

Aus der Abteilung Psychiatrie und Psychotherapie

(Prof. Dr. med. P. Falkai)

Schwerpunktprofessur Forensische Psychiatrie und Psychotherapie

(Prof. Dr. med. J. L. Müller)

im Zentrum Psychosoziale Medizin

der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

Das verbale Arbeitsgedächtnis

Gedächtniseffekte, kortikale Kurzzeitplastizität und Strategieunterschiede

INAUGURAL - DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

der Medizinischen Fakultät

der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Jan Lübke

aus Henstedt-Ulzburg

Göttingen 2010

Dekan: Prof. Dr. med. C. Frömmel

I. Berichterstatter: Prof. Dr. med. J. L. Müller

II. Berichterstatter/in:

III. Berichterstatter/in:

Tag der mündlichen Prüfung:

1. Einleitung.....	6
1.1 Allgemeines	6
1.2 Das menschliche Gedächtnis	7
1.2.1 Übersicht über die verschiedenen Gedächtnissysteme	7
1.2.2 Anatomie des Gedächtnisses	8
1.3 Das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley.....	9
1.3.1 Unterscheidung zwischen Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis.....	9
1.3.2 Theoretische Grundlagen des Modells	9
1.3.3 Anatomische Zuordnung der Subsysteme	13
1.3.4 Lateralisation der Subsysteme	16
1.4 Verbale Funktionen des Menschen.....	16
1.5 Lernen und Lerneffekte	20
1.5.1 Das Lerngesetz	20
1.5.2 Langzeitpotenzierung	20
1.5.3 Lernstrategien	21
1.5.4 Der Primacy-Recency-Effekt	22
1.6 Geschlechterunterschiede	22
1.7 Neuronale Plastizität	24
1.8 Ziele der Arbeit und Hypothesenaufstellung	25
1.8.1 Allgemeines	25
1.8.2 Verhaltensdaten	25
1.8.3 Bildgebungsdaten	26
1.8.4 „Rote strategy“	28
1.8.5 „Elaborative strategy“	29
1.8.6 „Mixed strategy“	30
2. Material und Methoden	30
2.1 Funktionsweise der funktionellen Magnetresonanztomographie	32
2.1.1 Geschichte	32

2.1.2	Grundlagen	32
2.1.3	Relaxation.....	35
2.1.4	BOLD-Effekt	37
2.1.5	Ortskodierung	38
2.1.6	Aufbau eines Magnetresonanztomographen	40
2.2	Verbaler Lern- und Merkfähigkeitstest (VLMT).....	40
2.3	Sprachaufzeichnung während der fMRT-Messung	41
2.4	Experimentelles Design und Durchführung	42
2.5	Befragung zur Lernstrategie	45
3	Datenanalyse.....	46
3.1	Verhaltensdaten	46
3.2	fMRT-Daten.....	48
3.2.1	Vorverarbeitung der fMRT-Daten.....	48
3.2.2	Statistische Analyse der fMRT-Daten.....	50
4	Ergebnisse.....	55
4.1	Verhaltensdaten	55
4.1.1	Allgemeine Ergebnisse der Verhaltensdaten	55
4.1.2	Primacy-Recency-Effekt	57
4.1.3	Vergleich der Lernstrategien	59
4.2	fMRT-Daten.....	60
4.2.1	Allgemeine neuronale Aktivierungsmuster	60
4.2.2	Veränderungen über die fünf Durchgänge - Kurzzeitplastizität.....	64
4.2.3	Aktivierungsdaten der Unterschiede zwischen den Lernstrategien.....	72
5	Diskussion	79
5.1	Verhaltensdaten	79
5.1.1	Allgemeine Verhaltensdaten.....	79
5.1.2	Primacy- und Recency-Effekt	82

5.1.3	Lernstrategien	84
5.2	fMRT-Daten.....	85
5.2.1	Allgemeine neuronale Aktivierungsmuster	85
5.2.2	Veränderungen über die fünf Durchgänge - Kurzzeitplastizität.....	89
5.2.3	Aktivitätsunterschiede zwischen den Lernstrategien	93
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	97
7	Anhang	102
7.1	VLMT-Wortlisten	102
7.2	Genehmigung der fMRT-Studie durch die Ethikkommission	103
8	Literaturverzeichnis	104

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ALM	Allgemeines Lineares Modell
a.u.	Arbitrary unit (willkürliche Einheit)
BA	Brodmann-Areal
BOLD	Blood-oxygen-level-dependent
CE	Central Executive
CVLT	California Verbal Learning Test
df	Degrees of freedom (Freiheitsgrade)
Dg	Durchgang
EB	Episodic buffer
FDR	False discovery rate
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomographie
hIP	Human intraparietal sulcus
IPC	Inferior parietal cortex
KZG	Kurzzeitgedächtnis
LTM	Long-term-memory (Langzeitgedächtnis)
LTP	Long-term-potential (Langzeitpotenzierung)
LZG	Langzeitgedächtnis
MNI	Montreal Neurological Institute
OP	Parietal operculum

PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PL	Phonological Loop
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SE	Standard Error (Standardfehler)
SMA	Supplementär motorisches Areal
SPL	Superior parietal lobule
SPM	Statistical Parametrical Mapping
SPSS	Statistical Product and Service Solutions
STM	Short-term-memory (Kurzzeitgedächtnis)
Tab.	Tabelle
TE	Temporal (primärer auditorischer Kortex)
VLMT	Verbaler Lern- und Merkfähigkeitstest
VSS	Visuospatial Sketchpad

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Fähigkeit sich zu erinnern ist für alle Menschen elementar. Wir erinnern uns tagtäglich an vieles, an den Weg zur Arbeit, Schule oder Universität, an eine Telefonnummer, an den PIN unserer EC-Karte oder an die Geburtstage unserer Freunde und Verwandten. Wir lernen Bewegungsabläufe, wie zum Beispiel Fahrrad fahren oder beim Fußball zu schießen und speichern sie so ab, dass wir diese, ohne darüber nachzudenken, ausführen können. Wir können uns an viele Erlebnisse unseres Lebens erinnern, auch wenn sie schon lange zurückliegen. All dies wird durch das ermöglicht, was wir allgemein als unser Gedächtnis bezeichnen.

Wir wissen, was das Gedächtnis tut, aber wie es das vollbringt, ist größtenteils noch unbekannt. Mit der zunehmenden Möglichkeit der funktionellen Bildgebung, z.B. der funktionellen Magnetresonanztomographie oder auch der Positronen-Emissions-Tomographie, ist es möglich geworden, einzelne Gedächtnisfunktionen genauer als bisher zu untersuchen.

In dieser Arbeit, die auf fMRT-Untersuchungen aufbaut, möchte ich einen Beitrag dazu leisten, Gedächtnisfunktionen besser erklären zu können.

Ich werde nun das menschliche Gedächtnis im Allgemeinen sowie anschließend das Arbeitsgedächtnis detaillierter beschreiben. Vorstellen möchte ich ebenfalls verschiedene Sprachmodelle, um die Verbindung zwischen dem Hören von Worten, ihrem Verständnis, der Speicherung und ihrer Wiedergabe herzustellen.

Hierbei können unterschiedliche Effekte beobachtet werden, die gemeinsam in einem Kapitel beschrieben werden. Im Anschluss daran möchte ich mich den Geschlechtsunterschieden widmen, die im Zusammenhang mit verbalen Aufgaben gefunden werden können.

Im letzten Kapitel der Einleitung werde ich einen Überblick über Plastizitätsvorgänge im Kortex geben, der eine wichtige Grundlage für meine Arbeit darstellen wird.

1.2 Das menschliche Gedächtnis

1.2.1 Übersicht über die verschiedenen Gedächtnissysteme

Das menschliche Gedächtnis teilt sich in verschiedene Untereinheiten auf, die jeweils mehr oder weniger deutlich voneinander abgegrenzt werden können. Es kann zwischen einem sensorischen Gedächtnis sowie einem Kurz- und einem Langzeitgedächtnis unterschieden werden.

Das sensorische Gedächtnis speichert die Information, die von den Sinnesorganen aufgenommen wird. Die Kapazität dieses Systems ist sehr hoch, sie muss für alles Aufgenommene ausreichend groß sein. Neue Sinneseindrücke überschreiben vorhandene Informationen wieder. Die Dauer der Speicherung beträgt deshalb nur Sekundenbruchteile. Diese kurze Zeit reicht aber aus, um, wenn nötig oder gewünscht, die Aufmerksamkeit auf einen Sinneseindruck zu richten. Im sensorischen Gedächtnis wird durch gezielte Aufmerksamkeit somit entschieden, welche Informationen wichtig genug sind, den Weg in die anschließende Gedächtnisinstanz zu finden (Pape 2003).

Das Kurzzeitgedächtnis hingegen hat eine geringere Speicherkapazität, die zeitlich und inhaltlich begrenzt ist. Hier wird die Information verarbeitet, die das sensorische Gedächtnis herausgefiltert hat. Das Kurzzeitgedächtnis wird oft mit dem Arbeitsgedächtnis gleichgesetzt, bzw. werden die Bezeichnungen fast synonym verwendet. Aus diesem Speicher kann durch Üben und Wiederholen von Inhalten eine Übertragung in das Langzeitgedächtnis erfolgen (Pape 2003).

Im Langzeitgedächtnis kann Information von Minuten über Tage bis hin zu Jahren, oder sogar lebenslang gespeichert werden (Pape 2003).

Das Langzeitgedächtnis kann wiederum weiter unterteilt werden. Wurden die drei unterschiedlichen Gedächtnissysteme bisher nach ihrer Speicherkapazität unterschieden, so wird das Langzeitgedächtnis nach der Art der gespeicherten Information weiter differenziert. Man spricht hierbei von einem deklarativen (expliziten) und einem nicht-deklarativen (impliziten) Gedächtnisanteil. Das deklarative Gedächtnis beinhaltet Faktenwissen, beispielsweise Telefonnummern, geschichtliche Daten oder Namen. Inhalte des nicht-deklarativen Gedächtnisses sind z.B. Informationen über Bewegungsabläufe (Fahrrad fahren, eine Leiter erklimmen oder ähnliches).

Weiterhin kann das Wissen im deklarativen Gedächtnis in das episodische sowie das semantische Gedächtnis getrennt werden. „Episodisch“ bezeichnet Inhalte, die mit persönlichen Erlebnissen verknüpft sind, z.B. die Erinnerung an den letzten Urlaub. Das semantische Wissen beinhaltet hingegen das reine Faktenwissen, beispielsweise die Hauptstädte der deutschen Bundesländer.

1.2.2 Anatomie des Gedächtnisses

Ich werde mich in dieser Arbeit in einem späteren Kapitel noch detailliert mit dem Arbeits- bzw. Kurzzeitgedächtnis beschäftigen und hierbei auch auf dessen Anatomie eingehen, deshalb möchte ich mich an dieser Stelle auf die Beschreibung des sensorischen Gedächtnisses und des Langzeitgedächtnisses beschränken.

Das sensorische Gedächtnis ist der erste Speicherort, nachdem die Sinneseindrücke aufgenommen wurden. Dieser Speicher liegt direkt in den einzelnen sensorischen Systemen, für visuelle Informationen, also direkt in der Sehrinde am okzipitalen Pol des Kortex. Analog dazu trifft dies für akustische Sinneseindrücke zu, die auf der primären Hörrinde, der Heschl'schen Querwindung, gespeichert werden (Pape 2003).

Über die Lokalisation des Langzeitgedächtnisses im menschlichen Gehirn gibt es keine eindeutig abgrenzbaren Aussagen. Zum deklarativen Teil des Langzeitgedächtnisses werden der Temporallappen, der präfrontale Kortex sowie einige Kerne des Thalamus gezählt (Kolb und Wishaw 2003).

Das nicht-deklarative LZG wird hingegen eher den Basalganglien, der Substantia nigra, sowie dem Kleinhirn zugeordnet, aber auch ventrale Kerne des Thalamus sollen integriert sein.

Der Hippokampusstruktur im medialen Temporallappen werden Schlüsselfunktionen des Langzeitgedächtnisses bescheinigt. Sie scheint als eine Art Zugang zum Inhalt des LZG zu dienen (Kolb und Wishaw 2003).

Die neuronale Aktivität im Hippokampus wurde in einer Studie von Wiswede et al. (2007) als Marker für Langzeitgedächtnisaktivierung verwendet. Bei der Auswertung der fMRT-Daten in dieser Arbeit werde ich auch auf diese Art der Messung von Langzeitgedächtnisaktivität zurückgreifen.

Im nächsten Abschnitt werde ich das Arbeitsgedächtnis detaillierter beschreiben, da es der Bereich im Gedächtnis ist, der in meiner Arbeit genau untersucht wird.

1.3 Das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley

1.3.1 Unterscheidung zwischen Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis

In der vorangegangenen Unterteilung wurde das Arbeitsgedächtnis bisher nicht als eigene Gedächtnisinstitution genannt bzw. mit dem Kurzzeitgedächtnis gleichgesetzt. Genau genommen ist das Arbeitsgedächtnis aber ein Teil des Kurzzeitgedächtnisses. Es macht nach seiner Funktionsbeschreibung den wichtigsten Teil des Kurzzeitgedächtnisses aus. So ist es wichtig, um Informationen zu wiederholen oder mit ihnen zu arbeiten. Im Grunde sind dies die Funktionen, die für das Kurzzeitgedächtnis in seiner Rolle als Vermittler ins Langzeitgedächtnis wichtig sind. Nur durch stetiges Auffrischen der Information im Kurzzeitgedächtnis kann diese in den Langzeitspeicher gelangen (Pape 2003).

Im Folgenden werde ich aufgrund dieser Tatsachen nur noch vom Arbeitsgedächtnis sprechen.

1.3.2 Theoretische Grundlagen des Modells

Um verschiedene Leistungen und Effekte des Arbeitsgedächtnisses zu erklären, wurde von Alan Baddeley und Graham Hitch 1972 das „three-component working memory model“ als Arbeitsgedächtnismodell vorgeschlagen (Baddeley 2007). Dieses Modell beinhaltet zwei Speicherkomponenten, den Phonological loop und das Visuospatial sketchpad sowie eine übergeordnete Steuereinheit, die sogenannte Central executive (Abb. 1) (Baddeley 2003).

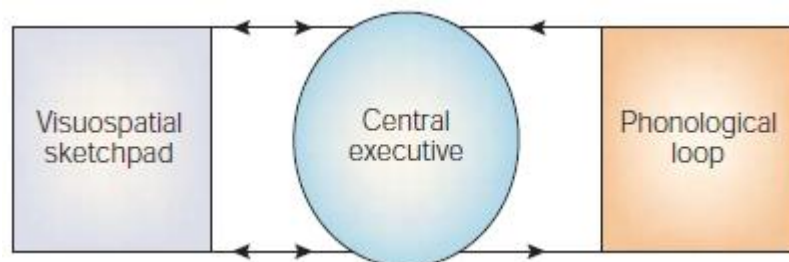


Abb. 1: Die drei Komponenten des Arbeitsgedächtnismodells nach Baddeley (Baddeley 2003, S. 830).

2003 führte Baddeley eine zusätzliche Komponente ein, den Episodic buffer, dessen Aufgabe es ist, zwischen dem Arbeits- und dem Langzeitgedächtnis zu vermitteln und Inhalte für beide Gedächtnissysteme zugänglich zu machen (Baddeley 2003).

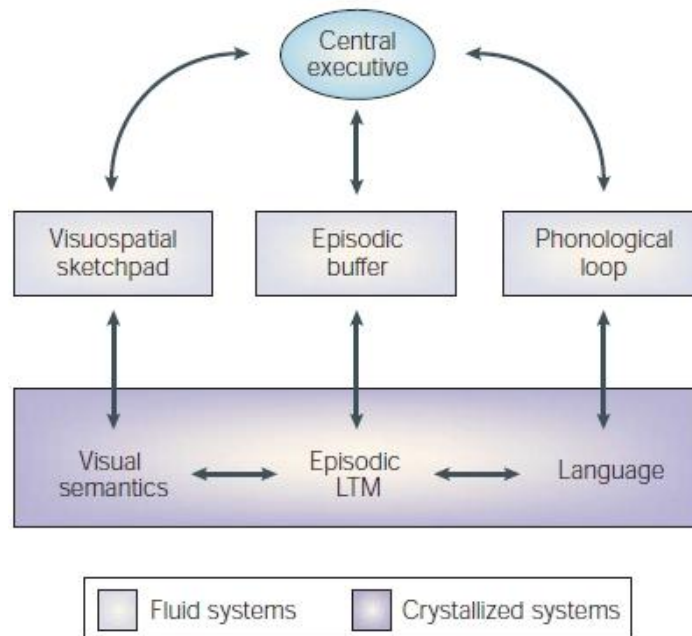


Abb. 2: Das Baddeley-Modell mit dem Episodic buffer (Baddeley 2003, S. 835).

Der Phonological loop sowie das Visuospatial sketchpad bestehen jeweils aus einem eigenen Speicher und einem Element, dessen Aufgabe es ist, eingehende Informationen zu verfestigen. Dies geschieht in beiden Systemen durch innerliches Wiederholen der zu erinnernden Inhalte.

Sprachliche Information, unabhängig ob gelesen oder gehört, wird im Phonological loop verarbeitet. Hier kann sie einerseits begrenzt gespeichert werden, andererseits aber auch durch andauerndes subvokales Wiederholen in das Langzeitgedächtnis überführt werden. Aus diesem Übungssystem kann aber auch direkt gesprochen werden (siehe Abb. 3) (Baddeley 2003).

