern um präparatorische Potentiale, welche beim BP die Vorbereitung einer Antwort und bei der CNV die Erwartung eines zeitlich kontingenten zweiten Stimulus betreffen. Für die vorliegende Arbeit sind hingegen solche LP interessant, welche nicht rein präparatorisch sind, sondern mit höheren kognitiven Prozessen korrelieren. Langsame Potentiale wurden beispielsweise als elektrophysiologisches Korrelat gefunden für das Halten von Information im Arbeitsgedächtnis (Mecklinger & Pfeifer, 1996; Ruchkin et al., 1992), visuelles *Imagery* (Farah et al., 1989; Uhl et al., 1990), Abruf aus dem Langzeitgedächtnis (Khader, Heil et al., 2005; Rösler et al., 1995), oder Lösen von Rechenaufgaben (Rösler & Heil, 1991; Ruchkin, Johnson, Canoune, & Ritter, 1991). Die Eignung langsamen Potentiale zur Untersuchung kognitiver Prozesse ergibt sich aus mehreren Eigenschaften (vgl. Rösler et al., 1995; Rösler, Heil, & Röder, 1997):

- Sie weisen aufgabenspezifische Unterschiede in ihren Topographien auf.
- Ihre Dauer entspricht der Dauer des entsprechenden kognitiven Prozesses.

- Sie zeigen eine Abhängigkeit der Amplitude von der Aufgabenschwierigkeit oder Gedächtnisbelastung (Load-Effekte).

Insbesondere die letzte Eigenschaft haben viele LP-Studien zum Arbeitsgedächtnis genutzt, um für das AG relevante Prozesse zu identifizieren (z.B. García-Larrea & Cézanne-Bert, 1998; Geffen et al., 1997; McEvoy, Smith & Gevins, 1998; Mecklinger & Pfeifer, 1996; Rämä et al., 1997). Die systematische Variation der Gedächtnisbelastung erlaubt es, mit dieser Belastung kovariierende LP als Korrelate des AG zu identifizieren. Dadurch gewinnt man ein zuverlässigeres Maß für AG-Prozesse als die absolute Aktivität, welche auch auf anderen, als AG-Prozessen beruhen kann. Denn Prozesse wie Antwortvorbereitung (BP) oder Erwartung eines Teststimulus (CNV) sollten nicht mit der Gedächtnisbelastung variieren. Ein Beispiel für Load-Effekte im EKP findet sich in der oben dargestellten Arbeit von Mecklinger und Pfeifer (1996; siehe Abb. 4, S. 32).

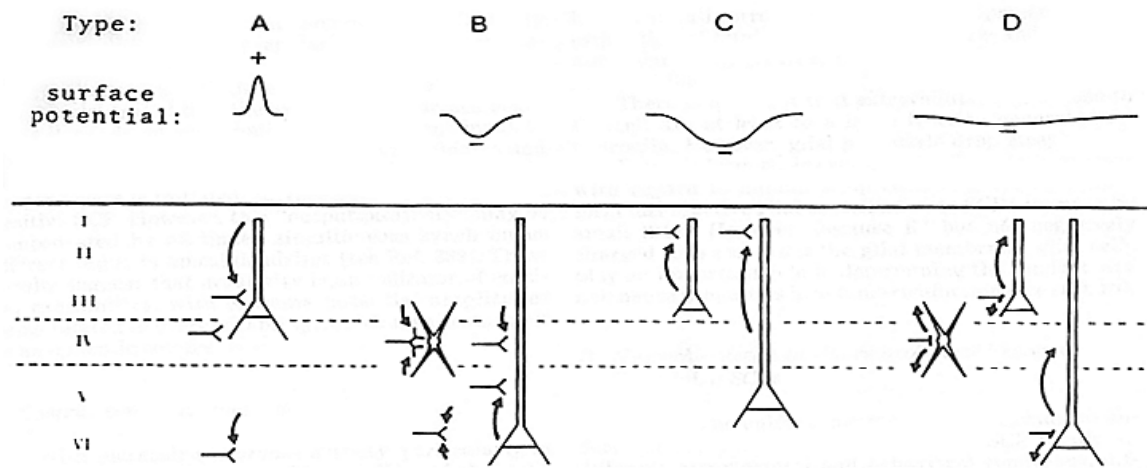


Abbildung 6: Vier Haupttypen der corticalen Aktivierung und ihre entsprechenden Oberflächenpotentiale, nach Mitzdorf (1985).

Entstehung und Interpretation langsamer Potentiale

Nach der Überblicksarbeit von Birbaumer und Kollegen (Birbaumer, Elbert, Canavan, & Rockstroh, 1990; siehe auch Rösler et al., 1997) entstehen negative Potentialverschiebungen im LP durch exzitatorische postsynaptische Potentiale (EPSP) an apikalen Dendriten. Ihre Quelle liegt in tieferen Schichten nahe des Zellkörpers (Soma; Schicht III-VI), ausgelöst wird die Aktivierung von unspezifischen thalamischen Afferenzen. Abbildung 6 zeigt diese Art der Aktivierung unter Typ C. Nur dieser

Aktivierungstyp führt aufgrund der großen Strecke der Reizweiterleitung zu langanhaltenden Negativierungen wie sie in LP beobachtet werden. Die Aktivierung dient der Erhöhung kortikaler Erregbarkeit zur Vorbereitung von Informationsverarbeitung; sie spiegelt also nicht die tatsächlich erfolgende Verarbeitung, sondern eine vorbereitende Potentialität wider. Positive Potentialverschiebungen hingegen entsprechen einem Rückgang oder dem Verbrauch dieser Potentialität. Sie können wahrscheinlich nicht im Sinne von Inhibition interpretiert werden, da die durch inhibitorische postsynaptische Potentiale (IPSP) der tieferen Strukturen ausgelösten Stromflüsse sehr gering sind und somit nicht zur Entstehung eines wirksamen Dipols führen. Letztere Art der Aktivierung ist in Abbildung 6, Typ D dargestellt. Die als Typ A und B bezeichneten Aktivierungen in oberen kortikalen Schichten sind zu kurzlebig, die als Typ B bezeichneten geschlossenen Felder zusätzlich zu schwach, um zu den LP beizutragen.²⁴

Zur Lokalisierung lässt sich sagen, dass langsame Potentiale immer auf kortikale Aktivierung schließen lassen, da die Auswirkung subkortikaler Generatoren vernachlässigbar ist. Damit ist es möglich, von unterschiedlichen Aktivierungsmustern auf unterschiedliche kortikale Module zu schließen (Rösler et al., 1997). Auch befindet sich das an der Kopfoberfläche gemessene Amplitudenmaximum nahe beim kortikalen Generator – auch wenn eine ganz eindeutige Zuordnung nicht möglich ist, da das Dipolfeld auch bei LP nicht immer senkrecht zur Kopfoberfläche projiziert. Die Lokalisierung aufgrund der beobachteten Aktivierung ist aber im Vergleich zu den schnelleren EKP-Komponenten zumindest näherungsweise möglich, wie die parallele Messung von LP und ereigniskorreliertem fMRT zeigt (Khader, Burke, Bien, Ranganath, & Rösler, 2005; Khader, Heil et al., 2005).

²⁴ Eine alternative theoretische Auffassung sieht LP nicht als elektrisch, sondern durch Depolarisierung von Glia-Zellen erzeugt an (Somjen, 1973). Rösler, Heil und Röder (1997) berichten Evidenz gegen einen substantiellen Einfluss von Glia-Zellen und weisen darauf hin, dass sich die beiden Mechanismen auch weder gegenseitig ausschließen, noch funktional unterscheiden würden.

6 Behaviorale Experimente

6.1 Experiment 1

6.1.1 Einleitung

Ausgehend von den oben dargestellten AG-Modellen lassen sich zwei Möglichkeiten denken, in welcher Beziehung auditives und visuelles AG für Objektpositionen zueinander stehen. Erstens könnte räumliche Information von Objekten in getrennten, modalitätsspezifischen Modulen enkodiert und gespeichert werden. Der von Logie (1995) eingeführte Visual Cache wäre dann die Komponente, welche die Positionen gesehener Objekte bewahrt, während entsprechend ein auditiver Cache die Positionen gehörter Geräusche speichert. Die räumlichen Eigenschaften der Wahrnehmung würden in dem Format gespeichert, in dem sie ursprünglich erfasst werden – als retinotopie räumliche Anordnung im Falle von Bildern und als tonotopie Repräsentation von zeitlichen und spektralen Eigenschaften im Fall von Geräuschen.

Zweitens könnte Information über Objektpositionen in einem gemeinsamen AG gespeichert werden. Das könnte über eine supra-modale Repräsentation geschehen, wie im Konzept der Objekt-Files vorgeschlagen. Alternativ könnte der Visual Cache modalitätsübergreifend für Positionsinformation zuständig sein und außer visuellen Objekten und ihren Positionen auch Ortsinformation der anderen Modalitäten speichern, indem die Information in ein visuelles Layout rekodiert wird.

Das erste Experiment soll – ohne schon zwischen den beiden letztgenannten Möglichkeiten zu unterscheiden – die Frage klären, ob das Halten von Objektpositionen im AG für Bilder und Geräusche auf die selben oder auf verschiedene Gedächtnisressourcen zurückgreift. Das Experimentalparadigma nutzt die Kapazitätsbeschränkung von AG-Prozessen (siehe S. 9), also die Tatsache, dass mit zunehmender Gedächtnisbelastung der relative Anteil dessen, was erinnert wird, abnimmt. Geht man von der Hypothese modalitätsspezifischer räumlicher AG-Speicher aus, so sollte jeder Speicher seine eigene Kapazität besitzen, die nur durch Material der jeweiligen Modalität genutzt wird. Wenn jedoch Stimulusmaterial beider Modalitäten im Wechsel präsentiert wird, kann die Gedächtnisbelastung auf beide Systeme verteilt werden, so dass die Gedächtnisleistung für solchen Input aus beiden

Modalitäten höher liegen sollte, als für Input aus nur einer Modalität, welcher nicht verteilt werden kann. Aus diesem Grund wurde im folgenden Experiment die Gedächtnisleistung bei Listen reiner Modalität (entweder n Bildern oder n Geräuschen) mit der Leistung bei Listen gemischter Modalität ($n/2$ Bilder zusammen mit $n/2$ Geräuschen) verglichen. Wenn modalitätsspezifische Gedächtnissysteme zum Gedächtnis für Objektpositionen beitragen, sollten beide Ressourcen für das Halten der gemischten Listen kombiniert werden. Weil jedes der zwei Systeme nur $n/2$ Items halten muss, sollte die Gedächtnisleistung im Falle gemischter Listen höher sein als im Falle reiner Listen, in welchem ein System alleine alle n Items halten muss. Unterschiede sollten sich spätestens dann zeigen, wenn eine der Ressourcen ihre Obergrenze erreicht. Aus diesem Grund wurde zusätzlich die Gesamtbelastung der Gedächtnisaufgabe variiert (durch Präsentation von entweder 4, 6 oder 8 Items). Wenn die im visuellen und auditiven Fall beteiligten Ressourcen tatsächlich unabhängig sind, sollte die Leistung für gemischte Listen etwa so hoch sein wie die für reine Listen der halben Länge.

6.1.2 Methode

Teilnehmer

24 Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen der Universität des Saarlandes nahmen gegen Bezahlung von 8 Euro (für etwa eine Stunde) an dem Experiment teil.

Stimulusmaterial

Die Stimuli bestanden aus 40 Bildern und 40 Tönen alltäglicher Objekte. Die Objektidentität der Bilder und Töne war dabei identisch – jedem Bild entsprach der Ton, der durch das dargestellte Objekt erzeugt wird. Der semantische Inhalt war somit in beiden Modalitäten gleich. Entsprechend wurden nur Objekte verwendet, die Geräusche hervorbringen, also Tiere, Maschinen, Musikinstrumente und Haushaltsgeräte.²⁵ Das visuelle Stimulusmaterial bestand aus farbigen Zeichnungen dieser Objekte (Abbildung 7),

²⁵ Die 40 Objekte waren im Einzelnen: Akkordeon, Amsel, Banjo, Biene, Bratsche, Dudelsack, Ente, Elefant, Eule, Fahrradklingel, Flugzeug, Frosch, Gans, Gitarre, Glocke, Hahn, Harfe, Helikopter, Huhn, Hund, Katze, Kuh, Löwe, Mixer, Möwe, Motorrad, Motorsäge, Pferd, Piano, Polizeisirene, Posaune, Querflöte, Radio, Schaf, Schwein, Staubsauger, Telefon, Uhr, Wecker, Wolf.

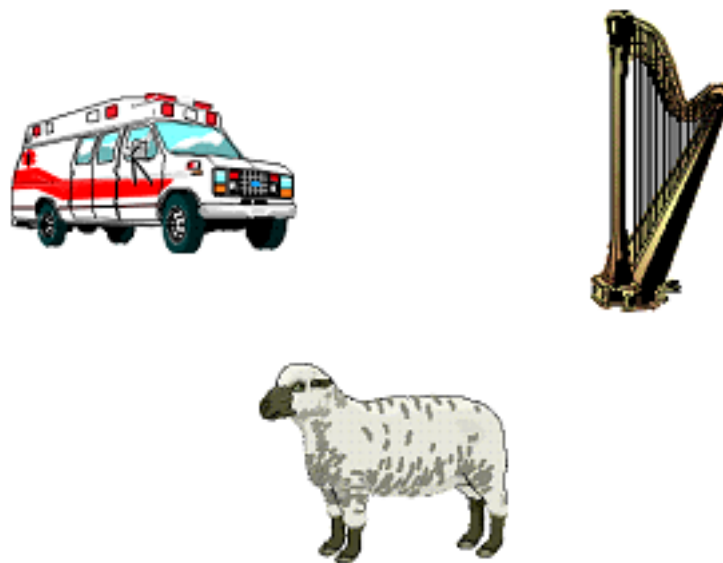


Abbildung 7: Beispiele für visuelles Stimulusmaterial in Experiment 1.

das auditive Stimulusmaterial aus den Geräuschen, welche die Objekte produzieren, mit einer Dauer von je zwei Sekunden.

Die visuellen und auditiven Stimuli wurden an den selben physikalischen Positionen dargeboten. Dazu wurde eine große, etwa 2,50 m breite Leinwand aufgestellt (Azimutwinkel ca. 50°), auf der vier horizontal nebeneinander gelegene Positionen als Lernpositionen definiert wurden. Die Abweichungen von der zentralen Position waren -23° , -8° , 8° , 23° . Eine fünfte Position (0°) direkt vor dem Probanden wurde zur Präsentation der Teststimuli genutzt. Visuelle Items wurden auf die Positionen projiziert, auditive Items wurden durch Lautsprecher abgespielt, die an jeder der Positionen direkt hinter der Leinwand platziert waren.

Design

Aus dem Stimulusmaterial wurden Listen in drei unterschiedlichen Längen gebildet (vier, sechs und acht Items). Diese Manipulation definierte die Variable Setgröße. Diese Gedächtnissets aus vier, sechs oder acht Items wurden als Bilder und Geräusche präsentiert, entweder in Listen reiner oder gemischter Modalität. Die Manipulation der Modalität (rein visuell, rein auditiv und gemischt) definierte die Variable Listenmodalität. In Sets gemischter Modalität wurde die Hälfte der Items als Bilder und die andere Hälfte als Geräusche dargeboten. Die Items wurden konzeptweise aus dem Pool von 40 Objekten

gezogen, das heißt, es wurden jeweils das Geräusch (z.B. das Bellen) und das Bild (z.B. das eines Hundes), welche zum selben Objekt gehören, parallel gezogen, aber nur eines davon präsentiert. Somit wurde niemals ein und das selbe Objekt innerhalb des selben Gedächtnissets in beiden Modalitäten dargeboten. Nachdem alle Objekte gezogen wurden, wurde die Stimulusmenge neu initialisiert. Die Darbietungspositionen wurden aus den vier möglichen Positionen ohne Zurücklegen zufällig gezogen; nach der vierten Position wurde die Menge neu initialisiert. Somit wurden bei Setgrößen größer vier an einigen Positionen zwei Objekte dargeboten. Die Probanden bearbeiteten je acht Listen jeder Setgröße und -modalität, was insgesamt 72 Listen ergab.

Für den Test wurden von jeder Liste zwei Items ausgewählt. Das erste Testitem stammte immer aus der ersten, das zweite Item aus der zweiten Listenhälfte. Items von allen Lernpositionen wurden mit gleicher Häufigkeit getestet. Für die gemischten Gedächtnissets konnten die beiden Items derselben oder verschiedenen Modalitäten angehören.

Die Variablen Setgröße und Listenmodalität variierten innerhalb der Versuchspersonen. Die Setgröße wurde blockweise konstant gehalten, während die Modalität innerhalb der Blöcke zufällig variierte.

Experimentalablauf

Den Probanden wurden unterschiedlich lange Lernlisten sequentiell präsentiert und nach einem kurzen Intervall wurden ihnen zwei pseudo-zufällig gewählte Items der Lernliste erneut präsentiert. Die Teststimuli wurden nacheinander an einer zentralen Position dargeboten, die in der Lernphase nicht verwendet wurde. Die Probanden waren angewiesen, sich die Positionen der Geräusche und Bilder zu merken und später, während des Tests, die Teststimuli den Positionen zuzuordnen, welche sie in der Lernphase belegt hatten. Um die Positionen anzugeben benutzten die Versuchspersonen eine Antworttastatur mit vier Tasten, welche die gleiche lineare Anordnung hatten wie die vier Lernpositionen.

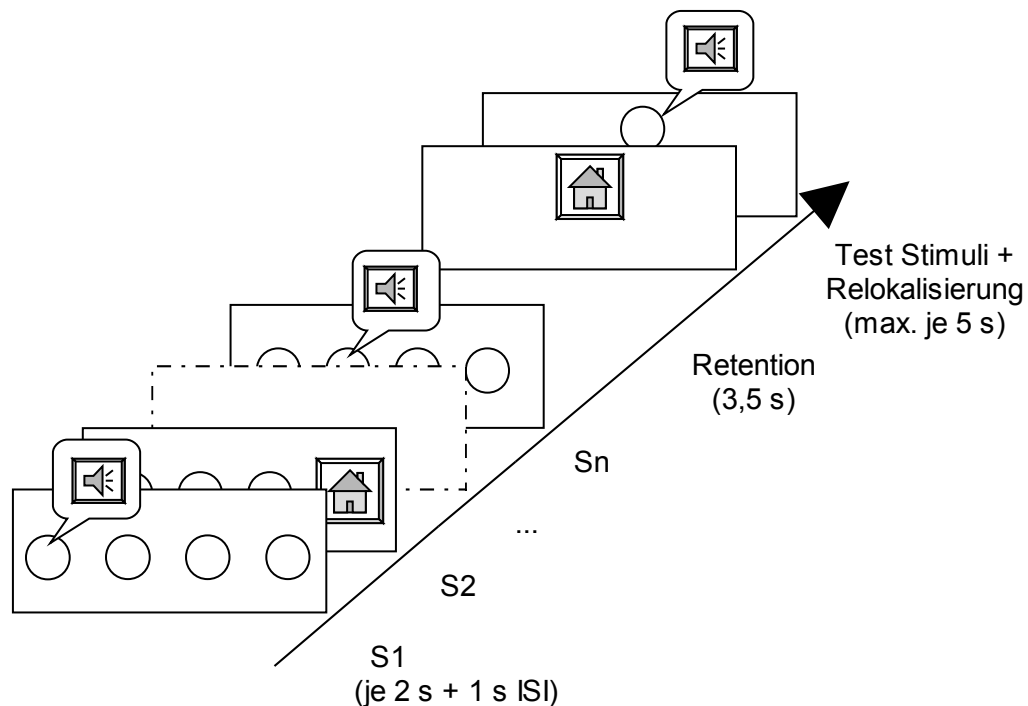


Abbildung 8: Schema des Experimentalablaufs. Kreise markieren die möglichen Positionen und waren im Experiment selbst nicht sichtbar.

Die Probanden saßen 2,50 m von der Leinwand entfernt. Die Lernitems wurden nacheinander für jeweils zwei Sekunden dargeboten, mit einem Interstimulus-Intervall (ISI) von einer Sekunde (siehe Abbildung 8). Dadurch ergab sich eine Länge der Lernphase von 11, 17 oder 23 Sekunden (für Setgröße vier, sechs oder acht). Nach einem Behaltensintervall von 3,5 s wurde der erste Teststimulus für maximal 2 s dargeboten. Die Probanden gaben seine ursprüngliche Position durch einen Tastendruck an, der auch die Darbietung beendete. Wenn bis dahin keine Antwort abgegeben wurde, waren nach Ende der Darbietung noch maximal 3 s Zeit, zu antworten. Eine Sekunde nach Tastendruck folgte der zweite Teststimulus. 2,5 s nach der zweiten Antwort startete der nächste Trial. Um zu verhindern, dass die Versuchspersonen Lern- und Testphase verwechseln, wurden 500 ms vor Präsentation jedes Testitems die Worte "Bitte zuordnen" am oberen Rand der Leinwand dargeboten, sowie 2 s bevor ein neuer Trial startete die Worte "Neue Lernphase."

Die Setgröße wurde blockweise variiert. Der erste Block enthielt Listen der Länge vier, der zweite Listen der Länge sechs und der letzte Block Listen der Länge acht. Die Blöcke wurden in aufsteigender Reihenfolge präsentiert um den Teilnehmern zu erlauben, sich an die Aufgabe zu gewöhnen, bevor sich die Schwierigkeit erhöhte. Dadurch sollte verhindert werden, dass sich Effekte der Setgröße und Lerneffekte überlagern. Bevor ein neuer Block begann, wurden die Probanden über die neue Setgröße informiert und hatten die Möglichkeit, eine Pause zu machen. Die Modalität variierte immer zufällig innerhalb der Blocks, so dass die Probanden keine Möglichkeit hatten, die Modalität der kommenden Items im Voraus zu wissen.

6.1.3 Ergebnisse

Die Daten wurden auf Basis einzelner Testitems analysiert, so dass die Items gemischter Listen nach Modalität unterschieden werden konnten. Damit ergaben sich die zwei Variablen Listentyp (rein vs. gemischt) und Itemmodalität (auditiv vs. visuell).

Eine $3 \times 2 \times 2$ ANOVA mit den Variablen Setgröße, Listentyp und Itemmodalität wurde mit der relativen Häufigkeit korrekt repositionierter Items (Hits) gerechnet. Die mittleren Hits als Funktion der drei Variablen sind in Abbildung 9 dargestellt.

Für alle Variablen mit mehr als zwei Stufen wurden die Freiheitsgrade für Nicht-Sphärität korrigiert (Greenhouse & Geisser, 1959). In diesen Fällen werden die ursprünglichen Freiheitsgrade, korrigierten p -Werte und der Korrekturkoeffizient ϵ berichtet.

Die Analyse ergab signifikante Haupteffekte für alle drei Variablen. Die Hits nahmen mit zunehmender Setgröße ab [$F(2,46) = 82.43$, $MSE = .0142$, $p < .0001$, $\epsilon = .94$]. Die Leistung war am höchsten mit Sets von vier Items (.83), nahm mit sechs Items ab (.68) und war am niedrigsten mit acht Items (.61). Dieser Haupteffekt folgte einem linearen Trend [$F(1,23) = 147.0$, $MSE = .0153$, $p < .0001$] ohne signifikantes Residuum. Zusätzlich ergab sich ein Effekt des Listentyps, der einen Vorteil gemischter (.73) über reine Listen (.69) ergab [$F(1,23) = 15.28$, $MSE = .0086$, $p < .001$]. Die Leistung war für auditive Items (.62) niedriger als für visuelle Items (.80) [$F(1,23) = 94.76$, $MSE = .0233$, $p < .0001$]. Die drei Variablen interagierten nicht signifikant.

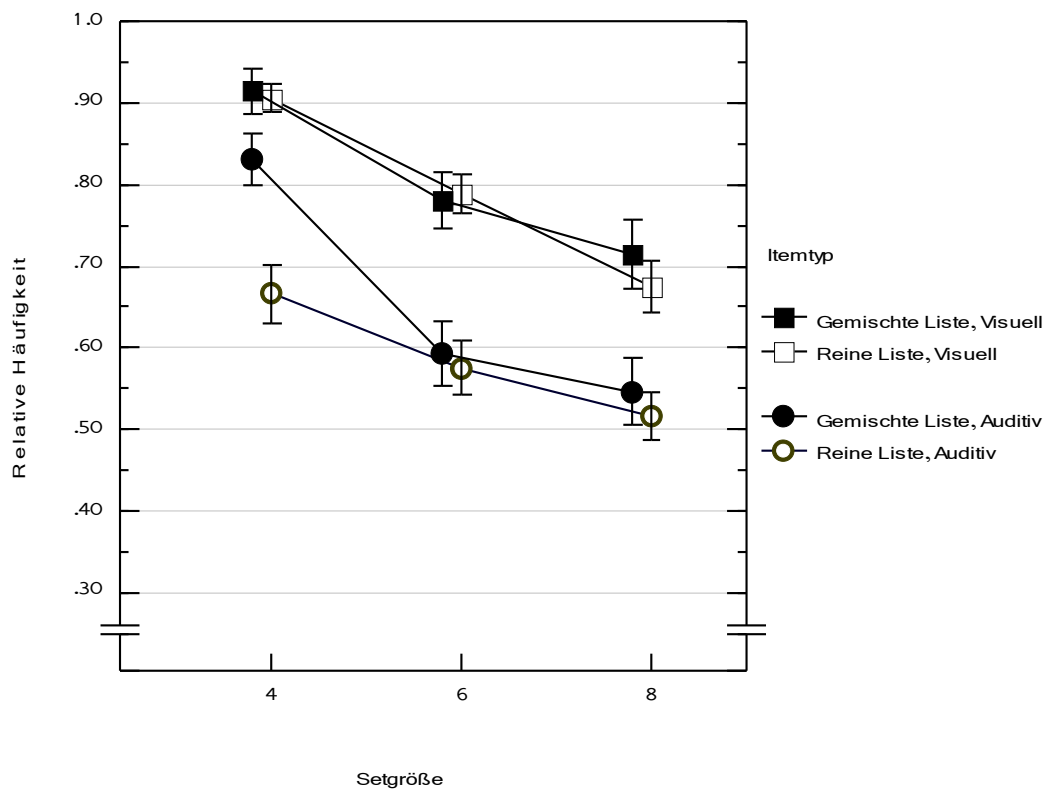


Abbildung 9: Relative Häufigkeit der Hits nach Itemtyp und Setgröße. Mittelwerte und Standardfehler.

Wie man Abbildung 9 entnehmen kann, war die Leistung in gemischten und reinen Listen sehr ähnlich, mit Ausnahme der auditiven Items bei Setgröße vier. Um zu testen, ob der Haupteffekt für die Variable Listentyp auf diese Differenz zurückgeht, wurde ein paarweiser post hoc Vergleich (Fischers LSD Test) der Items aus gemischten versus reinen Listen für jede Setgröße und Modalität durchgeführt. Einzig in der Bedingung mit vier auditiven Items unterschied sich die Leistung für gemischte und reine Listen [$p < .0001$]. Für alle anderen Kombinationen aus Setgröße und Modalität unterschieden sich die Leistungen nicht nach Listentyp.

6.1.4 Diskussion

Die Ergebnisse des Experiments zeigten zwei eindeutige Haupteffekte: Das Positionsgedächtnis nahm mit der Setgröße ab und es war besser für Bilder als für Geräusche; aber es zeigte sich (mit Ausnahme einer Bedingung) kein Vorteil für Listen gemischter Modalität. Das Ergebnis, dass das Positionsgedächtnis für Geräusche schlechter ist als für Bilder wurde bereits in anderen Studien beobachtet (z.B. Zimmer & de Vega, 1996). Der Grund liegt wahrscheinlich in der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der

beiden Systeme, beziehungsweise der Leichtigkeit, mit der die räumliche Information dem perzeptuellen Input entnommen werden kann. Visueller Input führt womöglich zu akkurateren räumlichen Repräsentationen als auditiver Input. Ergebnisse der Forschung zu visuellem Imagery stützen diese Interpretation (für einen Überblick siehe Paivio, 1986). Die Qualität des Inputs unterscheidet sich also schon in der Wahrnehmung.

Im vorliegenden Experiment waren die Leistungsunterschiede zwischen auditiven und visuellen Stimuli sehr wahrscheinlich durch Wahrnehmungsprozesse bedingt, da sie nicht nur in der Gedächtnisaufgabe auftraten, sondern auch in einer einfachen Lokalisierungsaufgabe, welche unter gleichen Bedingungen durchgeführt wurde. Die Versuchspersonen wurden dabei aufgefordert, die Positionen visueller und auditiver Stimuli unmittelbar, noch während ihrer Präsentation anzugeben. Auch in dieser perzeptuellen Diskriminationsaufgabe ohne Gedächtnisanteile zeigten sich Leistungsunterschiede. Die visuellen Stimuli konnten besser lokalisiert werden (Hits .97; Standardabweichung SD .01) als die in der selben räumlichen Anordnung präsentierten auditiven Stimuli (.82; SD .03) [$t(16) = 7.58, p < .0001$]. Man kann also davon ausgehen, dass auch in der Gedächtnisaufgabe die Positionen auditiver Items öfter als die visueller Items falsch wahrgenommen wurden und dann im Test die bereits falsch enkodierten Positionen "korrekt" erinnert wurden. Es handelt sich somit (überwiegend oder zur Gänze) um einen Unterschied im perzeptuellen Unterscheidungsvermögen und nicht in der Gedächtnisleistung.

Die Manipulation der Gedächtnisbelastung zeigte den erwarteten Effekt einer mit zunehmender Setgröße sinkenden Gedächtnisleistung pro Item. Dieser Setgrößen-Effekt war in beiden Modalitäten gleich groß, was darauf hindeutet, dass die Positionsinformation beider Modalitäten in gleicher Weise repräsentiert ist. Würde die Leistung mit zunehmender Setgröße unterschiedlich stark abfallen, würde dies auf unterschiedliche Kapazitätsgrenzen und somit unterschiedliche Verarbeitungssysteme hindeuten. Der gleich große Setgrößen-Effekt deutet hingegen auf eine Gemeinsamkeit in der Verarbeitung und ist damit ein Indiz für eine gemeinsame Repräsentation. Hinzu kommt die Tatsache, dass die Leistung nicht von der gemischten Präsentation profitiert hat. Die Positionen von drei Geräuschen im Kontext von drei Bildern (insgesamt sechs Stimuli) wurden nicht besser erinnert als die Positionen von sechs Geräuschen in einer reinen Liste, während die Leistung schlechter war, als sie für drei Geräusche alleine gewesen wäre (wie man an den

Vierer-Listen abschätzen kann). Das selbe gilt für Bilder. Nach der Logik begrenzter Ressourcen kann dies als Unterstützung für die Annahme eines gemeinsamen Systems gewertet werden, welches zum Arbeitsgedächtnis für Positionen von Bildern und Geräuschen beiträgt. Wenn zwei getrennte Mechanismen für visuelles und auditives Material zur Verfügung stehen würden, die über ihre eigenen Ressourcen verfügen, wären die Stimuli der gemischten Listen ihrer Modalität entsprechend verteilt worden. Die Gedächtnisleistung gemischter Listen sollte dann für jede Modalität der Leistung bei reinen Listen mit gleicher Anzahl Stimuli dieser Modalität (also halber Gesamtlänge) entsprechen. Die vier auditiven Stimuli der gemischten 8er-Listen zum Beispiel sollten gleich gut erinnert werden wie die vier auditiven Stimuli einer rein auditiven 4er-Liste, da in beiden Fällen das auditiv-räumliche System mit vier Stimuli belastet würde. Dieser Effekt zeigt sich nicht, woraus geschlossen werden kann, dass das Positionsgedächtnis für Geräusche und Bilder auf dem gleichen Prozess beruht.

Eine Ausnahme war die Listenlänge von vier Stimuli. Geräuschpositionen einer gemischten 4er-Liste wurden besser erinnert als die einer reinen 4er-Liste. Bei Bildern wurde dieses Ergebnis nicht beobachtet, was möglicherweise einem Deckeneffekt zugeschrieben werden kann: Die Leistung bei Bildern war bereits so gut, dass wenig Spielraum für eine Verbesserung blieb. Man könnte spekulieren, dass dieses Ergebnis auf eine geringere Kapazität des räumlichen AG für Geräusche als für Bilder hinweist. Für letztere wurden vier Stimuli als Obergrenze vorgeschlagen (Luck & Vogel, 1997). Geräusche gemischter 4er-Listen könnten einen Vorteil gegenüber reinen Listen gehabt haben, da zwei Stimuli noch unterhalb der Kapazität, vier Stimuli hingegen darüber liegen. Das Positionsgedächtnis der längeren Listen könnte dann auf Langzeitgedächtnisprozessen beruhen und deshalb keinen Vorteil gemischter Listen zeigen. Bei genauem Hinsehen scheint diese Interpretation allerdings unwahrscheinlich. Erstens sollte auch bei den 6er-Listen ein Vorteil gemischter Listen beobachtbar sein, da in diesem Fall nur drei Töne präsentiert werden, von denen mindestens zwei – wie bei den 4er-Listen – im AG gehalten werden können. Zweitens sollte der gleiche Effekt auch bei visuellen Stimuli beobachtbar sein, wenn die Listenlänge mit sechs oder spätestens acht Stimuli die Gedächtniskapazität übersteigt. Es gibt allerdings eine plausiblere Erklärung: Die Verringerung räumlicher Unbestimmtheit oder, anders ausgedrückt, der Ratewahrscheinlichkeit. In den 4er-Listen wurde jede Position genau einmal benutzt, was bei längeren Listen nicht der Fall war. Die

Positionen der beiden visuellen Stimuli wurden fast perfekt erinnert. Somit konnten die Positionen der Bilder in gemischten 4er-Listen als mögliche Positionen der Geräusche ausgeschlossen werden, womit nur zwei Positionen für die Zuordnung der Töne übrig blieben. Dieser Vorteil trat bei längeren Listen nicht mehr auf, da in diesem Fall mehr als ein Stimulus an einer bestimmten Position präsentiert werden konnte. In Experiment 3 wurde dieser Einfluß der Ratewahrscheinlichkeit auf die Gedächtnisleistung explizit getestet.

6.2 Experiment 2

6.2.1 Einleitung

Die Daten aus Experiment 1 legen nahe, dass das kurzfristige Positionsgedächtnis für auditives und visuelles Material nicht auf modalitätsspezifischen Komponenten beruht, sondern auf einem gemeinsamen modalitätsübergreifenden Prozess. Obwohl diese Schlussfolgerung zu den Daten passt, sind jedoch auch alternative Erklärungen denkbar. Im ersten Experiment wurden Bilder und Geräusche der selben semantischen Kategorien verwendet, zum Beispiel das Bild und das Bellen eines Hundes. Dies diente dazu, alle Einflüsse des semantischen Gedächtnis auf das Erinnern konstant zu halten. Man könnte allerdings einwenden, dass die Versuchspersonen unter diesen Umständen die einfache Benennbarkeit nutzen, um sich die Namen der Objekte und deren Orte zu merken, anstatt modalitätsspezifische Information zu nutzen. Innerhalb des AG-Modells kommt dem supra-modalen Episodic Buffer die Aufgabe zu, Identität (verbale Bezeichnungen) und Ortsinformation zu binden. Sollten die Versuchspersonen eine verbale Enkodierung genutzt haben, wurden modalitätsspezifische Systeme möglicherweise umgangen. Um dies zu testen, wurde ein zweites Experiment mit Stimulusmaterial durchgeführt, welches keine einfachen Benennungen erlaubt.

Um die Möglichkeit verbaler Rekodierungsoperationen zu minimieren wurden in Experiment 2 nicht bedeutungshaltige Bilder und Geräusche präsentiert. Die Bilder waren Anordnungen zufälliger Formen und die Geräusche waren nicht identifizierbare künstliche Klangereignisse. Wenn kurzfristiges Behalten räumlicher Positionen tatsächlich modalitätsübergreifend geschieht, sollte das Ergebnismuster von Experiment 2 dem von Experiment 1 ähnlich sein. Wenn das Muster in Experiment 1 allerdings auf verbalen Rekodierstrategien beruhte, sollte sich das Muster ändern, da das neue Stimulusmaterial

verbale Strategien erschwert. Dann sollten sich in diesem Experiment diejenigen Unterschiede zeigen, welche in Experiment 1 von den verbalen Prozessen verdeckt wurden.

6.2.2 Methode

Teilnehmer

24 Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen der Universität des Saarlandes nahmen gegen Bezahlung von 8 Euro (für etwa eine Stunde) an dem Experiment teil.

Stimulusmaterial

Die in Experiment 2 benutzten Stimuli bestanden aus 40 Bildern und 40 Geräuschen, die keine identifizierbaren Objekte darstellten. Das visuelle Material bestand aus 40 mehrfarbigen, abstrakten Figuren, die aus jeweils mehreren geometrischen Formen zusammengesetzt waren (siehe Abbildung 10). Die Geräusche waren Kombinationen mehrere kurzer maschinenartiger Klänge (wie Quietschen, Klappern, Blubbern, Rasseln – aus einem Pool von insgesamt 50 Klängen in unterschiedlichem zeitlichen Muster zusammengesetzt), die für 2 Sekunden abgespielt wurden.

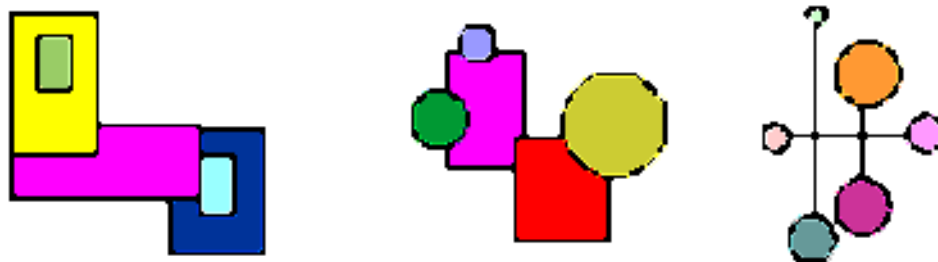


Abbildung 10: Beispiele für visuelle Stimuli in Experiment 2.

Design und Experimentalablauf

Design und Experimentalablauf waren die selben wie in Experiment 1 (siehe Abbildung 8, S. 54). Die Variablen Gedächtnisset (vier, sechs und acht Items) und Listenmodalität (rein visuell, rein auditiv und gemischt) wurden innerhalb Versuchspersonen variiert.

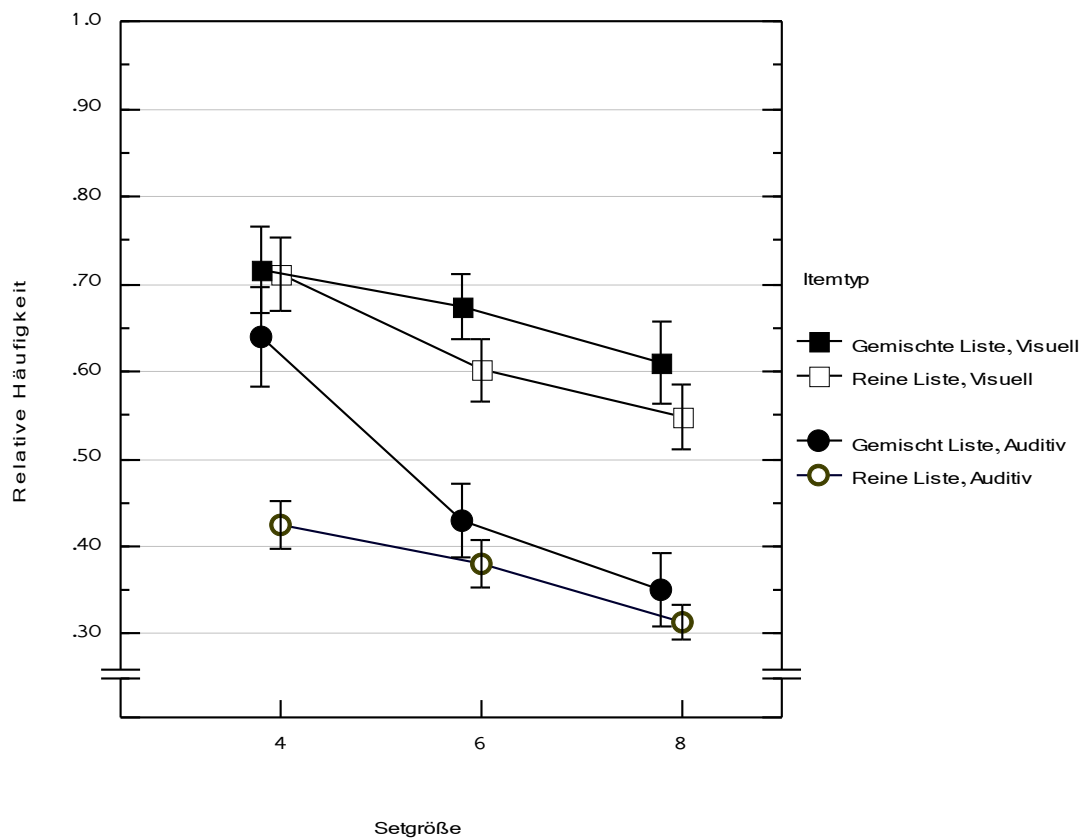


Abbildung 11: Relative Häufigkeit der Hits in Experiment 2 nach Itemtyp und Setgröße (Mittelwerte und Standardfehler).

6.2.3 Ergebnisse

Die Daten wurden in einer $3 \times 2 \times 2$ ANOVA analysiert, mit den Variablen Setgröße (vier, sechs und acht), Listentyp (rein und gemischt) und Itemmodalität (auditiv und visuell). Die relative Häufigkeit richtiger Positionszuordnungen (Hits) als Funktion der drei Variablen ist in Abbildung 11 dargestellt.

Für alle drei Variablen und die Dreifach-Interaktion ergaben sich signifikante Effekte. Mit zunehmender Setgröße nahm die Häufigkeit der Hits von vier (.62) über sechs (.52) bis acht (.46) Items ab [$F(2,46) = 22.25$, $MSE = .0307$, $p < .0001$, $\epsilon = .84$]. Es zeigte sich ein klarer linearer Trend [$F(1,23) = 30.66$, $MSE = .0439$, $p < .0001$] ohne Residuum. Items aus reinen (.50) und gemischten (.57) Listen unterschieden sich signifikant [$F(1,23) = 16.93$, $MSE = .0228$, $p < .0005$]. Die Leistung war für Bilder (.64) höher als für Klänge (.42) [$F(1,23) = 89.97$, $MSE = .0388$, $p < .0001$].

Zusätzlich war die Dreifach-Interaktion signifikant [$F(2,46) = 4.42$, $MSE = .0247$, $p < .05$, $\epsilon = 1.0$]. Diese wurde mit einem paarweisen post hoc Vergleich (Fischers LSD Test) der

gemischten versus reinen Listen für jede Kombination von Setgröße und Itemmodalität genauer analysiert. Nur im Falle der vier auditiven Items unterschieden sich die beiden Listentypen signifikant [$p < .0001$].

Vergleich der Experimente 1 und 2

In einer gemeinsamen Analyse der beiden Experimente mit Stimulusmaterial als Zwischen-Experiment-Variable, zeigte sich eine bessere Leistung bei Experiment 1 (.71) im Vergleich zu Experiment 2 (.53) [$F(1,46) = 29.57$, $MSE = .1503$, $p < .0001$]. Jedoch war die Variable Stimulusmaterial an keiner signifikanten Interaktion beteiligt.

6.2.4 Diskussion

In Experiment 2 führte das ungewohnte Stimulusmaterial zu einer insgesamt niedrigeren Leistung, aber änderte nicht das generelle Muster der Ergebnisse. Somit wird die Annahme nicht gestützt, dass dieses Muster in Experiment 1 von einer verbalen Strategie herrührte, welche durch die Vertrautheit und leichte Benennbarkeit des Stimulusmaterials gefördert wurde. Wenn verbale Strategien für das in beiden Experimenten beobachtbare Muster verantwortlich wären, hätte die Manipulation der Gedächtnisbelastung zu einem stärkeren Abfall in Experiment 2 führen sollen, weil Benennungsschwierigkeiten mit der zunehmenden Anzahl der Stimuli an Einfluss gewinnen sollten. Wenn die Benennung wesentlich ist, sollte sich die Schwierigkeit nicht konstant auf Gedächtnissets jeder Größe gleich auswirken, sondern jeden einzelnen zu benennenden Stimulus beeinflussen und somit zu einem multiplikativen Effekt von Load und Stimulusmaterial (bzw. seiner Benennbarkeit) führen.²⁶ Wenn die Probanden die Stimuli beispielsweise durch verbales Rehearsal im AG halten, sollte schwierigere Benennbarkeit dazu führen, dass weniger Stimuli gehalten werden können und der Leistungsabfall mit zunehmender Setgröße stärker ist, als bei leichter Benennbarkeit. Der Vergleich der beiden Experimente hat gezeigt, dass es keine signifikanten Interaktionen gibt, dass dies also nicht der Fall ist.

Während verbales Rehearsal in diesem Fall keine große Rolle gespielt hat, ist es aber doch wahrscheinlich, dass konzeptuelle Information eine entscheidende Rolle bei der Unterscheidung der einzelnen Stimuli gespielt hat, was die bessere Leistung in Experiment 1 erklärt. Die Stimuli in Experiment 2 konnten keine ausreichend unterschiedenen

²⁶ Eine solche multiplikative Interaktion findet sich beispielsweise in Experiment 5 zwischen Load und Aufgabe (siehe S. 88).

Langzeitgedächtniseinträge aktivieren und wurden somit öfter verwechselt und darum falschen Positionen zugeordnet. Demnach spiegelt der Leistungsunterschied zwischen den beiden Experimenten keinen Unterschied im Positionsgedächtnis per se wider, sondern einen Unterschied in der Diskriminierbarkeit der Stimuli innerhalb der Listen – was eine notwendige Voraussetzung für das Erinnern der jeweiligen Positionen ist.²⁷ Der geringe Vorteil gemischter Listen in Experiment 2 mag in ähnlicher Weise daher rühren, dass die Stimulusmodalität mangels sonstiger konzeptueller Information als Kriterium diente, Listenitems von einander zu unterscheiden. Die Teilnehmer mögen erinnert haben, ob ein auditiver oder ein visueller Stimulus an einer bestimmten Position dargeboten wurde, ohne jedoch den tatsächlichen Inhalt der Position zu erinnern.

Die Ergebnisse von Experiment 2 bestätigen außerdem, dass das Ergebnismuster von Experiment 1 bei niedrigerer Gesamtleistung bestehen bleibt. Wieder gab es einen Vorteil für auditive Stimuli von gemischten im Vergleich zu reinen 4er-Listen. Dies ist das selbe Ergebnis wie in Experiment 1. Allerdings war im ersten Experiment die Leistung bei visuellem Material so hoch, dass die Tatsache, dass der Effekt bei visuellen Stimuli nicht auftrat, durch Deckeneffekte hätte erklärt werden können. Experiment 2 zeigte bei niedriger Leistung auch in den visuellen Bedingungen, dass der Vorteil tatsächlich nur bei auditivem Material auftritt. Das nachfolgende Experiment 3 wurde entworfen um zu testen, ob die oben gegebene Erklärung dieses Effektes zutrifft.

6.3 Experiment 3

6.3.1 Einleitung

In Experiment 1 und 2 fand sich ein Unterschied zwischen reinen und gemischten Listen ausschließlich bei auditiven Items aus 4er-Listen. Die Einzelvergleiche zeigten, dass diese Differenz für die Haupteffekte und Interaktionen der Variablen Listentyp verantwortlich ist. Die in der Diskussion zu Experiment 1 aufgestellte Hypothese besagt, dass das

²⁷ Die Daten eines einfachen episodischen Rekognitionsexperiments mit dem selben auditiven

Stimulusmaterial stützen diese Interpretation. Die vertrauten Geräusche aus Experiment 1 (Hits .88) wurden besser wiedererkannt als das bedeutungslose Material aus Experiment 2 (.54) [$F(1,7) = 44.50$, $MSE = .0099$, $p < .0005$]. Trotz der unterschiedlichen Experimentalparadigmen legt dieses Ergebnis nahe, dass auch in der räumlichen Aufgabe die Leistung hauptsächlich unter dem schlechteren Erinnern der sinnlosen Objekte litt und nicht unter schlechterer Objekt-Positions-Zuordnung.

Positionsgedächtnis für auditive Stimuli gemischter 4er-Listen von der sehr guten Leistung der visuellen Listennachbarn profitierte. Wenn die Positionen der visuellen Stimuli fast perfekt erinnert wurden, blieben nur zwei Positionen für die auditiven Stimuli übrig. Somit war die räumliche Unbestimmtheit der auditiven Stimuli in gemischten Listen gegenüber reinen Listen wesentlich reduziert, was zu einer besseren Relokalisierung führte. Angenommen, dass dies korrekt ist, sollte der Vorteil gemischter 4er-Listen verschwinden, wenn die räumliche Unbestimmtheit in gemischten und reinen Listen gleich ist. Um dies zu testen wurde für 4er-Listen die räumliche Unbestimmtheit über die Anzahl möglicher Lern- und Testpositionen variiert.

In der *Konstanz*-Bedingung wurden die Stimuli so präsentiert, dass die räumliche Unbestimmtheit nicht von der Listenstruktur abhing. Es wurden nur zwei Lernpositionen verwendet, während weiterhin alle vier Testpositionen zur Verfügung standen. In diesem Falle wurden die Positionen in der 4er-Liste immer doppelt besetzt, so dass die räumliche Unbestimmtheit bei gemischten und reinen Listen gleich war. Sich zu erinnern, wo ein visueller Stimulus präsentiert worden war, half jetzt nicht mehr bei der Lokalisierung eines auditiven Stimuli. Damit sollte der Vorteil gemischter Listen verloren gehen falls räumliche Unbestimmtheit – und nicht modalitätsspezifische Ressourcen – für den Effekt verantwortlich waren.

In der *Standard*-Bedingung wurde die selbe Lern- und Testsituation wie zuvor hergestellt, so dass sich die räumliche Unbestimmtheit nach Listentyp unterschied. Hier sollte sich wie in den vorhergehenden Experimenten ein Vorteil gemischter gegenüber reinen Listen zeigen.

Die *Reduktions*-Bedingung diente dazu, die Möglichkeit einer Reduktion der räumlichen Unbestimmtheit auch in den Listen reiner Modalität zu zeigen. Zu diesem Zweck wurden vier Lernpositionen genutzt, aber zwei der falschen Antwortmöglichkeiten für jedes Testitem durchgestrichen, was analog dem Ausschluss möglicher Testpositionen durch die visuellen Begleitstimuli in der Standard-Bedingung wirken sollte. Folglich sollte auch bei reinen Listen ein Gedächtnisvorteil auftreten, wie er sich bisher nur bei den auditiven Stimuli gemischter 4er-Listen zeigte.

6.3.2 Methode

Teilnehmer

17 Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen der Universität des Saarlandes nahmen gegen Bezahlung von 8 Euro (für etwa eine Stunde) an dem Experiment teil.

Stimulusmaterial

In Experiment 3 wurden die selben identifizierbaren Bilder und Geräusche wie in Experiment 1 benutzt (siehe S. 51).

Design und Experimentalablauf

Es wurden nur Sets aus vier Items präsentiert. Die räumliche Unbestimmtheit wurde durch Variation der Anzahl von Lern- und Testpositionen manipuliert. Jede der drei Bedingungen wurde in einem Drittel der Durchgänge dargeboten. In der Bedingung mit konstanter Unbestimmtheit wurden in der Lernphase zwei Positionen je doppelt benutzt. Alle vier Positionen waren als Testpositionen verfügbar. In der Standard-Bedingung wurden die vier Items an vier verschiedenen Lernpositionen präsentiert. Jede Position wurde einmal benutzt und alle vier waren als Testpositionen verfügbar. In der Bedingung mit reduzierter Unbestimmtheit wurden in der Lernphase auch alle vier Positionen benutzt, aber im Test wurden zwei der Positionen mit einem roten X markiert, das angab, dass die jeweilige Position für das dargebotene Item nicht relevant ist. Das X wurde von 500 ms vor Stimulus-Onset bis zum Stimulus-Offset dargeboten. Bis auf diese Variationen war der Experimentalablauf identisch mit dem von Experiment 1 (siehe Abbildung 8, S. 54).

Somit gab es zwei Variablen, die zufällig innerhalb Versuchspersonen variiert wurden: Räumliche Unbestimmtheit (konstant, standard, reduziert) und Listenmodalität (rein visuell, rein auditiv und gemischt). Um die gleiche Anzahl von Items je Modalität in den reinen und gemischten Listen zu erhalten, wurde die Anzahl der Trials gemischter Modalität auf 16 verdoppelt, so dass sie der Summe von rein visuellen und rein auditiven Trials entsprach (je 8 pro Bedingung). Insgesamt bearbeiteten die Probanden 96 Trials.

6.3.3 Ergebnisse

Die mittlere Häufigkeit der Hits findet sich in Tabelle 1. Eine $3 \times 2 \times 2$ ANOVA mit den Variablen Räumliche Unbestimmtheit (konstant, standard, reduziert), Listentyp (rein und

gemischt) und Itemmodalität (auditiv und visuell) ergab signifikante Haupteffekte für Räumliche Unbestimmtheit [$F(2,32) = 4.40$, $MSE = .0147$, $p < .05$, $\varepsilon = .96$] und Itemmodalität [$F(1,16) = 32.65$, $MSE = .0329$, $p < .0001$], sowie eine signifikante Interaktion zwischen beiden Variablen [$F(2,32) = 5.62$, $MSE = .0075$, $p < .05$, $\varepsilon = .70$]. Die Variable Listentyp zeigte keinen signifikanten Haupteffekt oder Interaktionen.

	Räumliche Unbestimmtheit					
	Konstant		Standard		Reduziert	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
Auditiv						
Rein	.74	.03	.72	.04	.79	.04
Gemischt	.72	.04	.80	.04	.88	.03
Visuell						
Rein	.93	.02	.89	.03	.93	.02
Gemischt	.92	.03	.92	.02	.93	.02

Tabelle 1: Relative Häufigkeit von Hits nach Itemtyp und räumlicher Unbestimmtheit. Mittelwerte und Standardfehler.

Ein post hoc Vergleich (Fischers LSD Test) wurde durchgeführt um die Items der gemischten und reinen Listen für jede Modalität und Unbestimmtheits-Bedingung zu vergleichen. Der Test bestätigte, dass sich die visuellen Items der unterschiedlichen Bedingungen nicht voneinander unterschieden [alle $p > .50$]. Außerdem gab es in der konstanten Unbestimmtheits-Bedingung keinen Vorteil auditiver Items gemischter Listen über solche reiner Listen [.74 vs. .72, $p > .70$]. Allerdings zeigten sich für auditive Items marginal signifikante Unterschiede zwischen reinen und gemischten Listen in den beiden Bedingungen, in denen das Erinnern der visuellen Positionen zur Reduzierung der räumlichen Unbestimmtheit genutzt werden kann – der Standard-Bedingung [.72 vs. .80, $p < .06$] und der reduzierten Unbestimmtheits-Bedingung [.79 vs. .88, $p < .06$].

6.3.4 Diskussion

Das wichtigste Ergebnis ist, dass die Leistung bei der Relokalisierung bei konstanter Unbestimmtheit für beide auditive Bedingungen (d.h. auditive Stimuli aus beiden Listentypen) gleich war (.74 bzw. .72) und auf dem Leistungsniveau von reinen Listen in

der Standard-Bedingung lag (.72). Dies stützt die Hypothese, dass auditive Stimuli gemischter Listen nicht besser erinnert wurden, sondern von einer Reduktion der Unbestimmtheit im Test profitierten. Da in der Standard-Bedingung bei vier Stimuli jede Position genau einmal benutzt wurde, blieben nur zwei Positionen für die auditiven Stimuli übrig wenn die beiden visuellen erinnert wurden. Dies erleichterte das Erraten der richtigen Positionen auf Grundlage von Teilwissen. In der Bedingung mit reduzierter Unbestimmtheit wurde dieser Effekt dadurch simuliert, dass die Anzahl der Testpositionen reduziert wurde. Das Ausstreichen von zwei Positionen beim Test hatte den gleichen Effekt auf auditive Stimuli reiner Listen, wie das Erinnern der visuellen Positionen bei gemischten Listen. Tatsächlich erreichte das Positionsgedächtnis für auditive Stimuli reiner Listen (Hits .79) das selbe Niveau wie das Positionsgedächtnis in gemischten Listen mit der Standard-Prozedur (.80).²⁸

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse von Experiment 3 die Hypothese, dass die bessere Leistung bei auditiven Stimuli in gemischten Listen – wie sie in Experiment 1 und 2 und der Standard-Bedingung von Experiment 3 beobachtet wurde – durch eine Reduktion räumlicher Unbestimmtheit zustande kam, welche auf einer gegenseitigen Abhängigkeit der Lernpositionen beruhte. Die bessere Leistung ergab sich somit nicht aus einer Verteilung der Stimuli auf getrennte modalitätsspezifische Systeme, die jeweils ihre eigene Kapazität besitzen.