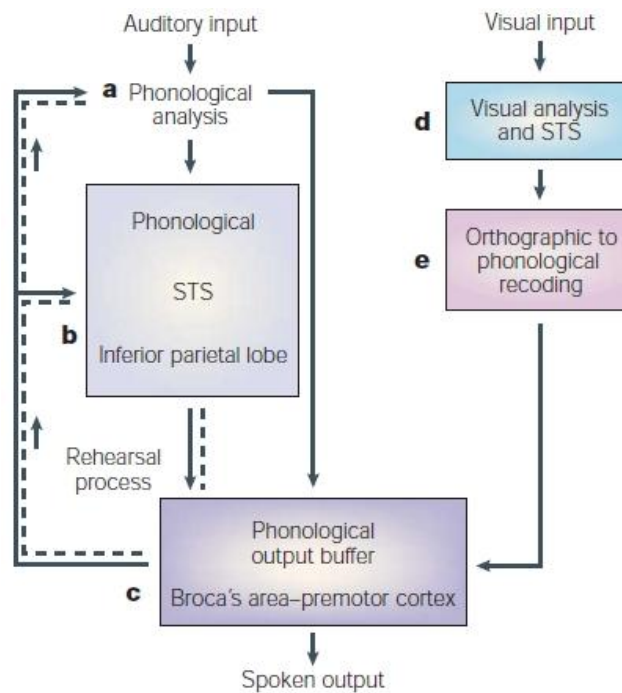


Abb. 3: Der Phonological loop im Detail (Baddeley 2003, S. 831).

Auditory input: (a) Zunächst wird das Gehörte auf phonetischer Ebene analysiert, damit anschließend Laute und deren Kombination als Wörter erkannt werden können.

(b) Diese Wörter können direkt den Weg in das interne Speichersystem finden (Phonological STS = short-time-storage) oder aber über

(c) in einen subvokalen Übungsprozess (Rehearsal process) eingehen.

Dieser findet im selben Kortextareal statt, in dem auch gesprochene Sprache generiert wird und Broca-Areal genannt wird. Durch das als Schleife ablaufende Wiederholen von Wörtern, die bereits im Phonological STS gespeichert sind, kann dessen Inhalt weiter verfestigt werden.

Die gestrichelten Linien in Abb. 3 zeigen Anteile des Rehearsal process an. Durch die durchgezogenen Linien werden die Verbindungen zwischen den Anteilen des Phonological loop dargestellt.

Visual input: (d) Hier finden geschriebene Wörter ihren Zugang zum verbalen Arbeitsgedächtnis. Als erstes müssen Buchstaben erkannt und daraus Wörter gebildet werden. Diese können zunächst kurz gespeichert werden (STS). Dieser Speicher wäre dem Visuospatial sketchpad zuzuordnen, hier wird räumliche und objektbezogene Information verarbeitet.

(e) Im nächsten Schritt wird dann die orthographische in phonologische Information umgesetzt und kann dann in (c) gelangen und von dort aus wie oben beschrieben in den Rehearsal process eingehen.

Der Phonological loop ist in seiner Aufgabe durch einige Limitierungen beschränkt. So ist seine Speicherkapazität auf ca. 7 Informationseinheiten (Items), oder nach zeitlicher Einteilung, auf ca. 2 Sekunden begrenzt. Ebenso wird die Erinnerungsleistung beeinflusst durch Wortlänge, phonetische oder semantische Ähnlichkeiten zwischen den Wörtern und durch für das eigentliche Erinnern unwichtige Nebengeräusche (Baddeley 2007).

Im Visuospatial sketchpad wird dieselbe Erinnerungsleistung für räumliche und bildliche Informationen erbracht. So kann das sketchpad als ein imaginärer Notizblock betrachtet werden, der es uns ermöglicht, visuelle Informationen für begrenzte Zeit zu behalten, wiederzugeben oder bei Bedarf in das Langzeitgedächtnis zu überführen (Baddeley 2007).

Die Central executive spielt im Modell nach Baddeley eine wichtige Rolle als Vermittler zwischen dem sprachlichen und dem visuellen Subsystem. Durch sie können Informationen aus dem einen in den anderen Speicher gelangen. Sie verwendet für diese Funktion einen multimodalen Code, der nicht abhängig ist von der ursprünglichen Art der Information. Ohne diese universale Eigenschaft der Central executive wäre es uns beispielsweise nicht möglich zu einem gehörten Wort ein entsprechendes Bild zu finden. So hören wir das Wort Trommel und können uns eine Trommel bildlich vorstellen (Baddeley 2007).

Außerdem muss es uns möglich sein, mit Informationen, die im Arbeitsgedächtnis vorhanden sind, zu arbeiten. Wichtig ist dies zum Beispiel, um Rechenaufgaben im Kopf zu lösen. Wir können so die Aufgabe 8×13 im Kopf zerlegen in 8×10 und 8×3 und die Ergebnisse dieser beiden Teilschritte anschließend summieren. Auch diese Funktion wird der Central Executive zugeschrieben (Baddeley 2007).

So kann zusammenfassend über die Central executive gesagt werden, dass sie neben den beiden Speichersystemen eine aufgaben- und aufmerksamskeitsorientierte Stellung innehat, selbst aber keine Gedächtnisinhalte speichern kann (Baddeley 2007).

Mit zunehmender Forschungsarbeit an diesem Modell wurde deutlich, dass durch die drei bisherigen Bestandteile nicht alle Funktionen erklärt werden konnten, die wir dem Arbeitsgedächtnis zuschreiben. So hat laut Baddeley die Central executive keine direkte Speicherfunktion. Es ist uns aber möglich, Inhalte unseres Langzeitgedächtnisses zusammen

mit neuen Informationen zu verarbeiten. Wir wissen, wie eine Trommel aussieht und können nur deshalb beim bloßen Hören des Wortes an das Bild einer Trommel denken. Für diese Interaktionen zwischen dem Arbeits- und dem Langzeitgedächtnis wurde deshalb der Episodic buffer eingeführt (Baddeley 2003). Ihm wurden zunächst alle Funktionen zugeschrieben, die durch die ersten drei Systeme nicht erklärt werden konnten. Seine Hauptfunktion besteht darin, Inhalte aus dem Langzeitgedächtnis für das Arbeitsgedächtnis zugänglich zu machen damit diese in der Central executive verarbeitet werden können. Nach wie vor wird vom Episodic buffer als „black box“ gesprochen. Dies zeigt, dass seine genaue Funktionsweise bislang noch nicht geklärt ist, er aber im menschlichen Arbeitsgedächtnis eine wichtige Rolle zu spielen scheint (Baddeley 2003).

1.3.3 Anatomische Zuordnung der Subsysteme

In vielen Studien wurde versucht, neuronale Korrelate zu den einzelnen Einheiten des Baddeley-Modells zu finden. Die Ergebnisse sind einerseits in Bezug auf einzelne Kortexregionen, andererseits in der Frage, ob eine Hemisphärenlateralisation oder Symmetrie zwischen den Hirnhälften zu finden ist, nicht eindeutig. Die folgende Zusammenstellung aus verschiedenen Arbeiten gibt einen Überblick über die bisher identifizierten anatomischen Strukturen des Arbeitsgedächtnisses. Sie bildet die Basis für die im späteren Teil der Arbeit aufzustellenden Hypothesen über die zu erwartenden neuronalen Aktivierungen in den jeweiligen Systemen.

Phonological loop: Dem reinen Übungsprozess, der im Phonological loop stattfindet, werden die Areale BA 44/6 (Gyrus frontalis inferior) und 8 (Gyrus frontalis medius) zugeordnet. Der Speicher wird dagegen eher in BA 40 (Gyrus parietalis inferior) lokalisiert (siehe Abb. 4) (Baddeley 2003; Logie et al. 2003; Smith und Jonides 1998).

Tendenziell sind diese Regionen bei verbalen Arbeitsgedächtnisaufgaben eher linkshemisphärisch aktiviert (Wager und Smith 2003).

Visuospatial sketchpad: Dem visuellen Anteil des Arbeitsgedächtnisses werden die BA 40 (Gyrus parietalis inferior), 6 (Gyrus frontalis superior und

medius), 47 (pars orbitalis des Gyrus frontalis inferior) und 19 (vorderer okzipitaler Kortex) sowie BA 37 (kaudale Anteile des Gyrus temporalis inferior) und BA 31 (Präcuneus-Region) zugeordnet (siehe Abb. 5). Diese scheinen im Gegensatz zum verbalen Anteil rechtshemisphärisch dominierend zu sein (Baddeley 2003; Wager und Smith 2003). Nicht unumstritten sind die Ergebnisse von Stephen M. Kosslyn, der in Studien zu Aufgaben, in denen Objekte vor dem „inneren Auge“ vorgestellt werden sollten, Aktivität in BA 17 (Area striata) und 18 (vorderer okzipitaler Kortex) fand; diese Areale werden der primären bzw. sekundären Sehrinde zugeordnet und sind vor allem bei „echtem“ Sehen aktiv (Ganis et al. 2004).

Central executive:

Dieser Teil des Arbeitsgedächtnisses ist deutlich schwieriger bestimmten Kortexarealen zuzuordnen. Zusammenfassend wird oft vom dorsolateralen präfrontalen Kortex gesprochen (D'Esposito et al. 1995). Dies deckt sich mit der Annahme, dass die Central executive Aufmerksamkeitsfunktion besitzt und diese dem frontalen Kortex zugeschrieben werden. Wager und Smith ermittelten in einer Metaanalyse als genaue Gebiete die BA 8, 9 und 7 sowie BA 6 und 10 (siehe Abb. 6) (Wager und Smith 2003).

Episodic buffer:

Zu diesem Teil des Arbeitsgedächtnisses gibt es bisher leider keine Angaben für anatomische Regionen. Hier wäre in Zukunft ein Ansatz für weitere Studien zu finden, um diese noch junge Komponente besser zu erforschen.

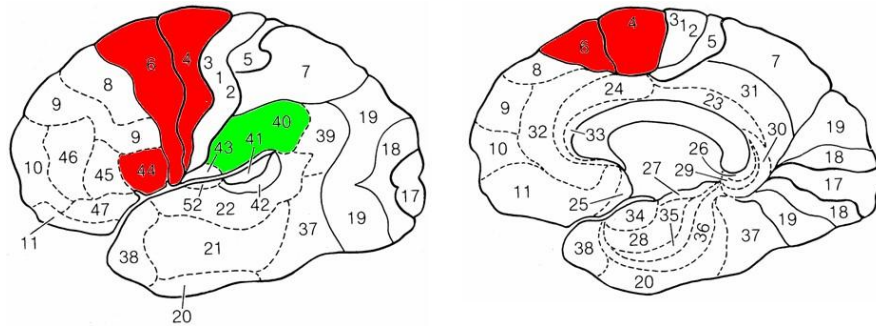


Abb. 4: Strukturen des Phonological loop der linken Hemisphäre. Rote Gebiete gehören zu der Rehearsal-Komponente, grüne stellen den Speicher dar. Links: Linke Hemisphäre von lateral betrachtet. Rechts: Rechte Hemisphäre von medial. Bilder modifiziert nach <http://www.fmri-easy.de>.

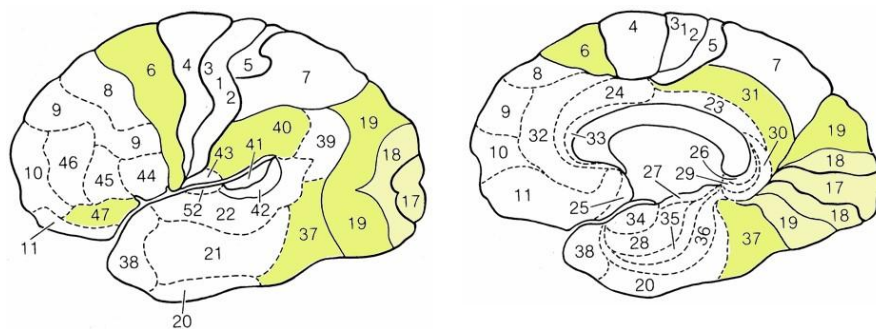


Abb. 5: Strukturen des Visuospatial sketchpad, die eher rechtshemisphärisch ausgeprägt sind. Die heller markierten Gebiete bezeichnen die primäre bzw. sekundäre Sehrinde, die nach Ganis et al. (2004) mit zum visuellen Arbeitsgedächtnis gezählt werden. Links: Linke Hemisphäre von lateral betrachtet. Rechts: Rechte Hemisphäre von medial. Bilder modifiziert nach <http://www.fmri-easy.de>.

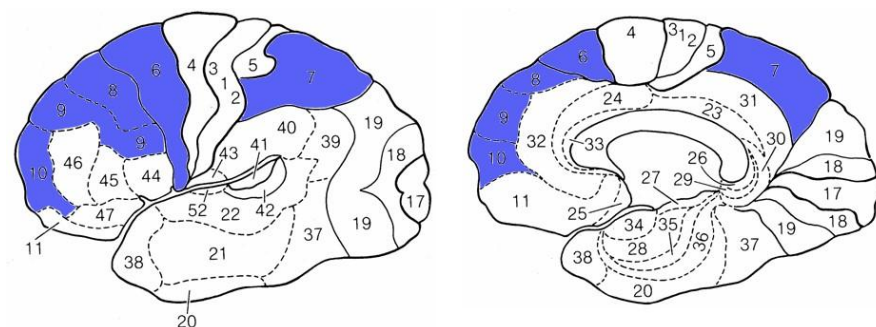


Abb. 6: Strukturen der Central executive, die auf beiden Hemisphären gleichwertig ausgeprägt sind. Links: Linke Hemisphäre von lateral betrachtet. Rechts: Rechte Hemisphäre von medial. Bilder modifiziert nach <http://www.fmri-easy.de>.

1.3.4 Lateralisation der Subsysteme

In der vorgestellten Literatur, die als Grundlage für die anatomische Zuordnung der einzelnen Systeme des Arbeitsgedächtnismodells nach Baddeley diente, zeigt sich eine deutliche Tendenz, Subsysteme auf den Hemisphären unterschiedlich anzusiedeln. Der Phonological loop als rein verbale Komponente wird laut Baddeley der linken Hemisphäre zugeordnet (Baddeley 2003). Rechtshemisphärisch wird hingegen der räumlich-visuelle Anteil in Form des Visuospatial sketchpads lokalisiert (Baddeley 2003). Auch Wager und Smith unterstützen in ihrer Meta-Analyse von Studien zum Arbeitsgedächtnis diese Aufteilung (Wager und Smith 2003).

Neben dieser Aufteilung zwischen den Hemisphären steht die Central executive nicht nur im Modell, sondern auch anatomisch als Vermittler, für sie werden anatomische Korrelate auf beiden Hemisphären angenommen (Baddeley 2003).

Es scheint eine recht strikte Aufgabenteilung im Gehirn bezüglich der einzelnen Qualitäten der zu speichernden Information zu existieren.

1.4 Verbale Funktionen des Menschen

Zahlreiche Kortexregionen werden verbalen Fähigkeiten zugeordnet. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Heschl'sche Querwindung sowie die Insula den primären auditorischen Kortex bilden, der zunächst für die Wahrnehmung von Sprache wichtig ist. Zusätzlich verbal aktiv sind die vorderen und hinteren Anteile des superioren temporalen Gyrus. Diese Anteile werden gemeinsam mit der Heschl'schen Querwindung oft auch als Planum Temporale bezeichnet (Kolb und Whishaw 2003).

Das Modell, das die sprachlichen Funktionen des Menschen und deren neuronalen Korrelate zuerst beschrieb, war das Wernicke-Geschwind-Modell. Seit der Arbeit von Paul Broca und Carl Wernicke in der Zeit von 1860 bis 1870 ist diese Erklärung für unsere Sprache bekannt. Zentrale These des Modells ist die Aussage, dass es eine Sprachregion für das Verstehen von Sprache (Wernicke-Region, BA 22) und eine für das Sprechen selber (Broca-Region, BA 44) gibt. Diese beiden Areale stehen über einen Faserzug, den Fasciculus arcuatus, miteinander in Verbindung (Abb. 7). Besonders hieran ist die stark ausgeprägte Dominanz der linken

Hemisphäre. So soll die Sprachverarbeitung fast ausschließlich linksseitig stattfinden (Poeppl und Hickok 2004).

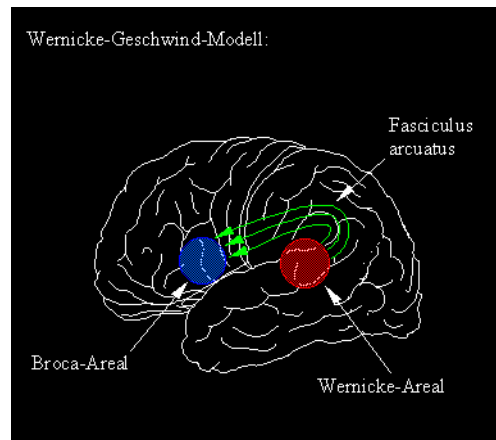


Abb. 7: Das Wernicke-Geschwind-Modell mit seinen zentralen Komponenten. Aus http://brain.exp.univie.ac.at/y_wss_bilder.

Dieses grundlegende Modell kann nun zur Erklärung von zwei Arten des Sprachverständnisses herangezogen werden. So kann ein Wort gehört, aber auch gelesen werden. Abb. 8 zeigt diese beiden Verarbeitungswege.

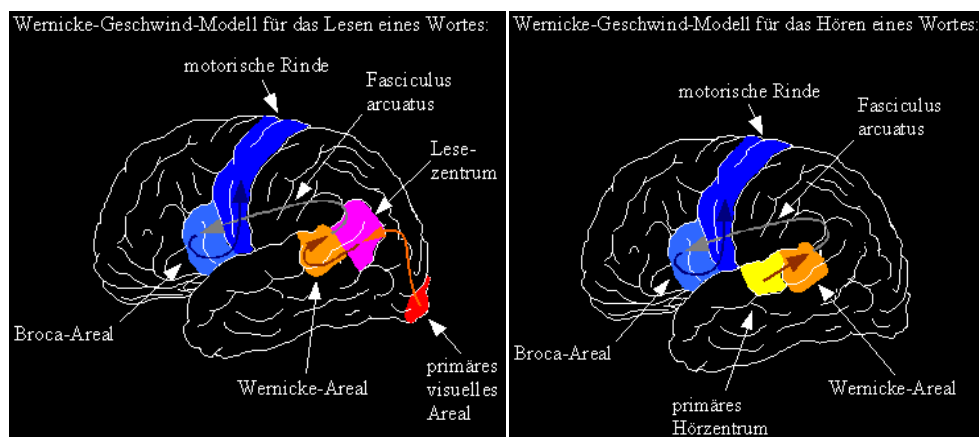


Abb. 8: Modelle für das Lesen (links) und Hören (rechts) von Wörtern nach dem Wernicke-Geschwind-Modell. Aus http://brain.exp.univie.ac.at/y_wss_bilder.