²⁸ Natürlich profitierten auch auditive Stimuli gemischter Listen von der Reduktion der Testpositionen, so dass sich hier die räumliche Unbestimmtheit noch weiter reduzierte.

7 EKP Studien

7.1 Experiment 4

7.1.1 Einleitung

Die vorangegangenen behavioralen Experimente haben Evidenz geliefert, dass das Positionsgedächtnis für die auditive und die visuelle Modalität auf eine gemeinsame, beschränkte Ressource zugreift. Experiment 2 hat darüber hinaus gezeigt, dass es sich bei dieser gemeinsamen Ressource sehr wahrscheinlich nicht um verbales oder semantisches Gedächtnis handelt. Das folgende Experiment soll genauere Auskunft darüber geben, um welche Prozesse es sich bei dieser gemeinsamen Ressource handelt. Dazu werden EEGs gemessen, während Versuchspersonen die gleiche Aufgabe wie in den vorhergehenden Experimenten bearbeiten. Daraus werden für Lernphase und Retentionsintervall getrennt EKP Slow Potentials gemittelt. Im Experimentalablauf wurden zwei Änderungen gegenüber den Experimenten 1 und 2 vorgenommen: Das Retentionsintervall wurde von drei auf sechs Sekunden verlängert und es wurden nur unimodale Listen von vier und sechs Items präsentiert, auf Listen der Länge acht wurde verzichtet. Die Verlängerung des Retentionsintervalls sollte es gestatten, langsame Potentiale zu messen, welche die tatsächlichen Behaltensprozesse während des Retentionsintervalls widerspiegeln und nicht durch zeitliche Nähe zur Lern- und Testphase von Enkodier- und Abrufprozessen überlagert sind. Auf die Präsentation von Listen der Länge acht konnte verzichtet werden, da sich in den vorhergehenden Experimenten gezeigt hat, dass der Leistungsabfall von sechs zu acht Items mit dem von vier zu sechs Items vergleichbar ist, und somit kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn durch die langen Listen zu erwarten war.

Die Hypothesen zum Experiment waren folgende: Die Verhaltensdaten sollten ein ähnliches Muster wie in den Experimenten 1 und 2 aufweisen, mit Haupteffekten für die Faktoren Modalität und Listenlänge, die nicht signifikant interagieren. In den LPs der Lernitems sollten sich Einflüsse der Input-Modalität zeigen. Auditive Items sollten zu stärkeren Aktivierungen an anterioren (frontalen bis temporalen) Elektroden führen, visuelle Items zu stärkeren Aktivierungen an posterioren (parietalen bis okzipitalen) Elektroden. Die LPs des Behaltensintervalls sollten sich – gemäß der Hypothese einer gemeinsamen Verarbeitung – nicht nach der Modalität unterscheiden. Load-Effekte sollten

sich, wie in früheren Studien beobachtet (Mecklinger & Pfeifer, 1996; Rämä et al., 2000; Ruchkin et al., 1992), über den für die Verarbeitung spezifischen Arealen entwickeln. Im vorliegenden Fall der Objektpositionen sind frontale und parietale Aktivierungen zu erwarten, da beide Areale bei der Verarbeitung von Objekten und Positionen beteiligt sind. Sollte die Hypothese einer gemeinsamen räumlichen Verarbeitung hingegen nicht zutreffen, sind modalitätsspezifische Load-Effekte zu erwarten, die der oben vermuteten Topografie der Lernitems entsprechen.

7.1.2 Methode

Teilnehmer

16 Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen der Universität des Saarlandes nahmen gegen Bezahlung von 32 Euro (für zwei Sitzungen von jeweils 2 Stunden Dauer) an dem Experiment teil. Alle Versuchspersonen waren Rechtshänder.

Stimulusmaterial

In Experiment 4 wurden die selben 40 Bilder und Geräusche wie in den Experimenten 1 und 3 benutzt (siehe S. 51).

Design und Experimentalablauf

Die beiden Faktoren Setgröße und Listenmodalität variierten innerhalb Versuchspersonen. Die Gedächtnissets bestanden aus vier oder sechs Objekten, welche alle in der selben Modalität entweder als Bilder oder Geräusche präsentiert wurden. Die Setgröße variierte blockweise: Die erste Sitzung startete mit der kleineren Setgröße, damit die Versuchspersonen mit der Aufgabe vertraut sind, wenn sich deren Schwierigkeit mit der Setgröße erhöht. In der zweiten Sitzung wurde die Abfolge der Setgrößen umgekehrt. Die Modalität variierte innerhalb jedes Blocks zufällig. Insgesamt bearbeiteten die Versuchspersonen 20 Listen jeder Setgröße und Modalität.

Listenkonstruktion und Ziehen der Objekte erfolgten wie in Experiment 1. Auch der Experimentalablauf entsprach weitgehend dem von Experiment 1 (siehe S. 54). Um längere EEG-Potentiale messen zu können wurde jedoch das Behaltensintervall auf 6 s verlängert.

Die Versuchspersonen lernten die Positionen der sequentiell präsentierten Items (Darbietungszeit je 2 s; Interstimulus-Intervall 1 s), gefolgt von einem Retentionsintervall von 6 s und erneuter Präsentation zweier Items (für jeweils maximal 2 s). Die ursprünglichen Positionen der Testitems wurden auf einer Tastatur angegeben (innerhalb maximal 5 s). Der zweite Teststimulus folgte 1 s nach dem ersten Tastendruck. Der nächste Experimentaldurchgang wurde von der Versuchsperson per Tastendruck gestartet.

Um die Zuordnung der Antworttasten zu den Leinwandpositionen zu üben, bekamen die Versuchspersonen zu Beginn jeder Sitzung jeweils 12 Bilder und Geräusche nacheinander auf zufälligen Positionen präsentiert, welche sie per Tastatur angeben sollten.

Datenaufzeichnung und –analyse

Als Verhaltensdaten wurde die relative Häufigkeit korrekter Antworten analysiert.

Das EEG wurden von 22 Ag/AgCl Elektroden registriert, welche nach dem internationalen 10-20 System platziert waren (F3, Fz, F4, T7, C3, Cz, C4, T8, P7, P5, P3, Pz, P4, P6, P8, PO7, PO3, PO4, PO8, O1, Oz und O2). Als Referenz diente die linke Mastoid-Elektrode, die Erdung erfolgte über eine Elektrode auf AFz. Horizontales und vertikales Elektro-Okulogramm (EOG) wurden über Ag/AgCl Hautelektroden an den äußeren Augenwinkeln beider Augen, bzw. ober- und unterhalb des rechten Auges aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgte mit einer Rate von 250 Hz durch einen AC-gekoppelten Verstärker (Zeitkonstante 10 s; Tiefpassfilter 70 Hz; Sperrfilter gegen Netzrauschen 50 Hz). Alle Impedanzen wurden unter 10 k Ω gehalten.

In die Analyse gingen Aufzeichnungsintervalle von 25,5 s Länge ein, welche Lernphase und Retentionsintervall jedes Durchgangs umfassten. EOG-Artefakte wurden mit dem von Gratton, Coles und Donchin (1983) entwickelten Algorithmus bereinigt. Durchgänge, die nach der Korrektur noch Artefakte enthielten, wurden ausgeschlossen (Kriterien: maximale Amplitude im Intervall $\pm 200 \mu\text{V}$; maximale Differenz zweier Werte $200 \mu\text{V}$). Drei Datensätze, die nach der EOG Korrektur übermäßige Artefakte enthielten, wurden komplett ausgeschlossen, so dass insgesamt 13 Datensätze in die weitere Analyse eingingen. Die verbleibenden Intervalle wurden tiefpassgefiltert (30 Hz, 24 dB/Oktave). Eine durchschnittliche Anzahl von 23,8 Intervallen pro Versuchsperson und Bedingung ging in die folgende Mittelung ein. EKPs wurden für zwei verschiedene Zeitabschnitte des Experiments gemittelt: EKPs der Lernphase reichten von 500 ms vor dem Einsetzen des

ersten bis 1000 ms nach Ausblenden des letzten (vierten, bzw. sechsten) Lern-Items. EKPs für das Retentionsintervall reichten von 500 ms vor Ausblenden des letzten Lern-Items bis zum Einsetzen des ersten Testitems. Vor dem Mitteln wurde eine Baseline-Korrektur auf das Niveau der ersten 500 ms des entsprechenden Intervalls vorgenommen.

Da die Hypothesen über die topografische Verteilung der Aktivität größere Areale umfassten und keine Quellenlokalisierung geplant war, wurden die langsamen Potentiale mit einer geringen Elektrodendichte aufgezeichnet und anschließend gepoolt um eine größere statistische Power zu erreichen. Vor der statistischen Analyse wurden sechs Regionen definiert, welche jeweils drei Elektroden einschlossen: frontal (F3, Fz, F4), zentral (C3, Cz, C4), parietal (P3, Pz, P4), links parietal-okzipital (P7, PO3, PO7), rechts parietal-okzipital (P8, PO4, PO8), and okzipital (O1, Oz, O2).

7.1.3 Ergebnisse

Verhaltensdaten

Die relative Häufigkeit richtiger Antworten war in visuellen Durchgängen höher, als in auditiven und nahm mit der Listenlänge ab: Vier visuelle Items .88 (SD .03), sechs visuelle Items .72 (.03), vier auditive Items .72 (.04) und sechs auditive Items .55 (.03).

In einer 2×2 ANOVA mit den Faktoren Modalität (visuell vs. auditiv) und Listenlänge (vier vs. sechs Items) zeigten beide Faktoren signifikante Haupteffekte. Die Leistung war besser für visuelle Items als für auditive, $F(1,12) = 86.56$, $MSE = .3577$, $p < .0001$, und besser für kurze, als für lange Listen, $F(1,12) = 86.38$, $MSE = .3618$, $p < .0001$. Die Interaktion war nicht signifikant, $F(1,12) = 0.38$, $MSE = .0007$.

Die Leistungen sind etwas niedriger als in Experiment 1, was an dem verlängerten Retentionsintervall oder der Störung durch die EEG-Aufzeichnung liegen mag. Das Ergebnismuster entspricht dem der vorausgegangenen behavioralen Experimenten 1 und 2.

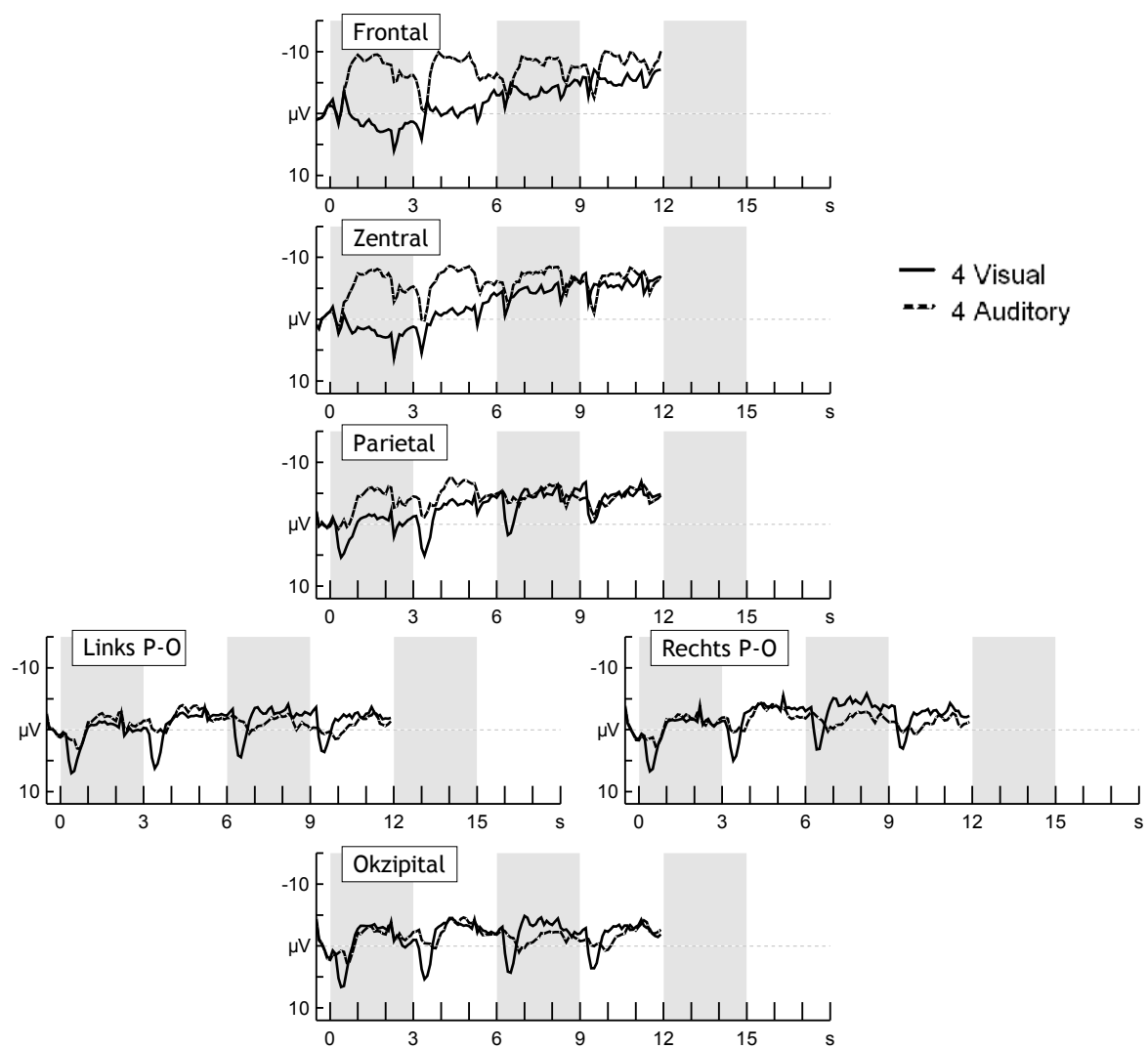


Abbildung 12: EKGs der Lernphase bei Listenlänge 4. Die Schattierung entspricht je einem Item + ISI.

Langsame Potentiale der Lernphase

Die EKGs der Lernphase über den verschiedenen Elektrodenregionen sind in Abbildung 12 für vier Items und in Abbildung 13 für sechs Items dargestellt. Für jede Region wurden die mittleren Amplituden (in μV) für Intervalle von jeweils drei Sekunden berechnet, beginnend mit Präsentationsbeginn jedes Items. Mit diesen Daten wurden separate ANOVAs für Listen von vier und sechs Items gerechnet, d.h., es ergaben sich eine $2 \times 6 \times 4$ und eine $2 \times 6 \times 6$ ANOVA mit den Faktoren Modalität (visuell vs. auditiv), Elektrodenregion (frontal, zentral, parietal, links / rechts parietal-okzipital, okzipital) und serielle Position des Items (1 bis 4, bzw. 1 bis 6). Die ANOVAs zeigten signifikante 3-fach-Interaktionen dieser Faktoren sowohl für Sets von vier, $F(15,180) = 3.730$,

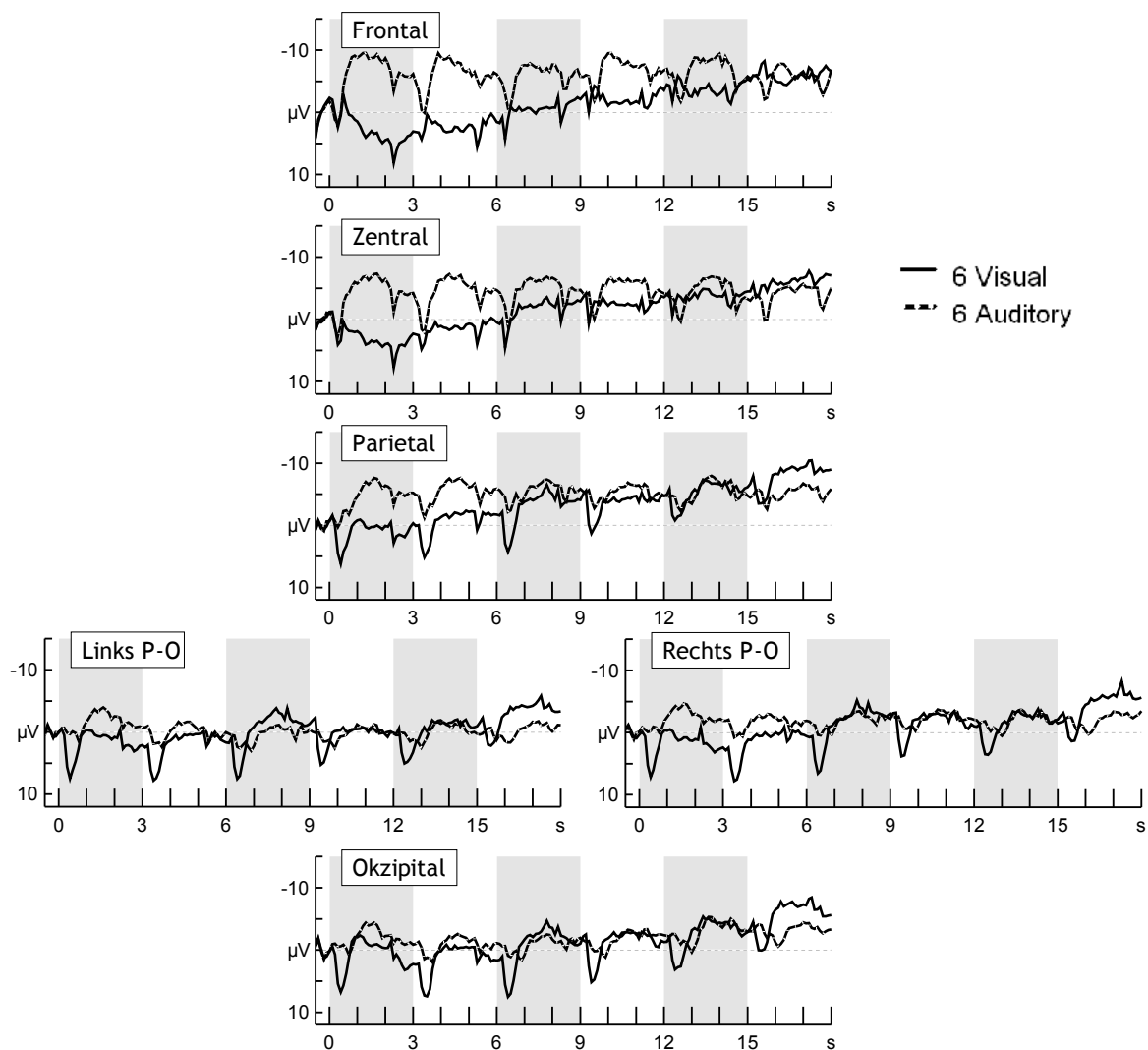


Abbildung 13: EKGs der Lernphase bei Listenlänge 6. Die Schattierung entspricht je einem Item + ISI.

$MSE = 1.668$, $p < .0001$, als auch von sechs Items, $F(25,300) = 2.148$, $MSE = 2.393$, $p < .005$.

Für die mittleren Amplituden der frontalen Elektrodenregion (in Abbildung 14 dargestellt) wurde der lineare Trend der auditiven und der visuellen Bedingung verglichen. An den frontalen Elektroden zeigten die Amplituden der visuellen Vierer- und Sechser-Listen einen linearen Anstieg mit zunehmender Itemposition. Sets von vier und sechs Items wurden getrennt analysiert. Die jeweiligen linearen Trends der visuellen Bedingungen wurden mit denen der auditiven Bedingungen der selben Listenlänge verglichen. Diese Differenz wurde signifikant für Sets von vier, $F(1,12) = 12.41$, $MSE = 9.282$, $p < .005$, und

für solche von sechs Items, $F(1,12) = 13.03$, $MSE = 29.31$, $p < .005$. Damit bestätigten die Analysen, dass sich die linearen Trends (oder Steigungen) der LPs der Enkodierphase für auditive und visuelle Items unterscheiden.

Das Enkodieren der Lern-Items ins AG ging mit modalitätsspezifischen EKP-Verläufen einher. Die Item-weise Aktivität war für visuelle Items an okzipitalen Elektroden und für auditive Items an frontalen Elektroden am größten. Zusätzlich zeigten sich ausgeprägte Korrelate der Verarbeitung über der frontalen Region. Die Enkodierung ins AG geschieht augenscheinlich auf modalitätsspezifische Weise, mit einer Item-weisen Enkodierung auditiver Items und einer kontinuierlichen, kumulativen Enkodierung visueller Items. Die zunehmende Negativierung in der visuellen Bedingung könnte ein Korrelat der zunehmenden Gedächtnisbelastung sein, die mit Präsentation jedes zusätzlichen Items ansteigt. Sie findet sich jedoch nicht über den posterioren Regionen, von denen man annimmt, dass sie visuelle Information speichern. Es ist wahrscheinlicher, dass die frontale Aktivität ein Korrelat von Kontrollprozessen ist, die ein inkrementelles Rehearsal der Items ermöglichen. Düzel et al. (1999) berichteten ein sehr ähnliches langsames Potential über frontalen Elektroden, das nur in einer episodischen Aufgabe auftrat, die Gedächtnisabruf erforderte, nicht aber in einer semantischen Aufgabe. Die Autoren

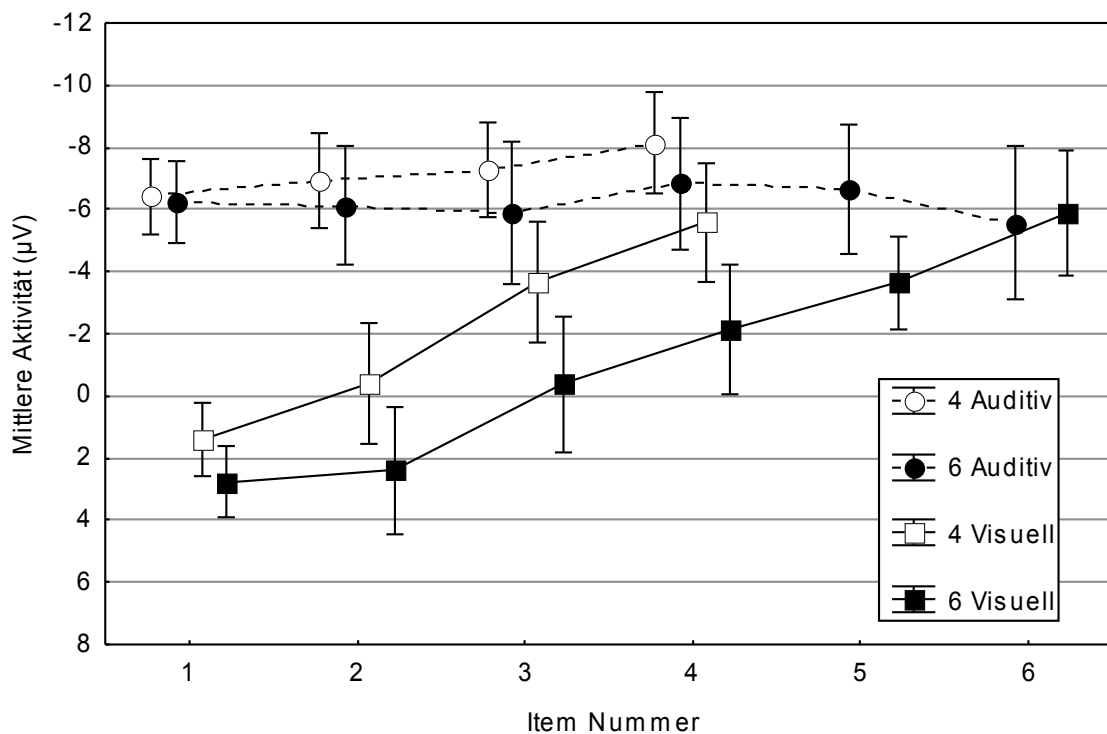


Abbildung 14: Mittlere Aktivität per Item in der Lernphase. Mittelwerte und Standardfehler.

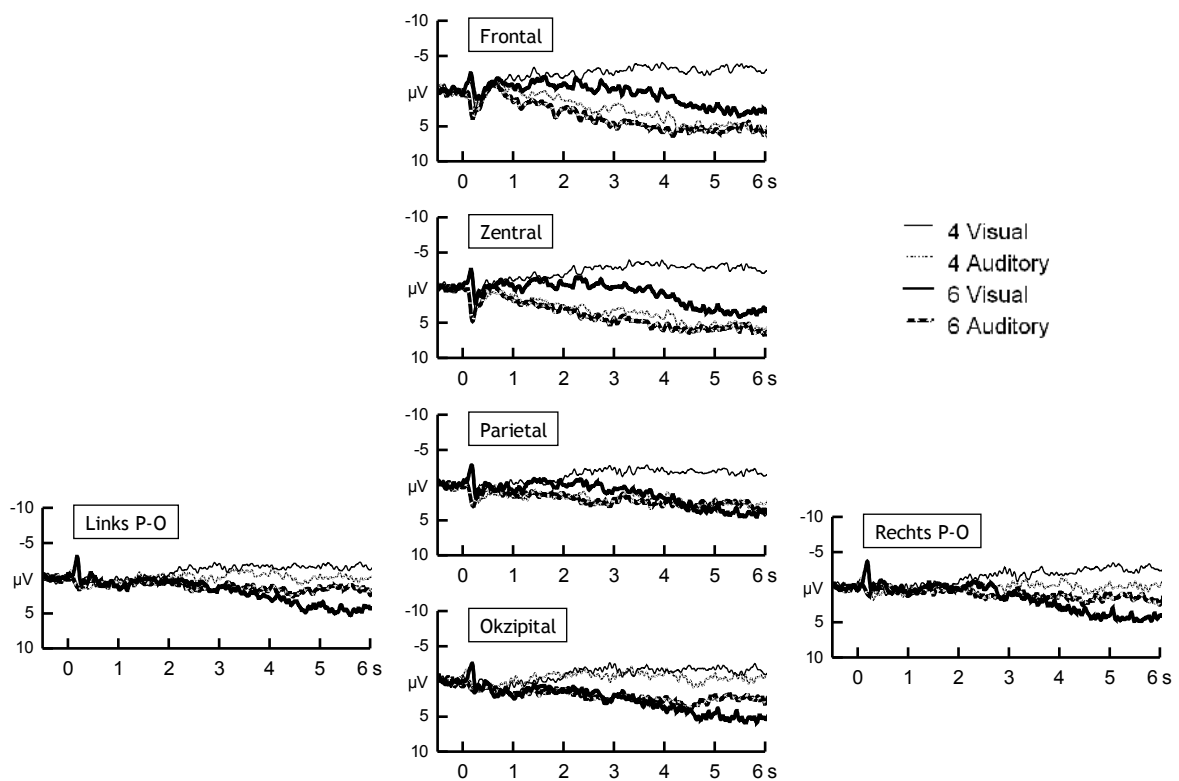


Abbildung 15: Langsame Potentiale im Retentionsintervall

betrachteten das Potential deshalb als ein Korrelat des Abrufmodus. Auch in der vorliegenden AG-Aufgabe könnten Abrufprozesse eine Rolle beim Enkodieren spielen. In der visuellen Aufgabe können die Versuchspersonen zuvor enkodierte Items erneut abrufen, nachdem sie das aktuell präsentierte verarbeitet haben. Die höhere perzeptuelle Schwierigkeit der auditiven Aufgabe benötigt hingegen einen höheren Aufwand bei der Verarbeitung jedes einzelnen Items, was ein Rehearsal vorhergehender Items verhindert.

Langsame Potentiale des Retentionsintervalls

Für die Analyse der LPs im Retentionsintervall (Abbildung 15) dienten die mittleren Amplituden (in μV) in der zweiten Hälfte des Retentionsintervalls als abhängige Variable und wurden für jede Elektrodenregion separat einer (2×2) ANOVA mit den Faktoren Modalität (visuell vs. auditiv) und Listenlänge (vier vs. sechs) unterzogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Von der Gedächtnisbelastung abhängige Variationen fanden sich an frontalen, links und rechts parietal-okzipitalen und okzipitalen Elektroden. Der Unterschied wurde jedoch nur an der frontalen Region signifikant. Modalitätseffekte fanden sich an frontalen und

zentralen, nicht aber an weiter posterior gelegenen Elektroden. Signifikante Interaktionen zwischen den beiden Faktoren ergaben sich an allen außer der okzipitalen Region.