Beim Lesen eines Wortes wird die rein bildliche Information aus dem primären visuellen Areal im Lesezentrum als Wort identifiziert und im Wernicke-Areal „verstanden“. Die weitere Verarbeitung im Broca-Areal und im motorischen Kortex ist wichtig für das Vorlesen des Wortes.

Beim Hören eines Wortes gelangt die akustische Information zunächst in die primäre Hörrinde, die Heschl'sche Querwindung, und wird von dort in das Wernicke-Areal überführt. Auch hier ermöglicht der anschließende Weg über den Fasciculus arcuatus und die Broca-Region die Wiedergabe des Wortes (Poeppl und Hickok 2004).

Problematisch an diesem klassischen Modell ist, dass nicht alle Symptomkomplexe der Aphasie erklärt werden können. Der relativ einfache Aufbau des Modells scheint auch der komplexen Vielfalt unserer Sprache nicht gerecht zu werden. Dazu kommt, dass in bildgebenden Studien neben den eben genannten Bereichen zusätzliche kortikale und subkortikale Areale aktiv waren. Zu diesen gehören der anteriore superiore Temporallappen, der mittlere temporale Gyrus, die Grenzzone zwischen dem temporalen und dem parietalen Lappen, die Basalganglien sowie einige verschiedene Gebiete der rechten Hemisphäre.

Im Jahr 2000 wurde von Hickok und Poeppl ein Sprachmodell vorgeschlagen, das für die Sprachwahrnehmung die rechten und linken auditorischen Kortexgebiete im posterioren superioren Temporallappen postuliert. Neben ihm existieren ein dorsaler und ein ventraler Pfad (dorsal stream und ventral stream), die stärker linksseitig ausgeprägt sind (siehe Abb. 9). Der ventrale Pfad ist wichtig für Sprachvorgänge, die auf das mentale Sprachlexikon zurückgreifen, ein Speicher, der Bedeutungen von Wörtern enthält. Lokalisiert ist dieser Pfad in der Grenzregion zwischen temporalen, parietalen und okzipitalen Kortexregionen. Die dorsale Bahn hingegen findet ihre Bedeutung in Vorgängen, die auf sublexikalische Sprachsegmente zurückgreifen. Der dorsale Pfad wird als eine Art Schnittstelle zwischen sensorischen und motorischen Sprachprozessen beschrieben. Zu finden ist er im inferioren parietalen und frontalen Lappen (Hickok und Poeppl 2000).

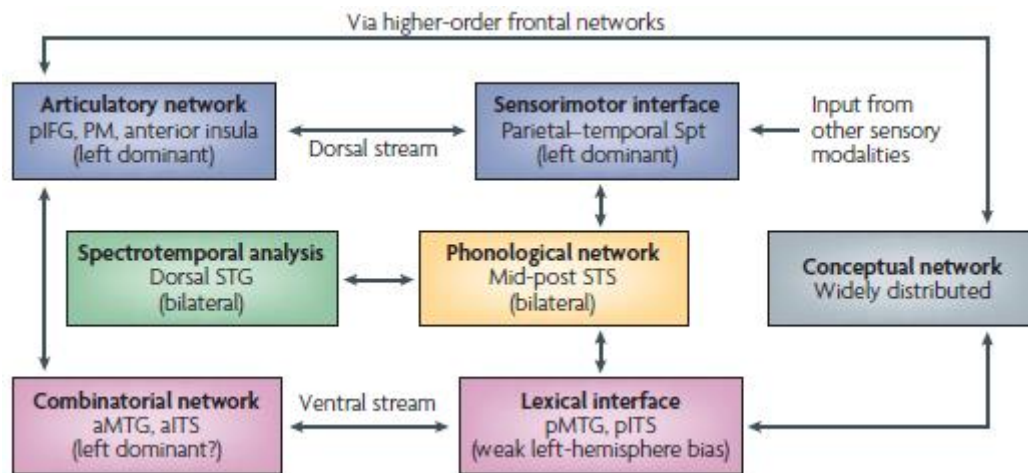


Abb. 9: Das Dual-Stream-Modell nach Hickok und Poeppel: Kernelement dieses Modells ist das phonologische Netzwerk (Phonological Network), in dem die erste Analyse der Sprache stattfindet. Daneben existieren einerseits der ventrale Pfad (Ventral stream), der verbale Information über eine Schnittstelle mit einer Art verbalem Lexikon abgleicht, sowie andererseits der dorsale Pfad (Dorsal stream), dessen Funktion darin besteht, eine Schnittstelle zwischen der verbalen Information und ihrer motorischen Äquivalenz (der Aussprache) herzustellen. Aus Hickok und Poeppel 2007, S. 395.

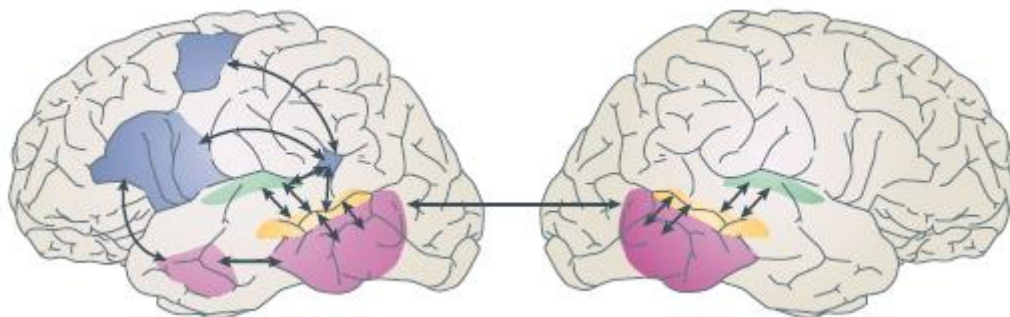


Abb. 10: Die Kortexabbildungen des Dual-Stream-Modells: Das zentrale phonologische Netzwerk ist gelb dargestellt, Bereiche der Sprachanalyse grün. Blaue markieren den dorsalen, violette Bereiche den ventralen Pfad. Aus Hickok und Poeppel, 2007, S. 395.

Erklärtes Ziel dieses Modells ist es, einerseits empirisch Beobachtetes in eine konkrete Vorstellung der Sprache umzusetzen, andererseits aber auch Sprachdefizite, wie z.B. Aphasien, besser erklären zu können. Der ventrale und dorsale Pfad sind in ihrer Gesamtheit noch nicht endgültig erschlossen, Hickok und Poeppel erwarten hierzu noch detailliertere Erkenntnisse, die letztendlich zum Verständnis unserer Sprachfähigkeit führen sollen (Hickok und Poeppel 2007).

1.5 Lernen und Lerneffekte

1.5.1 Das Lerngesetz

Unter Lernen versteht man im weiteren Sinn, neue Fähigkeiten zu erlernen oder neues Wissen aufzunehmen und zu merken. Wenn wir eine bestimmte Tätigkeit mehrfach ausführen, lernen wir durch das Wiederholen diese besser zu beherrschen. Man spricht dabei von einem Lernzuwachs, der über die Wiederholungen stattfindet. Dieser Zuwachs kann mathematisch beschrieben werden. So nimmt die Leistung zwar bei jeder Wiederholung zu, doch ist ihr Anstieg und somit der Lernerfolg bei jeder weiteren Wiederholung geringer als bei der ihr vorangegangenen (Anderson 2001).

Die Potenzfunktion, die diesen Zuwachs beschreibt, wird nach Newell und Rosenbloom als Potenzgesetz des Lernens bezeichnet (Newell und Rosenbloom 1981).

Die ursprüngliche Form dieses Gesetzes wurde anhand eines Experiments aufgestellt, in dem Reaktionszeiten bis zur Wiedererkennung von einfachen Sätzen gemessen und diese mit steigender Versuchsanzahl aufgetragen wurden. Der Lernfortschritt hierbei kann durch diese Formel beschrieben werden:

$$T = 1,40 P^{-0,42}$$

T = Reaktionszeit

P = Zahl der Übungstage

In dieser ursprünglichen Form ist das Potenzgesetz des Lernens zwar auf einen bestimmten Studententyp beschränkt, seine Bedeutung lässt sich hieraus aber gut ableiten. Mit zunehmenden Übungstagen wird durch die negative Potenz die Reaktions- und somit die Wiedererkennungzeit kürzer. Der Übungseffekt nimmt in seiner Intensität mit der Zeit ab und nähert sich der bestmöglichen Leistung asymptotisch an (Newell und Rosenbloom 1981).

1.5.2 Langzeitpotenzierung

Analog dazu verläuft die neuronale Aktivität im Hippokampus. Diese Art des neuronalen Lernens wird als Langzeitpotenzierung (long-term-potential, LTP) bezeichnet. Sie beschreibt den Zuwachs an Sensibilität einer Nervenbahn bei deren wiederholter Reizung. Die Sensibilität steigt zunächst stark an und nimmt dann in der Stärke der Zunahme langsam ab,

auch sie kann in diesem Zusammenhang als Potenzfunktion beschrieben werden (Anderson 2001).

1.5.3 Lernstrategien

Immer wieder sieht man im Fernsehen einige „Gedächtnismeister“, die es durch ganz besondere Strategien schaffen, sich hunderte von Zahlen oder Wörtern zu merken. Unter ihnen werden sogar Wettkämpfe wie die deutsche Meisterschaft ausgetragen. So konnte der deutsche Gedächtnismeister 2008 Johannes Mallow in 30 Minuten zehn komplette Kartenspiele mit jeweils 52 Karten erinnern (<http://www.gloschewski.de>). Diese enormen Leistungen sind sicherlich nur durch besonderes Training zu erreichen und können für Gedächtnisleistungen im Alltag nicht als Maßstab herangezogen werden.

Aber auch ungeübte „Merker“ können verschiedene Strategien anwenden, um etwas auswendig zu lernen. Unterteilt wird hierbei grob in zwei verschiedene Kategorien. Einerseits besteht die Möglichkeit, etwas durch reines Wiederholen auswendig zu lernen („rote strategy“). Dies geschieht in der Regel durch subvokales Wiederholen der Items (Benjamin und Bjork 2000). Andererseits ist es aber auch möglich, die zu erinnernden Items inhaltlich in einen Zusammenhang zu setzen, beispielsweise eine Geschichte um sie herum aufzubauen („elaborative strategy“) (Fabiani et al. 1990). Monica Fabiani et al. zeigten 1990 in einer Studie, dass eine elaborative Lernstrategie zu besseren Erinnerungsleistungen führte, als reines Auswendiglernen es tat (Fabiani et al. 1990). Diese strikte Strategieeinteilung scheint jedoch nicht immer haltbar zu sein. In einer Studie von Daniel Wiswede aus dem Jahre 2007 musste eine dritte Gruppe („mixed strategy“) eingeführt werden. Nur so konnten alle Probanden entweder einer klaren Strategie oder einer Mischform zugeordnet werden (Wiswede et al. 2007).

Jedoch ist dieser Unterschied auch abhängig vom Zeitdruck, unter dem das Lernen stattfindet. So ist das elaborative Lernen weniger effektiv, wenn nur wenig Zeit zum Lernen zur Verfügung steht (Benjamin und Bjork 2000). Reines Auswendiglernen hingegen funktioniert auch unter Zeitdruck noch gut oder zumindest mit weniger starken Einschränkungen im Vergleich zur elaborativen Strategie (Benjamin und Bjork 2000).

1.5.4 Der Primacy-Recency-Effekt

Ein typischer Effekt, der bei Gedächtnisaufgaben auftritt, ist der sogenannte Primacy-Recency-Effekt. Er beschreibt einerseits die bessere Abrufleistung von Items, die in einer Reihenfolge am Anfang stehen (Primacy), sowie derer, die am Ende der Liste stehen (Recency) (Zhang et al. 2003). In einer Wortliste von 15 Wörtern würden so die ersten und die letzten von einem Probanden besser erinnert oder aber mit einer kürzeren Reaktionszeit wiedererkannt werden.

Zu dem Primacy-Recency-Effekt finden sich keine Aussagen über Geschlechtsunterschiede, es scheint davon ausgegangen zu werden, dass zwischen Männern und Frauen in der Ausprägung kein Unterschied besteht.

Es gibt zwei verschiedene Erklärungsansätze für diesen Effekt. Im Dual-Store-Modell wird die bessere Erinnerungsleistung bei Items zu Beginn einer Liste dadurch erklärt, dass diese bereits in das Langzeitgedächtnis übertragen werden konnten und somit schon verfestigt sind. Der Recency-Effekt tritt nach diesem Modell auf, weil die letzten Items noch immer im Speicher des Kurzzeitgedächtnisses vorhanden sind und somit am schnellsten und leichtesten erinnert werden können (Talmi et al. 2005).

Das Single-Store-Modell hingegen findet für den Primacy-Effekt die Erklärung, dass die Items, die zu Beginn in das Kurzzeitgedächtnis gekommen sind, durch innerliches Wiederholen und somit einem Auffrischen des Gedächtnisinhaltes besser erinnert werden können. Der Unterschied zwischen den beiden Modellen besteht letztlich in der Erklärung des Primacy-Effektes, der entweder mit oder ohne Langzeitgedächtnisbeteiligung entsteht (Talmi et al. 2005).

In einer Studie von Talmi et al. wurde für den Primacy-Effekt eine Langzeitgedächtnisaktivierung im fMRT nachgewiesen. Dies stützt also die These des Dual-Store-Modells.

1.6 Geschlechterunterschiede

Die allgemeine von vielen als richtig anerkannte Annahme, dass Frauen in sprachlicher Hinsicht Männern, diese den Frauen wiederum in räumlichen Aufgaben überlegen sind, ist so pauschal sicherlich nicht haltbar.

Bleecker et al. beschrieben 1988 in einer Studie mit Männern und Frauen, die eine Liste mit 15 Wörtern frei wiedergeben mussten, eine bessere Leistung der Frauen über alle Altersgruppen hinweg (Bleecker et al. 1988).

1997 beobachteten Kramer et al. in einem Experiment, das auf dem California Verbal Learning Test beruhte, eine signifikant bessere Performance der Frauen. Diese Ergebnisse zeigten sich auch in einer Untersuchung an 5- bis 16-jährigen Kindern und Jugendlichen wieder (Kramer et al. 1997).

Der CVLT ist eine englischsprachige Variante des deutschen VLMT (Verbaler Lern- und Merkfähigkeitstest), der in vielen der genannten Arbeiten als Test zur Messung des verbalen Gedächtnisses verwendet wurde. Beide Tests basieren auf Wortlisten, die nach verbaler Präsentation frei wiedergegeben werden müssen (siehe Methodenteil). So sind gerade diese Aussagen für meine Arbeit interessant, da meine Daten ebenfalls diese bessere Leistung der Frauen zeigen müssten.

In einem Review von Weiss et al. wurde 2003 die bessere Leistung der Frauen bei verbalen Aufgaben anhand vieler Studien deutlich herausgestellt. Dem entgegengesetzt fand sich eine Überlegenheit der Männer bei räumlich-visuellen Aufgaben (Weiss et al. 2003). Auch die gängige Lehrbuchmeinung unterstützt diese Aussagen. Besonders wird hierbei die Überlegenheit der Frauen in Aufgaben, die das verbale Gedächtnis beanspruchen, herausgestellt (Lautenbacher et al. 2007).

In einem neueren Review von Wallentin wurde die generelle Überlegenheit des weiblichen Geschlechts in verbalen Aufgabenstellungen angezweifelt. Die Gesamtheit der Studien zeige keine großen Unterschiede zwischen Männern und Frauen (Wallentin 2009). Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass sich Effekte in verschiedenen Aufgabenbereichen gegenseitig auslöschen können, wenn sie gemeinsam betrachtet werden. So kann insgesamt vielleicht keine verbale Überlegenheit der Frauen angenommen werden, jedoch können diese in Aufgaben, die z.B. das verbale Gedächtnis betreffen, durchaus bessere Leistungen erbringen als Männer.

Auch auf der Ebene der Bildgebung finden sich Unterschiede zwischen Männern und Frauen. Diese wurden als Teil dieses Gesamtprojektes von Kathrin Behrens in ihrer Dissertation untersucht (Behrens 2008). In meiner Arbeit möchte ich jedoch andere Schwerpunkte setzen. Ich werde mich bei der Analyse der fMRT-Daten hauptsächlich auf die Plastizitätseffekte über die ersten 5 Durchgänge des VLMT konzentrieren.

1.7 Neuronale Plastizität

Das Lerngesetz beschreibt die Zunahme von Leistung mit stetiger Wiederholung von Aufgaben oder Tätigkeiten. Diese Steigerung spiegelt sich auch auf neuronaler Ebene wider. Unter dem Begriff der neuronalen Plastizität versteht man Umstrukturierungsprozesse des Kortex auf gesamtkortikaler Ebene, aber auch an einzelnen Synapsen. Dies kann sich sowohl in struktureller als auch in funktioneller Weise äußern (Draganski und May 2008).

Zu diesem Themengebiet existieren viele Studien, die sich hauptsächlich auf die Plastizitätseffekte nach längerem Training beziehen. Leider beanspruchen die Aufgabenstellungen dieser Arbeiten in der Regel nicht das verbale Arbeitsgedächtnis.