Region	Modalität		Listenlänge		Modalität × Listenlänge	
	<i>F</i> (1,12)	<i>p</i>	<i>F</i> (1,12)	<i>p</i>	<i>F</i> (1,12)	<i>p</i>
Frontal	27.52	< .0005	4.75	< .05	5.55	< .05
Zentral	19.89	< .001	2.46	<i>n.s.</i>	6.58	< .05
Parietal	1.72	<i>n.s.</i>	1.74	<i>n.s.</i>	7.08	< .05
Links parietal-okzipital	.70	<i>n.s.</i>	3.99	= .07	6.86	< .05
Rechts parietal-okzipital	.15	<i>n.s.</i>	3.64	= .08	6.07	< .05
Okzipital	.73	<i>n.s.</i>	4.46	= .06	1.32	<i>n.s.</i>

Tabelle 2: Ergebnisse der ANOVAs für die sechs Elektrodenregionen in Exp. 4

An den posterioren Regionen gab es einen (marginal signifikanten) Listenlängeneffekt für beide Modalitäten, mit einer größeren Negativität für kurze Listen als für lange. Dieses Ergebnis könnte unterschiedliche Strategien für die beiden Listenlängen widerspiegeln. Es ist unwahrscheinlich, dass es sich bei der Differenz um ein Korrelat der allgemeinen Aufgabenschwierigkeit handelt, in welchem Falle die LPs auch von der Aufgabenschwierigkeit aufgrund der Modalität beeinflusst sein sollten. Die Tatsache, dass die okzipitale Aktivierung nur von der Listenlänge beeinflusst ist, weist auf eine von einer Kapazitätsbeschränkung abhängige Verarbeitungsstrategie hin. Nach aktuellen AG-Modellen kann das AG bis zu vier Items halten, während sechs Items die AG-Kapazität überschreiten (Luck & Vogel, 1997; Vogel & Machizawa, 2004). Die Überlastung mit sechs Items könnte eine Strategie begünstigen, die sich, sobald die Enkodierung abgeschlossen ist, mehr auf passives Gedächtnis, als auf aktives Rehearsal verlässt. Die positiv verlaufenden Potentiale der 6er-Listen an posterioren Regionen können als Korrelat einer solchen passiven Strategie aufgefasst werden. Am Ende der Lernphase, welches die Baseline für das Retentionsintervall darstellte, hatten die Potentiale bereits ein erhöhtes Maß an Negativität erreicht (siehe Abbildung 12 und 13). In den 6er-Listen fiel diese Aktivierung zurück auf das Niveau vor der Lernphase, welches sie am Ende des Retentionsintervalls fast erreichte. Im Gegensatz dazu blieben die Potentiale der 4er-Listen auch im Retentionsintervall negativ (siehe Abbildung 16).

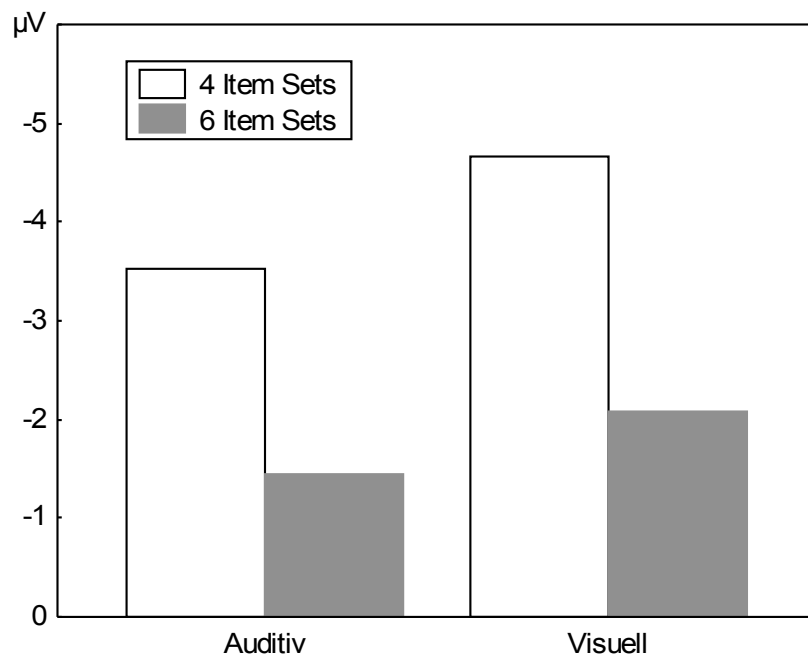


Abbildung 16: Okzipitale Aktivierung am Ende des Retentionsintervalls, relativ zur Pre-Trial-Baseline.

Die okzipitale bis parieto-okzipitale Topographie legt nahe, dass das aktive Rehearsal der kurzen Listen durch visuelles Imagery geschieht (Farah et al., 1989; Kosslyn, 2005; Mazard, Tzourio-Mazoyer, Crivello, Mazoyer, & Mellet, 2004), oder durch Behaltensprozesse, die visuell-räumliche LZG-Repräsentationen nutzen (Rösler et al., 1995). Die Ähnlichkeit der okzipitalen LPs für die beiden Modalitäten könnte bedeuten, dass die auditiv wahrgenommenen Positionen in ein visuell-räumliches Format rekodiert wurden, um sie durch Rehearsal aufrecht zu erhalten. Angesichts des Aufgabentyps und der okzipitalen Topographie ist die AG-Repräsentation, welche aufrecht erhalten wird, eher eine statische visuell-räumliche Konfiguration im Visual Cache, als das dynamische Rehearsal der Inner Scribe. Die am besten mit den Daten zu vereinbarende Erklärung ist, dass die Items beider Modalitäten als visuelle Bilder von Objekten an ihren jeweiligen Positionen repräsentiert werden.

An der frontalen Region wurde die LP-Aktivität sowohl von dem Faktor Modalität, als auch von der Listenlänge moduliert. Den visuellen 4er-Listen entsprach ein ausgeprägtes negatives Potential, während die visuelle 6er-Liste ein positiveres Potential, die auditiven 4er- und 6er-Listen das positivste Potential hervorriefen. Andere Studien berichteten ausgeprägte positive LPs an frontalen Elektroden im Zusammenhang mit allgemeiner Aufgabenschwierigkeit (King & Kutas, 1995; Ruchkin et al., 1991; Werkle-Bergner,

Mecklinger, Kray, Meyer, & Duzel, 2005), insbesondere mit Gedächtnisbelastung, nicht aber mit Aufgabentyp oder Modalität (Anurova et al., 2003; McEvoy et al., 1998). In Bezug auf Gedächtnisprozesse kann diese frontale Aktivität als ein Korrelat a-modaler aufmerksamkeitsbasierter Kontrollprozesse interpretiert werden, die multimodale Integration ermöglichen (Baddeley, 2000; Ruchkin et al., 2003). In diesem Experiment kann die Aktivität an frontalen Elektroden somit als ein Korrelat von Aufmerksamkeitsprozessen interpretiert werden, welche sowohl mit der Gedächtnisbelastung zunehmen, als auch mit der Notwendigkeit, auditive Items ins visuelle AG zu rekodieren.

In anderen EKP-Studien modulierte die Gedächtnisbelastung die langsamen Potentiale des Retentionsintervalls über aufgabenspezifischen Arealen (z.B. Mecklinger & Pfeifer, 1996; Rämä et al., 2000; Ruchkin et al., 1992). In der Regel führte die höhere Gedächtnisbelastung an den jeweiligen Elektroden zu einer stärkeren Abweichung vom Baseline-Niveau. Im vorliegenden Experiment legt die Abwesenheit solcher räumlich begrenzten modalitätsspezifischen Modulationen nahe, dass die Speicherung der räumlichen Positionen nicht in Abhängigkeit von der Eingangsmodalität geschah.

7.1.4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen deutlich verschiedene Muster für die Studierphase und das anschließende Behaltensintervall. Während des Enkodierens unterscheiden sich die Oberflächenpotentiale für die beiden Modalitäten mit einer maximalen Differenz an frontalen bis zentralen Elektroden. Wenn man die anschließende okzipitale Aktivierung als ein Korrelat visueller Verarbeitung ansieht, kann die hohe frontale Aktivität für auditive Items als ein Korrelat derjenigen exekutiven Prozesse aufgefasst werden, die für eine visuelle Rekodierung auditiver Items nötig sind. Für visuelle Listen ist diese Rekodierung nicht notwendig, so dass die freien Ressourcen genutzt werden können, um die Liste inkrementell zu verarbeiten und zuvor gesehene Items erneut aufzufrischen. Das zunehmende Potential könnte einem solchen Prozess entsprechen. Interessanterweise erreichte das Potential der kurzen Listen mit dem vierten Item das gleiche Niveau, wie das der langen Liste mit dem sechsten Item. Außerdem war das maximale Niveau beider Listen (etwa 6 μV) das gleiche, das auch die auditiven Potentiale im Interstimulus-Intervall erreichten. Dieser asymptotische Anstieg der frontalen Aktivität ähnelt der asymptotischen

Aktivität an parieto-okzipitalen Elektroden in anderen Studien zum visuellen AG (Luck & Vogel, 1997; McCollough, Machizawa, & Vogel, 2007; Vogel & Machizawa, 2004), in welchen das Maximum der Aktivität bei Individuen mit niedriger AG-Kapazität schneller erreicht war und somit wohl der maximal möglichen AG-Aktivität entsprach. In Analogie dazu könnte auch hier das frontale Spannungsmaximum ein Korrelat ressourcenbegrenzter AG-Prozesse sein.

Oben wurde angenommen, dass die okzipitale Aktivität bei kurzen Listen einen visuell-räumlichen Imagery-Prozess widerspiegelt. Wenn für die langen Listen kein visuell-räumliches Imagery genutzt wird und sie trotzdem teilweise erinnert werden, stellt sich die Frage, wie sie im Gedächtnis gehalten werden. Vermutlich beruht das Gedächtnis für beide Listenlängen partiell auf den gleichen (Langzeit-) Gedächtniseinträgen, die Objekte an Positionen binden (wie im Konzept des Episodic Buffer beschrieben, Baddeley, 2000). Im vorliegenden Fall handelt es sich dann um integrierte Repräsentationen von Objekten mit ihrem räumlichen Kontext. Der Unterschied besteht darin, dass diese Information im Falle der 4er-Listen aktiv aufrecht erhalten wird, während sie bei 6er-Listen hauptsächlich passiv genutzt wird.

Die Ergebnisse sind vereinbar mit der Ansicht des menschlichen AG als fronto-parietales Netzwerk, in dem domänen- oder modalitätsspezifische Verarbeitung in posterioren Arealen und aufmerksamkeitsbasierte Kontrollprozesse in frontalen Arealen stattfinden (Ruchkin et al., 2003; Smith & Jonides, 1997). Die meisten elektrophysiologischen Studien waren an der Unterscheidung zwischen der Verarbeitung von „What“ und „Where“ interessiert und nutzten daher räumliche Aufgaben, in denen reine Positionen im AG gehalten wurden. Im vorliegenden Experiment wurde hingegen das AG für integrierte Objekt-Orts-Assoziationen getestet. Während die erwähnten Studien parietale Aktivierungen fanden, die als Nutzung des parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes oder der Inner Scribe interpretiert werden können, traten hier Aktivierungen auf, die sich weiter posterior bis zu den okzipitalen Elektroden erstreckten und besser mit einer Objekt-Orts-Bindung im visuellen AG erklärt werden können. Dieses Ergebnis legt nahe, dass das AG für Objektpositionen nicht auf einer bloß gemeinsamen Aktivierung der „What“- und „Where“-Netzwerke für Objekte und räumliche Information beruht, sondern unter entsprechenden Bedingungen ein integriertes Perzept von „Objekten-an-Positionen“ im visuellen AG nutzt. Solche integrierten Repräsentationen wurden von der *Feature*

Integration Theory vorgeschlagen (Treisman & Gelade, 1980), die besagt, dass während der Wahrnehmung von Objekten im Aufmerksamkeitsfokus Objekteigenschaften zu Object Files gebunden werden. Diese Object Files, welche auch Ortsinformation enthalten (Treisman & Zhang, 2006), können dann als Einheiten des visuellen AG dienen (Schneider, 1999; Treisman, 2006). Das vorliegende Experiment erweitert diese Ergebnisse auf auditive Objekt-Orts-Bindung und zeigt, dass das Gedächtnis für Objektpositionen stärker von der Aufgabenschwierigkeit als von der Modalität beeinflusst wird. Im vorliegenden Fall, in dem integrierte Information über Objekte und ihre Positionen im AG gehalten wurde, lassen sich die Ergebnisse am besten durch ein Zusammenspiel zweier Prozesse erklären, die für beide Modalitäten gelten. Der erste ist ein Rehearsal-Prozess im kapazitätsbeschränkten visuell-räumlichen AG, der mit einem anhaltenden negativen LP in parietalen und okzipitalen Ableitungen einhergeht. Der zweite Prozess ist die Bildung episodischer Gedächtnisspuren während der Lernphase, welche Objekte an Positionen binden, was sich in langsamen Potentialen an frontalen Ableiteorten widerspiegelt.

7.2 Experiment 5

7.2.1 Einleitung

Die bisherigen Experimente lieferten Hinweise auf eine modalitätsübergreifende Raumrepräsentation. Die behavioralen und elektrophysiologischen Maße zeigten sehr ähnliche Resultate für visuelle und auditive Gedächtnisaufgaben. Experiment 4 legte zudem nahe, dass diese gemeinsame Raumrepräsentation im visuell-räumlichen Format gespeichert ist. Ein möglicher Einwand gegen die Generalisierbarkeit dieses Ergebnisses lautet, dass den Versuchspersonen durch die wechselnde Präsentation visueller und auditiver Experimentaldurchgänge nahegelegt wurde, eine gemeinsame Strategie zur Bearbeitung der Aufgaben zu wählen. Die visuell-räumliche Repräsentation der auditiven Items wäre dann darauf zurück zu führen, dass es einfacher ist, alle Items auf gleiche Weise zu verarbeiten, als zwischen zwei Arten der Enkodierung zu wechseln und dass es leichter ist, auditive Items visuell zu rekodieren, als umgekehrt. Wenn Versuchspersonen nur auditive Aufgaben zu bearbeiten hätten, sollten sie dann nicht visuell rekodieren, sondern das genuin auditive System nutzen. Um diese Möglichkeit zu prüfen, wurden im folgenden Experiment 5 die Versuchsperson zwei Gruppen zugeteilt, die jeweils nur

auditive oder nur visuelle Items lernten. In der auditiven Gruppe wurden nicht, wie bisher, visuell sichtbare Positionen genutzt, sondern für die Versuchspersonen unsichtbare Lautsprecher, die kreisförmig um sie herum aufgestellt waren – und somit teilweise außerhalb des visuellen Gesichtsfeldes lagen. Dieser Aufbau sollte den Eigenschaften des auditiv-räumlichen Wahrnehmungsfeldes besser entsprechen, als die Präsentation in der Mitte des visuellen Sichtfeldes, wie dies in den bisherigen Experimenten geschah.

Eine weitere Frage, die Experiment 5 zu beantworten versucht, betrifft die Spezifität der AG-Prozesse. Wenn die okzipitale Aktivierung auf die Nutzung der visuell-räumlichen Komponente des AG hinweist, sollte diese Aktivierung unabhängig davon auftreten, ob nur Objekte oder auch deren Positionen verarbeitet werden. Auf den Visual Cache sollten Objekte genauso wie Objekt-Orts-Bindungen zurückgreifen. Um mögliche Unterschiede in der Verarbeitung dieser beiden Arten von Information aufzeigen zu können, wird in Experiment 5 das Gedächtnis für Objekt-Orts-Assoziation mit dem für die reine Objektidentität kontrastiert.

Eine weitere Änderung gegenüber den vorherigen Experimenten besteht in der Reduzierung der Setgröße. Die geringe Aktivität im EKP bei 6er-Sets hatte in Experiment 4 Hinweise geliefert, dass diese nicht aktiv rehearsed werden. In Experiment 5 werden die Setgrößen auf zwei und vier Items verringert. Damit sollte es möglich sein, die Interpretation der Load-Effekte in Experiment 4 empirisch zu stützen. Da diesmal beide Setgrößen innerhalb der angenommenen Gedächtnisspanne von vier Items liegen, sollten beide aktiv verarbeitet werden. Die schwierigeren 4er-Sets sollten dabei zu mehr Aktivität führen, als die leichten 2er-Sets. Wenn die Interpretation richtig ist, dass der negativere EKP-Verlauf der kleinen Sets in Experiment 4 einer höheren Aktivität entsprach, sollten diesmal umgekehrt die größeren Sets zu einem negativeren Verlauf führen. Jedoch besteht auch die Möglichkeit, dass sich – da beide Setgrößen innerhalb der Gedächtnisspanne liegen – keine sehr deutlichen Load-Effekte ergeben. Aus diesem Grund wurde neben Objekt- und Positionsaufgabe eine Kontrollaufgabe eingeführt, die als Baseline dienen sollte und in der die Versuchspersonen im Retentionsintervall keine Gedächtnisbelastung hatten.

Experiment 5 wurde als Rekognitionsexperiment konzipiert. Damit ist eine weitergehende Auswertung der Verhaltensdaten möglich, als in den bisherigen Experimenten mit Vierfach-Wahlreaktion. Die Alt/Neu-Entscheidung der Rekognitionsphase erlaubt eine

Auswertung sowohl von Reaktionszeiten, als auch von Diskriminationsmaßen (PR-Scores).

Die Hypothesen für Experiment 5 waren folgende: Die Verhaltensdaten sollten ein ähnliches Muster zeigen, wie in den bisherigen Experimenten, mit Haupteffekten für Modalität und Setgröße. Wieder sollten aufgrund perzeptueller Unterschiede visuelle Aufgaben leichter sein als auditive (möglicherweise abgeschwächt durch den neuen, dem Hörsinn gerechteren Experimentalaufbau) und Items kurzer Sets besser erinnert werden, als Items langer Sets. Die neu eingeführte Identitätsaufgabe sollte leichter sein als die Positionsaufgabe, da in der letzten sowohl Objektidentität als auch -position erinnert werden müssen. Bezüglich der LP im Retentionsintervall sollten die 4er-Sets zu größerer (negativer) Aktivität an posterioren Elektroden führen, als 2er-Sets. Auch sollte sich die Aktivität an frontalen Elektroden wieder gemäß der Aufgabenschwierigkeit unterscheiden, d.h. die jeweils in den Verhaltensdaten gefundene Unterschiede nach Aufgabe, Setgröße und Modalität widerspiegeln. Wenn das Rehearsal der Items wie vermutet im Visual Cache stattfindet, sollten (zumindest im visuellen Fall) Identitäts- und Positionsaufgabe beide mit okzipitalen Aktivierungen einhergehen. Falls zusätzliche Aktivierungen in der Positionsaufgabe auftreten, sollten diese als Korrelat einer genuin räumlichen Verarbeitung interpretierbar sein.

7.2.2 Methode

Teilnehmer

28 Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen der Universität des Saarlandes nahmen gegen Bezahlung von 20 Euro (für etwas mehr als zwei Stunden) an dem Experiment teil. Alle Versuchspersonen waren Rechtshänder, 17 waren weiblich, 11 männlich.

Stimulusmaterial

Als visuelles Stimulusmaterial wurden 64 abstrakte Objekte, ähnlich denen in Experiment 2 verwendet (siehe Abb. 17). Jeweils 8 Objekte entstammten der selben von 8 Kategorien, welche durch das Konstruktionsprinzip (z.B. aus Kreisen und Quadraten aufgebaute Objekte) definiert waren.

Als auditive Stimuli wurden 64 natürliche Geräusche verwendet, von denen ebenfalls jeweils 8 Geräusche aus der selben Kategorie stammten. Die 8 Kategorien waren:

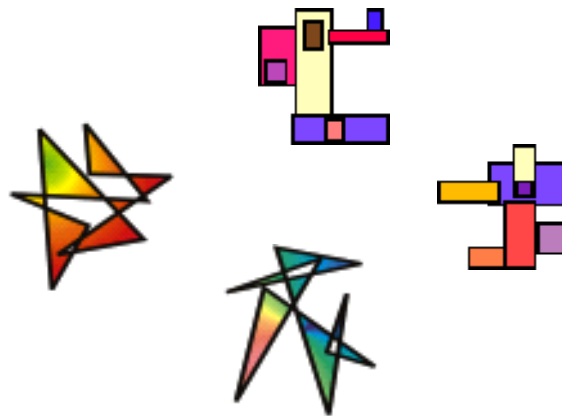


Abbildung 17: Beispiele für visuelles Stimulusmaterial in Experiment 5.

Autohupen, Vogelstimmen, Gitarrenakkorde, Frösche, Klingeltöne, Glockenspiele, Sägen, Schlagzeugsoli.

Design

Die Variable Stimulusmodalität wurde zwischen Versuchspersonen variiert. Die Teilnehmer wurden den beiden Gruppen abwechselnd zugeordnet. Sie lernten Listen von zwei bzw. vier sequentiell dargebotenen Items (Bildern oder Tönen), die an unterschiedlichen räumlichen Positionen präsentiert wurden. Am Ende der Lernliste gab ein visueller Hinweisreiz (Cue) Auskunft darüber, welche Art Test folgen würde: Rekognition der Objektidentität, Rekognition der Objektposition, oder eine Kontrollaufgabe ohne Gedächtnisanforderung.

Somit gab es die drei Variablen Stimulusmodalität, Listenlänge und Aufgabe, von denen die erste zwischen Versuchspersonen, die beiden übrigen innerhalb Versuchspersonen variiert wurden.

Die Variablen waren vollständig gekreuzt, in jeder der Bedingungen wurden 30 Trials mit je zwei Testitems präsentiert. Die Hälfte der Testitems erforderte eine ‚Alt‘-, die andere Hälfte eine ‚Neu‘-Antwort. In der Kontrollbedingung (einer Links-Rechts-Entscheidung) erforderte ebenfalls jeweils die Hälfte der Items den Druck der einen oder anderen Antworttaste. Insgesamt ergaben sich für jede Versuchsperson 180 Trials mit 360 Antworten (Tabelle 3).

	Rekognitionsaufgaben				Kontrollaufgabe	
	Objektidentität		Objektposition		2 Items	4 Items
	2 Items	4 Items	2 Items	4 Items		
Gruppe: Auditiv	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30
Gruppe: Visuell	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30

Tabelle 3: Design von Experiment 5. Die Werte in den Zellen bezeichnen die Anzahl erforderlicher Antworten in den jeweiligen Antwortkategorien (Alt-Neu bzw. Links-Rechts).

Experimentalablauf

Die Versuchsperson saß in 60 cm Entfernung vor einem Bildschirm, auf dem die Stimuli der visuellen Bedingung, sowie die Anweisungen zum Experiment gezeigt wurden. Um die Versuchsperson herum waren fünf Lautsprecher-Satelliten auf Kopfhöhe (120 cm) aufgestellt. Die Lautsprecher standen alle in etwa 90 cm Entfernung vom Kopf der Versuchsperson und waren für die Versuchsperson nicht sichtbar, da vor ihnen eine Stoffbahn gespannt war. Die fünf Lautsprecherpositionen stellten die tatsächlichen Darbietungspositionen dar, so dass in allen Bedingungen (außer der Testphase der Kontrollbedingung) mit physikalischen Schallquellen gearbeitet wurde. Das Setting ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt.

Während die Versuchsperson für die EEG-Messung vorbereitet wurde, bekam sie alle im Experiment verwendeten Stimuli präsentiert, damit sie mit dem Material vertraut wird.

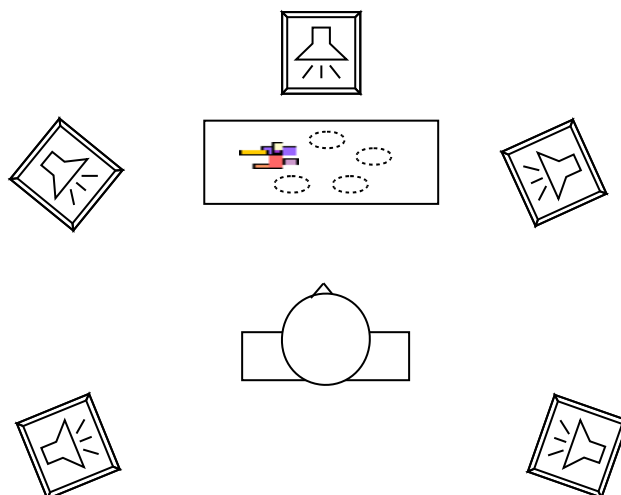


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Experimentalaufbaus in Experiment 5.

Darauf folgte ein Probedurchlauf. Jede der sechs Bedingungen wurde einmal präsentiert. Im Gegensatz zum nachfolgenden Experiment bekamen die Versuchspersonen während des Probedurchlaufs in allen Bedingungen Rückmeldung darüber, ob ihre Antwort richtig oder falsch war.

Die Versuchsperson startete jeden Experimentaldurchgang mit der Leertaste. Während des gesamten Durchgangs wurde in der Mitte des Bildschirms ein Fixationskreuz eingeblendet. Nach 1 s wurde der erste Stimulus dargeboten. Visuelle Stimuli wurden auf einer von fünf Positionen auf dem Bildschirm gezeigt, auditive Stimuli wurden von einem der fünf Lautsprecher abgespielt. Die Darbietungsdauer jedes Stimulus betrug 2 s, gefolgt von einem Interstimulusintervall (ISI) von 1 s. Eine Sekunde nach dem letzten (zweiten, bzw. vierten) Stimulus wurde für 500 ms der Hinweisreiz eingeblendet, der mitteilte, ob die Objektinformation ('obj') oder die Positionsinformation ('pos') im Test abgefragt wird, oder ob eine einfache Links-Rechts-Entscheidung ('L|R') getroffen werden soll. Der Hinweisreiz wurde in beiden, der auditiven und der visuellen Bedingung, visuell dargeboten. Nach einem Retentionsintervall von 6 s wurde der erste Teststimulus präsentiert. Eine vereinfachtes Beispiel des Ablaufs findet sich in Abbildung 19.

In der Positionsaufgabe wurde im Test einer der Lernstimuli an einer der ursprünglichen Positionen präsentiert und die Versuchsperson entschied, ob die Kombination aus Stimulus und Position alt oder neu war. In der Objektaufgabe wurde ein Stimulus aus der selben Kategorie wie die Lernstimuli an zentraler Position in der Bildschirmmitte (visuell), bzw. von allen Lautsprechern zugleich (auditiv), dargeboten. Die Versuchsperson entschied, ob der Stimulus bereits in der Lernphase vorkam oder nicht. In der Kontrollaufgabe schließlich wurde ein neuer Stimulus der Lernkategorie links oder rechts der Mitte präsentiert. Im auditiven Fall wurde der Ton aus beiden Lautsprechern der betreffenden Seite abgespielt, so dass die wahrgenommenen (virtuellen) Schallquellen links und rechts der Versuchsperson lagen. Im visuellen Fall wurden Bildschirmpositionen links und rechts der Mitte genutzt, die keine Lernpositionen darstellten. Bei 2er-Listen wurden die alten Items in beliebiger Reihenfolge im Test präsentiert, bei den 4er-Listen wurde als erstes Testitem immer ein Item der ersten Listenhälfte, als zweites Testitem ein Item der zweiten Listenhälfte dargeboten. Die Teststimuli wurden für maximal 2 s dargeboten, danach hatte die Versuchsperson noch maximal 3 s Zeit zu antworten. Als Antworttasten wurden die beiden Umschalt- (Shift-) Tasten der PC-Tastatur genutzt. Die Hälfte der

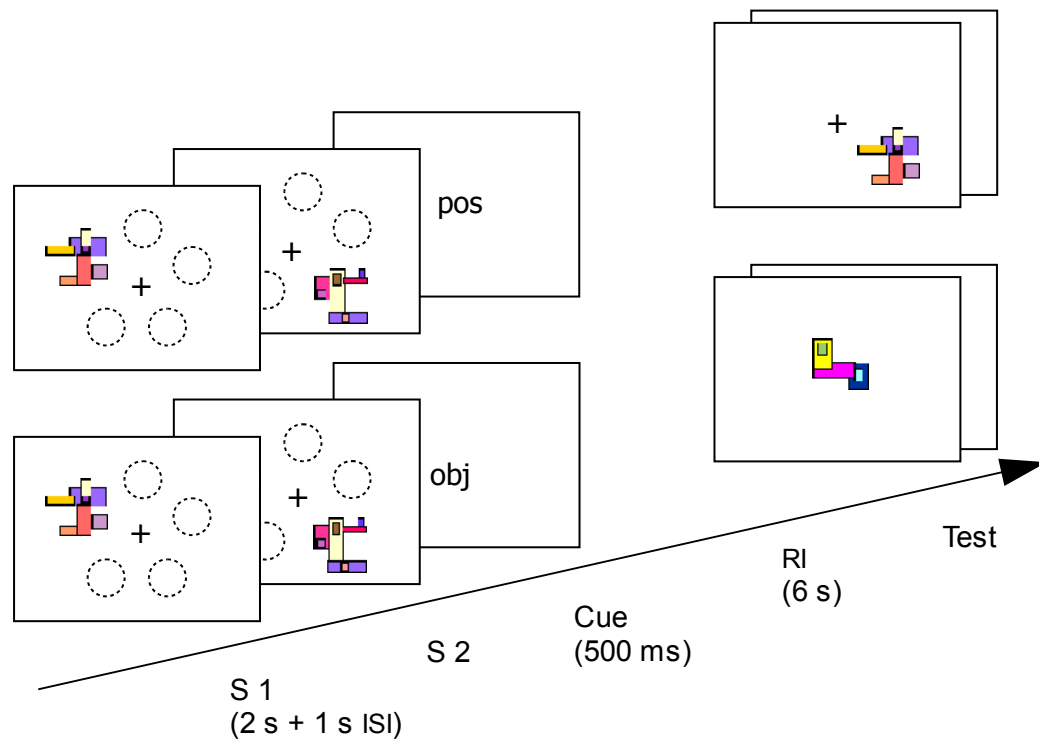


Abbildung 19: Trialschema in Experiment 5 für visuelle 2-Item-Sets, dargestellt für die Positionsbedingung (oben) und die Objektbedingung (unten). Durch Kreise angedeutete Positionen waren nicht sichtbar.

Versuchspersonen drückte die linke Taste bei Alt- und die rechte Taste bei Neu-Antworten, die andere Hälfte hatte umgekehrte Tastenbelegung. Bei Antwort schon während der Stimulusdarbietung wurde diese abgebrochen; 1 s nach der Antwort wurde der zweite Teststimulus dargeboten. Nach der zweiten Antwort wurden die Versuchspersonen aufgefordert, den nächsten Durchgang mit der Leertaste zu starten. Nach 90 der 180 Trials hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit eine längere Pause zu machen. In der Kontrollbedingung bekamen die Versuchspersonen zusätzlich nach jeder Antwort für 2 s eine Rückmeldung über ihre Antwortgeschwindigkeit (in Millisekunden). Außerdem bekamen sie eine zusätzliche Rückmeldung wenn die Antwort falsch war, nicht innerhalb des geforderten Zeitraums abgegeben wurde oder eine neue persönliche Bestzeit darstellte. Die Rückmeldung sollte dazu dienen, die Versuchsperson zu motivieren und gegebenenfalls auf nachlassende Aufmerksamkeit hinzuweisen.

Die Bedingungen wurden aus einem Pool von 18 Trials (je 3 aus sechs Bedingungen) ohne Zurücklegen gezogen; danach wurde neu initialisiert. Die Abfolge der Stimulus-Kategorien

und der Items innerhalb jeder Kategorie erfolgte ebenfalls durch zufälliges Ziehen ohne Zurücklegen. Nach Verwendung aller Kategorien wurden beide Mengen neu initialisiert.

Datenaufzeichnung und –analyse

Die EEGs wurden mit dem DC-Verstärker BrainampDC der Firma BrainProducts (München) aufgezeichnet. Gemessen wurden insgesamt 63 Kanäle mit einer Sampling-Rate von 500 Hz. Der Frequenzbereich reichte von DC bis 250 Hz, mit einem Sperrfilter im Bereich des Netzrauschens bei 50 Hz. Die Auflösung betrug $0,1 \mu\text{V}$, die Impedanzen betragen unter $10 \text{ k}\Omega$. Als Erdung (Ground) diente die AFz-Elektrode. Die EEGs wurden mit dem linken Mastoid (A1) als Referenzelektrode aufgezeichnet und offline neu referenziert mit den verbundenen Mastoidelektroden (A1-A2) als neue Referenz.

Im Intervall zwischen den Experimentaldurchgängen wurde eine Gleichspannungskorrektur (DC Reset) vorgenommen. Zusätzlich wurde offline eine globale Korrektur für Gleichspannungsdrift durchgeführt (DC-Detrend). Die verwendete Methode orientiert sich an der Arbeit von Hennighausen, Heil und Rösler (1993). Zur Schätzung des DC-Drifts wurden die über die gesamte Aufzeichnung erfolgenden Veränderungen der Prä-Stimulus-Baselines (200 ms) aller Stimuli, sowie der Intervalle unmittelbar vor DC-Resets (gemittelt über 2000 ms) verwendet.

EEG-Abschnitte mit ungewöhnlich hoher Aktivität (mehr als $2000 \mu\text{V}$ innerhalb von 200 ms) oder ungewöhnlich niedriger Aktivität (weniger als $0,5 \mu\text{V}$ über 100 ms) wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Es wurden Aufzeichnungsepochen von 6700 ms Dauer analysiert. Die Epochen reichten von 200 ms vor Präsentation des Aufgaben-Cues bis zum Ende des Retentionsintervalls.

Über die segmentierten Daten wurde eine Augenartefaktkorrektur nach dem Algorithmus von Gratton, Coles und Donchin (1983) gerechnet.²⁹ Danach wurde ein Lowpass-Filter angewandt (30 Hz, 24 dB/octave) und artefaktbehaftete Segmente aussortiert (Kriterien: mehr als $50 \mu\text{V}$ Differenz benachbarter Samplingpunkte oder mehr als $250 \mu\text{V}$ Differenz zweier Werte im Segment).

²⁹ Die Augenartefaktkorrektur wurde unipolar durchgeführt. Die bipolare Korrektur mit jeweils zwei Korrekturkanälen führte bei den LP-Daten zu artefaktbehafteten Ergebnissen.

Anschließend wurde für jedes Segment die Baseline von 200 ms vor Stimuluspräsentation vom Gesamtniveau subtrahiert und die Segmente jeder Bedingung gemittelt. In die gemittelten EKPs (pro Bedingung und Versuchsperson) gingen durchschnittlich 26,0 Segmente ein. Es wurden neun Regionen (Regions of Interest, ROI) festgelegt, in die jeweils drei Elektroden eingingen. Anterior-Links: F5, F7, FC5; Anterior-Mitte: Fp1, Fp2; Anterior-Rechts: F6, F8, FC6; Zentral-Links: CP5, T7, TP7; Zentral-Mitte: Cz, CP1, CP2; Zentral-Rechts: CP6, T8, TP8; Posterior-Links: P5, P7, PO7; Posterior-Mitte: Pz, O1, O2; Posterior-Rechts: P6, P8, PO8. Damit ergab sich eine 3 (Anterior/Posterior) x 3 (Lateralität) Anordnung der Elektroden.

7.2.3 Ergebnisse und Diskussionen

Verhaltensdaten

Als Maß für die Rekognition alter Items (alter Objekte, bzw. Objekt-Positions-Assoziationen) dienten PR-Scores – die Differenz zwischen *Hit-Rate* und *False Alarm-Rate* (Snodgrass & Corwin, 1988). In einer zweiten Analyse wurden die Reaktionszeiten der Hits ausgewertet. Die relativen Häufigkeiten und Reaktionszeiten richtiger Antworten in der Kontrollaufgabe wurden in getrennten Analysen ausgewertet.

Rekognitionsleistung

Die PR-Scores (Abbildung 20) wurden in einer $2 \times (2 \times 2)$ ANOVA mit den Variablen Modalität, Aufgabe und Setgröße analysiert. Die Analyse ergab signifikante Haupteffekte für alle drei Variablen. Bildmaterial wurden besser wiedererkannt als Töne [$F(1,26) = 7.71$, $MSE = .0830$, $p < .05$], die Objektaufgabe war leichter als die Positionsaufgabe [$F(1,26) = 52.79$, $MSE = .0151$, $p < .0001$] und Items aus 2er-Sets wurden öfter wiedererkannt, als die aus 4er-Sets [$F(1,26) = 46.75$, $MSE = .0264$, $p < .0001$]. Die Interaktion zwischen Aufgabe und Setgröße war signifikant [$F(1,26) = 11.83$, $MSE = .0126$, $p < .0005$], die 3-fach-Interaktion unter Beteiligung der Modalität nur marginal [$F(1,26) = 3.48$, $MSE = .0126$, $p < .08$].

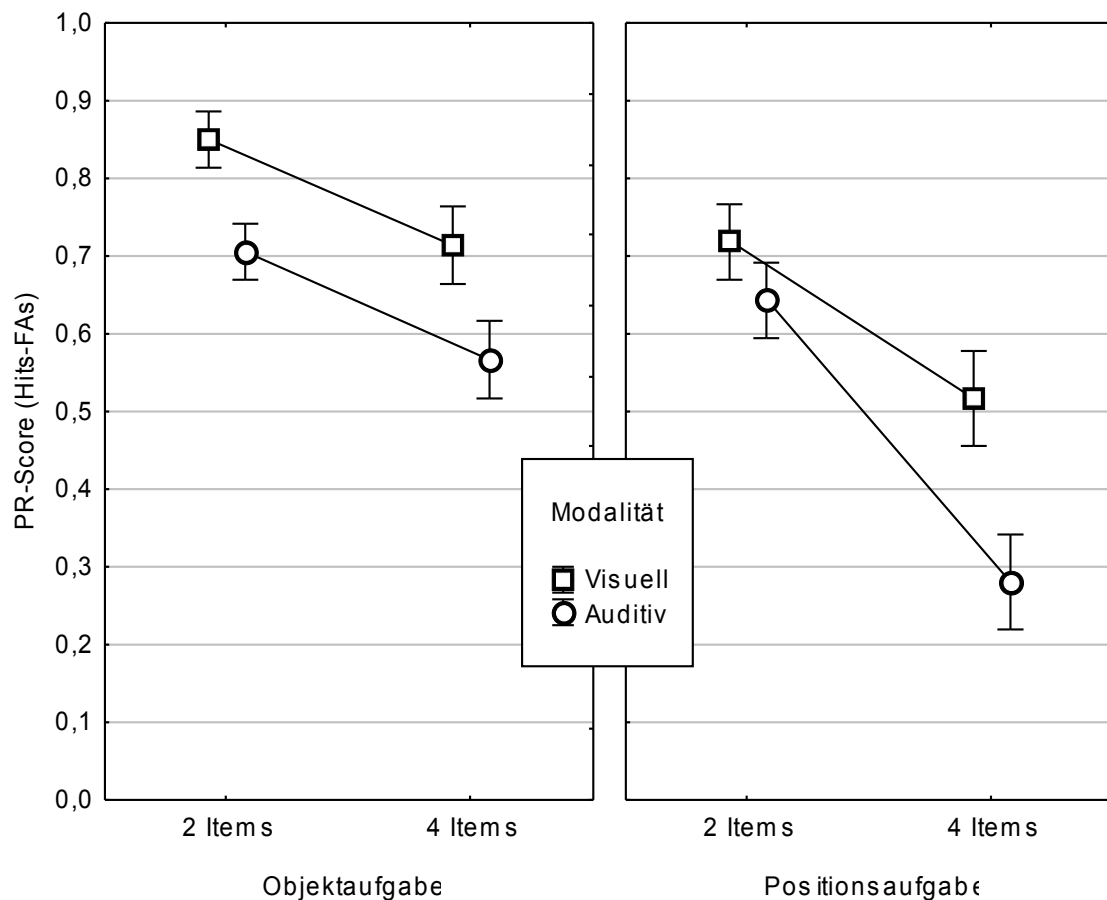


Abbildung 20: Rekognitionsleistung in Experiment 5. Mittelwerte und Standardfehler.

Reaktionszeiten der Hits

Auch die Reaktionszeiten der Hits (Abbildung 21) wurden in einer $2 \times (2 \times 2)$ ANOVA mit den Variablen Modalität, Aufgabe und Setgröße analysiert. Es fanden sich Haupteffekte für Modalität [$F(1,26) = 7.50$, $MSE = 374622$, $p < .05$], Aufgabe [$F(1,26) = 4.39$, $MSE = 13297$, $p < .05$] und Setgröße [$F(1,26) = 57.62$, $MSE = 16662$, $p < .0001$]. Die Aufgabe interagiert signifikant sowohl mit der Setgröße [$F(1,26) = 19.92$, $MSE = 13951$, $p < .0005$], als auch mit der Modalität [$F(1,26) = 34.33$, $MSE = 13297$, $p < .0001$].

Kontrollbedingung

Die Auswertung der Kontrollbedingung zeigte eine bessere Leistung in der Rechts-Links-Lokalisierung visueller (.97) als auditiver (.95) Items [$F(1,26) = 5.99$, $MSE = .0016$, $p < .05$]. Auch die Reaktionszeiten waren für visuelle Teststimuli (359 ms) geringer als für auditive (437 ms), [$F(1,26) = 8.548$, $MSE = 10037$, $p < .01$]. Zusätzlich wirkte sich die Länge der vorhergegangenen Lernliste auf die Reaktionszeiten aus. Nach 2er-Sets wurde

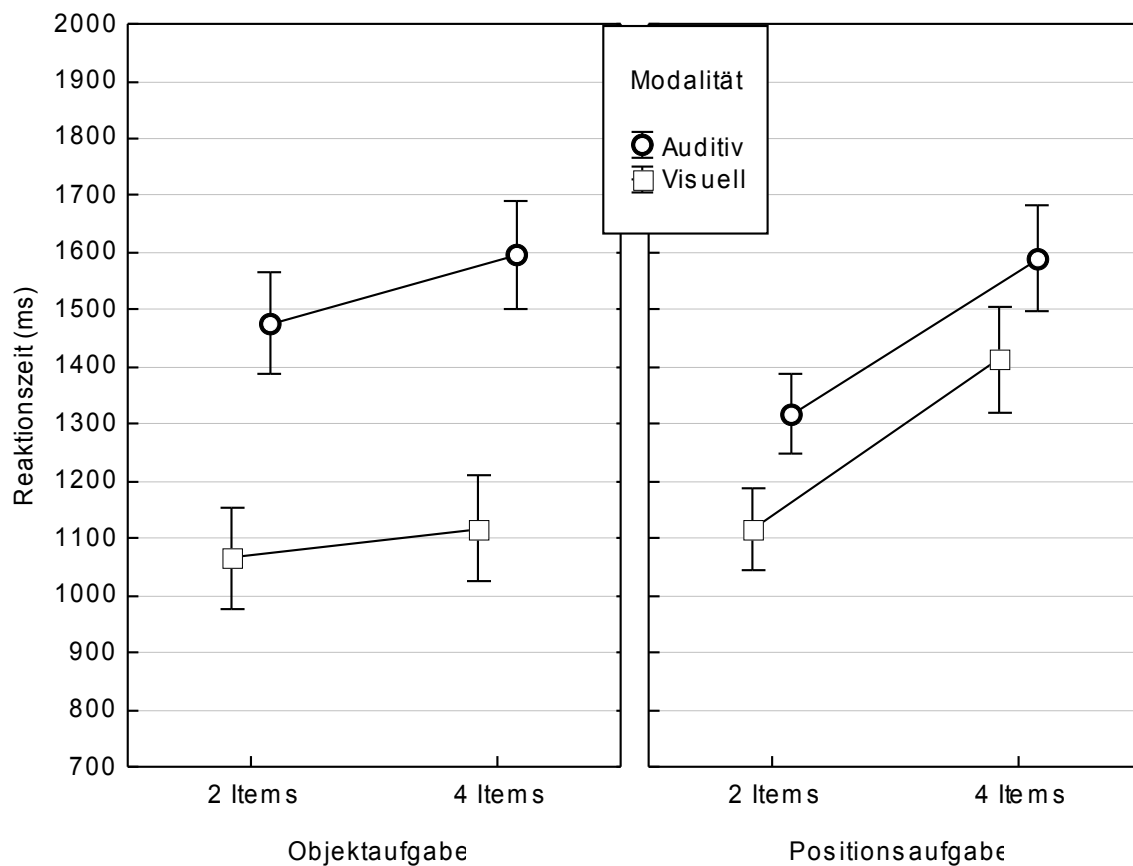


Abbildung 21: Reaktionszeiten der Hits in Experiment 5. Mittelwerte und Standardfehler.

auf die Kontrollaufgabe signifikant schneller reagiert (389 ms), als nach 4er-Sets (407 ms), [$F(1,26) = 5.238$, $MSE = 905$, $p < .05$].

Diskussion

Dass sich in der Kontrollaufgabe die Setgröße noch nach einem Intervall von mehr als 6 Sekunden, in welchem sich die Versuchspersonen keines der Items merken müssen, auf die Reaktionszeiten auswirkt, deutet darauf hin, dass das Behaltensintervall der Kontrollaufgabe nicht frei von Gedächtnisprozessen war. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Versuchspersonen den Cue nicht ausreichend beachtet haben und immer die gesamte Information (Objekt und Position) rehearsed haben, um in der Testphase – je nach Aufgabe – beides, nur die Objektinformation, oder keines von beidem zu verwenden. Dagegen sprechen jedoch die Unterschiede zwischen den beiden Gedächtnisaufgaben im Cue-EKP. Eine wahrscheinlichere Erklärung ist, dass die Versuchspersonen den Cue zwar beachtet haben, aber im Retentionsintervall der Kontrollaufgabe trotzdem Items rehearsed haben – sei es, um die Aufgabe absichtlich zu üben, oder aus Gewohnheit (Beibehaltung

des Task-Sets). Die unterschiedlichen Reaktionszeiten der Kontrollaufgabe kommen dann dadurch zustande, dass entweder in der 4er-Bedingung häufiger Items rehearsed wurden, oder der Wechsel des Task-Sets hin zur Kontrollaufgabe langsamer war, wenn das vorhergehende Rehearsal mehr Ressourcen beanspruchte.

Die Auswertung der beiden Rekognitionsaufgaben zeigt in beiden Verhaltensmaßen die erwarteten Haupteffekte, welche auch in den vorhergehenden Experimenten auftraten: Auditive Items sind schwerer zu unterscheiden und zu lokalisieren als visuelle Items und die Leistung nimmt mit zunehmender Gedächtnisbelastung ab. Interessant ist der Unterschied zwischen Identitäts- und Positionsaufgabe, welcher mit der Setgröße interagiert. Dies deutet darauf hin, dass Positionen nicht automatisch (oder mühelos) mitkodiert werden, sondern das Gedächtnis zusätzlich belasten. In der Positionsaufgabe verdoppeln sich mit der Erhöhung des Loads beide Informationsarten, Objekte und Positionen, so dass die Gesamtschwierigkeit exponentiell ansteigt – so dass der Load mit zunehmender Listenlänge zu einem stärkeren Leistungsabfall und längeren Reaktionszeiten führt, als in der reinen Objektaufgabe. Überraschend ist die Interaktion mit der Modalität, bzw. die unerwartet gute Leistung in der Positionsaufgabe für auditive 2er-Sets, welche zur Interaktion führt. Möglicherweise erleichterte die sensorische Kongruenz zwischen Lern- und Testdarbietung das Wiedererkennen oder die Positionen dienten in dieser Aufgabe als Abruf-Cue für die Objekte. In der reinen Objektaufgabe war eine solche sensorische Kongruenz nicht gegeben, da die Items in der Lernphase an ihren jeweiligen Positionen, in der Testphase aber von einer (virtuell) zentralen Schallquelle wiedergegeben wurden.

In Hinblick auf die EKP-Daten sprechen die Verhaltensdaten dafür, dass sich die Versuchspersonen in den beiden Gedächtnisbedingungen die geforderte Information über das Behaltensintervall hinweg gemerkt haben, so dass die EKPs im Sinne der experimentellen Bedingungen interpretiert werden dürfen. Die Kontrollbedingung hingegen zeigt Load-Variationen, die auf Aktivität im Behaltensintervall hindeuten, so dass die entsprechenden EKPs nicht wie geplant als Baseline-Aktivität betrachtet werden können. Auf die Kontrollaufgabe wird deshalb in den folgenden EKP-Auswertungen nicht weiter eingegangen.

EKP des Hinweisreiz

Die EKP zeigen im Anschluss an die P3-Komponente des Hinweisreizes eine positive Komponente, die mit den experimentellen Bedingungen variiert. Nach etwa 1000 ms geht die Aktivierung in ein langsames Potential über, das sich bis zum Ende des Retentionsintervalls zunehmend für die Experimentalbedingungen unterscheidet. (Das gesamte Retentionsintervall ist in den Abbildungen 24 und 25 auf S. 94 für die 9 ROIs dargestellt.) Nach visueller Inspektion der Daten wurde deshalb die mittlere Aktivität im Zeitfenster von 600 bis 1000 ms getrennt von der Aktivität des weiteren Retentionsintervalls ausgewertet.³⁰ Die EKP des Hinweisreiz und des beginnenden Retentionsintervalls an vier posterioren Einzelelektroden sind in Abbildung 22 für die visuelle Gruppe und in Abbildung 23 für die auditive Gruppe dargestellt. Die Cue-Darbietung erstreckt sich von 0 bis 500 ms.

Analysiert wurde die mittlere Aktivität im Intervall von 600 bis 1000 ms an den ROIs Posterior-Links (P5, P7, PO7) und -Rechts (P6, P8, PO8).³¹ Eine $2 \times (2 \times 2 \times 2)$ ANOVA mit den Variablen Modalität, Aufgabe, Setgröße und Lateralität (links vs. rechts) ergab signifikante Haupteffekte für Aufgabe [$F(1,26) = 21.85$, $MSE = 14.2$, $p < .0001$] und Setgröße [$F(1,26) = 14.80$, $MSE = 18.0$, $p < .001$]. Signifikante Effekte der Modalität oder Lateralität fanden sich nicht, ebensowenig Interaktionen [alle $F < 1.5$].

Diskussion

Der Haupteffekt der Setgröße ist schwer zu interpretieren, da sich bereits die Größe der P3 augenscheinlich nach Setgröße unterscheidet. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Versuchspersonen nach dem vierten Item bereits wussten, dass kein weiteres Item mehr folgen würde, während sie nach zwei Items noch nicht wussten, ob noch zwei weitere folgen oder ob der Hinweisreiz eingeblendet würde. Diese Unsicherheit wurde durch den Cue disambiguiert, was die deutlichere P3-Komponente erklärt. In der auditiven Bedingung scheint der Setgrößen-Effekt zumindest zum Zeitpunkt der P3 geringer zu sein,

³⁰ Zur Unterscheidung der aufeinander folgenden Komponenten P3, *Positive Slow Wave* (PSW) und *Late Slow Wave* siehe auch Ruchkin, Johnson, Mahaffey und Sutton (1988).

³¹ Eine weitere Analyse unter Einbezug aller 9 ROIs bestätigte, dass die Effekte von Aufgabe und Setgröße beide nach anterior abnehmen (jeweils 2-fach-Interaktionen mit der Variablen Anterior-Posterior), weshalb hier nur die posterioren ROI berichtet werden. Interaktionen höherer Ordnung traten nicht auf.

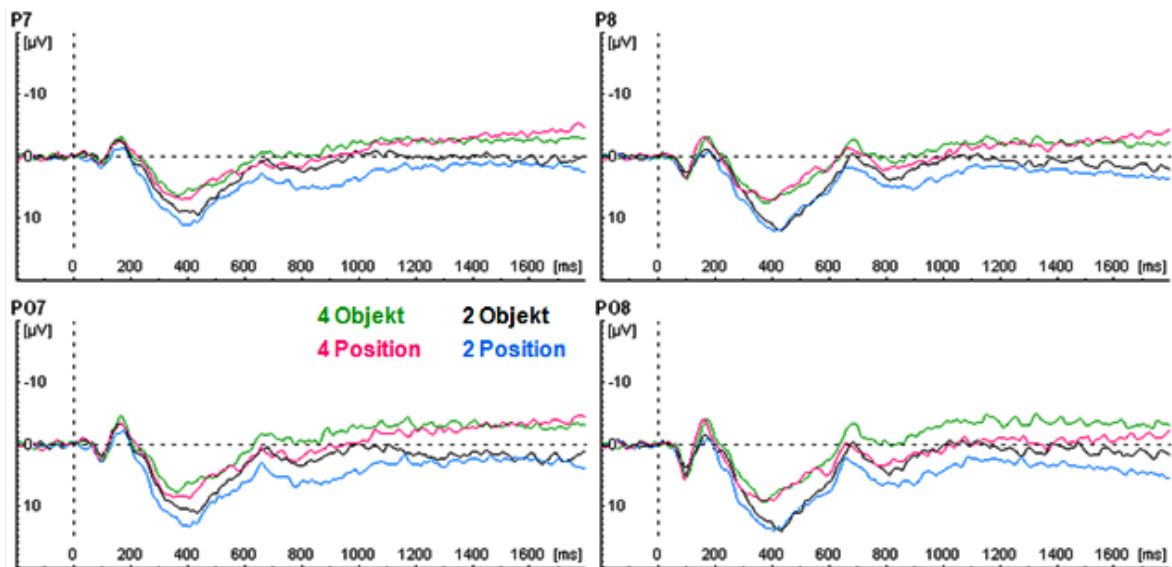


Abbildung 22: EKP des Hinweisreiz in den visuellen Bedingungen nach Setgröße und Aufgabe.

möglicherweise weil hier eine frühere Disambiguierung durch den Wechsel der Modalität stattfand, da der Cue auch hier visuell präsentiert wurde.

Der Haupteffekt der Aufgabe besteht in einem positiveren EKP nach Positions-Cue als nach Objekt-Cue. Da der Aufgaben-Cue anzeigt, welche Information für den nachfolgenden Test benötigt wird, kann dieser Effekt als Korrelat einer aufgabenspezifischen Konfiguration des AG interpretiert werden. Solche positiven LPs (*positive slow waves, PSW*) an posterioren Elektroden wurden in der Literatur mit einem

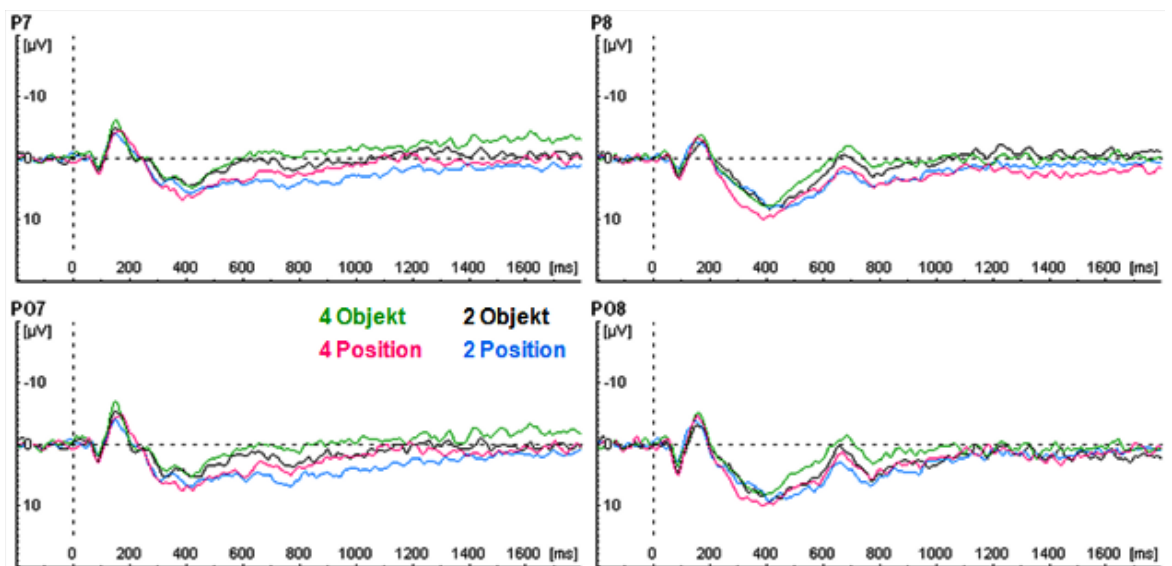
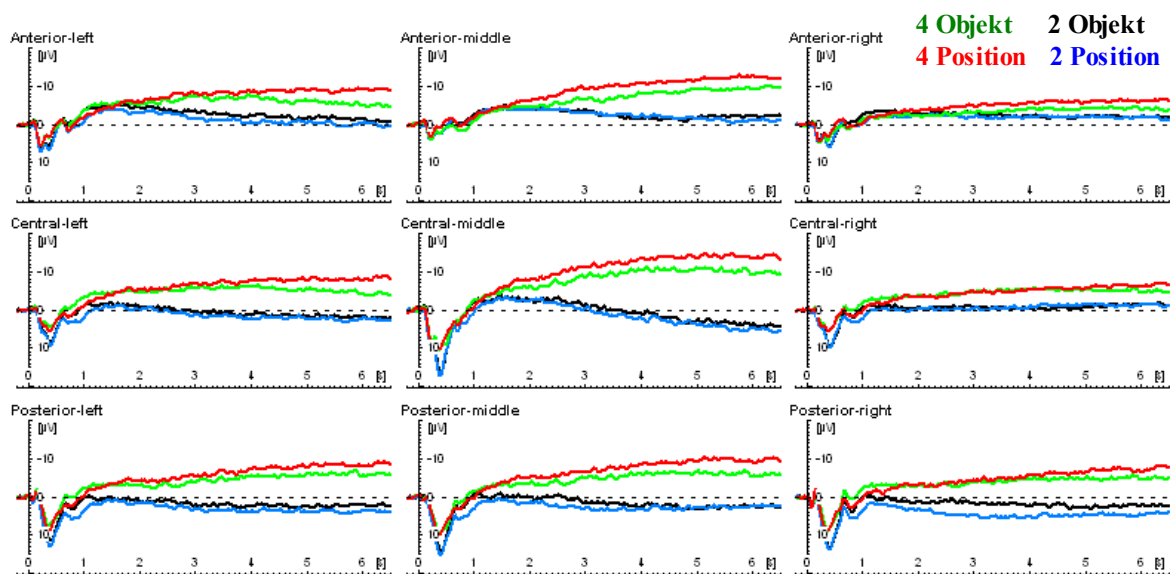
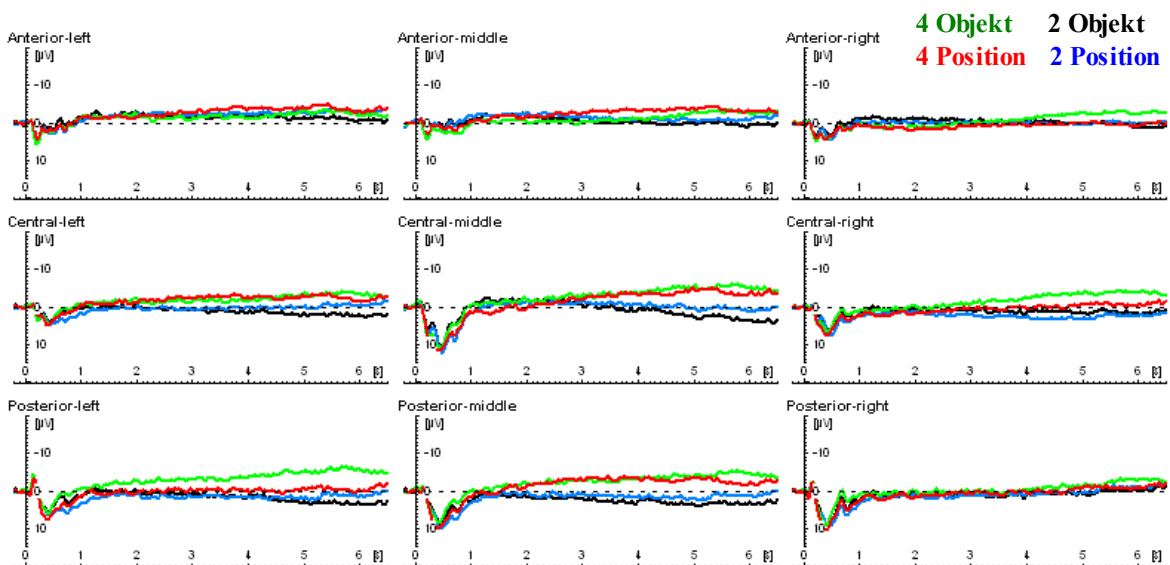


Abbildung 23: EKP des Hinweisreiz in den auditiven Bedingungen nach Setgröße und Aufgabe.