Sehr gute Gesamtübersichten über Plastizitätsvorgänge finden sich in den Arbeiten von Clare Kelly. Sie stellt in einem Review von 2006 den Stand der Plastizitätsforschung dar. So wird grundsätzlich unterschieden zwischen Zunahme und Abnahme von messbarer Aktivität und einer Umstrukturierung von gesamten neuronalen Netzwerken. So können über einen gewissen Trainingszeitraum nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ unterschiedliche Aktivitätsmuster gefunden werden. Eine Zunahme in der messbaren Aktivität (in fMRT- oder PET-Studien) wird größtenteils bei motorischen und sensorischen Aufgabenstellungen beobachtet. Entgegengesetzt dazu finden sich in der Mehrzahl der Studien, die kognitive Leistung fordern, abnehmende Aktivitätsmuster nach Training. Diese Trennung sollte so strikt aber nicht stehen gelassen werden. So steigt laut Kelly in Kortexgebieten, die aufgabenspezifisch aktiv sind, die Aktivität über die Zeit an, in Regionen, die Aufmerksamkeitsfunktionen zugeordnet werden, nimmt diese aber ab (Kelly et al. 2006).

Im nachfolgenden Abschnitt werde ich weiter auf Arbeiten eingehen, die sich mit den Plastizitätseffekten befassen, die für meine Arbeit von besonderem Interesse sind.

Eine der wenigen bildgebenden Studien, in der das verbale Arbeitsgedächtnis untersucht wurde, ist eine PET-Studie von Andreasen et al. aus dem Jahre 1995. In dieser Studie wurden Probanden Wortlisten präsentiert, die nach einer Woche Trainingszeit wiederholt werden mussten. Im Vergleich dazu geschah dies auch mit Wortlisten, die den Probanden unbekannt waren. Die PET-Aktivierungsdaten zeigten einen schwächeren Blutfluss in den verbalfunktionellen Kortexgebieten bei geübten Listen als bei unbekanntem (Andreasen et al. 1995). Diesem Effekt kann eine zunehmende Fokussierung auf die zentrale Aufgabe zugrunde liegen, da mit Übung keine unnötigen Kortexaktivitäten mehr stattfinden (Kelly et al. 2006). Dieselbe Aktivitätsänderung wurde in einer fMRT-Studie von Garavan et al. gefunden, die

jedoch das räumlich-visuelle Arbeitsgedächtnis untersuchten. Auch hier nahm die messbare Aktivität in Bereichen des Arbeitsgedächtnisses ab, jedoch schon nach 20 Minuten Training (Garavan et al. 2000).

Es gibt jedoch auch Arbeiten, die einen entgegengesetzten Effekt beobachten.

Hempel et al. beschrieben in einer Studie zum visuellen Arbeitsgedächtnis eine Aktivitätsänderung in den untersuchten Kortexgebieten, die einer umgekehrten U-Kurve folgte. Hierbei wurden beim ersten Mal, nach zwei Wochen und nach vier Wochen jeweils dieselben Aufgabenstellungen gegeben und die Probanden währenddessen im fMRT-Scanner untersucht (Hempel et al. 2004). Drei einzelne Probanden wurden von Westerberg und Klingberg über einen Zeitraum von fünf Wochen auf Arbeitsgedächtnisaufgaben trainiert und die fMRT-Daten vorher und nachher miteinander verglichen. Hier fand sich eine verstärkte Aktivität in präfrontalen Kortexregionen nach der Trainingszeit, die vorher weniger aktiv waren (Westerberg und Klingberg 2007).

Die Vielzahl der Studien zum Thema der neuronalen Plastizität zeigt keine einheitlichen Ergebnisse. Sowohl ein Anstieg als auch ein Abfall der Aktivierung von arbeitsgedächtnisassoziierten Kortexarealen ist zu finden. Dies zeigt deutlich den Bedarf an weiteren, Klarheit schaffenden Studien auf diesem Gebiet.

1.8 Ziele der Arbeit und Hypothesenaufstellung

1.8.1 Allgemeines

Die in der bisherigen Einleitung vorgestellten Effekte sowie das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley stellen den derzeitigen Stand des Wissens sowie die noch offenen Fragen in Bezug auf diese Arbeit vor. Auf dieser Basis stelle ich die folgenden Hypothesen sowohl für die Verhaltens- als auch die Bildgebungsdaten auf. Anhand dieser möchte ich die genannten Effekte überprüfen und testen.

1.8.2 Verhaltensdaten

Auf der Ebene der Verhaltensdaten lassen sich einige der beschriebenen Literaturbefunde überprüfen. Zunächst soll der Lernzuwachs über die fünf Durchgänge sowie die Funktion, die diesen Zuwachs beschreibt, bestimmt werden. Aufgrund der Literaturlage wird angenommen,

dass Frauen im VLMT eine bessere Leistung erreichen als Männer. Eine Geschlechtsdifferenz sollte beim Primacy- und Recency-Effekt nicht zu finden, der Effekt an sich aber in den Daten nachzuweisen sein. Ebenso wird davon ausgegangen, dass Probanden, die die elaborative Strategie zum Lernen der Liste gewählt haben, die besten Ergebnisse im Abruf erzielen konnten.

Diese Annahmen führen zu folgenden Hypothesen:

1. Die Abrufleistung steigert sich mit jedem Durchgang.
2. Die Leistung kann als eine Potenzfunktion beschrieben werden, ihr Zuwachs nimmt mit jedem weiteren Durchgang also ab.
3. Frauen zeigen bessere Leistungen beim Abruf als Männer.
4. Es findet sich ein Primacy-Effekt.
5. Es findet sich ein Recency-Effekt.
6. Diese Effekte sind geschlechtsunabhängig vorhanden.
7. Probanden, die die elaborative Strategie verwendeten, erzielten bessere Leistungen als die restlichen Probanden.

1.8.3 Bildgebungsdaten

Die Analyse der fMRT-Daten bezieht sich vorrangig auf die Untersuchung der kortikalen Plastizität über die 5 Lerndurchgänge. Hierbei werden die verschiedenen Untereinheiten des Arbeitsgedächtnisses einzeln betrachtet, sowie die unterschiedlichen Lernstrategien berücksichtigt.

Zunächst werden die Aktivierungsdaten auf die anatomischen Zuordnungen der einzelnen Arbeitsgedächtnisanteile untersucht. Es wird erwartet, dass diese Hirngebiete auch im durchgeführten Experiment Aktivität zeigen.

Hypothese: Die in der Einleitung aufgezeigten anatomischen Korrelate zu den Subsystemen des Arbeitsgedächtnisses zeigen in den fMRT-Daten signifikante Aktivität.

Aus der in der Einleitung vorgestellten Literatur geht hervor, welche Hirngebiete spezifisch für die einzelnen Subsysteme des Arbeitsgedächtnismodells nach Baddeley aktiv sein sollen.

Unter dem Punkt Hemisphärentendenz wird außerdem aufgeführt, ob eine Lateralisation dieser Gebiete auf eine der beiden Hemisphären laut der in der Einleitung vorgestellten Literatur erwartet werden kann. Dies ist in Tab. 1 aufgeführt.

Subsystem	Anatomische Region	Brodmann-Area	Hemisphärentendenz
Phonological Loop	Gyrus frontalis inferior	44 / 6	L > R
	Gyrus frontalis superior und medius	8	L > R
	Gyrus parietalis inferior	40	L > R
Visuospatial Sketchpad	Gyrus frontalis superior und medius	6	L < R
	Pars orbitalis des Gyrus frontalis inferior	47	L < R
	Gyrus temporalis inferior	37	L < R
	Gyrus parietalis inferior	40	L < R
	Präcuneus	31	L < R
	vorderer okzipitaler Kortex	19	L = R
Central Executive	präfrontaler Kortex	6, 7, 8, 9, 10	L = R

Tab. 1: Die von mir aufgestellten Hypothesen zu den erwarteten anatomischen Korrelaten der Subsysteme des Arbeitsgedächtnismodells nach Baddeley sowie einer groben Angabe zur Hemisphärentendenz bzw. Lateralisierung der einzelnen Gebiete. L > R z.B. bedeutet, dass auf der linken Hemisphäre stärkere Aktivität zu erwarten ist als auf der rechten.

Als erste allgemeine Hypothese gehe ich bei den Annahmen zur Plastizität davon aus, dass sich in der kurzen Zeitspanne des vorliegenden Experiments die messbare Aktivität verstärkt. Dies deckt sich mit einem Großteil der Arbeiten, die entweder nur einen Anstieg oder einen initialen Anstieg mit anschließendem Aktivitätsabfall bei Übung beobachteten. Die inverse U-Kurve, die Hempel et al. beschreiben, wird voraussichtlich in solch einer kurzen Zeit nicht zu finden sein (Hempel et al. 2004).

Betrachtet werden der Phonological loop, das Visuospatial sketchpad, die Central executive sowie eine mögliche Aktivität des Langzeitgedächtnisses. Als Marker hierfür soll der Hippokampus dienen.

Als zusätzlichen Analysepunkt möchte ich die Unterschiede zwischen verschiedenen Strategiegruppen untersuchen. Diese Idee entstand bei einer ersten Sichtung der Verhaltensdaten und den Fragebögen, die die Probanden nach der Durchführung des Experiments ausfüllen sollten. In ihnen wurde unter anderem nach einer möglichen Lernstrategie gefragt. Diese Untersuchung war nicht als Hauptziel der Studie vorgesehen, erscheint mir jedoch als so interessant, dass ich sie gerne als Zusatz mit in die Arbeit aufnehmen möchte. Die ursprüngliche Ausrichtung meiner Arbeit auf die Untersuchung auf Kurzzeitplastizität ist aber weiterhin der Kernpunkt der Dissertation.

Diese Kombination aus der Bedingung Hören und Sprechen, den unterschiedlichen Subsystemen und der Strategieeinteilung ergibt eine große Zahl an Hypothesen. Ich werde daher die Annahmen zu den verschiedenen Strategien einzeln zuerst in einer Tabelle vorstellen und diese anschließend erläutern. So kann trotz der Vielzahl an Hypothesen ein klares Bild entstehen.

1.8.4 „Rote strategy“

Bedingung	Komponente	Dg 1	Dg 2	Dg 3	Dg 4	Dg 5
Hören	PL	+	++	+++	++++	+++++
	CE	o	+	+	++	++
	LZG	o	+	++	++ +	++++
	VSS	o	o	o	o	o
Sprechen	PL	++	++	+++	++++	+++++
	CE	o	+	+	++	++
	LZG	o	+	++	+++	++++
	VSS	o	o	o	o	o

Tab. 2: Veränderungen der verschiedenen Gedächtnisbereiche über die Zeit bei reiner „Aufsage-Strategie“ (Dg: Durchgang; PL: Phonological Loop; CE: Central Executive; LZG: Langzeitgedächtnis; VSS: Visuospatial Sketchpad; o: keine bis geringe Aktivität; + - +++++: Aktivitätsstärke je nach Anzahl der +).

Bei einer reinen „Aufsage“-Strategie erwarte ich eine starke Aktivität des Phonological Loop über die 5 Durchgänge beim Hören und Wiedergeben der Wortliste. Diese Aktivität wird mit jedem Durchgang stärker werden. Bildlich sollte hierbei nichts geschehen, also dürfte

Aktivität im Visuospatial Sketchpad eher schwach bis gar nicht zu finden sein. Die Central Executive überführt Inhalte aus dem PL in den Episodic Buffer und von dort aus ins Langzeitgedächtnis. Da mit jedem Durchgang mehr Information diesen Weg gehen sollte, müsste die Aktivität hier von Durchgang 1 bis 5 zunehmen. Dementsprechend sollte das LZG in späteren Durchgängen stärker beansprucht und somit aktiviert werden. Diese Annahmen gelten sowohl für das Hören der Liste als auch für ihre Wiedergabe.

1.8.5 „Elaborative strategy“

Bedingung	Komponente	Dg 1	Dg 2	Dg 3	Dg 4	Dg 5
Hören	PL	+	+	+	+	+
	CE	++	++	++	++	++
	LZG	o	+	++	+++	++++
	VSS	+	++	+++	++++	+++++
Sprechen	PL	o	o	o	o	o
	CE	+++	+++	+++	+++	+++
	LZG	o	+	++	+++	++++
	VSS	++	++	+++	++++	+++++

Tab. 3: Veränderungen der verschiedenen Gedächtnisbereiche über die Zeit bei einer elaborativen Lernstrategie.

Bei einer elaborativen Lernstrategie erwarte ich andere Aktivitätsänderungen als bei einer reinen „Aufsage“-Strategie. Wenn die Worte gehört werden, sollte der PL nur gering aktiv, eine gewisse Grundaktivität aber vorhanden sein, schließlich geht es um verbale Information. Beim Sprechen hingegen dürfte hier aber nur Aktivität im (prä-)motorischen Anteil zu finden sein. Entgegengesetzt dazu ist das VSS beim Hören und Sprechen sehr aktiv. Die VSS-Aktivität nimmt mit jedem Durchgang, sozusagen als Abbildung des Trainings, zu. Die CE muss bei dieser Lernstrategie Information verstärkt umsetzen, sowohl beim Hören als auch beim Sprechen der Wörter, da diese verbildlicht gespeichert sind. Das Langzeitgedächtnis sollte sich ähnlich verhalten wie in der Strategie zuvor. Seine Aktivität müsste mit zunehmenden Durchgängen stärker werden.

1.8.6 „Mixed strategy“

Bedingung	Komponente	Dg 1	Dg 2	Dg 3	Dg 4	Dg 5
Hören	PL	+	++	++	+++	+++
	CE	++	++	++	++	++
	LZG	o	+	++	+++	++++
	VSS	+	+	++	++	++
Sprechen	PL	+	+	+	+	+
	CE	++	++	++	++	++
	LZG	o	+	++	+++	++++
	VSS	+	+	++	++	++

Tab. 4: Veränderungen der verschiedenen Gedächtnisbereiche über die Zeit bei einer gemischten Lernstrategie.

Bei Probanden die eine Mischform aus beiden Lernstrategien anwendeten, erwarte ich sowohl im PL als auch im VSS bei Hören und Sprechen eine Aktivitätszunahme, die jedoch für den PL etwas stärker ausgeprägt ist, weil es sich um eine verbale Aufgabe handelt und der Trainingseffekt dort eher zu registrieren sein müsste. Die CE wird eine moderate Aktivität zeigen, sie übersetzt die Information unter beiden Bedingungen aus dem PL in den Code des VSS. Das Langzeitgedächtnis wird wie zuvor erwartet auch hier in seiner Aktivität zunehmen.

2. Material und Methoden

Die vorliegende Dissertation baut auf der Arbeit von Frau Kathrin Behrens auf, die die fMRT-Untersuchungen für ihre eigene Dissertation durchführte (Behrens 2008). Sie rekrutierte die Probanden und erstellte das experimentelle Design. Ich übernahm für meine Arbeit die fMRT-Daten aus ihrer Studie.

Ihre und meine Arbeit sind ein Teil des Gesamtprojektes „Entwicklung und Validierung von neuen fMRT-Paradigmen zur Untersuchung des Einflusses von Sexualhormonen auf die kortikalen Korrelate verbaler und räumlicher kognitiver Funktionen“. Dieses Projekt wurde gefördert vom „Forschungsförderungsprogramm, Medizinische Fakultät, Georg-August-

Universität Göttingen“. Ebenfalls zu diesem Projekt gehört die Dissertation von Frau Sophie Hinrichs (Hinrichs 2008).

In gemeinsamer Diskussion mit Frau Dr. Kirsten Jordan (Schwerpunktprofessur Forensische Psychiatrie der Universität Göttingen) und Herrn Dipl.-Ing. Torsten Wüstenberg (Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Charité Universitätsmedizin, Berlin) wurde erörtert, in welche Richtung ich mich mit meiner erneuten Untersuchung der fMRT-Daten bewegen sollte. Hierbei wurden deutlich andere Schwerpunkte gesetzt, als Frau Kathrin Behrens es getan hatte.

Die Verhaltensdaten, die von Frau Behrens erfasst wurden, wertete ich selbstständig komplett neu aus.

Die Vorverarbeitung der fMRT-Daten fand gemeinsam mit Frau Dr. Jordan und Herrn Wüstenberg statt.

Nach einer Einarbeitung in notwendige Software von Frau Dr. Jordan und Herrn Wüstenberg wurde die Literaturrecherche für die Erstellung des theoretischen Teils der Arbeit von mir selbstständig ausgeführt und die Auswertung der fMRT-Daten mithilfe des MATLAB R2007A-Plugins SPM in der Version 5.0 (Quelle: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) ebenfalls von mir durchgeführt. Hierbei wurden neue Einzelprobandenmodelle und neue Gruppenmodelle von mir selbstständig erstellt.

Nach der Einarbeitung von Frau Dr. Jordan erfolgte die statistische Auswertung der weiteren Daten mit der Software SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) in der Version 15.0 von mir.

Die Abbildungen der fMRT-Aktivierungsdaten wurden nach Einarbeitung von den genannten Mitarbeitern in die entsprechende Software, in diesem Fall MRICron, ebenfalls selbstständig erstellt. MRICron ist ein Programm, das es ermöglicht, aus fMRT-Aktivierungsbildern 3D-Bilder von Hirnen zu erstellen und auf diesen Aktivitätscluster darzustellen. Die Software stammt von Chris Rorden und ist unter <http://www.cabiatl.com/mricron/> erhältlich.

Interpretation und Diskussion der Ergebnisse erfolgte unter Einbeziehung der aktuellen Literatur selbstständig.

2.1 Funktionsweise der funktionellen Magnetresonanztomographie

2.1.1 Geschichte

Das Phänomen der Magnetresonanztomographie (damals noch als kernmagnetische Resonanz bezeichnet) wurde unabhängig voneinander von zwei Forschern, Felix Bloch und Edward Purcell, 1946 entdeckt. 1952 wurden sie dafür mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet. Paul Lauterbur war 1973 der erste, der diese Entdeckung für bildgebende Versuche nutzen konnte (Weishaupt et al. 2006). Wirklichen Einzug in die funktionelle Bildgebung fand die Magnetresonanztomographie, als Seiji Ogawa 1990 den BOLD-Effekt (Blood oxygen level dependent) entdeckte und beschrieb (Ogawa et al. 1990). Dieser Effekt beruht auf den unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von oxygeniertem und desoxygeniertem Hämoglobin. So wurde es möglich, Blut selbst als eine Art Kontrastmittel zu verwenden. Ohne vorherige Gabe dieser Mittel war zuvor eine funktionelle Messung nicht durchführbar gewesen.