Abbildung 24: LP der visuellen Gruppe im Retentionsintervall

Updating des AG in Zusammenhang gebracht und variierten mit der Komplexität (nicht aber der subjektiven Schwierigkeit) der Aufgabe (García-Larrea & Cézanne-Bert, 1998; Rösler, Borgstedt, & Sojka, 1985). Auch im vorliegenden Fall scheint es sich nicht einfach um einen Effekt der allgemeinen Aufgabenschwierigkeit zu handeln. Denn dann sollten die erhöhte Schwierigkeit durch die Setgröße und durch zusätzliches Memorieren der Positionen in gleicher Richtung wirken; die EKP-Effekte sind jedoch gegenläufig. Zusätzlich sollte bei Effekten der Aufgabenschwierigkeit eine Interaktion zwischen beiden Variablen stattfinden, wie dies in den Rekognitionsleistungen beobachtet wurde. Auch dies ist nicht der Fall.

Abbildung 25: LP der auditiven Gruppe im Retentionsintervall

Eine stärker ausgeprägte PSW für räumliche als für nicht-räumliche Aufgaben an posterioren Elektroden wurde bereits zuvor in auditiven 'What vs. Where'-Studien berichtet und aufgrund ihrer Topografie mit dem dorsalen Pfad in Zusammenhang gebracht (Alain et al., 2001; Anurova et al., 2003). Diejenigen PSW, die in nicht-räumlichen Aufgaben gefunden wurden, zeigten hingegen eine (fronto-)temporale Topografie (Alain et al., 2001; Anurova et al., 2005).

Zusammenfassend kann die hier beobachtete posteriore PSW als Korrelat einer aufgabenspezifischen Konfiguration des AG aufgefasst werden, die sowohl in der auditiven als auch in der visuellen Gruppe stattfand und unterschiedliche Anforderungen bei Identitäts- und Positionsaufgabe stellte.

LP im Retentionsintervall

Die LP zeigen eine mit der Dauer des Retentionsintervalls zunehmende Differenz zwischen den experimentellen Bedingungen (s. Abb. 24 und 25). Zur weiteren Analyse wurde nach visueller Inspektion der EKP-Verläufe die mittlere Aktivität im Zeitfenster zwischen 3000 und 5000 ms nach Cue-Onset als abhängige Variable gewählt. Dieses Zeitintervall zeigt deutlich ausgeprägte Unterschiede zwischen den Bedingungen und ist hinreichend weit vom Ende des Retentionsintervalls entfernt, um wesentliche Einflüsse des Teststimulus (z.B. durch die Antwortvorbereitung) auszuschließen.

Die mittlere Aktivität wurde in einer $2 \times (3 \times 3 \times 2 \times 2)$ ANOVA mit den Variablen Modalität (auditiv vs. visuell), Anterior/Posterior (anterior, zentral, posterior), Lateralität (links, mitte, rechts), Aufgabe (Identität vs. Position) und Setgröße (2 vs. 4) analysiert. Alle Haupteffekte, sowie die signifikanten und marginal signifikanten Interaktionen (bis $p < .20$) sind in Tabelle 4 dargestellt.

Die langsamen Potentiale beider Modalitäten zeigen einen Haupteffekt der Setgröße: Gedächtnissets von zwei Items führten zu Potentialen nahe der Baseline, während 4er-Sets zu deutlichen Negativierungen führten. Die Negativierungen waren in der visuellen Gruppe (marginal signifikant) größer als in der auditiven.³²

³² Alle Interaktionen unter Beteiligung von Setgröße und Modalität (s. Tabelle 4) gehen darauf zurück, dass der Setgrößeneffekt durchgängig für die visuelle Gruppe größer ist als für die auditive. Eine disordinale Interaktion findet sich nicht, d.h. wo sich keine auditiven Load-Effekte finden, sind immer auch die visuellen verringert.

	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	ϵ
Modalität (Mod)	1,26	3.753	= .06	
Anterior/Posterior (AP)	2,52	7.090	< .01	.74
Lateralität (Lat)	2,52	6.737	< .005	.91
Aufgabe	1,26	< 1	<i>n.s.</i>	
Setgröße (Set)	1,26	12.54	< .005	
Set \times Mod	1,26	3.101	= .09	
AP \times Lat	4,104	1.599	= .20	.76
Lat \times Aufgabe	2,52	4.942	< .05	.84
AP \times Set	2,52	5.121	< .05	.78
Lat \times Set	2,52	13.25	< .0001	.96
Lat \times Set \times Mod	2,52	1.707	= .19	.96
AP \times Lat \times Set \times Mod	4,104	3.086	< .05	.77

Tabelle 4: ANOVA der langsamen Potentiale in Experiment 5

Die Haupteffekte und Interaktionen der Variablen AP und Lat verweisen darauf, dass sich in beiden Gruppen das Maximum des Load-Effekts an mittleren posterioren Elektroden findet (visuell: CPz und CP1, auditiv: Pz und P1; s. Abb. 26). Die Aktivierungen der Identitäts- und der Positions-Aufgabe unterscheiden sich nicht signifikant, es gibt jedoch eine Interaktion zwischen Aufgabe und Lateralität. An mittleren Elektroden waren die LP der Positionsaufgaben etwas negativer als die der Identitätsaufgaben, während sie rechtsseitig leicht positiver verliefen [Kontrast der Differenzen zentral vs. rechts: $F(1,26) = 8.265$, $MSE = 11.80$, $p < .01$]. An linkshemisphärischen Elektroden unterschieden sich die Aufgaben nicht.

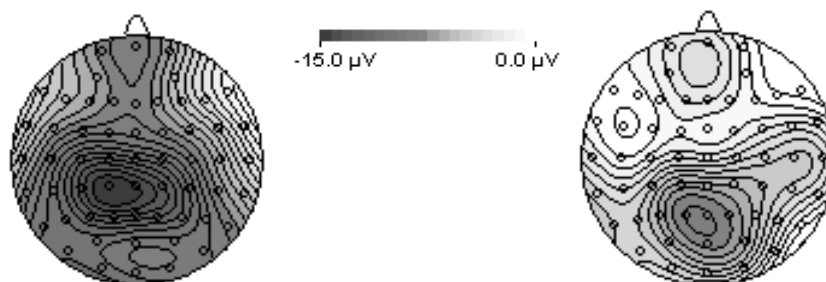


Abbildung 26: Load-Effekte im RI zwischen 4 und 5 s. Differenz der Aktivierung bei Setgröße 4 vs. 2. Links visuelle, rechts auditive Gruppe.

Diskussion

Im Retentionsintervall zeigten sich erneut deutliche Load-Effekte in Form negativer Potentiale, die in beiden Modalitäten eine ähnliche Topografie aufwiesen. Sie sprechen dafür, dass auch im vorhergehenden Experiment die negativeren Verläufe der 4er-Sets ein Korrelat erhöhter Aktivität waren, während die positiveren Verläufe geringere Verarbeitung anzeigten. In beiden Experimenten rief eine Belastung des AG mit dem vermuteten Maximum von vier Items einen negativeren Verlauf an posterioren Elektroden hervor. Sowohl eine Unter-, als auch eine Überforderung des AG scheint im Vergleich dazu zu einer relativen Inaktivität zu führen.

Zwischen visueller und auditiver Modalität fanden sich Unterschiede einerseits im quantitativen Ausmaß der Aktivität und andererseits in der genauen Lokalisierung der Load-Effekte. Die insgesamt geringeren Aktivierungen bei der auditiven Gruppe könnten eine Begleiterscheinung der größeren Aufgabenschwierigkeit sein. Wenn die Aufgabe insgesamt schwieriger ist, werden Versuchspersonen im Retentionsintervall öfter alternative Enkodierstrategien ausprobieren oder sich passiv verhalten, als bei einer einfacheren Aufgabe, bei der sie die einmal gewählte Strategie erfolgreich beibehalten können. Wenn dies der Fall ist, bilden die LP der visuellen Gruppe den Prozess gewissermaßen 'reiner' ab, als die LP der auditiven Gruppe, welche nicht in jedem Trial optimales Rehearsal nutzte.

Der Unterschied in der Lokalisierung des Load-Effektes ist schwierig zu interpretieren, da die Modalität bei diesem Experiment nicht innerhalb, sondern zwischen Versuchspersonen variiert wurde. Sowohl die Platzierung von Elektroden auf der Skalpoberfläche als auch die darunter liegenden Hirnareale weisen eine hohe Variabilität zwischen Versuchspersonen auf. Der Unterschied in den Maxima der Load-Effekte ist zu gering, um zwingend auf die Beteiligung unterschiedlicher Hirnareale zu schließen. Zwar lässt er ebenso wenig den umgekehrten Schluss einer Verarbeitung im gleichen Areal zu, doch erlaubt er zumindest die generelle Aussage, dass in beiden Modalitäten maximale Aktivierung im Bereich der mittleren zentro-parietalen bis parietalen Elektroden stattfand. Dies weist auf eine räumliche Verarbeitung im Parietallappen hin und spricht, da sich kein Maximum an okzipitalen Elektroden fand (s. Abb. 26), gegen die Hypothese einer Verarbeitung in visuellen Arealen.

Identitäts- und Positionsaufgabe unterscheiden sich trotz der Unterschiede in den behavioralen Daten und den PSWs nicht signifikant im Retentionsintervall. Anscheinend führt die schwierigere Positionsaufgabe nicht zu vermehrtem Rehearsal im Retentionsintervall, so wie es bei der größeren Gedächtnisbelastung durch 4er-Listen der Fall ist. Die Gleichheit in der Topografie der Aktivierungen deutet darauf hin, dass nicht nur das quantitative Ausmaß, sondern auch der Inhalt des Rehearsals bei Positions- und Identitätsaufgabe weitgehend gleich ist, d.h., dass wohl auch in der Identitätsaufgabe räumliche Information mit im AG gehalten wird. Möglicherweise nutzten die Versuchspersonen – begünstigt durch das Innerhalb-VP-Design – eine einheitliche Rehearsalstrategie für alle Aufgaben. Darauf wiesen bereits die Verhaltensdaten der Kontrollaufgabe hin, welche sich nach Setgröße unterschieden, obwohl diese irrelevant war (s. S. 90). Gegen eine völlige Gleichbehandlung der Aufgaben sprechen jedoch die unterschiedlichen PSW auf den Aufgabencue hin, sowie die signifikante Interaktion zwischen den Variablen Lateralität und Aufgabe. Die posterioren Unterschiede zwischen mittlerer und rechter ROI könnten dabei auf eine Lokalisierung der räumlichen Verarbeitung in rechts-parietalen Arealen deuten (vgl. Alain et al., 2008; Smith et al., 1995).

7.2.4 Gemeinsame Diskussion

Betrachtet man die PSW der Enkodierphase, die LP im Behaltensintervall und die behavioralen Maße des Gedächtnisabrufs zusammen, so zeigen sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den einzelnen Phasen der Gedächtnisaufgaben. Über alle drei Phasen hinweg zeigen die visuelle und auditive Gruppe qualitativ ähnliche Ergebnisse, wobei sowohl die Leistung als auch die elektroфизиologische Aktivierung in der auditiven Gruppe quantitativ niedriger ist, als in der visuellen. Die parietale Topografie von PSW und LP in den räumlichen Aufgaben deutet darauf hin, dass für räumliche Gedächtnisaufgaben beider Modalität die gleichen (identischen oder nahe bei einander liegenden) parietalen Hirnregionen aktiviert werden. Überraschend ist, dass sich in beiden Gruppen die Identitäts- und die Positionsaufgabe zwar in den PSW des Aufgabencue, nicht aber in den LP des Retentionsintervalls unterscheiden. Da die Probanden auch in der Lernphase der Identitätsaufgabe bis zum Aufgabencue die Positionen mit enkodiert haben, ist es wahrscheinlich, dass sie diese Information im Behaltensintervall nutzten – etwa weil es ihnen half, die Objekte besser zu unterscheiden. So könnten sie beispielsweise die

Objekte in Reihenfolge ihrer Positionen rehearsen, um sicher zu gehen, keines auszulassen. Die Bindung von Objekten und ihren Orten kann nicht nur dem Positionsgedächtnis dienen, sondern auch als Unterscheidungsmerkmal für die Objekte selbst – in ähnlicher Weise wie in der Wahrnehmung räumliche Information genutzt wird, um Ambiguitäten zwischen Objekt-Features aufzulösen (Shafritz, Gore, & Marois, 2002).

8 Allgemeine Diskussion

8.1 Überblick

8.1.1 Fragestellung

Allgemein formuliert stellt die vorliegende Arbeit die (titelgebende) Frage nach dem Einfluss der Sinnesmodalität wahrgenommener Objekte auf das nachfolgende Erinnern der räumlichen Positionen, an welchen diese Objekte wahrgenommen wurden. Die räumlichen Positionen werden dabei in den verschiedenen Sinnesmodalitäten aus ganz unterschiedlichen 'Rohdaten' errechnet, so dass die Frage berechtigt erscheint, wie sich diese Unterschiede in der Wahrnehmung auf höhere Stufen der Verarbeitung, wie das Arbeitsgedächtnis, auswirken. Für das verbale Arbeitsgedächtnis etwa wurden solche Einflüsse der Wahrnehmungsmodalität nachgewiesen (Penney, 1989). Die vorliegende Arbeit orientiert sich an zwei Modellvorstellungen zum räumlichen Arbeitsgedächtnis: dem multimodalen AG-Modell und dem Dissoziationsmodell des 'What & Where'. Dabei handelt es sich eher um Modellfamilien, denn um geschlossene Modelle. Vor allem die multimodale Gedächtnistheorie erlaubt je nach Entwicklungsstand und Autor unterschiedliche Aussagen bezüglich der vorliegenden Fragestellung. So wurde die räumliche Komponente zu Beginn als a-modal aufgefasst, später hingegen als modalitätsspezifische, visuell-räumliche Komponente. Nach Sichtung der Literatur lässt sich die Ausgangsfragestellung folgendermaßen spezifizieren: Werden Objektpositionen im Arbeitsgedächtnis modalitätsspezifisch verarbeitet oder a-modal – und geschieht dies für auditive und visuelle Objekte gemeinsam oder getrennt?

8.1.2 Verhaltensdaten

Experiment 1 lieferte erste Evidenz dafür, dass das AG für auditive und visuelle Objektpositionen den gleichen Gesetzen gehorcht. Beide Modalitäten zeigten vergleichbare Load-Effekte mit zunehmender Größe des Gedächtnissets. Weiterhin zeigte sich, dass eine Verteilung der Gedächtnisbelastung auf beide Modalitäten keinen Behaltensvorteil brachte – wie es der Fall sein sollte, wenn den beiden Modalitäten auch zwei (zumindest partiell) unabhängige Gedächtnissysteme für räumliche Positionen entsprächen. Als einziger Unterschied zwischen den Modalitäten fand sich eine bessere

Relokalisierungsleistung für visuelle Stimuli, die in diesem Ausmaß auch in Lokalisierungsaufgaben ohne Gedächtnisanforderung auftrat und somit nicht als Hinweis auf getrennte Gedächtnissysteme gewertet werden kann.

Um dem Einwand zu begegnen, dass die Gemeinsamkeiten zwischen den Modalitäten auf eine gemeinsame Benennung der – semantisch identischen – auditiven und visuellen Objekte zurückgeht, wurde in Experiment 2 das Stimulusmaterial verändert. Die neuen Stimuli stellten keine natürlichen Objekte dar und sollten daher erstens schwerer zu benennen sein und zweitens keine gemeinsamen verbalen 'Etikettierungen' für auditive und visuelle Stimuli erlauben. Die schwerere Benennbarkeit sollte sich mit zunehmender Setgröße verstärkt bemerkbar machen (da jedes einzelne Item schwieriger wird) und somit zu einem stärkeren Abfall mit zunehmendem Load führen. Dies war nicht der Fall, wie eine gemeinsame Analyse von Experiment 1 und 2 zeigte. Das neue Stimulusmaterial führte zu einem Haupteffekt, der nicht mit der Setgröße interagierte. Das Ergebnismuster entsprach ansonsten dem von Experiment 1 und sprach damit gegen einen wesentlichen Effekt der Benennung.

Das Ergebnismuster zeigte auch in beiden Experimenten einen Vorteil für auditive Items aus 4er-Sets gemischter Modalität gegenüber solchen rein auditiver Modalität. Dies wurde dahingehend interpretiert, dass das nahezu perfekte Erinnern der visuellen Items in den gemischten Sets die Möglichkeiten zur Positionierung der beiden auditiven Items stark einschränkte und somit die Basiswahrscheinlichkeit richtiger Antworten erhöhte. In Experiment 3 wurde diese Interpretation empirisch geprüft. Eine systematische Variation der jeweils möglichen Testpositionen zeigte, dass sich die tatsächliche Gedächtnisleistung auch bei auditiven 4er-Sets nicht zwischen reinen und gemischten Listen unterschied. Wenn die Basiswahrscheinlichkeiten gleich waren, zeigten sich bei gleicher Setgröße gleiche Leistungen.

8.1.3 Langsame Potentiale

Experiment 4 war das erste von zwei EKP-Experimenten. Die neue Methodik versprach, die in den behavioralen Experimenten gewonnenen Erkenntnisse einerseits bestätigen oder falsifizieren zu können, andererseits aber auch zu erweitern. Bestätigen insofern, als eine gemeinsame Verarbeitung der räumlichen Information beider Modalitäten sich auch in einer gleichartigen Aktivierung im EKP abbilden sollte. Die behavioralen Daten liesen die

Möglichkeit offen, dass die sehr ähnlichen Leistungen trotz allem durch unterschiedliche kognitive und neuronale Prozesse zustande kamen. Eine Erweiterung der gewonnenen Erkenntnisse versprachen die EKP-Studien insofern, als die behavioralen Daten starke Evidenz für eine gemeinsame Verarbeitung lieferten, allerdings keine Aussage darüber erlaubten, welcher Art diese Prozesse sind. Die Zuordnung zu beteiligten Hirnarealen sollte eine genauere Auskunft über zugrunde liegende Prozesse erlauben, als die behavioralen Daten. Experiment 4 wurde mit dem gleichen Design und Stimulusmaterial durchgeführt wie Experiment 1 und ergab vergleichbare Verhaltensdaten. Im EKP zeigte sich ein Modalitätseffekt in den langsamen Potentialen der Lernphase, die an frontalen Elektroden eine hohe Item-weise Aktivität für auditive Stimuli zeigten, für visuelle Stimuli hingegen eine kumulativ zunehmende Aktivität über die gesamte Stimuluspräsentation. Diese LP wurden im Sinne exekutiver Prozesse interpretiert, welche in der schwierigeren auditiven Aufgabe bei der Enkodierung der Items jeweils maximale Aktivität zeigen, während sie in der visuellen Aufgabe erst mit zunehmender Anzahl an Items, welche kumulativ rehearsed werden, ihrem Maximum zustreben. Die LP des Behaltensintervalls zeigten an parietalen bis okzipitalen Elektroden gleiche Aktivierungen für auditive und visuelle Trials. Die Potentiale der 4er-Sets verliefen negativer als die der 6er-Sets, was so interpretiert wurde, dass nur bei den 4ern Rehearsal stattfand, während die 6er aufgrund der Überladung des AG passiv verarbeitet wurden. Das aktive Rehearsal wurde anhand der Topografie als visuell-räumliches identifiziert. An frontalen Elektroden zeigte sich eine Positivierung, die mit der allgemeinen Aufgabenschwierigkeit variierte und als Korrelat amodaler Kontrollprozesse angesehen wurde, die etwa der Bildung von episodischen Gedächtnisspuren dienen könnten.

Für Experiment 5 wurde das Experimentaldesign gegenüber den vorherigen Experimenten stark verändert. Die wichtigste Veränderung bestand darin, dass die Modalität nicht innerhalb, sondern zwischen Versuchspersonen variiert wurde, um die Entwicklung einer gemeinsamen Strategie für Stimuli beider Modalitäten auszuschließen. Eine weitere Änderung bestand in der Einführung einer zusätzlichen, nicht-räumlichen Aufgabe, in der statt der Objekt-Orts-Bindung die Objektidentität abgefragt wurde. Dies sollte Aussagen darüber erlauben, ob die räumliche Information gemeinsam mit der Objektinformation verarbeitet wird (wie für das VSSP angenommen) oder zusätzliche Prozesse stattfinden. Auch in Experiment 5 fanden sich keine deutlichen qualitativen Unterschiede zwischen der

visuellen und auditiven Bedingung. Die PSWs unmittelbar nach Präsentation des Aufgaben-Cue unterschieden sich in beiden Gruppen nach Setgröße und nach Art der Aufgabe. Die anschließenden LP des Retentionsintervalls differenzierten nicht mehr zwischen Identitäts- und Ortsaufgabe, zeigten aber einen Load-Effekt mit höherer Negativierung bei 4er-Sets als bei 2er-Sets. Die Aktivierungen hatten ihr Maximum an parietalen Elektroden der Mittellinie und wurden als Korrelat einer unabhängig von der Aufgabe stattfindenden räumlichen Verarbeitung (Objekt-Orts-Bindung) interpretiert.

8.2 Diskussion

8.2.1 Gemeinsame Betrachtung

Betrachtet man die Ergebnisse aller fünf Experimente zusammen, so ergibt sich das Bild einer gemeinsamen Verarbeitung von auditiver und visueller Ortsinformation. Uneinheitlich sind hingegen die Aussagen der beiden EEG-Studien darüber, wie diese Verarbeitung genau stattfindet. Einzeln betrachtet ergänzt sich jedes der beiden EEG-Experimente gut mit den Verhaltensdaten. Dabei kann man das Verhältnis von behavioralen und EKP-Studien auch von einer anderen Seite her betrachten, als dies bisher geschehen ist. Nicht nur geben die EKPs genauere Auskunft darüber, welcher Natur die behavioral gefundene gemeinsame Verarbeitung ist, sondern umgekehrt helfen auch die behavioralen Daten, die EKPs zu interpretieren. So lassen die EKPs aufgrund ihrer geringen räumlichen Auflösung die Möglichkeit offen, dass die Aktivierungen nicht im selben Hirnareal lokalisiert sind, sondern in nahe beieinander liegenden parallel verlaufenden Systemen für beide Modalitäten. Gegen solche parallel nutzbaren Systeme sprechen nun aber die Ergebnisse aus dem Mixed-List-Design der Verhaltensstudien, die keinen Vorteil für gemischte Listen zeigen, wie er bei der Nutzung zweier Systeme auftreten sollte. Behaviorale und EKP-Experimente liefern somit konvergierende Evidenz dafür, dass das Behalten von Objektpositionen im Arbeitsgedächtnis modalitätsübergreifend geschieht: Auditives und visuelles räumliches AG nutzen die gleichen Verarbeitungsnetzwerke in frontalen und posterioren Gehirnarealen.

8.2.2 Unterschiede im EKP

Die Unterschiede zwischen den beiden EKP-Studien legen nahe, dass die beteiligten Hirnareale in Abhängigkeit von der Art der Aufgabe variieren können. Es scheint, dass in

der Relokalisierungs-Aufgabe von Experiment 4, in der Objekte ihren ursprünglichen Positionen zugeordnet wurden, und der Rekognitions-Aufgabe von Experiment 5, in der Objekt-Orts-Kombinationen als alt wiedererkannt wurden, unterschiedliche Informationen genutzt oder zumindest unterschiedlich gewichtet wurden. Die okzipitalen Aktivierungen in Experiment 4 sprechen für eine visuelle Rekodierung auditiver Items und anschließendes visuell-räumliches Rehearsal für Items beider Modalitäten. Die parietalen Aktivierungen in Experiment 5 deuten hingegen auf die Beteiligung eines a-modalen Prozesses für die Objekt-Orts-Bindung hin. In der Literatur wurden okzipitale Aktivierungen im EKP vor allem im Zusammenhang mit visuellem oder visuell-räumlichem Imagery berichtet (Farah, Peronnet, Gonon, & Giard, 1988; Farah et al., 1989; Uhl et al., 1990). Parietale Aktivierungen fanden sich hingegen durchgängig als EKP-Korrelat des Positionsgedächtnisses in Studien zum dorsalen Verarbeitungspfad (s. S. 34). Es ist somit anzunehmen, dass in Experiment 4 visuell-räumliches Imagery genutzt wurde, um die Objekte in ihrer räumlichen Anordnung zu erinnern, in Experiment 5 hingegen die typische Aktivierung für räumliches Gedächtnis ohne Nutzung von Imagery-Strategien zu beobachten ist. Es ist möglich, dass die letztgenannten Prozesse auch in Experiment 4 auftraten, sich aber im parieto-okzipitalen Potential nicht deutlich von der weiter okzipital gelegenen Aktivierung durch Imagery differenzieren ließen. In diesem Fall wären in beiden Experimenten parietale Aktivierungen (im dorsalen Pfad) als Korrelat des räumlichen Gedächtnisses vorhanden – im Sinne eines a-modales Gedächtnisses für Positionen, bzw. Objekt-Orts-Bindung. Das visuelle Imagery wäre dann ein zusätzlich genutzter, aber für die Objekt-Orts-Bindung nicht notwendiger, AG-Prozess, der in der einen Aufgabe genutzt wird, in der anderen jedoch nicht. Die leichte Imaginierbarkeit des in Exp. 4 genutzten Stimulusmaterials beider Modalitäten mag den Einsatz von visuellem Imagery als Gedächtnishilfe gefördert haben. In Exp. 5 war hingegen schlechter imaginierbares Stimulusmaterial gewählt worden. Im visuellen Fall war es weniger ikonisch, da es keine leicht unterscheidbaren Prototypen darstellte, und im auditiven Fall entzog es sich einer einfachen visuellen Rekodierung, da die Items eines Gedächtnissets jeweils der selben Kategorie entstammten (z.B. Gitarrenklänge) und somit keine unterscheidbaren visuellen Gegenstücke besaßen.