Mittlerweile ist die MRT/fMRT ein wichtiges Diagnose- und Forschungsverfahren geworden, das unter anderem auch wegen seiner, im Vergleich zu Röntgenverfahren nicht vorhandenen Strahlenbelastung geschätzt wird.

2.1.2 Grundlagen

Grundlage der Magnetresonanztomographie ist die Eigenschaft von Atomkernen, um ihre eigene Längsachse zu kreisen. Diese Bewegung wird als Kernspin bezeichnet und findet sich nur in Atomen mit einer ungeraden Protonenanzahl. Das einfachste Beispiel hierfür ist der Wasserstoffkern mit nur einem Proton. Durch die Kreisbewegung des positiven Protons entsteht ein Dipol mit einem dazugehörigen magnetischen Feld (Abb. 11) (Weishaupt et al. 2006).

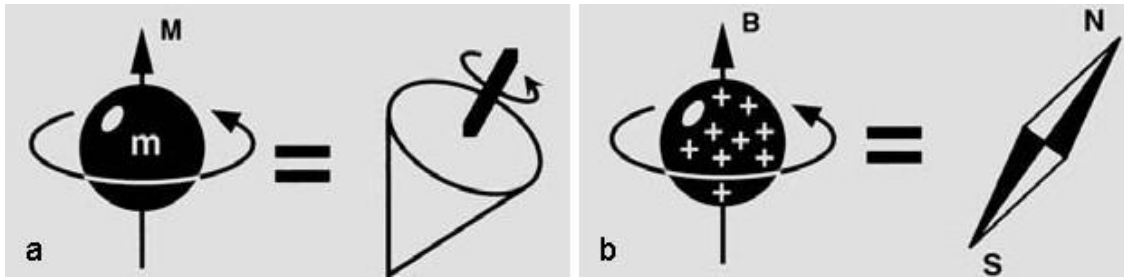


Abb. 11: Kernspin in einem Atom (a) und dessen zugehöriges Magnetfeld (b). Aus Weishaupt et al., 2006, S. 2.

Für die folgenden Erklärungen benötigen wir ein Koordinatensystem, das die drei Raumrichtungen x , y und z enthält. Alle drei Achsen stehen orthogonal zueinander im Raum. Im normalen unangeregten Zustand ordnen sich die Atomkerne diffus im Raum aus, ihre magnetischen Felder neutralisieren sich gegenseitig in der Summe. Wirkt jedoch ein äußeres starkes Magnetfeld auf die Kerne ein, so richten sie sich parallel bzw. anti-parallel zueinander aus. Das bedeutet, dass ein Teil in die eine Richtung entlang des äußeren Magnetfelds ausgerichtet wird, der andere genau entgegengesetzt. Insgesamt findet sich aber ein leichtes Übergewicht an Kernen in der parallelen Ausrichtung (Abb. 12) (Weishaupt et al. 2006).

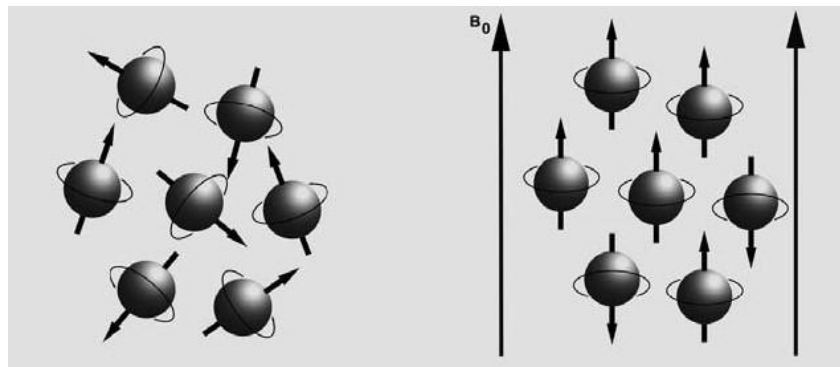


Abb. 12: Auf der linken Seite sind die Atomkerne in unterschiedlichen, zufälligen Richtungen angeordnet. Wird nun ein äußeres Magnetfeld, hier bezeichnet durch B_0 , auf die Kerne angelegt, richten sie sich parallel bzw. antiparallel dazu aus. Aus Weishaupt et al., 2006, S. 5.

Durch diese Anordnung entsteht eine Magnetisierung in der z -Richtung, parallel zum äußeren Feld B_0 . Die Spins der Kerne zeigen aber nicht geradewegs in die Richtung von B_0 sondern kreisen zunächst um diese Achse, wie ein Kreisel, der nicht exakt gerade läuft (Abb. 13). Diese kreiselnde Bewegung wird Präzessionsbewegung genannt (Weishaupt et al. 2006).

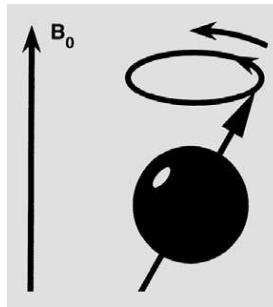


Abb. 13: Die Atomkerne kreisen um die Achse des äußeren Magnetfelds B_0 . Aus Weishaupt et al., 2006, S. 3.

Diese Präzessionsbewegung findet in allen Atomkernen in einer bestimmten Geschwindigkeit statt. Diese ist abhängig von der Stärke des äußeren Magnetfeldes B_0 sowie der sogenannten gyromagnetischen Konstante, die für jede Art von Atomkernen unterschiedlich ist. Diese Geschwindigkeit wird als Larmorfrequenz bezeichnet und kann nach der Larmorgleichung berechnet werden:

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

ω_0 = Larmorfrequenz in MHz

γ = gyromagnetische Konstante MHz/ T- 1

B_0 = Stärke des Magnetfeldes in Tesla

Diese Präzessionsbewegung nimmt immer weiter ab, bis sich die Kerne um eine Achse drehen, die genau parallel zu B_0 liegt. Dadurch, dass mehr Kerne parallel als antiparallel ausgerichtet werden, entsteht eine Magnetisierung entlang der z-Achse (M_z) (Weishaupt et al. 2006).

Durch Hochfrequenzimpulse (HF-Impulse), deren Frequenz mit der Larmorfrequenz übereinstimmt, können die Atomkerne angeregt werden, also Energie aufnehmen. Die rotierenden Atomkerne werden mit der Energie aus ihrer bisherigen, energiearmen Ausrichtung abgelenkt. Die Rotationsachse kippt aus der z-Richtung in die xy-Ebene (Abb. 14) (Weishaupt et al. 2006).

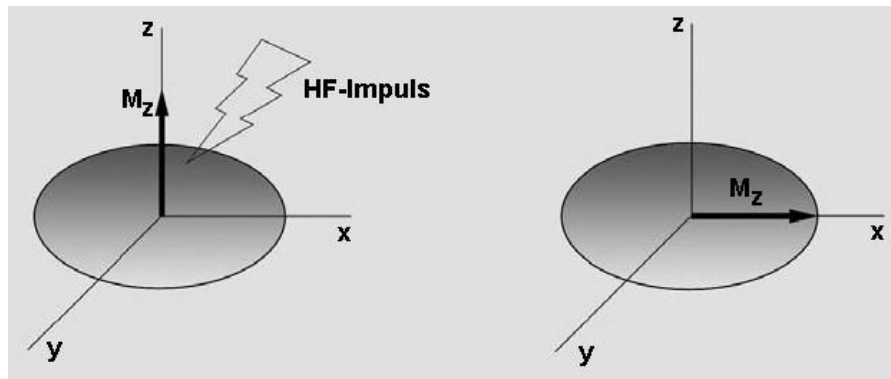


Abb. 14: Wird ein Hochfrequenzimpuls in der Larmorfrequenz auf das System gebracht, werden die kreisenden Atomkerne angeregt. Ihre Magnetisierungsachse kippt aus der z-Achse auf die xy-Ebene. Aus Weishaupt et al., 2006, S.5.

Die Magnetisierung in der xy-Ebene (M_{xy}) wird als Quermagnetisierung bezeichnet. Ihr Magnetfeld kann von der Empfängerspule im MRT gemessen werden. Die Feldstärke der Quermagnetisierung hängt von der Stärke und der Dauer des HF-Impulses ab. Der Impuls, der die Magnetisierung um genau 90° auf die xy-Ebene kippt, wird als 90° -Impuls bezeichnet. Mit ihm ist das stärkste Signal im Empfänger zu registrieren (Weishaupt et al. 2006).

Für die Vorstellung des Raumes, in dem sich die Kerne bei der Untersuchung eines Menschen im MRT anordnen, ist es hilfreich, die verschiedenen Achsen direkt auf den Körper zu übertragen. Die z-Achse, die gleichgerichtet zu dem äußeren angelegten Magnetfeld ist, verläuft im Körper der Person, die in der Röhre des MRT liegt, von den Füßen bis zum Kopf. Senkrecht zu ihr nach oben verläuft die y-Achse, orthogonal zur Seite die x-Achse. Die z-Achse liegt also parallel zur Röhre des MRT. Das äußere Magnetfeld, das angelegt wird, ist das ständig vorhandene Feld der Spule im MRT.

2.1.3 Relaxation

Nach der Anregung durch den HF-Impuls kehren die Atomkerne wieder in ihre parallele bzw. anti-parallele energieärmere Ausgangslage zurück. Dies kann durch zwei Relaxationsprozesse beschrieben werden, die Spin-Gitter-Relaxation / T1-Relaxation und die Spin-Spin-Relaxation / T2-Relaxation.

Die T1-Relaxation beschreibt die erneute Zunahme der Magnetisierung in der z-Achse, bedingt durch Wechselwirkungen der angeregten Atomkerne mit ihrer Umgebung, dem Gitter, in denen die aufgenommene Energie abgegeben wird. Die T1-Zeit ist die Zeit nach der

Anregung, in der 63% der ursprünglichen Längsmagnetisierung wieder hergestellt wird. Diese Zeit ist für viele Gewebe unterschiedlich und schwankt im Bereich von ca. 0,5 bis zu mehreren Sekunden bei einer äußeren Feldstärke von 1,5 Tesla. Möchte man Gewebe darstellen, die eine kurze T1-Zeit haben, werden mehrere HF-Impulse in kurzen Abständen stattfinden. Aufgrund der kurzen Relaxationszeit kann bereits wieder ein großer Teil der Kerne angeregt werden und somit zum MR-Signal beitragen. Ein langes Intervall (lange Repetitionszeit) wird gewählt um diese Gewebe weniger stark darzustellen.

Die T2-Relaxation beschreibt die Abnahme der Magnetisierung in der xy-Ebene. Durch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Atomkernen kreisen diese nicht mehr parallel zueinander, sondern phasenverschoben. Dies bewirkt eine Abschwächung von M_{xy} und somit des MR-Signals (Abb. 15).

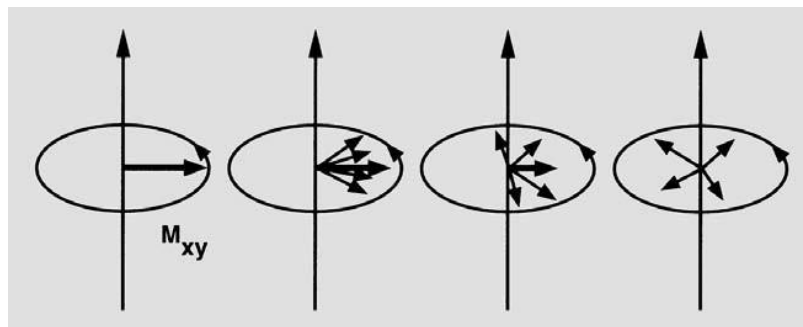


Abb. 15: Mit der Einwirkung des HF-Impulses kreisen alle Kerne parallel (phasengleich) in der xy-Ebene, man spricht von Phasenkohärenz. Nach dem Impuls verschieben sich die Phasen der Spins. Sie liegen noch in der xy-Ebene, sind aber phaseninkohärent, was mit einem abnehmenden MR-Signal einhergeht. Diese Verschiebung entsteht durch die Wechselwirkungen der Spins untereinander (Spin-Spin-Relaxation). Aus Weishaupt et al., 2006, S. 9.

Zusätzlich zu der Spin-Spin-Interaktion gibt es Beeinflussungen durch kleinste Inhomogenitäten des äußeren Magnetfelds, die zum Beispiel durch den zu untersuchenden Körper selbst auftreten können. Die damit verbundene Abnahme der Quermagnetisierung ist in der Regel schneller als durch die reine T2-Relaxation durch Spin-Spin-Interaktionen und wird daher T2*-Zeit genannt. Sie ist die Zeit, nach der nur noch 37% der durch den HF-Impuls entstandenen Quermagnetisierung übrig geblieben sind. Die reine T2-Zeit ist kaum messbar, deshalb wird quasi immer die T2*-Zeit gemessen, auch bei einer T2-Gewichtung.

Die Gewichtung von T2 kann mit der sogenannten Echo-Zeit beeinflusst werden. Sie bezeichnet das Intervall zwischen HF-Impuls und der Signalaufnahme in der Empfangsspule. Bei langer Echo-Zeit lassen sich Gewebe mit einer längeren T2-Zeit besser darstellen als Gewebe mit einer kurzen T2-Zeit. Eine kurze Echo-Zeit stellt Gewebe unabhängig ihrer T2-Zeit ähnlich stark dar (Weishaupt et al. 2006).

2.1.4 BOLD-Effekt

Der BOLD (Blood-oxygen-level-dependent)-Effekt ermöglicht die Aufnahme von funktionellen Magnetresonanztomographie-Bildern. Hierfür werden die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von oxygeniertem und desoxygeniertem Hämoglobin genutzt. So können Kontraste zwischen verschiedenen Hirnbereichen dargestellt werden, ohne Kontrastmittel geben zu müssen.

Oxygeniertes Hämoglobin ist diamagnetisch und beeinflusst das MR-Signal somit kaum. Desoxygeniertes Hämoglobin dagegen ist paramagnetisch und besitzt zwei zusätzliche ungepaarte Elektronen. Die Quermagnetisierung wird hierdurch schneller wieder zurückgebildet, das heißt, das MR-Signal schwächt sich in Hirnbereichen mit erhöhtem Anteil an desoxygeniertem Hämoglobin schneller wieder ab (Weishaupt et al. 2006).

Bei neuronaler Aktivität wird vermehrt Sauerstoff benötigt. In diesen Gebieten sinkt also zunächst die Konzentration an oxygeniertem Hämoglobin, während desoxygeniertes Hämoglobin vermehrt vorliegt. Als Ausgleich werden diese Hirnbereiche stärker durchblutet, der regionale cerebrale Blutfluss gesteigert und diese Areale mit mehr oxygeniertem Hämoglobin versorgt. Dieser Ausgleich ist verhältnismäßig stärker als der Verbrauch an Sauerstoff. Deshalb geben Gebiete, in denen neuronale Aktivität stattfindet und diese somit eine erhöhte Konzentration an oxygeniertem Sauerstoff besitzen, ein stärkeres MR-Signal ab als nicht aktive Areale.

Mit dieser Methode lassen sich indirekt Schlüsse auf neuronale Aktivität ziehen. Direkt kann die Aktivität von Neuronen im fMRT nicht gemessen werden (Weishaupt et al. 2006).

Letztendlich wird im fMRT eine Signalintensität gemessen, die davon abhängig ist, in welchem Maße, im Vergleich zum restlichen Gewebe, oxygeniertes bzw. desoxygeniertes Blut in einzelnen Hirngebieten vorhanden ist. Diese Signalintensität ergibt sich immer aus relativen Werten im Vergleich von verschiedenen Hirnarealen. In der weiteren Arbeit werde ich, der Einfachheit halber, jedoch von Aktivität sprechen. Ich bin mir dessen bewusst, dass

neben exzitatorischen Prozessen auch inhibitorische Prozesse vermehrt Sauerstoff benötigen und somit auch Hirngebiete, in denen Prozesse unterdrückt werden, fälschlicherweise als exzitatorisch aktiv missinterpretiert werden könnten. Hierbei verlasse ich mich allerdings auf meine Literaturrecherche und meine daraus aufgestellten Hypothesen, die, für die von mir untersuchten Hirngebiete, eine klare exzitatorische Komponente für Sprachvorgänge herausstellen.

2.1.5 Ortskodierung

Mit den bisherigen Beschreibungen kann erklärt werden, wie ein MR-Signal entsteht. Leider kann dem Signal noch kein Ort zugeordnet werden, denn alle Kerne verhalten sich exakt gleich, egal wo sie im zu messenden Körper liegen. Wir empfangen ein Signal, bestehend aus der Summe aller Kernmagnetisierungen.

Um nun jeder Volumeneinheit, Voxel genannt, eine feste Position im MRT-Bild zuordnen zu können, muss jeder dieser Voxel einzeln registrierbar sein. Möglich ist dies durch die genaue Ortskodierung in den drei Raumrichtungen x , y und z . Ist das Magnetfeld B_0 über einem angeregten Volumen homogen, werden alle Kerne angeregt, deren Lamorfrequenz getroffen wird. Durch Gradientenspulen im MRT kann B_0 in alle drei Richtungen kontrolliert beeinflusst werden (Weishaupt et al. 2006).

In der z -Richtung wird das Magnetfeld so beeinflusst, dass dessen Stärke in eine Richtung abnimmt, also ein Gradient entlang dieser Achse entsteht. Nach der Lamorgleichung geht die Stärke des Magnetfeldes direkt in die Berechnung der Lamorfrequenz ein. Das heißt, dass nun jede Schicht in z -Richtung einzeln mit HF-Impulsen angeregt werden kann (Abb. 16).

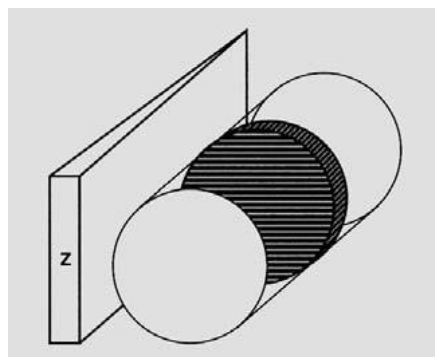


Abb. 16: Der Gradient im Magnetfeld entlang der z -Achse ermöglicht ein gezieltes Anregen einzelner Schichten durch ihre spezifische Lamorfrequenz. Aus Weishaupt et al., 2006, S. 22.

Anschließend kann in jedem Schnittbild die genaue Position auf der x- und y-Achse durch die sogenannte Ortskodierung, bestehend aus Phasenkodierung und Frequenzkodierung, ermittelt werden.

Die Phasenkodierung wird verwendet, um Positionen auf der y-Achse zu bestimmen. Hierfür wird ein Magnetfeldgradient in y-Richtung nach der Anregung durch den HF-Impuls eingeschaltet. Die Kernspins sind zunächst in allen Kernen parallel oder phasenkohärent. Durch das Zuschalten des y-Gradienten werden die Kerne je nach Stärke des Feldes beschleunigt. Entlang des Gradienten findet sich eine zunehmende Phasenverschiebung, die Beschleunigung ist am stärkeren Ende des Gradienten am kräftigsten. Wird dieser Gradient abgeschaltet, kreisen die Kerne wieder wie zuvor in der gleichen Geschwindigkeit, nun aber in unterschiedlichen Phasen, je nach Lage auf der y-Achse (Abb. 17). Durch diese Phaseninkohärenz kann jedem Kern eine y-Position zugeordnet werden (Weishaupt et al. 2006).

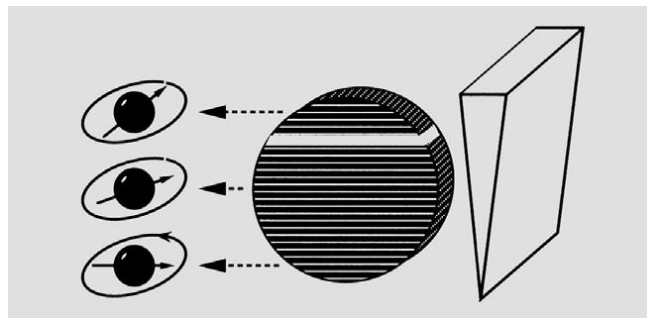


Abb. 17: Durch einen Gradienten in y-Richtung kreisen die Atomkerne phasenverschoben. Aus Weishaupt et al., 2006, S. 25.

In der Richtung der x-Achse wird schließlich die Frequenzkodierung angewandt. Auch hier wird ein Magnetgradient eingeschaltet, der die Spins der Kerne in ihrer Larmorfrequenz beeinflusst (Abb. 18). Durch diese unterschiedlichen Frequenzen kann jedem Voxel auf der x-Achse eine Position zugeordnet werden.

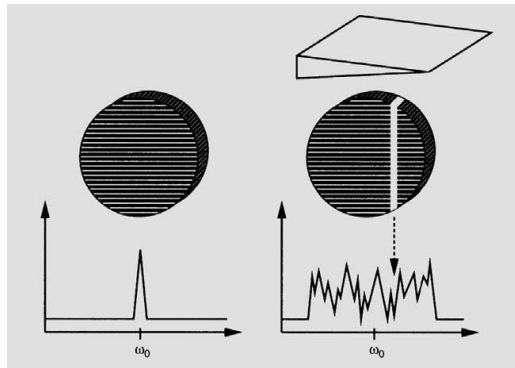


Abb. 18: Ein Gradient in der x-Achse ermöglicht es, jedem Voxel eine spezifische Larmorfrequenz zuzuordnen. Aus Weishaupt et al., 2006, S. 25.

Schließlich kann jedem Voxel eine genaue Position im gemessenen Volumen zugeordnet werden und daraus ein MRT-Bild erzeugt werden. Die genaue Berechnung der Positionen findet in einer Fourier-Transformation statt (Weishaupt et al. 2006).

2.1.6 Aufbau eines Magnetresonanztomographen

Die wesentlichen Bestandteile eines Magnetresonanztomographen sind:

- ein starker Magnet um B_0 zu erzeugen
- die drei Gradientenspulen in x-, y- und z-Richtung
- eine Hochfrequenzsende- und eine Hochfrequenzempfangsspule
- mehrere Computer, die die Gradientenspulen und den Scanner steuern, das MR-Bild erzeugen und den Gesamtprozess koordinieren.

2.2 Verbaler Lern- und Merkfähigkeitstest (VLMT)

Der Verbale Lern- und Merkfähigkeitstest (VLMT) ist ein standardisierter Test, um das verbale Gedächtnis eines Probanden testen zu können (Helmstaedter et al. 2001). Er besteht aus zwei Wortlisten (Liste A und Liste B), die jeweils 15 Wörter lang sind. Diese stehen semantisch in keinem Zusammenhang zueinander. Zunächst wird die erste Liste insgesamt fünfmal vorgetragen. Nach jedem Durchgang, in dem der Proband die Liste gehört hat, soll er versuchen, so viele Worte wie möglich wiederzugeben. Nach fünf Runden aus Vortragen und Wiedergeben, wird die zweite Liste präsentiert. Auch hier sollen möglichst viele Wörter wiedergegeben werden. Diese Liste wird jedoch nur einmal vorgetragen. Anschließend soll

der Proband die erste Liste ohne erneutes Hören dieser wiedergeben. Hieran folgt eine Unterbrechung des Tests, wovon der Proband nichts weiß. Nach dieser 20- bis 30-minütigen Pause, die mit non-verbale Aufgaben gefüllt werden soll, soll Liste A noch einmal, so gut es möglich ist, wiedergegeben werden. Danach wird dem Probanden eine Liste aus 50 Worten präsentiert, die die 30 Wörter der Listen A und B enthält. Hier muss bei jedem Wort individuell vom Probanden angegeben werden, ob es in Liste A vorkam. Im Anhang 7.1 (S. 102) sind Liste A und B sowie die Wiedererkennensliste mit ihren 50 Wörtern aufgelistet.

Der VLMT ist ein anerkannter Test, um verbale Gedächtnisleistungen von Probanden zu testen. Er besitzt einerseits eine Komponente der freien Wiedergabe, andererseits berücksichtigt er aber auch Aspekte der Wiedererkennungsleistung. Diese Kombination macht ihn zu einem gut geeigneten Test, um ein möglichst breites verbales Aufgabenfeld abdecken zu können. Neben der deutschen Variante des VLMT existiert eine englischsprachige Version, die unter dem Namen California Verbal Learning Test (CVLT) geführt wird. In englischsprachigen Studien wird deshalb oft mit dem CVLT gearbeitet.

2.3 Sprachaufzeichnung während der fMRT-Messung

Der gesamte VLMT wurde durchgeführt, während die Probanden einer fMRT-Untersuchung unterzogen wurden. Die auditive Darbietung erfolgte hierbei über einen Kopfhörer. Die Wiedergabe der Listen durch die Probanden geschah über ein Mikrofon, welches die Probanden zum Sprechen benutzen konnten. Das Besondere an dieser Methode ist die Verwendung eines Richtmikrofons, mit dem es möglich war, trotz der großen Umgebungslautstärke im fMRT-Scanner, die gesprochenen Worte der Probanden zu verstehen. Über diese Vorgehensweise fanden sich bisher keine bestehenden Literaturangaben in der fMRT-Forschung.

Neben den Aktivierungsdaten aus der fMRT-Messung, wurden über das Richtmikrofon auch die Audiodaten der Probanden zur Auswertung der Verhaltensdaten aufgezeichnet.

Über die Kopfhörer, durch die die VLMT-Listen präsentiert wurden, war auch der Kontakt von Versuchsleitung zum Probanden sichergestellt.

Jeweils nach der Erklärung der Aufgabenstellung für die Probanden, wurde nachgefragt, ob inhaltlich sowie akustisch alles verstanden worden sei. Dies geschah bereits im fMRT-Scanner.

Nach der Untersuchung wurden die Probanden befragt, ob es Schwierigkeiten beim Verstehen der Wortlisten gab. Lediglich ein Proband (Vpn 16 bzw. Vpn 9 der männlichen Gruppe) gab an, dass er aufgrund des Lärmpegels nicht alles verstehen konnte. Die Leistungen dieses Probanden wurden einer Ausreißerprobe unterzogen, die jedoch einen Ausschluss der Versuchsperson nicht zuließ. Daher wurden die Daten dieses Probanden ebenso mit in die Analyse einbezogen.

Möglichen Interaktionen zwischen dem Lärm des Magnetresonanztomographen und den abgeleiteten Daten wurde damit vorgebeugt, dass der Lärm ständig vorlag, nicht stimuluskorreliert auftrat, und so mögliche Effekte in den entsprechenden statistischen Tests herausgerechnet wurden. Sollte eine fMRT-messbare Aktivität bedingt durch den Lärmpegel vorhanden gewesen sein, so dürfte sie daher keinen Einfluss auf die stimuluskorrelierten Effekte gehabt haben.

2.4 Experimentelles Design und Durchführung

Die Untersuchung dieser Arbeit bestand darin, den VLMT mit Probanden durchzuführen, während diese funktionell magnetresonanztomographisch untersucht wurden. Der Test wurde exakt nach der VLMT-Anleitung durchgeführt, die vorgetragenen Wortlisten kamen von einem zuvor aufgezeichneten Tonband, um mögliche Schwankungen in der Vortragungsweise auszuschließen. Dieses Tonband wurde in mehreren Abschnitten von einer Mitarbeiterin der Abteilung „MR-Forschung in der Neurologie und Psychiatrie“ aufgezeichnet.

Der Versuchsablauf sah folgendermaßen aus:

Vor der Untersuchung wurde jeder Proband über den genauen Ablauf des Versuches aufgeklärt. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, normal laut und deutlich zu sprechen, sowie die Augen während der Messung geschlossen zu halten. Über den Kopfhörer und das Mikrofon war jederzeit die Möglichkeit gegeben, Kontakt mit der Versuchsleitung aufzunehmen. Als zusätzliche Überwachung waren alle Probanden mit einem Pulsmessgerät verbunden. Der Kopf der Probanden wurde fixiert, um Bewegungsartefakte zu verringern.

Vor Beginn der funktionellen Untersuchung wurde von jeder Versuchsperson ein anatomischer MRT-Datensatz des Gehirns aufgenommen. Die jeweiligen Messungen wurden von einer technischen Assistentin aus der Abteilung „MR-Forschung in der Neurologie und Psychiatrie“ durchgeführt. Die Aufnahmeparameter für die anatomische und die funktionellen Aufnahmen finden sich in Tab. 5.

	Wichtung	Aufnahmeparameter	Schnitt
anatomisch	T1	1 x 1 x 1 Voxel Field of view (FOV) = 256 mm Kipp-Winkel = 30° Echozeit (TE) = 2,6 s Wiederholungszeit (TR) = 2250 ms Schichten = 176	sagittal
funktionell	EPI	2 x 2 x 4 Voxel Field of view (FOV) = 256 mm Kipp-Winkel = 70° Echozeit (TE) = 3,6 s Wiederholungszeit (TR) = 2200 ms Schichten = 22	oblique

Tab. 5: Die Aufnahmeparameter für die anatomische und funktionelle Bildaufnahme im Magnetresonanztomographen. EPI bedeutet hierbei echoplanare Sequenz. Sie ermöglicht eine schnelle Aufnahme Frequenz, weshalb sie gut für die Aufnahme funktioneller MRT-Bilder geeignet ist.

Für die eigentliche Aufnahme wurde für die Stimuli (die Wortlisten) und die Wiedergabe der Listen ein Blockdesign entworfen. Jeder dieser Blöcke enthielt 22 Volumina (gesamte Hirnmessungen) und dauerte 33 Sekunden. Eine Präsentation, eine Wiedergabe einer Liste oder eine Pause wurde hierbei als ein Block angesehen.

Zunächst wurde damit begonnen, die Liste A des VLMT fünfmal zu präsentieren und von den Probanden wiedergeben zu lassen. Hierfür wurde zunächst ein Ruheblock aufgenommen, anschließend ein Block, der die Präsentation der Wortliste enthielt, um abschließend einen Block für die Wiedergabe dieser Liste aufzunehmen. Diese Reihenfolge wurde fünfmal (fünfmalige Präsentation der Liste A des VLMT) wiederholt, siehe Abb. 19. Abschließend wurden noch einmal 15 Ruhevolumina aufgenommen.

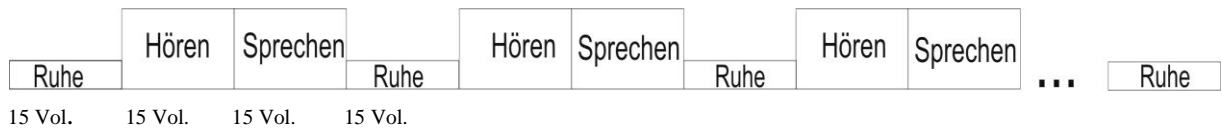


Abb. 19: Das Design des ersten Abschnitts des VLMT mit insgesamt 240 aufgenommenen Volumina (5 x Hören, 5 x Sprechen, 6 x Ruhe).

Der zweite Abschnitt des VLMT (das Präsentieren und Wiedergeben der Wortliste B) wurde in 4 Blöcken mit jeweils 15 Volumina aufgezeichnet (s. Abb. 20).



Abb. 20: Das Design des zweiten VLMT-Abschnitts mit insgesamt 60 aufgenommenen Volumina (1 x Hören, 1 x Sprechen, 2 x Ruhe).

Nach einer durch die Versuchsanleitung des VLMT festgelegten Pause wurde der dritte Abschnitt (die erneute Wiedergabe der Liste A) folgendermaßen aufgenommen (s. Abb. 21).



Abb. 21: Das Design des dritten VLMT-Abschnitts, insgesamt 45 aufgenommene Volumina (1 x Sprechen, 2 x Ruhe).

Die geforderte Pause, zwischen den Abschnitten zwei und drei des VLMTs, wurde mit einer non-verbalen, in diesem Fall einer räumlichen Aufgabe gefüllt, die die Probanden zu absolvieren hatten. In dieser Aufgabe mussten die Probanden in einem skizzierten Labyrinth den Ausgang finden und den Weg zu diesem lernen. Während der Ausführung der Labyrinthaufgabe fand ebenfalls eine fMRT-Messung statt. Die Daten aus dieser Aufgabe waren die Grundlage für die Dissertation von Sophie Hinrichs (Hinrichs 2008).

Die Wiedererkennungsaufgabe im Anschluss an Abschnitt drei wurde zunächst mit 15 Ruhevolumina eingeleitet. Darauf folgte die akustische Präsentation von insgesamt 50 Wörtern (Liste A, Liste B, sowie 20 neue Wörter), aus denen der Proband die Wörter der Liste A wiedererkennen musste. Jedes Wort wurde für eine Dauer von 2 Sekunden präsentiert,

woraufhin 30 Sekunden gegeben wurden, um das Wort zuzuordnen. Beendet wurde dieser Abschnitt wieder durch die Aufnahme von 15 Ruhevolumina.

Die Software, die für die Messung aller Abschnitte benötigt wurde, wurde von Dipl.-Ing. Torsten Wüstenberg mit Hilfe des Programms Neurobehavioral Systems Presentation in der Version 11.0 erstellt.

In einer Gesamtübersicht über die durchgeführten Abschnitte ergibt sich folgendes Bild:

VLMT Liste A (5x)	VLMT Liste B (1x)	Wiedergabe Liste A (1x)	<i>Labyrinth- aufgabe</i>	Wiedergabe Liste A (1x)	Wiedererkennen von Liste A aus 50 Wörtern
fMRT- Daten verwendet	fMRT-Daten <u>nicht</u> verwendet				

Tab. 6: Übersicht über die durchgeführten Testabschnitte und Kennzeichnung der Abschnitte, von denen die fMRT-Daten in meine Analyse eingehen.

Deutlich herausgestellt werden soll an dieser Stelle, dass zwar der gesamte VLMT von einer fMRT-Messung begleitet wurde, ich für meine Dissertation jedoch lediglich die ersten fünf Durchgänge der Liste A betrachte. Ich möchte die Kurzzeitplastizität untersuchen, deshalb wurde diese Beschränkung getroffen.

2.5 Befragung zur Lernstrategie

Nach Ende der Untersuchung wurde den Probanden ein Fragebogen vorgelegt, in dem sie ausführen sollten, ob sie eine bestimmte Strategie bei dem Erlernen der Wortliste angewandt hatten. Die Antworten hierauf sollten frei erfolgen.

Diese Fragebögen wurden von zwei Ratern (Frau Dr. Kirsten Jordan und mir) unabhängig voneinander ausgewertet, um die Probanden anhand ihrer Ausführungen in drei verschiedene Lerngruppen einzuteilen. Es wurde anschließend verglichen, ob wir beide dieselbe Einteilung der Probanden getroffen hatten. Diese Art der übereinstimmenden Einteilung stammt aus

einer Arbeit von Daniel Wiswede, der in einer Studie, in der ebenfalls Wortlisten gelernt werden sollten, auf diese Weise nach folgenden drei Gruppen einteilte (Wiswede et al. 2007):

1. „rote strategy“
2. „elaborative strategy“
3. „mixed strategy“.