8.2.3 Zugrundeliegende Prozesse

Im vorausgehenden Abschnitt wurden die Ergebnisse bereits mit denen von EKP-Studien zum visuellen Imagery und zum dorsalen Verarbeitungspfad in Beziehung gesetzt. Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse weiterer EKP- und auch bildgebender Studien herangezogen werden, um genauer zu beleuchten, welche Hirnareale am Zustandekommen der beobachteten Potentiale beteiligt sein könnten und mit welchen Prozessen diese Areale in Zusammenhang gebracht werden.

Die okzipitalen Aktivierungen lassen sich recht eindeutig als Korrelat von visuellem Imagery identifizieren, da sich für die Aktivierung visueller Areale in Abhängigkeit von der Gedächtnisbelastung keine einfache Alternativerklärung finden lässt. Lang et al. (1992) fanden parieto-okzipitale Negativierungen sowohl in visuellen, als auch in auditiven AG-Aufgaben wenn die Versuchspersonen visuelles Imagery nutzten, nicht aber, wenn sie andere Strategien berichteten. Außer in den bereits genannten Studien, die sich direkt mit Imagery beschäftigten, wurden auch in bildgebenden Studien zu 'What & Where' häufig okzipitale Aktivierungen in den räumlichen Aufgaben gefunden. Wager und Smith (2003) interpretieren diese in ihrer Metaanalyse ebenfalls im Sinne von visuellem Imagery. Die parietale Aktivierung lässt sich nicht so eindeutig interpretieren wie die okzipitale. Zwar wurden in den Studien zur Dissoziation von 'What' und 'Where' parietale Aktivierungen überwiegend als Korrelat des Positionsgedächtnisses gefunden, während das Objektgedächtnis mit weiter dorsal gelegenen Aktivierungen einherging. Es gibt jedoch auch Ausnahmen: In den PET-Studien der Gruppe um John Jonides führten sowohl visuell-räumliches (Jonides et al., 1993), als auch verbales (Awh et al., 1996) und Objektgedächtnis (Smith & Jonides, 1995) zu parietalen Aktivierungen. Die Ergebnisse mahnen somit zur Vorsicht, dass parietale Aktivierung nicht per se im Sinne räumlicher Verarbeitung interpretiert werden kann. Die Aktivierungen in den drei Studien unterschieden sich jedoch in der Lateralität: Verbales und Objektgedächtnis führten zu stärkerer Aktivierung in der linken Hemisphäre, räumliches Gedächtnis zu stärkerer Aktivierung in der rechten. Möglicherweise ist es diese Hemisphärenspezialisierung, die in der Interaktion zwischen Lateralität und Aufgabe in Experiment 5 sichtbar wird.

Eine parietale Region, welche für die in den vorliegenden Experimenten stattfindende, modalitätsübergreifende räumliche Verarbeitung zuständig sein könnte, ist der intra-parietale Sulcus (IPS). Im IPS wurde Aktivität während der Konstruktion und

Manipulation räumlicher Vorstellungen beobachtet (vgl. den Überblick bei Zimmer, 2008), so dass man ihn als das für *räumliches* Imagery zuständige parietale Areal identifizieren könnte, welches Farah (1988) dem okzipitalen *visuellen* Imagery gegenüberstellte. Vielleicht noch wichtiger im gegebenen Zusammenhang ist, dass in vielen Studien, welche auditive und visuelle räumliche Verarbeitung direkt verglichen haben, Aktivität im IPS oder angrenzenden Regionen gemessen wurde. So etwa in Aufgaben der unmittelbaren und verzögerten räumlichen Lokalisierung (Bushara et al., 1999) und in räumlichen *n-back*-Aufgaben (Martinkauppi, Rämä, Aronen, Korvenoja, & Carlson, 2000), aber auch in einer cross-modalen räumlichen Aufgabe, bei der auditive und visuelle Stimuli miteinander verglichen werden mussten (Sestieri et al., 2006). Der IPS ist aber auch eine Region, die bei modalitätsübergreifender Bewegungsverarbeitung aktiv ist (Bremmer et al., 2001; für ein Review siehe Macaluso & Driver, 2005) und ist möglicherweise für Feature Binding anhand räumlicher Übereinstimmung zuständig. Shafritz et al. (2002) stellten fest, dass die Verarbeitung von visuellen Merkmals-Konjunktionen den IPS und superiore parietale Regionen aktivierte – Regionen, die auch während räumlicher Aufmerksamkeit aktiv waren. In der Merkmalsbindungs-Aufgabe waren diese Regionen nur dann aktiv, wenn mehrere Objekte gleichzeitig an verschiedenen Orten gezeigt wurden, nicht aber, wenn sie sequentiell am selben Ort gezeigt wurden. Mit anderen Worten: in einer nicht-räumlichen Aufgabe wurde nur dann IPS-Aktivität beobachtet, wenn die räumlichen Positionen als Hilfe zur Merkmalsbindung herangezogen werden konnten. Es scheint also, dass diese Regionen der räumlichen Verarbeitung dienen, aber auch in nicht-räumlichen Aufgaben genutzt werden, um Objekte dadurch zu diskriminieren, dass ihre Merkmale an die jeweiligen Positionen gebunden werden. In der Diskussion zu Exp. 5 wurde bereits angesprochen, dass auch dort das Mitenkodieren der Positionen zu einer erhöhten Diskriminierbarkeit der Objekte führt, was erklären könnte, warum sich kaum Unterschiede zwischen der räumlichen und der nicht-räumlichen Aufgabe finden.

8.2.4 Modelle: VSSP

Im Zusammenhang mit der Aktivität des visuellen Cortex in Exp. 4 wurde häufig von der *Rekodierung auditiver Items* gesprochen. Dies sollte nicht so verstanden werden, dass umgekehrt die visuellen Stimuli in dem Format verbleiben, in dem sie wahrgenommen wurden, und quasi *direkt* dem visuellen Imagery zugeführt werden. Nach den Modellen zum visuell-räumlichen AG – insbesondere von Logie und Pearson – bestehen die Bilder

des visuellen Imagery nicht einfach aus den Sinnesdaten der Wahrnehmung. Auch die visuellen Items müssen also erst 'rekodiert' werden, bevor sie Gegenstand von Imagery werden können. Nach Logie (z.B. 2003) sind die visuellen Vorstellungen des Visual Cache immer schon semantisch interpretiert, d.h., dieser ist nur über das LZG und nicht direkt von der Wahrnehmung aus zugänglich (vgl. Abb. 2, S. 14). Pearson (2001) differenziert das Modell weiter und unterscheidet zwischen dem Visual Cache, der keine bewussten Bilder beinhaltet, und einem Visual Buffer, in dem Imagery stattfindet. Auch Baddeley (2002) sieht Imagery nicht als reine Funktion des VSSP. Aufgrund des Einflusses des LZG auf visuelles und auditives Imagery (Baddeley & Andrade, 2000) weist er dem vermittelnden Episodic Buffer eine wesentliche Rolle beim Imagery zu. In den letzten beiden Modellen ist somit die für Imagery zuständige Komponente nicht mit dem visuellen AG identisch. Es handelt sich beim visuellen Imagery nicht nur für die auditiven, sondern auch für die visuellen Items um einen zusätzlichen Verarbeitungsschritt. Das AG-Modell kann somit erklären, warum okzipitale Aktivierungen in manchen AG-Studien gefunden wurden und in anderen nicht. Visuelles Imagery ist ein fakultativer Verarbeitungsschritt, der kein notwendiger Bestandteil des visuell-räumlichen (geschweige denn des auditiv-räumlichen) AG ist, sondern von den Versuchspersonen – bei entsprechender Imaginierbarkeit der Stimuli – zusätzlich genutzt werden kann. In der Terminologie des AG lassen sich die Ergebnisse von Exp. 4 so interpretieren, dass visuell-räumliches Imagery im Visual Buffer (sensu Pearson) genutzt wird, um Objekte an ihren Orten zu erinnern. Die Objekte können etwa in Form einer räumlichen Konfiguration visuell vorgestellt werden (vgl. Zimmer & Lehnert, 2006). In Exp. 5 hingegen fanden sich keine Hinweise auf visuelles (okzipitales) Imagery.³³ In Pearsons Modell könnte in diesem Fall der Visual Cache die Objekt-Orts-Bindungen aufrecht erhalten. Die Trennung von Visual Buffer und Visual Cache in Pearsons Modell kann dem Ergebnis Rechnung tragen, dass es Gedächtnis für Objektpositionen mit und ohne okzipitale Aktivierungen (Imagery) gibt. In den Modellen von Logie und Baddeley lässt sich dies nicht so einfach erklären. Da die Inner Scribe rein räumliche Information verarbeitet, müsste in beiden Fällen der Visual Cache für die Aufrechterhaltung der visuellen Objektinformation verantwortlich sein. Wenn diese Art der Verarbeitung einmal mit und einmal ohne visuelles Imagery geschieht,

³³ Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die räumliche Information auf eine Weise rehearsed wird, die man im weiteren Sinne auch als Imagery bezeichnen könnte. So spricht etwa Farah (1988) von einem räumlichen (parietalen) Imagery.

bzw. unterschiedliche hirnpfysiologische Korrelate aufweist, lässt sich die Annahme jedoch nicht aufrecht erhalten, dass der Visual Cache ein einheitliches Repräsentationsformat besitzt. Eine einzelne Komponente mit einem einheitlichen Repräsentationsformat wird den Ergebnisse nicht gerecht. Unter Zuhilfenahme des Episodic Buffer könnte man die Ergebnisse so erklären, dass in Exp. 4 der Visual Cache (okzipital) die Objekt-Orts-Konfigurationen aufrecht erhalten hat, in Exp. 5 hingegen die räumliche Information des Inner Scribe (parietal) unter Beteiligung des Episodic Buffer an LZG-Einträge, bzw. semantische Information über die Objekte gebunden wurden. Vergleicht man die beiden Erklärungen anhand der Modelle von Pearson, bzw. Logie und Baddeley, so unterscheiden sie sich (jenseits der Terminologie) in einem kritischen Punkt: Der Frage, ob auch die Verarbeitung ohne visuelles Imagery, so wie sie in Exp. 5 stattfand, im *visuellen* AG stattfindet, oder ob die Objektinformation *a-modal*, über semantische LZG-Einträge, erinnert wird. Wenn die Verarbeitung visueller Natur wäre, würde sich die Frage anschließen, ob die auditive Objektinformation wiederum rekodiert wurde, oder nicht. Diese Fragen lassen sich anhand der Experimentalergebnisse von Exp. 5 nicht eindeutig beantworten. Da die parietalen LP als Korrelat der *räumlichen* Verarbeitung identifiziert wurden und sich keine weiteren Aktivierungen davon unterscheiden ließen, lässt sich die genaue Verarbeitung der *Objekt*-Information letztendlich nicht aufklären.³⁴

8.2.5 Modelle: What & Where

Die Forschung zum dorsalen und ventralen Verarbeitungspfad im AG, wie sie zu Beginn dargestellt wurde, ließ zwei Fragen offen, die für die vorliegende Arbeit relevant sind. Die erste ist die Frage nach der Modalitätsspezifität der Verarbeitung. Wenn räumliche Information schon früh von der visuellen und auditiven Objektinformation getrennt wird, dann besteht die Möglichkeit, dass räumliche Information modalitätsübergreifend weiterverarbeitet wird. Modalitätsspezifische Verarbeitung, wie sie Penney (1989) für das verbale AG berichtet hat, wäre dann ein Folgeprodukt der ventralen Objektverarbeitung und im räumlichen AG nicht nachzuweisen. Die hier berichteten Ergebnisse legen tatsächlich nahe, dass visuelle und auditive räumliche Information ein gemeinsames System nutzen – was sich in der Ressourcenbeschränkung des Arbeitsgedächtnis

³⁴ Ich tendiere jedoch zur Annahme der zweiten, a-modalen Interpretation – wenn auch nur aufgrund der Abwesenheit modalitätsspezifischer Aktivierungen und wegen Vorbehalten gegenüber dem Konzept zweier unterschiedlicher visueller Repräsentationsformate.

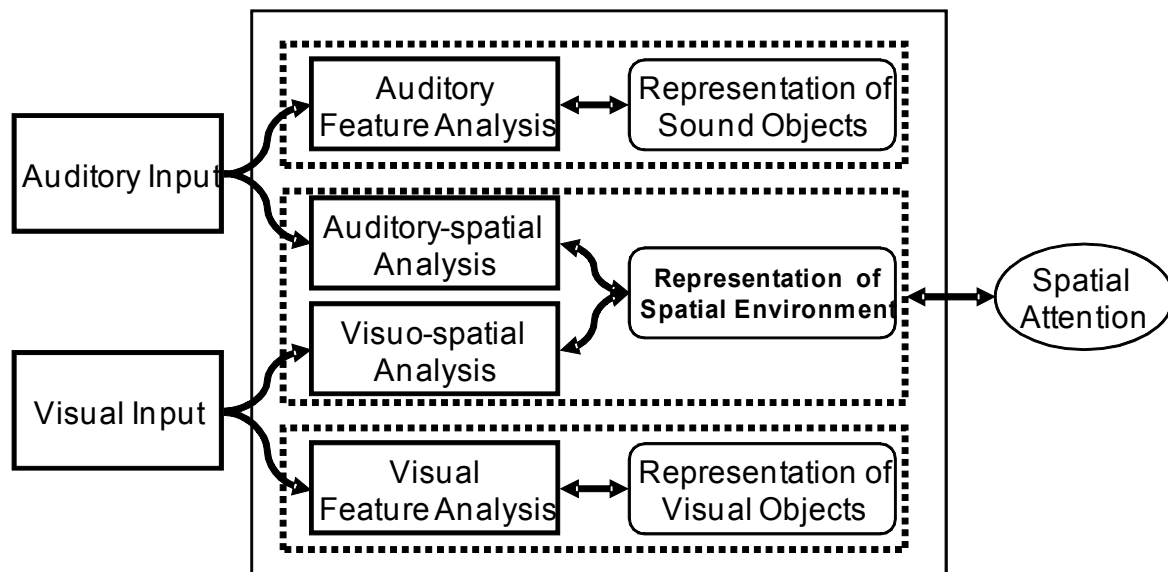


Abbildung 27: Das Modell von Zimmer (2008)

gleichermaßen zeigt, wie in den übereinstimmenden Aktivierungen im EKP. Die Daten unterstützen somit Modelle wie das von Zimmer (2008) skizzierte (Abb. 27), in welchem einer modalitätsspezifischen Objektverarbeitung eine modalitätsübergreifende räumliche Verarbeitung gegenübersteht. Die zweite Frage, deren Antwort sich nicht in der Literatur zu den beiden Verarbeitungspfaden fand, ist die nach der Verarbeitung von Objekt-Orts-Bindungen. Wenn Objektinformation anders verarbeitet wird als räumliche Information, muss es einen Mechanismus geben, der beide Informationsarten miteinander verbindet, damit so etwas wie Arbeitsgedächtnis für Objekte-an-Positionen möglich ist. Alternativ könnte eine solche Konjunktion von Ort und Objekt auf einem gemeinsamen, dritten Prozess beruhen, anstatt auf jenen beiden, die in den Dissoziations-Studien für die getrennte Informationsverarbeitung beobachtet wurden. Für beides wurde in der vorliegenden Arbeit Evidenz erbracht. Einerseits gibt es eine solche Verarbeitung von Objekten-an-Orten in Form von visuellem Imagery (Exp. 4), das räumliche Relationen als Bestandteil einer Objektkonfiguration aufrecht erhält. Andererseits war das Wiedererkennen von Objektpositionen auch ohne diese visuellen Prozesse möglich (Exp. 5), so dass der grundlegendere Prozess wohl, wie oben diskutiert, in einem räumlichen Bindungsmechanismus besteht.

8.3 Konklusion

Scheut man sich nicht, die verbleibenden Wissenslücken einmal zur Probe mit (begründeten) Vermutungen zu füllen, so kann man in einer Zusammenschau des bestehenden Wissens über das menschliche Arbeitsgedächtnis mit den neu hinzugewonnenen Ergebnissen der vorliegenden Studie das folgende Bild zeichnen:

Das menschliche Arbeitsgedächtnis nutzt ein Netzwerk, in dem frontale Areale AG-spezifische exekutive Funktionen ausüben, während die beteiligten posterioren Areale nicht AG-spezifisch sind, sondern auch in Prozesse der Wahrnehmung und des Langzeitgedächtnisses eingebunden sind. Innerhalb der posterioren Regionen werden Objektinformation und räumliche Information getrennt verarbeitet. Objektinformation wird in modalitätsspezifischen ventralen Arealen verarbeitet, räumliche Information hingegen in posterioren Arealen des dorsalen Pfades, die sich nicht nach der Stimulusmodalität unterscheiden. Der Bindung dieser beiden getrennt verarbeiteten Informationsarten kommt eine wichtige Rolle zu. Einerseits können einzelne Objektmerkmale über ihren Ort als zusammengehörig identifiziert werden, andererseits können getrennte Objekte anhand ihres Ortes diskriminiert werden. Der gemeinsame Ort dürfte dabei auch einer der wichtigsten Mechanismen sein, um Wahrnehmungen aus verschiedenen Modalitäten ein und demselben Objekt zuzuordnen. Eine Region, die bei solchen Prozessen der Bindung innerhalb und zwischen Modalitäten Aktivität zeigte, ist der intra-parietale Sulcus. Das Arbeitsgedächtnis für Objektpositionen beruht somit im Wesentlichen auf einem Zusammenspiel von ventralem und dorsalem Verarbeitungspfad, die von einem parietalen Bindungsmechanismus koordiniert werden. Diese Prozesse sind notwendig und hinreichend, um Objekte mit ihren Positionen im AG zu halten. Dazu können noch weitere, fakultative AG-Prozesse treten, wie die verbale Rekodierung oder das in okzipitalen Arealen stattfindende visuelle Imagery, mit dem räumliche Information als figurative Eigenschaft einer Objektanordnung gehalten werden kann. Diese Rekodierungsoptionen stehen ebenfalls für Information aus allen Modalitäten zur Verfügung, so dass auch die Beteiligung dieser Prozesse die Gültigkeit der abschließenden Formulierung nicht einschränkt:

Das räumliche Arbeitsgedächtnis stellt eine für alle Eingangsmodalitäten gemeinsame Ressource dar. Es stellt sich als ein einheitliches, a-modales Gedächtnissystem dar, das

Informationen, die ursprünglich aus verschiedenen Modalitäten stammen, gemeinsam und in einem einheitlichen Repräsentationsformat aufrecht erhält.

Literatur

- Adriani, M., Maeder, P., Meuli, R., Thiran, A. B., Frischknecht, R., Villemure, J.-G., et al. (2003). Sound recognition and localization in man: Specialized cortical networks and effects of acute circumscribed lesions. *Experimental Brain Research*, *153*, 591-604.
- Aglioti, S., DeSouza, J. F., & Goodale, M. A. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, *5*, 679-685.
- Ahveninen, J., Jaaskelainen, I. P., Raij, T., Bonmassar, G., Devore, S., Hamalainen, M., et al. (2006). Task-modulated "what" and "where" pathways in human auditory cortex. *PNAS*, *103*, 14608-14613.
- Alain, C., Arnott, S. R., Hevenor, S., Graham, S., & Grady, C. L. (2001). "What" and "where" in the human auditory system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*, 12301-12306.
- Alain, C., Yu, H., & Grady, C. (2008). The contribution of the inferior parietal lobe to auditory spatial working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*, 285-295.
- Allen, R. J., Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (2006). Is the binding of visual features in working memory resource-demanding? *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*, 298-313.
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge: Harvard University Press.
- Anderson, S. J., & Yamagishi, N. (2000). Spatial localization of colour and luminance stimuli in human peripheral vision. *Vision research*, *40*, 759-771.
- Anurova, I., Artchakov, D., Korvenoja, A., Ilmoniemi, R. J., Aronen, H. J., & Carlson, S. (2003). Differences between auditory evoked responses recorded during spatial and nonspatial working memory tasks. *NeuroImage*, *20*, 1181-1192.
- Anurova, I., Artchakov, D., Korvenoja, A., Ilmoniemi, R. J., Aronen, H. J., & Carlson, S. (2005). Cortical generators of slow evoked responses elicited by spatial and nonspatial auditory working memory tasks. *Clinical Neurophysiology*, *116*, 1644-1654.
- Arnott, S. R., Binns, M. A., Grady, C. L., & Alain, C. (2004). Assessing the auditory dual-pathway model in humans. *NeuroImage*, *22*, 401-408.
- Arnott, S. R., Grady, C. L., Hevenor, S. J., Graham, S., & Alain, C. (2005). The functional organization of auditory working memory as revealed by fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*, 819-831.
- Ashcroft, M. H. (2006). *Cognition* (4 ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence (Ed.), *The psychology of learning and*

- motivation: Advances in research and theory* (Vol. 2, pp. 89-195). New York: Academic Press.
- Awh, E., Anllo-Vento, L., & Hillyard, S. A. (2000). The role of spatial selective attention in working memory for locations: Evidence from event-related potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 840-847.
- Awh, E., & Jonides, J. (2001). Overlapping mechanisms of attention and spatial working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*, 119-126.
- Awh, E., Jonides, J., & Reuter-Lorenz, P. A. (1998). Rehearsal in spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *24*, 780-790.
- Awh, E., Jonides, J., Smith, E. E., Buxton, R. B., Frank, L. R., Love, T., et al. (1999). Rehearsal in spatial working memory: Evidence from neuroimaging. *Psychological Science*, *10*, 433-437.
- Awh, E., Jonides, J., Smith, E. E., Schumacher, E. H., Koeppel, R. A., & Katz, S. (1996). Dissociation of storage and rehearsal in verbal working memory: Evidence from positron emission tomography. *Psychological Science*, *7*, 25-31.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1996). The concept of working memory. In S. E. Gathercole (Ed.), *Models of Short-term Memory* (pp. 1-27). East Sussex, UK: Psychology Press.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 417-423.
- Baddeley, A. D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist*, *7*, 85-97.
- Baddeley, A. D., & Andrade, J. (2000). Working memory and the vividness of imagery. *Journal of Experimental Psychology: General*, *129*, 126-145.
- Baddeley, A. D., Grant, S., Wight, E., & Thomson, N. (1975). Imagery and visual working memory. In P. M. Rabbitt & S. Dornic (Eds.), *Attention and Performance* (Vol. V, pp. 205-217). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, pp. 647-667). Hillsdale NJ: Erlbaum.
- Baddeley, A. D., & Lieberman, K. (1980). Spatial working memory. In R. Nickerson (Ed.), *Attention and Performance* (Vol. VIII, pp. 521-539). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Baddeley, A. D., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *14*, 575-589.
- Barceló, F., Martín-Loeches, M., & Rubia, F. J. (1997). Event-related potentials during memorization of spatial locations in the auditory and visual modalities. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *103*, 257-267.
- Barrett, D. J. K., & Hall, D. A. (2006). Response preferences for "what" and "where" in human non-primary auditory cortex. *NeuroImage*, *32*, 968-977.

- Belin, P., & Zatorre, R. J. (2000). 'What', 'where' and 'how' in auditory cortex. *Nature Neuroscience*, 3, 965-966.
- Bense, M. (1997). Raum und Ich. In *Ausgewählte Schriften* (Vol. 1). Stuttgart: Metzler.
- Birbaumer, N., Elbert, T., Canavan, A. G. M., & Rockstroh, B. (1990). Slow potentials of the cerebral cortex and behavior. *Physiological Reviews*, 70, 1-41.
- Bosch, V., Mecklinger, A., & Friederici, A. D. (2001). Slow cortical potentials during retention of object, spatial and verbal information. *Cognitive Brain Research*, 10, 219-237.
- Brechmann, A., Gaschler-Markefski, B., Sohr, M., Yoneda, K., Kaulisch, T., & Scheich, H. (2007). Working memory-specific activity in auditory cortex: Potential correlates of sequential processing and maintenance. *Cerebral Cortex*, 17, 2544-2552.
- Bremmer, F., Schlack, A., Shah, N. J., Zafiris, O., Kubischik, M., Hoffmann, K.-P., et al. (2001). Polymodal motion processing in posterior parietal and premotor cortex: A human fMRI study strongly implies equivalencies between humans and monkeys. *Neuron*, 29, 287-296.
- Bridgeman, B., Lewis, S., Heit, G., & Nagle, M. (1979). Relation between cognitive and motor-oriented systems of visual position perception. *Journal of Experimental Psychology*, 5, 692-700.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. London: Pergamon Press.
- Brooks, L. R. (1967). The suppression of visualization by reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 19, 289-299.
- Bushara, K. O., Weeks, R. A., Ishii, K., Catalan, M.-J., Tian, B., Rauschecker, J. P., et al. (1999). Modality-specific frontal and parietal areas for auditory and visual spatial localization in humans. *Nature Neuroscience*, 2, 759-766.
- Chao, L. L., & Knight, R. T. (1996). Prefrontal and posterior cortical activation during auditory working memory. *Cognitive Brain Research*, 4, 27-37.
- Chomsky, N. (1968). *Language and Mind*. New York: Harcourt Brace Jovanovich.
- Clarke, S., & Thiran, A. B. (2004). Auditory neglect: What and where in auditory space. *Cortex*, 40, 291-300.
- Clarke, S., Thiran, A. B., Maeder, P., Adriani, M., Vernet, O., Regli, L., et al. (2002). What and where in human audition: Selective deficits following focal hemispheric lesions. *Experimental Brain Research*, 147, 8-15.
- Coello, Y., Danckert, J., Blangero, A., & Rossetti, Y. (2007). Do visual illusions probe the visual brain?: Illusions in action without a dorsal visual stream. *Neuropsychologia*, 45, 1849-1858.
- Courtney, S. M., Petit, L., Maisog, J. M., Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1998). An area specialized for spatial working memory in human frontal cortex. *Science*, 279, 1347.

- Courtney, S. M., Ungerleider, L. G., Keil, K., & Haxby, J. V. (1996). Object and spatial visual working memory activate separate neural systems in human cortex. *Cerebral Cortex*, *6*, 39-49.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, *104*, 163-191.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87-114.
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *11*, 671-684.
- D'Esposito, M., Aguirre, G. K., Zarahn, E., Ballard, D., Shin, R. K., & Lease, J. (1998). Functional MRI studies of spatial and nonspatial working memory. *Cognitive Brain Research*, *7*, 1-13.
- Davis, G., & Holmes, A. (2005). The capacity of visual short-term memory is not a fixed number of objects. *Memory & Cognition*, *33*, 185-195.
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, *70*, 80-90.
- Driver, J., & Spence, C. (1999). Cross-modal links in spatial attention. In G. W. Humphreys, J. Duncan & A. Treisman (Eds.), *Attention, space, and action: Studies in cognitive neuroscience* (pp. 130-149): Oxford University Press.
- Duerr, H. P. (1983). *Traumzeit: Über die Grenze zwischen Wildnis und Zivilisation*. Frankfurt a.M.: Syndikat.
- Düzel, E., Cabeza, R., Picton, T. W., Yonelinas, A. P., Scheich, H., Heinze, H. J., et al. (1999). Task-related and item-related brain processes of memory retrieval. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America*, *96*, 1794-1799.
- Engelkamp, J. (1994). Episodisches Gedächtnis: Von Speichern zu Prozessen und Informationen. *Psychologische Rundschau*, *45*, 195-210.
- Farah, M. J. (1988). Is visual memory really visual? Overlooked evidence from neuropsychology. *Psychological Review*, *95*, 307-317.
- Farah, M. J., Hammond, K. M., Levine, D. N., & Calvanio, R. (1988). Visual and spatial mental imagery: Dissociable systems of representation. *Cognitive Psychology*, *20*, 439-462.
- Farah, M. J., Peronnet, F., Gonon, M. A., & Giard, M. H. (1988). Electrophysiological evidence for a shared representational medium for visual images and visual percepts. *Journal of Experimental Psychology: General*, *117*, 248-257.
- Farah, M. J., Weisberg, L. L., Monheit, M. A., & Peronnet, F. (1989). Brain activity underlying mental imagery: Event-related potentials during mental image generation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *1*, 302-316.