Die Strategien unterscheiden sich dadurch, dass von den Probanden entweder versucht wurde, die Liste durch innerliches, subvokales Wiederholen besonders gut zu verinnerlichen („rote strategy“) oder sich die Worte semantisch zu erschließen, d. h. eine Geschichte dazu zu erfinden, Wortgruppen in Bilder einzufügen oder ähnlichem („elaborative strategy“). Die semantische Verknüpfung jeglicher Art, diente bei der Einteilung sozusagen als Marker dafür, dass eine elaborative Strategie angewandt wurde. Zusätzlich dazu gab es aber auch Probanden, die eine Mischform aus diesen Strategien als ihre Art, sich die Liste zu merken, angaben. Diese wurden in die Gruppe „mixed strategy“ eingeordnet.

3 Datenanalyse

3.1 Verhaltensdaten

Die Ergebnisse des Verbalen Lern- und Merkfähigkeitstests wurden von Frau Kathrin Behrens direkt nach dem Erheben in dafür vorgesehene Protokollbögen übertragen (Behrens 2008). Hierbei wurden die Vorgaben des Tests durch die Testautoren streng beachtet (Helmstaedter et al. 2001). Aus diesen Bögen konnte ich meine Daten zusammentragen.

Für meine Analysen sind lediglich die ersten fünf Präsentationen der Liste A des VLMT zu betrachten (im Folgenden als fünf Durchgänge bezeichnet). Die Interferenzliste und die Wiedererkennung der ersten Liste sind nicht Gegenstand meiner Arbeit.

Für jeden Probanden wurden die Anzahl der richtigen Wörter pro Durchgang und die Anzahl der Erinnerungen pro Wort erfasst. Mit diesen Werten wurden Gruppenmittelwerte zur graphischen Darstellung des Lernfortschrittes berechnet. Mittels Kurvenanpassung wurde geprüft, mit welcher Funktion sich der Lernfortschritt am besten beschreiben lässt.

Die Veränderung der Leistung, d.h. der Anzahl der richtigen Worte pro Durchgang, wurde über die fünf Durchgänge geprüft und zusätzlich bzgl. möglicher Geschlechterunterschiede untersucht. Hierfür wurde eine Varianzanalyse für wiederholte Messungen gerechnet. Die unabhängigen Variablen waren hierbei der Zwischensubjektfaktor Geschlecht sowie der Wiederholungsfaktor Durchgang mit den Durchgängen 1-5. Abhängige Variable war die erzielte Leistung pro Durchgang. Signifikante Effekte, erklärt durch die Variable Durchgang, wurden anschließend in nach Bonferroni korrigierten post-hoc-t-Tests genauer untersucht. Die Korrektur hierbei bezieht sich nicht direkt auf den t-Test, sondern auf die Anpassung des Signifikanzniveaus nach Bonferroni, um falschsignifikante Ergebnisse bei multiplen Vergleichen so gut wie möglich auszuschließen. Im Folgenden spreche ich der Einfachheit halber jedoch von korrigierten t-Tests.

Für die Analyse des Primacy- und des Recency-Effektes teilte ich für jeden Probanden die 15 Wörter des ersten Durchgangs in fünf Gruppen, bestehend aus jeweils drei Wörtern, auf. Für diesen Durchgang wurde nun die Gesamtzahl der Wörter in den jeweiligen Gruppen ermittelt. Die erste und die fünfte Gruppe wurden mit der dritten verglichen, um den Primacy- und Recency-Effekt zu untersuchen. Es wurde lediglich der erste Durchgang betrachtet, da die genannten Effekte nur bei unbekanntem Wortlisten zu finden sind (Wiswede et al. 2007). Diese Vorgehensweise stammt aus der Arbeit von Wiswede aus dem Jahr 2007 und wurde den Bedingungen in diesem Experiment entsprechend angepasst. Auch hier wurde ein Vergleich zwischen den Geschlechtern durchgeführt. Zur Prüfung der Hypothesen wurde eine Varianzanalyse für wiederholte Messungen angewandt, mit der wiederholten Variable der Wortgruppe (Primacy-, Mittel-, Recency-Gruppe) als Innersubjektfaktor sowie dem Zwischensubjektfaktor Geschlecht, beide als unabhängige Variable. Abhängige Variable war die erzielte Leistung in der entsprechenden Wortgruppe. Signifikante Effekte, erklärt durch die Wortgruppe, wurden wiederum durch Bonferroni-korrigierte post-hoc-t-Tests untersucht.

Für den Vergleich zwischen den verschiedenen Lernstrategien teilten Frau Dr. Kirsten Jordan und ich unabhängig voneinander die Probanden nach ihren Aussagen den drei Gruppen („rote“; „elaborative“; „mixed“) zu. Anschließend wurde die Gesamtleistung über die fünf Durchgänge zwischen den Strategiegruppen verglichen. Hierzu diente eine Varianzanalyse mit dem Zwischensubjektfaktor Lernstrategie als unabhängige Variable sowie der erzielten Leistung (die Summe aller richtig genannten Wörter in allen fünf Durchgängen pro Proband) als abhängige Variable. Signifikante Effekte, erklärt durch die Lernstrategie, wurden in Bonferroni-korrigierten post-hoc-t-Tests genauer analysiert.

3.2 fMRT-Daten

3.2.1 Vorverarbeitung der fMRT-Daten

Die Auswertung der fMRT-Daten erfolgte mit der auf MATLAB Version R2007A basierenden Software SPM in der Version 5.0 (Quelle: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>). Um die Daten vor der eigentlichen Analyse von Bewegungsartefakten und individuellen anatomischen Unterschieden zwischen den Probanden weitestgehend zu befreien, wurden die Daten nach Friston vorverarbeitet (siehe Abb.22). Zu dieser Vorverarbeitung gehören:

- Bewegungskorrektur (realignment)
- Normalisierung
- räumliche Glättung (smoothing)

(Friston et al. 2007).

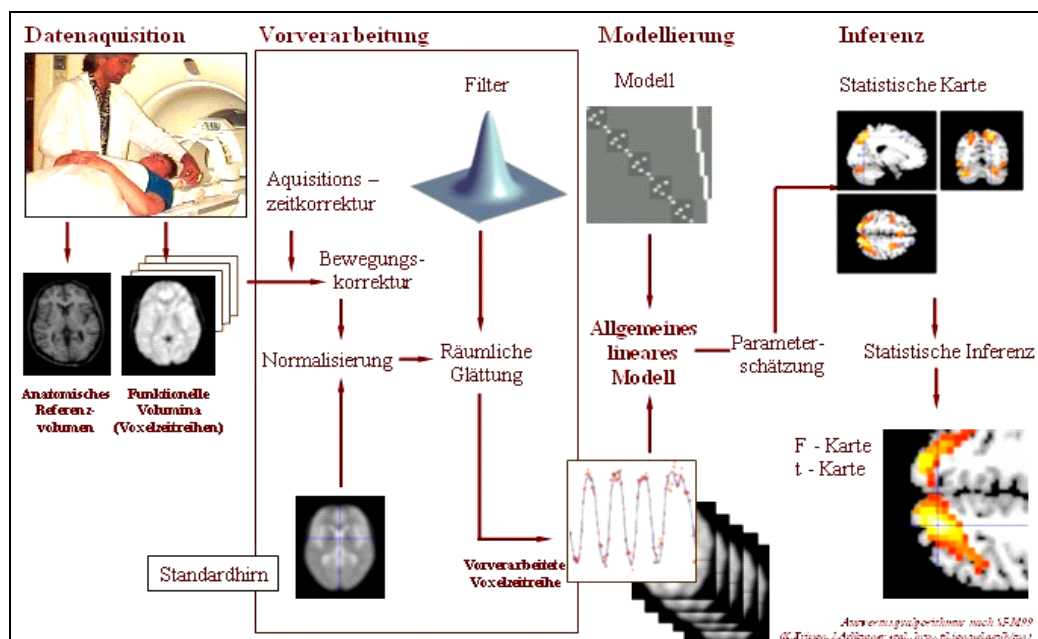


Abb. 22: Übersicht über den Ablauf der Verarbeitung von fMRT-Daten. Aus Behrens, 2008, S. 57).

Bewegungskorrektur

Bereits kleinste Bewegungen des Probanden während der Messung im fMRT-Scanner können die Ergebnisse verfälschen. Dies ist ein Problem, das verstärkt in dem vorliegenden

Experiment auftreten konnte, da die Probanden im Scanner sprechen mussten. Eine punktgenaue Fixation des Kopfes ist nicht möglich, so dass versucht werden muss, nachträglich die entstandenen Bewegungsartefakte zu eliminieren oder zumindest auf ein Minimum zu reduzieren. Dazu wird die anatomische Messung als Referenz genommen und die nachfolgenden Bilder (Volumina) werden an ihm ausgerichtet. So wird erreicht, dass auch bei kleinen Bewegungen die messbaren Aktivierungen an denselben Stellen im Gehirn dargestellt werden und diese sich über die Messung nicht auf der Hirnrinde verschieben. Daten, die über die Grenze einer Verschiebung von 2 mm und einer Rotation von $0,5^\circ$ hinaus abwichen, gingen nicht in die weitere Berechnung ein.

Normalisierung

In diesem Schritt werden die anatomischen Unterschiede zwischen den einzelnen Probanden so gut wie möglich eliminiert. Jeder Mensch unterscheidet sich in anatomischen Gegebenheiten von seinen Mitmenschen. Durch die Anpassung der einzelnen Hirne an einen genormten Raum, das sogenannte Talairach-Koordinatensystem, können diese Unterschiede ausgeglichen und ein Vergleich zwischen den Probanden ermöglicht werden. Diese Anpassung geschieht einerseits durch lineare Verformungen, andererseits aber auch durch komplexe nicht-lineare Verzerrungen. Ebenfalls in der Normalisierung wurden die bisher quaderförmigen Voxel ($2 \times 2 \times 4$) in quadratische Voxel umgeformt ($2,7 \times 2,7 \times 2,7$). Die Kantenlänge von 2,7 ergibt sich aus der dritten Wurzel von 20, was dem Volumen der ursprünglichen Voxel ($2 \times 2 \times 4$) plus der Lücke zwischen den gemessenen Schichten (1 mm) entspricht (effektive Voxelgröße insgesamt: $2 \times 2 \times 5$).

Räumliche Glättung

Bei der Glättung der Daten werden statistisch irrelevante Datenspitzen aus den fMRT-Daten herausgerechnet. Dieser Schritt erfolgte mit Hilfe eines dreidimensionalen Gauss-Filters mit 5,4 mm Halbwertsbreite (doppelte Voxelgröße). Auf diese Weise kann das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert werden. Das bedeutet im Endeffekt, dass die Aktivität, die schließlich bestimmt wird, mehr auf der spezifischen Aktivität in einem spezifischen Bereich beruht und nicht auf einer Art Grundaktivität, die im Hirn ständig vorhanden ist.

3.2.2 Statistische Analyse der fMRT-Daten

Im Anschluss an die Vorverarbeitung der fMRT-Daten fand deren statistische Auswertung statt. Mit ihrer Hilfe sollten Aktivitätsänderungen in verschiedenen Hirnbereichen während des Experiments analysiert werden. Diese Änderungen beinhalten Aktivitätszu- und abnahmen gegenüber dem Nullniveau an Grundaktivität. Zu der Erklärung dieser Effekte wurde das Allgemeine Lineare Modell herangezogen.

Das Allgemeine Lineare Modell

Das Allgemeine Lineare Modell (ALM) dient dazu, einem beobachteten Wert (z.B. fMRT-Aktivierungsdaten) feste, diesen Wert erklärende, Variablen (Prädiktorvariablen) zuzuordnen. Da mehrere Variablen existieren können und diese in unterschiedlicher Stärke das Ergebnis beeinflussen können, werden diesen Variablen zusätzlich Wichtungsfaktoren zugeordnet. Da in der Regel nicht jedes Ergebnis zu hundert Prozent durch die festgelegten Variablen erklärt werden kann, geht außerdem ein Fehlerterm in die Gleichung mit ein. Durch genaues und geschicktes Skalieren der Wichtungsfaktoren kann im Modell der Fehlerterm so klein wie möglich gehalten werden, so dass der Großteil der Varianz in den beobachteten Werten durch die genannten Variablen zu erklären ist. Das ALM wird durch die folgende Formel beschrieben:

$$Y_j = X_{j1} \cdot \beta_1 + X_{j2} \cdot \beta_2 + \dots + X_{jL} \cdot \beta_L + \varepsilon$$

Y	empirische Beobachtung (z.B. das MR-Signal)
X	erklärende Variable
ε	Fehlerterm
β	Wichtungsfaktoren (Parametergewichte) des ALM
j	Nummer der empirischen Beobachtung
L	Anzahl der genutzten erklärenden Variablen

In einer Designmatrix, die die erklärenden Variablen beinhaltet, wird das zu berechnende Modell spezifiziert. Der Signalverlauf, der unter Experimentalbedingungen gefunden wird, kann so geschätzt werden. Um anschließend eine Gewichtung der einzelnen Variablen und

somit Werte für die Wichtungsfaktoren zu finden, werden diese so lange geschätzt bis eine möglichst exakte Näherung an Y_j erreicht ist. Die Wichtungsfaktoren können nicht direkt bestimmt werden, da in der Regel mehr beobachtete Effekte auftreten, als erklärende Variablen durch das Modell gegeben sind. Aus diesen Schätzungen entstehen die β -Bilder (Statistical Parametrical Maps, SPMs). Sie werden in Graustufen durch die verschiedenen Parameter der Voxelzeitreihe gebildet.

Inferenzstatistik

Nach der Schätzung dieser SPMs kann anschließend eine Aussage darüber getroffen werden, ob Voxel, unter bestimmten Experimentalbedingungen und in Abhängigkeit von den gegebenen Variablen, Ab- oder Zunahmen in der Intensität ihres MR-Signals zeigen. Die Kontraste, die so zwischen den Variablen entstehen, werden statistische Kontraste genannt. Unter Mitbeachtung vom Restfehler ε konnten so Aussagen über variablenbedingte Unterschiede und deren Signifikanz gemacht werden. Auch die Zuverlässigkeit von Effekten, innerhalb eines einzelnen Probanden und deren Bedeutung für die Gesamtheit, konnte so ermittelt werden.

Einzelprobandenanalyse (First-Level-Analysis)

Die Einzelprobandenanalyse erlaubt es, statistische Auswertungen eines einzelnen Probanden durchzuführen. Es werden somit intraindividuelle Unterschiede zwischen verschiedenen Bedingungen herausgestellt. Für jeden Probanden wurde ein Varianzanalysenmodell erstellt, das die Bedingungen Hören, Sprechen sowie Ruhe in den ersten fünf Durchgängen des VLMT als unabhängige Variablen und die entsprechende hämodynamische Antwort als abhängige Variable berücksichtigt. Dieses Modell wurde in einer Designmatrix festgehalten. Dadurch wurde die Bestimmung von differentiellen Kontrasten und Haupteffektkontrasten ermöglicht. Haupteffektkontraste sind Effekte, die sich im Vergleich zwischen der Ruhe- und der experimentellen Bedingung finden. Effekte zwischen zwei Experimentalbedingungen werden als differentielle Kontraste bezeichnet. Die Kontraste werden in sogenannten Kontrastbildern gespeichert, aus denen anschließend SPM-T-Bilder erstellt wurden. Diese beinhalten für jedes Voxel einen bestimmten t-Wert, der unter Berücksichtigung bestimmter Signifikanzschwellen berechnet wurde. Auf der Grundlage dieser Bilder baut über weitere Zwischenschritte die Gruppenanalyse auf.

Gruppenanalyse (Second-Level-Analysis)

Die Gruppenanalyse dient dem Zweck, Gemeinsamkeiten zwischen unterschiedlichen Gruppen in einer Population herauszustellen. Diese Gruppen werden durch klar definierte Bedingungen eingeteilt. Die Einzelkontrastbilder aus der Einzelprobandenanalyse wurden in ein Varianzanalysengruppenmodell eingefügt. Dieses Modell berücksichtigte die drei Faktoren Durchgang, Bedingung (Hören und Sprechen) und die Lernstrategie. Um die einzelnen Effekte darstellen zu können, wurde eine Varianzanalyse für wiederholte Messungen mit dem Zwischensubjektfaktor Lernstrategie, dem Innersubjektfaktor Bedingung und der wiederholten Variable Durchgang gerechnet.

Abhängig davon, welcher Kontrast dargestellt werden sollte, wurden unterschiedliche Signifikanzschwellen und Korrekturen angewandt.

Für die Darstellung der allgemeinen neuronalen Aktivierungsmuster wurde eine FDR (false-discovery-rate)-korrigierte Signifikanzschwelle von $\alpha=0,05$ angewandt. Diese Korrektur verringerte die Zahl der falschpositiven Aktivitätseffekte, dies jedoch auf Kosten der Sensitivität für schwächer ausgeprägte Effekte. Der räumliche Schwellwert lag bei 10 Voxeln. Dies bedeutet, dass mindestens 10 Voxel in einem Aktivitätscluster zusammenhängen müssen. Kleinere Cluster fallen aus der Analyse heraus. Der Kontrast, der hierfür verwendet wurde, verglich die unter Experimentalbedingungen messbare Aktivität über die fünf Durchgänge gegen null, d.h. gegen die Aktivität, die in Ruhe vorhanden war.

Die Effekte, bedingt durch den Faktor „Durchgang“, wurden bei einer unkorrigierten Signifikanzschwelle von $\alpha=0,001$ berechnet. So wurde versucht, jeden Effekt, der darstellbar war, auch zu erkennen und nicht möglicherweise durch Korrekturen zu verfälschen. Um falschpositive Effekte anschließend nicht fehlzuinterpretieren, wurden nur Effekte in Clustern berücksichtigt, in denen laut den Hypothesen Aktivität zu erwarten war. Der räumliche Schwellwert betrug 10 Voxel.