- Finke, K., Bublak, P., Neugebauer, U., & Zihl, J. (2005). Combined processing of what and where information within the visuospatial scratchpad. *European Journal of Cognitive Psychology, 17*, 1-22.
- Fujiki, N., Riederer, K. A. J., Jousmaki, V., Makela, J. P., & Hari, R. (2002). Human cortical representation of virtual auditory space: Differences between sound azimuth and elevation. *European Journal of Neuroscience, 16*, 2207-2213.
- Fuster, J. M. (2006). The cognit: A network model of cortical representation. *International Journal of Psychophysiology, 60*, 125-132.
- García-Larrea, L., & Cézanne-Bert, G. (1998). P3, positive slow wave and working memory load: A study on the functional correlates of slow wave activity. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 108*, 260-273.
- Gauthier, I., Tarr, M. J., Anderson, A. W., Skudlarski, P., & Gore, J. C. (1999). Activation of the middle fusiform 'face area' increases with expertise in recognizing novel objects. *Nature Neuroscience, 2*, 568-573.
- Geffen, G. M., Wright, M. J., Green, H. J., Gillespie, N. A., Smyth, D. C., Evans, D. M., et al. (1997). Effects of memory load and distraction on performance and event-related slow potentials in a visuospatial working memory task. *Journal of Cognitive Neuroscience, 9*, 743.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences, 15*, 20-25.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature, 349*, 154-156.
- Goodale, M. A., & Westwood, D. A. (2004). An evolving view of duplex vision: Separate but interacting cortical pathways for perception and action. *Current Opinion in Neurobiology, 14*, 203-211.
- Grady, C. L., Yu, H., & Alain, C. (2008). Age-related differences in brain activity underlying working memory for spatial and nonspatial auditory information. *Cerebral Cortex, 18*, 189-199.
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology, 55*, 468-484.
- Greenhouse, S. W., & Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika, 24*, 95-112.
- Griffiths, T. D., & Warren, J. D. (2002). The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neurosciences, 25*, 348-353.
- Griffiths, T. D., & Warren, J. D. (2004). What is an auditory object? [10.1038/nrn1538]. *Nature Reviews Neuroscience, 5*, 887-892.
- Grill-Spector, K., Sayres, R., & Ress, D. (2006). High-resolution imaging reveals highly selective nonface clusters in the fusiform face area. *Nature Neuroscience, 9*, 1177-1185.
- Hagler Jr., D. J., & Sereno, M. I. (2006). Spatial maps in frontal and prefrontal cortex. *NeuroImage, 29*, 567-577.

-
- Hart, H. C., Palmer, A. R., & Hall, D. A. (2004). Different areas of human non-primary auditory cortex are activated by sounds with spatial and nonspatial properties. *Human Brain Mapping, 21*, 178-190.
- Haxby, J. V. (2006). Fine structure in representations of faces and objects. *Nature Neuroscience, 9*, 1084-1086.
- Hennighausen, E., Heil, M., & Rösler, F. (1993). A correction method for DC drift artifacts. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 86*, 199-204.
- Ingle, D. (1967). Two visual mechanisms underlying the behavior of fish. *Psychologische Forschung, 31*, 44-51.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Dover.
- Jonides, J., Schumacher, E. H., Smith, E. E., Lauber, E. J., Awh, E., Minoshima, S., et al. (1997). Verbal working memory load affects regional brain activation as measured by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience, 9*, 462.
- Jonides, J., Smith, E. E., Koeppe, R. A., Awh, E., Minoshima, S., & Mintun, N. (1993). Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature, 363*, 623-625.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: A module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *The Journal of Neuroscience, 17*, 4302-4311.
- Kanwisher, N., & Wojciulik, E. (2000). Visual attention: Insights from brain imaging. *Nature Reviews Neuroscience, 1*, 91-100.
- Karnath, H.-O. (2001). New insights into the functions of the superior temporal cortex. *Nature Reviews Neuroscience, 2*, 568-576.
- Kessels, R. P. C., Kappelle, L. J., de Haan, E. H. F., & Postma, A. (2002). Lateralization of spatial-memory processes: Evidence on spatial span, maze learning and memory for object locations. *Neuropsychologia, 40*, 1465-1473.
- Kessels, R. P. C., Postma, A., & de Haan, E. H. F. (1999). P and M channel-specific interference in the what and where pathway. *Neuroreport, 10*, 3765-3767.
- Khader, P., Burke, M., Bien, S., Ranganath, C., & Rösler, F. (2005). Content-specific activation during associative long-term memory retrieval. *NeuroImage, 27*, 805-816.
- Khader, P., Heil, M., & Rösler, F. (2005). Material-specific long-term memory representations of faces and spatial positions: Evidence from slow event-related brain potentials. *Neuropsychologia, 43*, 2109-2124.
- King, J. W., & Kutas, M. (1995). Who did what and when? Using word- and clause-level ERPs to monitor working memory usage in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience, 7*, 376-395.
- Klauer, K. C., & Stegmaier, R. (1997). Interference in immediate spatial memory: Shifts of spatial attention or central executive involvement? *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 50A*, 79-99.

- Kornhuber, H. H., & Deecke, L. (1965). Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Archiv [European Journal of Physiology]*, 284, 1-17.
- Kosslyn, S. M. (2005). Mental images and the brain. *Cognitive Neuropsychology*, 22, 333 - 347.
- Kosslyn, S. M., Koenig, O., Barrett, A., Cave, C. B., Tang, J., & Gabrieli, J. D. (1989). Evidence for two types of spatial representations: Hemispheric specialization for categorical and coordinate relations. *Journal Of Experimental Psychology. Human Perception And Performance*, 15, 723-735.
- Kraus, N., & Nicol, T. (2005). Brainstem origins for cortical 'what' and 'where' pathways in the auditory system. *Trends in Neurosciences*, 28, 176-181.
- Krumbholz, K., Schönwiesner, M., RübSamen, R., Zilles, K., Fink, G. R., & von Cramon, D. Y. (2005). Hierarchical processing of sound location and motion in the human brainstem and planum temporale. *European Journal of Neuroscience*, 21, 230-238.
- Krumbholz, K., Schönwiesner, M., von Cramon, D. Y., RübSamen, R., Shah, N. J., Zilles, K., et al. (2005). Representation of interaural temporal information from left and right auditory space in the human planum temporale and inferior parietal lobe. *Cerebral Cortex*, 15, 317-324.
- Lang, W., Starr, A., Lang, V., Lindinger, G., & Deecke, L. (1992). Cortical DC potential shifts accompanying auditory and visual short-term memory. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 82, 285-295.
- Logie, R. H. (1986). Visuo-spatial processes in working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38A, 229-247.
- Logie, R. H. (1995). *Visuo spatial working memory*. Hove, UK: Erlbaum.
- Logie, R. H. (2003). Spatial and visual working memory: A mental workspace. In D. E. Irwin & B. H. Ross (Eds.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 42, pp. 37-78). Amsterdam: Academic Press.
- Logie, R. H., Della Sala, S., Wynn, V., & Baddeley, A. D. (2000). Visual similarity effects in immediate verbal serial recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 53, 626-646.
- Logie, R. H., & Marchetti, C. (1991). Visuo-spatial working memory: Visual, spatial or central executive? In R. H. Logie & M. Denis (Eds.), *Mental images in human cognition* (pp. 105-115). Amsterdam: Elsevier.
- Lorenz, K. (1990). *Einführung in die philosophische Anthropologie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390, 279-281.
- Macaluso, E., & Driver, J. (2005). Multisensory spatial interactions: A window onto functional integration in the human brain. *Trends in Neurosciences*, 28, 264-271.
- Mach, E. (1919). *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen* (6th ed.). Jena: Gustav Fischer.

- Maeder, P. P., Meuli, R. A., Adriani, M., Bellmann, A., Fornari, E., Thiran, J. P., et al. (2001). Distinct pathways involved in sound recognition and localization: A human fMRI study. *NeuroImage*, *14*, 802-816.
- Martinkauppi, S., Rämä, P., Aronen, H. J., Korvenoja, A., & Carlson, S. (2000). Working memory of auditory localization. *Cerebral cortex*, *10*, 889-898.
- Mazard, A., Tzourio-Mazoyer, N., Crivello, F., Mazoyer, B., & Mellet, E. (2004). A PET meta-analysis of object and spatial mental imagery. *European Journal of Cognitive Psychology*, *16*, 673-695.
- McCollough, A. W., Machizawa, M. G., & Vogel, E. K. (2007). Electrophysiological measures of maintaining representations in visual working memory. *Cortex*, *43*, 77-94.
- McEvoy, L. K., Smith, M. E., & Gevins, A. (1998). Dynamic cortical networks of verbal and spatial working memory: Effects of memory load and task practice. *Cerebral Cortex*, *8*, 563-574.
- Mecklinger, A. (1998). On the modularity of recognition memory for object form and spatial location: A topographic ERP analysis. *Neuropsychologia*, *36*, 441-460.
- Mecklinger, A., Bosch, V., Gruenewald, C., Bentin, S., & von Cramon, D. Y. (2000). What have Klingon letters and faces in common? An fMRI study on content-specific working memory systems. *Human Brain Mapping*, *11*, 146-161.
- Mecklinger, A., & Meinshausen, R. M. (1998). Recognition memory for object form and object location: An event-related potential study. *Memory & Cognition*, *26*, 1068-1088.
- Mecklinger, A., & Mueller, N. (1996). Dissociations in the processing of "what" and "where" information in working memory: An event-related potential analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*, 453-473.
- Mecklinger, A., & Pfeifer, E. (1996). Event-related potentials reveal topographical and temporal distinct neuronal activation patterns for spatial and object working memory. *Cognitive Brain Research*, *4*, 211-224.
- Middlebrooks, J. C., & Green, D. M. (1991). Sound localization by human listeners. *Annual Review of Psychology*, *42*, 135-159.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*, 81-97.
- Mitzdorf, U. (1985). Current source-density method and application in cat cerebral cortex: Investigation of evoked potentials and EEG phenomena. *Physiological Reviews*, *65*, 37-100.
- Mohr, G. (1997). Bewußtseinsphänomene in der Neuropsychologie und der experimentellen Allgemeinen Psychologie. *Psychologische Rundschau*, *48*, 125-140.
- Münzer, S., Berti, S., & Pechmann, T. (2002). Encoding of timbre, speech, and tones: Musicians vs. non-musicians. *Psychologische Beiträge*, *44*, 187-202.
- Musil, R. (1978). *Der Mann ohne Eigenschaften*. Reinbek: Rowohlt.

- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, *9*, 353-383.
- Neggers, S. F. W., Van der Lubbe, R. H. J., Ramsey, N. F., & Postma, A. (2006). Interactions between ego- and allocentric neuronal representations of space. *NeuroImage*, *31*, 320-331.
- Nietzsche, F. (1872). *Die Geburt der Tragödie aus dem Geiste der Musik*. Leipzig: E. W. Fritsch.
- Owen, A. M. (1997). The functional organization of working memory processes within human lateral frontal cortex: The contribution of functional neuroimaging. *European Journal of Neuroscience*, *9*, 1329-1339.
- Owen, A. M., Herrod, N. J., Menon, D. K., Clark, J. C., Downey, S. P. M. J., Carpenter, T. A., et al. (1999). Redefining the functional organization of working memory processes within human lateral prefrontal cortex. *European Journal of Neuroscience*, *11*, 567-574.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations. A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.
- Pearson, D. G. (2001). Imagery and the visuo-spatial sketchpad. In J. Andrade (Ed.), *Working memory in perspective* (pp. 33-59): Psychology Press.
- Penney, C. G. (1989). Modality effects and the structure of short-term verbal memory. *Memory & Cognition*, *17*, 398-422.
- Perenin, M. T., & Vighetto, A. (1988). Optic ataxia: A specific disruption in visuomotor mechanisms. I. Different aspects of the deficit in reaching for objects. *Brain*, *111*, 643-674.
- Petrides, M. (1994). Frontal lobes and working memory: Evidence from investigations of the effects of cortical excisions in nonhuman primates. In F. Boller & J. Grafman (Eds.), *Handbook of Neuropsychology* (Vol. 9, pp. 59-82). Amsterdam: Elsevier.
- Postle, B. R. (2006). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, *139*, 23-38.
- Postle, B. R., Awh, E., Jonides, J., Smith, E. E., & D'Esposito, M. (2004). The where and how of attention-based rehearsal in spatial working memory. *Cognitive Brain Research*, *20*, 194-205.
- Postle, B. R., D'Esposito, M., & Corkin, S. (2005). Effects of verbal and nonverbal interference on spatial and object visual working memory. *Memory & Cognition*, *33*, 203-212.
- Postma, A., & de Haan, E. H. F. (1996). What was where? Memory for object locations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *49A*, 178-199.
- Postma, A., Huntjens, R. J. C., Meuwissen, M., & Laeng, B. (2006). The time course of spatial memory processing in the two hemispheres. *Neuropsychologia*, *44*, 1914-1918.

- Quinn, J. G., & McConnell, J. (1996). Irrelevant pictures in visual working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Human Experimental Psychology, 49A*, 200-215.
- Rämä, P. (2008). Domain-dependent activation during spatial and nonspatial auditory working memory. *Cognitive Processing, 9*, 29-34.
- Rämä, P., Kesseli, K., Reinikainen, K., Kekoni, J., Hämäläinen, H., & Carlson, S. (1997). Visuospatial mnemonic load modulates event-related slow potentials. *Neuroreport, 8*, 871-876.
- Rämä, P., Paavilainen, L., Anourova, I., Alho, K., Reinikainen, K., Sipilä, S., et al. (2000). Modulation of slow brain potentials by working memory load in spatial and nonspatial auditory tasks. *Neuropsychologia, 38*, 913-922.
- Rämä, P., Poremba, A., Sala, J. B., Yee, L., Malloy, M., Mishkin, M., et al. (2004). Dissociable functional cortical topographies for working memory maintenance of voice identity and location. *Cerebral Cortex, 14*, 768-780.
- Ranganath, C., DeGutis, J., & D'Esposito, M. (2004). Category-specific modulation of inferior temporal activity during working memory encoding and maintenance. *Cognitive Brain Research, 20*, 37-45.
- Rauschecker, J. P., & Tian, B. (2000). Mechanisms and streams for processing of "what" and "where" in auditory cortex. *PNAS, 97*, 11800-11806.
- Repovš, G., & Baddeley, A. (2006). The multi-component model of working memory: Explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience, 139*, 5-21.
- Rhodes, G., Byatt, G., Michie, P. T., & Puce, A. (2004). Is the fusiform face area specialized for faces, individuation, or expert individuation? *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*, 189-203.
- Rösler, F., Borgstedt, J., & Sojka, B. (1985). When perceptual or motor sets are changed: Effects of updating demands on structure and energy of P300. *Acta Psychologica, 60*, 293-321.
- Rösler, F., & Heil, M. (1991). Toward a functional categorization of slow waves: Taking into account past and future events. *Psychophysiology, 28*, 344-358.
- Rösler, F., Heil, M., & Hennighausen, E. (1995). Distinct cortical activation patterns during long-term memory retrieval of verbal, spatial, and color information. *Journal of Cognitive Neuroscience, 7*, 51-65.
- Rösler, F., Heil, M., & Röder, B. (1997). Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology, 45*, 109-141.
- Ruchkin, D. S., Grafman, J., Cameron, K., & Berndt, R. S. (2003). Working memory retention system: A state of activated long-term memory. *Behavioral and Brain Sciences, 26*, 709-728.
- Ruchkin, D. S., Johnson, R., Jr, Canoune, H., & Ritter, W. (1991). Event-related potentials during arithmetic and mental rotation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 79*, 473-487.

- Ruchkin, D. S., Johnson, R., Jr, Grafman, J., Canoune, H., & Ritter, W. (1992). Distinctions and similarities among working memory processes: An event-related potential study. *Cognitive Brain Research*, *1*, 53-66.
- Ruchkin, D. S., Johnson, R., Jr, Grafman, J., Canoune, H., & Ritter, W. (1997). Multiple visuospatial working memory buffers: Evidence from spatiotemporal patterns of brain activity. *Neuropsychologia*, *35*, 195-209.
- Ruchkin, D. S., Johnson, R., Jr, Mahaffey, D., & Sutton, S. (1988). Toward a functional categorization of slow waves. *Psychophysiology*, *25*, 339-353.
- Sala, J. B., & Courtney, S. M. (2007). Binding of what and where during working memory maintenance. *Cortex*, *43*, 5-21.
- Sala, J. B., Rämä, P., & Courtney, S. M. (2003). Functional topography of a distributed neural system for spatial and nonspatial information maintenance in working memory. *Neuropsychologia*, *41*, 341-356.
- Santa, J. L. (1977). Spatial transformations of words and pictures. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *3*, 418-427.
- Schneider, G. E. (1967). Contrasting visuo-motor functions of tectum and cortex in the golden hamster. *Psychologische Forschung*, *31*, 52-62.
- Schneider, W. X. (1999). Visual-spatial working memory, attention, and scene representation: A neuro-cognitive theory. *Psychological Research*, *62*, 220-236.
- Sestieri, C., Di Matteo, R., Ferretti, A., Del Gratta, C., Caulo, M., Tartaro, A., et al. (2006). "What" versus "Where" in the audiovisual domain: An fMRI study. *NeuroImage*, *33*, 672-680.
- Shafritz, K. M., Gore, J. C., & Marois, R. (2002). The role of the parietal cortex in visual feature binding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*, 10917-10922.
- Skandries, W. (2002). Electroencephalogram (EEG) Topography. In J. P. Hornak (Ed.), *The Encyclopedia of Imaging Science and Technology* (Vol. 1, pp. 198-210). New York: John Wiley & Sons.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1995). Working memory in humans: Neuropsychological evidence. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The Cognitive Neurosciences* (pp. 1009-1020). Cambridge, MA: MIT Press.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1997). Working memory: A view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, *33*, 5-42.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1998). Neuroimaging analyses of human working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*, 12061-12068.
- Smith, E. E., Jonides, J., Koeppel, R. A., Awh, E., Schumacher, E. H., & Minoshima, S. (1995). Spatial versus object working memory: PET investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *7*, 337-356.
- Smith, Z. M., Delgutte, B., & Oxenham, A. J. (2002). Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. *Nature*, *416*, 87-90.

- Smyth, M. M., & Scholey, K. A. (1994). Interference in immediate spatial memory. *Memory & Cognition*, *22*, 1-13.
- Snodgrass, J. G., & Corwin, J. (1988). Pragmatics of measuring recognition memory: Applications to dementia and amnesia. *Journal of Experimental Psychology: General*, *117*, 34-50.
- Somjen, G. G. (1973). Electrogenesis of sustained potentials. In G. A. Kerkut & J. W. Phillis (Eds.), *Progress in Neurobiology* (pp. 201-232). Oxford: Pergamon Press.
- Spence, C., & Driver, J. (1996). Audiovisual links in endogenous covert spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *22*, 1005-1030.
- Tassinari, G., Campara, D., Balercia, G., Chilosi, M., Martignoni, G., & Marzi, C. A. (1994). Magno- and parvocellular pathways are segregated in the human optic tract. *Neuroreport*, *5*, 1425-1428.
- Treisman, A. (1960). Contextual cues in selective listening. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *12*, 242 - 248.
- Treisman, A. (2006). Object tokens, binding and visual memory. In H. D. Zimmer, A. Mecklinger & U. Lindenberger (Eds.), *Handbook of binding and memory: Perspectives from cognitive neuroscience* (pp. 315-338). Oxford: Oxford University Press.
- Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, *12*, 97-136.
- Treisman, A., & Zhang, W. (2006). Location and binding in visual working memory. *Memory & Cognition*, *34*, 1704-1719.
- Tresch, M. C., Sinnamon, H. M., & Seamon, J. G. (1993). Double dissociation of spatial and object visual memory: Evidence from selective interference in intact human subjects. *Neuropsychologia*, *31*, 211-219.
- Uhl, F., Goldenberg, G., Lang, W., & Lindinger, G. (1990). Cerebral correlates of imagining colours, faces and a map: II. Negative cortical DC potentials. *Neuropsychologia*, *28*, 81-93.
- Ungerleider, L. G., Courtney, S. M., & Haxby, J. V. (1998). A neural system for human visual working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*, 883.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale & J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549-586). Cambridge, MA: MIT Press.
- van Doorn, H., van der Kamp, J., & Savelsbergh, G. J. P. (2007). Grasping the Muller-Lyer illusion: The contributions of vision for perception in action. *Neuropsychologia*, *45*, 1939-1947.
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., & Martinerie, J. (2001). The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*, 229-239.

- Ventre-Dominey, J., Bailly, A., Lavenne, F., LeBars, D., Mollion, H., Costes, N., et al. (2005). Double dissociation in neural correlates of visual working memory: A PET study. *Cognitive Brain Research*, *25*, 747-759.
- Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, *428*, 748-751.
- Wager, T. D., & Smith, E. E. (2003). Neuroimaging studies of working memory: A meta-analysis. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *3*, 255-274.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent Negative Variation : An electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, *203*, 380-384.
- Warren, J. D., & Griffiths, T. D. (2003a). Distinct mechanisms for processing spatial sequences and pitch sequences in the human auditory brain. *Journal of Neuroscience*, *23*, 5799-5804.
- Warren, J. D., & Griffiths, T. D. (2003b). Distinct mechanisms for processing spatial sequences and pitch sequences in the human auditory brain - Data supplement. Retrieved December 24, 2008, from <http://www.jneurosci.org/cgi/content/full/23/13/5799/DC1/1>
- Weeks, R. A., Aziz-Sultan, A., Bushara, K. O., Tian, B., Wessinger, C. M., Dang, N., et al. (1999). A PET study of human auditory spatial processing. *Neuroscience Letters*, *262*, 155-158.
- Werkle-Bergner, M., Mecklinger, A., Kray, J., Meyer, P., & Duzel, E. (2005). The control of memory retrieval: Insights from event-related potentials. *Cognitive Brain Research*, *24*, 599-614.
- Westwood, D. A., & Goodale, M. A. (2003). Perceptual illusion and the real-time control of action. *Spatial Vision*, *16*, 243-254.
- Wheeler, M. E., & Treisman, A. M. (2002). Binding in short-term visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *131*, 48.
- Wilson, F. A., Scialidhe, S. P., & Goldman-Rakic, P. S. (1993). Dissociation of object and spatial processing domains in primate prefrontal cortex. *Science*, *260*, 1955-1958.
- Zimmer, H. D. (2008). Visual and spatial working memory: From boxes to networks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *32*, 1373-1395
- Zimmer, H. D., & de Vega, M. (1996). The medium and the message in spatial communication. In T. Ensink & C. Sauer (Eds.), *Researching technical documents* (pp. 153-180). Groningen: University of Groningen.
- Zimmer, H. D., & Lehnert, G. (2006). The spatial mismatch effect is based on global configuration and not on perceptual records within the visual cache. *Psychological Research*, *70*, 1-12.
- Zimmer, H. D., Speiser, H. R., & Seidler, B. (2003). Spatio-temporal working-memory and short-term object-location tasks use different memory mechanisms. *Acta Psychologica*, *114*, 41-65.

Abkürzungsverzeichnis

μV	Mikrovolt (Millionstel Volt)	$\text{k}\Omega$	Kilo-Ohm (Maßeinheit für elektrischen Widerstand)
Abb.	Abbildung	KZG	Kurzzeitgedächtnis
AG	Arbeitsgedächtnis	LP	Langsames Potenzial
ANOVA	<i>analysis of variance</i>	LZG	Langzeitgedächtnis
BA	<i>brodmann's area</i>	M	<i>mean</i> , Mittelwert
BP	Bereitschaftspotential	ms	Millisekunden
CE	<i>central executive</i>	MSE	<i>mean squared error</i>
CNV	<i>contingent negative variation</i>	PET	Positronen-Emissions-Tomografie
dB	Dezibel (Hilfsmaßeinheit für logarithmische Größen)	PFC	<i>prefrontal cortex</i>
DLPFC	<i>dorsolateral prefrontal cortex</i>	PL	<i>phonological loop</i>
DMTS	<i>delayed match to sample</i>	PSW	<i>positive slow wave</i>
EEG	Elektroenzephalogramm	rCBF	<i>regional cerebral blood flow</i>
EKP	Ereigniskorreliertes Potenzial	ROI	<i>region of interest</i>
EOG	Elektro-Okulogramm	s	Sekunden
EPSP	Exzitatorisches Postsynaptisches Potential	S.	Seite
ERP	<i>event-related potential</i>	SD	<i>standard deviation</i>
Exp.	Experiment	SE	<i>standard error</i>
FEF	<i>frontal eye fields</i>	SFS	<i>superior frontal sulcus</i>
FIT	<i>feature integration theory</i>	SP	<i>slow potential</i>
fMRI, fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie	SPL	<i>superior parietal lobe</i>
Hz	Hertz (Maßeinheit 1/s)	STG	<i>superior temporal gyrus</i>
IPL	<i>inferior parietal lobe</i>	STS	<i>superior temporal sulcus</i>
IPS	<i>intraparietal sulcus</i>	VC	<i>visual cache</i>
IPSP	Inhibitorisches Postsynaptisches Potential	VLPFC	<i>ventrolateral prefrontal cortex</i>
IS	<i>inner scribe</i>	VSSP	<i>visuo-spatial sketchpad</i>
ISI	Interstimulus-Intervall	WM	<i>working memory</i>

Anmerkung

Einige der berichteten Experimente und theoretischen Überlegungen finden sich in ähnlicher Form auch in folgenden Einzelveröffentlichungen:

- Lehnert, G., & Zimmer, H. D. (2006). Auditory and visual spatial working memory. *Memory & Cognition*, 34, 1080-1090.
<http://mc.psychonomic-journals.org/content/34/5/1080.short>
- Lehnert, G., & Zimmer, H. D. (2007). Modality and domain specific components in auditory and visual working memory tasks. *Cognitive Processing*, 9, 53-61.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10339-007-0187-6>
- Lehnert, G., & Zimmer, H. D. (2008). Common Coding of Auditory and Visual Spatial Information in Working Memory. *Brain Research*, 1230, 158-167.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.005>

Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle meinem Mentor, Herrn Professor Dr. Hubert Zimmer, der in all den Jahren größter Förderer und produktivster Kritiker meiner wissenschaftlichen Arbeit zugleich war. Ich bin ihm für beides in gleichem Maße dankbar.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr. Axel Mecklinger, der mir im persönlichen Gespräch und durch das Beispiel seiner Arbeiten die ersten Gehversuchen auf dem Terrain der ereigniskorrelierten Potentiale sehr erleichtert hat.

Ebenso danke ich meinen Kollegen, Dr. Ullrich Ecker und insbesondere Dr. Christian Groh-Bordin, die diese Terra incognita gemeinsam mit mir erkundet haben, sowie Manuela Münzer-Schrobildgen, Thorsten Brinkmann, PD Dr. Christian Frings, Dr. Nicola Ferdinand, und anderen Kollegen, die durch ihre Hilfe, Diskussionsbereitschaft und die konstante Aufrechterhaltung einer angenehmen Arbeitsatmosphäre wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dies gilt auch für meine studentischen Hilfskräfte, Kristin Günther und Yvonne Pooch.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern, Else und Ludwig Lehnert, die mich in diesem, wie in all meinen Unterfangen vorbehaltlos unterstützt haben. Ihr Rückhalt erlaubt es mir, den Blick nach vorne zu richten. Danke.

Denn was fängt man am Jüngsten Tag, wenn die menschlichen Werke gewogen werden, mit drei Abhandlungen über die Ameisensäure an, und wenn es ihrer dreißig wären?! Andererseits, was weiß man vom Jüngsten Tag, wenn man nicht einmal weiß, was alles bis da hin aus der Ameisensäure werden kann?!

Robert Musil, *Der Mann ohne Eigenschaften*

Lebenslauf

Günther Lehnert

geboren am 8. Juni 1973 in Saarbrücken

Familienstand: ledig, keine Kinder

Bildungsweg

2009

Promotion zum Dr. phil. (magna cum laude)

seit 2005

Ausbildung zum Psychologischen Psychotherapeuten, Fachkunde
„Psychoanalyse“ und „Tiefenpsychologisch fundierte Psychotherapie“
am Saarländischen Institut für Psychoanalyse und Psychotherapie

2001 – 2007

Wissenschaftlicher Mitarbeiter in den DFG-geförderten Projekten „Visuo-Spatial Working Memory“ und „Aufgabenspezifische Enkodierung und Rekodierung im Arbeitsgedächtnis“

(Projektleitung: Prof. Dr. Hubert Zimmer & Prof. Dr. Axel Mecklinger)

1993 – 2000 Studium an der Universität des Saarlandes

Psychologiestudium mit Abschluss Diplom (1,5)

Titel der Diplomarbeit: „Stroop-Interferenz nahe der
Wahrnehmungsschwelle: Effekte subliminaler Reizverarbeitung“

Philosophiestudium bis zur Zwischenprüfung

1983 – 1992 Von-der-Leyen-Gymnasium, Blieskastel; Abitur (2,0)

1979 – 1983 Grundschule Schlossbergschule, Blieskastel