Um die Effekte darstellen zu können, die durch den Faktor „Lernstrategie“ moduliert wurden, musste die Signifikanzschwelle auf $\alpha=0,01$ angehoben werden, da die Effekte nur auf diesem Niveau signifikant waren. Als räumlicher Schwellwert wurden 10 Voxel festgesetzt. Diese erhöhte Wahrscheinlichkeit für falsch positive Werte musste in Kauf genommen werden, um zumindest vorsichtig interpretierbare Ergebnisse bekommen zu können.

Für die Untersuchung auf den genauen Verlauf der Aktivierungen und um einzelne Faktoren gezielt miteinander vergleichen zu können, war es notwendig, die Aktivierungsdaten aus SPM für die relevanten Cluster zu extrahieren, um sie anschließend in SPSS analysieren zu können.

Dies geschah für die Daten der Effekte bedingt durch die Faktoren Durchgang und Strategie. Für die Cluster, in denen signifikante Unterschiede, bedingt durch diese Effekte, in SPM nachgewiesen werden konnten, wurde der mittlere Wert der Aktivierung für jeden Probanden und jede Variable herausgezogen. Für jeden relevanten Cluster waren somit 220 Aktivierungswerte vorhanden (Hören / Sprechen x Durchgang 1-5 x 22 Probanden). Der Aktivierungswert gibt die relative hämodynamische Antwort, bedingt durch den BOLD-Effekt, wieder.

Daran schlossen Varianzanalysen für wiederholte Messungen, einzeln für die Bedingungen Hören und Sprechen mit dem Zwischensubjektfaktor Strategie, dem Aktivierungswert als abhängiger Variable und dem Wiederholungsfaktor Durchgang, an. In den Varianzanalysen gefundene signifikante Haupteffekte wurden in Bonferroni-korrigierten-t-Tests überprüft. Das Signifikanzniveau wurde hierbei auf $\alpha=0,05$ festgelegt.

Anatomische Zuordnung der aktivierten Cluster

Die in der Analyse gefundenen Cluster wurden mit Hilfe des SPM-Plugins „Anatomy Toolbox“ in der Version 1.6 (Quelle: http://www.fz-juelich.de/inm//spm_anatomy_toolbox) anatomischen und zytoarchitektonischen Regionen zugeordnet. Mit Hilfe dieser Zuordnungen konnte anschließend auf funktionelle Eigenschaften dieser Cluster geschlossen werden. Das Plugin wurde von Simon Eickhoff entwickelt und basiert auf probabilistischen zytoarchitektonischen Hirnkarten, die verwendet werden, um aktivierte Cluster bestimmten Regionen zuzuordnen und somit Aussagen über die genaue Lokalisation von aktivierten Arealen zu machen (Eickhoff et al. 2005).

Die zytoarchitektonischen Areale werden in dem Plugin mit Abkürzungen beschrieben, die ich in der Ergebnisbeschreibung der Aktivierungsdaten übernommen habe. Deshalb gebe ich hier eine Zusammenfassung über die Bezeichnungen, die im Folgenden verwendet werden (s. Tab. 7).

Allgemeine Bezeichnung	Bedeutung	Spezifische Untergliederung	Bedeutung
hIP	humaner intraparietaler Sulcus	hIP 1	Bereich zwischen hIP 2 und hIP 3
		hIP 2	lateralen Anteil
		hIP 3	medialen Anteil

IPC	inferiorer parietaler Kortex	IPC (PF)	frontaler Anteil
		IPC (PFm)	medialer Anteil
		IPC (PFcm)	kaudaler, medialer Anteil
OP	parietales Operculum	OP 1	okzipitaler Anteil
SPL	superiorer Lobulus parietalis	SPL (5M)	BA 5, medialer Anteil
		SPL (5L)	BA 5, lateraler Anteil
		SPL (7A)	BA 7, anteriorer Anteil
		SPL (7M)	BA 7, medialer Anteil
		SPL (7PC)	BA 7, posteriorer caudaler Anteil
TE	primärer auditorischer Kortex	TE 1.0	superiorer frontaler Anteil
		TE 1.1	superiorer okzipitaler Anteil
		TE 3	inferiorer Anteil

Tab. 7: Die Bezeichnungen der zytoarchitektonisch bestimmten Areale aus der Anatomy Toolbox (Caspers et al. 2008; Choi et al. 2006; Eickhoff et al. 2006; Eickhoff et al. 2005; Morosan et al. 2005).

Die Koordinaten, die der Beschreibung der genauen Lage der einzelnen Bereiche dienen, beziehen sich auf das MNI (Montreal Neurological Institute)-Standardhirn und sind deshalb in MNI-Koordinaten (in mm) angegeben.

Die Anatomy Toolbox macht es durch den Einsatz von, von verschiedenen Autoren aufgestellten, zytoarchitektonisch ermittelten Wahrscheinlichkeitskarten möglich, einen großen Teil der Regionen funktionell zuzuordnen (Eickhoff et al. 2005). Neben diesen zytoarchitektonischen Zuordnungen findet sich aber auch eine rein anatomische Zuordnung, die auf dem Talairach-Atlas der Anatomie beruht. Die MNI-Koordinaten lassen sich in das Talairach-System übertragen. Diese Umrechnung ist notwendig, weil beiden Koordinatensystemen unterschiedliche Standardhirne zugrunde liegen. Ein großer Vorteil dieser Toolbox ist die automatisierte Vorgehensweise und die somit erreichte gute Vergleichbarkeit von Ergebnissen. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren von mir in der Datenanalyse angewandt. Auch die Vielzahl an fMRT-Forschern, die an der Weiterentwicklung der Anatomy Toolbox arbeiten, zeigt, dass diese Vorgehensweise auf eine recht breite Akzeptanz in der Gemeinschaft der fMRT-Forschung trifft (Eickhoff et al. 2005).

4 Ergebnisse

4.1 Verhaltensdaten

4.1.1 Allgemeine Ergebnisse der Verhaltensdaten

In der Vorstellung der Ergebnisse der Verhaltensdaten werde ich mich an die Reihenfolge der aufgestellten Hypothesen aus Abschnitt 1.8 (S. 25) halten.

Für die Verhaltensdaten wurde grundsätzlich von einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ ausgegangen.

Zunächst betrachte ich den Verlauf der Abrufleistung über die 5 Durchgänge, den Unterschied zwischen Männern und Frauen, sowie die Funktion der Kurve, die den Leistungszuwachs beschreibt. Die hierfür erforderlichen Mittelwerte aus den verschiedenen Durchgängen sind in Tabelle 8 dargestellt.

	Dg 1	Dg 2	Dg 3	Dg 4	Dg 5	Dg 1-5
Frauen (n=11)	8,273 (SE=0,744)	10,909 (SE=0,755)	11,636 (SE=0,642)	13,273 (SE=0,678)	13,455 (SE=0,614)	11,509 (SE=0,602)
Männer (n=11)	8,818 (SE=0,744)	11,364 (SE=0,755)	12,727 (SE=0,642)	12,091 (SE=0,678)	13,273 (SE=0,614)	11,655 (SE=0,602)
Gesamt (n=22)	8,545 (SE=0,526)	11,136 (SE=0,534)	12,182 (SE=0,454)	12,682 (SE=0,479)	13,364 (SE=0,434)	11,582 (SE=0,426)

Tab. 8: Mittelwerte und Standardfehler (SE) für die Anzahl der korrekt wiedergegebenen Worte von Frauen, Männern und der gesamten Gruppe in den einzelnen fünf Durchgängen (Dg) sowie im Mittel aller Durchgänge.

Die Mittelwerte der richtig erkannten Wörter der Gesamtgruppe nehmen, wie angenommen, zunächst stark zu. Die Varianzanalyse für wiederholte Messungen ergab einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Durchgang“ ($F(4,17)=25,412$, $\eta^2=0,857$, $p=0,000$). Detaillierte Effekte zwischen den einzelnen Durchgängen sind in Tabelle 9 dargestellt.

(I) Durchgang	(J) Durchgang	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz (Bonferroni-korrigiert)
1	2	-2,591	0,328	0,000
	3	-3,636	0,441	0,000
	4	-4,136	0,422	0,000
	5	-4,818	0,473	0,000
2	3	-1,045	0,395	0,155
	4	-1,545	0,372	0,005
	5	-2,227	0,441	0,001
3	4	-0,500	0,266	0,746
	5	-1,182	0,295	0,007
4	5	-0,682	0,220	0,056

Tab. 9: Differenzen zwischen den Durchgängen (I,J), Standardfehler sowie die Bonferroni-korrigierten Signifikanzen zwischen den einzelnen Durchgängen, nach der Berechnung durch post-hoc-t-Tests. Signifikante Unterschiede finden sich zwischen Durchgang 1 im Vergleich mit Dg 2, 3, 4 und 5, zwischen Dg 2 mit 4 und 5 sowie zwischen Dg 3 und 5. Signifikante p-Werte sind fett dargestellt.

Ein Geschlechtsunterschied, bezogen auf die Gesamtleistung, wurde nicht gefunden ($F(1,20)=0,29$, $\eta^2=0,001$, $p=0,866$).

Eine Interaktion zwischen Geschlecht und Durchgang wurde nachgewiesen ($F(4,17)=4,542$, $\eta^2=0,517$, $p=0,011$). In den ersten drei Durchgängen fanden sich durchschnittlich bessere Leistungen der Männer, in Durchgang 4 und 5 hingegen konnten die Frauen im Schnitt mehr Wörter nennen. Diese Unterschiede wurden mit t-Tests für unabhängige Stichproben auf Signifikanz untersucht. In keinem Durchgang unterschieden sich die Leistungen von Frauen und Männern signifikant voneinander.

Die Form der Kurve der Leistung im Verlauf über die fünf Durchgänge wurde mit einer Kurvenanpassung auf eine lineare Funktion sowie eine Potenzfunktion hin untersucht. Die Lernkurve kann einerseits durch eine lineare Gleichung beschrieben werden

($F(1,108)=50,192$, $p=0,000$), andererseits aber auch durch eine Potenzfunktion ($F(1,108)=50,595$, $p=0,000$). Die lineare Trendkurve wird durch die Funktion

$$y = 1,109 x + 8,245$$

beschrieben. Die Gleichung für die Trendkurve als Potenzfunktion lautet:

$$y = 8,481 x^{0,287}$$

Die Kurven sind in Abb. 23 aufgetragen.

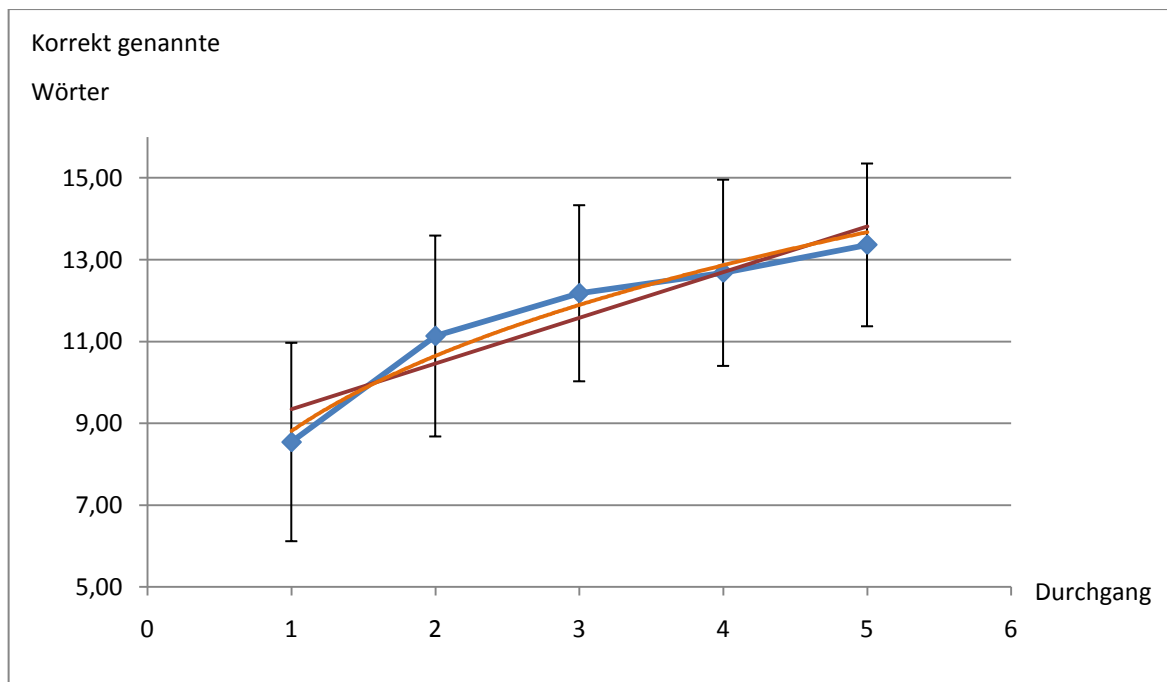


Abb. 23: Die blaue Kurve zeigt die Anzahl der richtig genannten Wörter in den fünf Durchgängen für die gesamte Gruppe ($n=22$). Die Balken zeigen die Standardabweichung an. Zusätzlich sind zwei Trendlinien eingetragen, die rote als lineare Funktion, die orangene als Potenzfunktion.

4.1.2 Primacy-Recency-Effekt

Für die Analyse des Primacy-Recency-Effekts wurde die Wortliste in fünf Gruppen mit jeweils drei Worten eingeteilt (siehe Tab. 10). Daraus ergaben sich eine Primacy-Gruppe und eine Recency-Gruppe, die jeweils mit der dritten, der Vergleichs-Gruppe, verglichen wurden.

	Trommel	Vorhang	Glocke	Kaffee	Schule	Eltern	Mond	Garten	Hut	Bauer	Nase	Truthahn	Farbe	Haus	Fluss
	Gruppe 1 (Primacy)			Gruppe 2 (Plateau)			Gruppe 3 (Vergleich)			Gruppe 4 (Plateau)			Gruppe 5 (Recency)		
F	2,182 (SE=0,249)						1,000 (SE=0,276)						1,818 (SE=0,268)		
M	2,000 (SE=0,249)						1,455 (SE=0,276)						1,727 (SE=0,268)		
G	2,091 (SE=0,176)						1,227 (SE=0,195)						1,773 (SE=0,190)		

Tab. 10: Die Tabelle zeigt die fünf Wortgruppen und ihre zugehörigen Wörter. Dazu sind die Mittelwerte (mit Standardfehler) der Anzahl der richtig genannten Wörter in den Gruppen 1, 3 und 5 für Frauen (F), Männer (M) und die Gesamtgruppe (G) aufgelistet.

Um zu überprüfen, ob ein Primacy-Effekt in diesem Experiment auftrat, wurde eine Varianzanalyse für wiederholte Messungen mit der abhängigen Variable der Wortsumme pro Gruppe und der unabhängigen, wiederholten Variable der Wortgruppe gerechnet. Als Zwischensubjektfaktor ging das Geschlecht in die Berechnung ein. In post-hoc-Tests wurden die in Gruppe 1 (Primacy-Gruppe) richtig genannten Wörter (maximal 3) mit dem Wert aus Gruppe 3 (Vergleichs-Gruppe) verglichen. Für den Recency-Effekt wurde auf gleiche Weise mit Gruppe 5 (Recency-Gruppe) und Gruppe 3 verfahren. Diese Art des Testens bzgl. des Primacy- und Recency-Effekts wurde modifiziert nach Wiswede et al. (2007) angewandt.

Ein Effekt, bedingt durch die Wortgruppe, konnte gefunden werden ($F(2,19)=6,972$, $\eta^2=0,423$, $p=0,005$). Es fand sich folglich ein Unterschied zwischen den Gruppen, bedingt durch den Faktor der Wortgruppe. Die Ergebnisse der Bonferroni-korrigierten post-hoc-t-Tests sind in Tabelle 11 aufgetragen. Hierbei konnte lediglich ein signifikanter Unterschied zwischen der Primacy- und der Vergleichs-Gruppe gefunden werden ($p=0,003$).

(I) Wortgruppe	(J) Wortgruppe	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz (Bonferroni-korrigiert)
1	3	0,864	0,225	0,003
	5	0,318	0,256	0,682
3	5	-0,545	0,277	0,189

Tab. 11: Mittlere Differenz, Standardfehler sowie Signifikanz zwischen den einzelnen Wortgruppen. Signifikante Werte sind fett markiert. Gruppe 1 = Primacy-Gruppe, Gruppe 3 = Vergleichs-Gruppe, Gruppe 5 = Recency-Gruppe.

Ein Effekt, der sich durch den Faktor Geschlecht erklären ließ, konnte nicht gefunden werden ($F(1,20)=0,68$, $\eta^2=0,003$, $p=0,797$).

4.1.3 Vergleich der Lernstrategien

Die Einteilung der Probanden in die drei unterschiedlichen Lernstrategiegruppen erfolgte nach der bereits beschriebenen Vorgehensweise und ergab, einstimmig von zwei Ratern (Frau Dr. Jordan und mir) eingeteilt, insgesamt sieben Probanden, die eine „rote strategy“ anwendeten, neun die eine „elaborative strategy“ verfolgten sowie sechs Versuchspersonen, die eine „mixed strategy“ verwendeten.

Bei den Vergleichen der Leistungen zwischen den unterschiedlichen Lernstrategien fand sich in der Varianzanalyse für wiederholte Messungen (siehe Datenanalyse) kein Effekt, der durch die verschiedenen Strategien erklärt werden konnte ($F(2,19)=0,111$, $\eta^2=0,012$, $p=0,895$). Die Leistungen, d.h. die Mittelwerte der aufsummierten Leistung über die 5 Durchgänge pro Proband der drei Strategien, sind in Tab. 12 dargestellt.

Lernstrategie	Gesamtleistung (Mittelwert)	Standardfehler
„rote strategy“ (n=7)	59,000	3,864
„elaborative strategy“, (n=9)	56,667	3,407
„mixed strategy“, (n=6)	58,333	4,173

Tab. 12: Mittelwerte der Gesamtleistung in jeder Gruppe über alle 5 Durchgänge mit den zugehörigen Standardfehlern.

4.2 fMRT-Daten

Die Ergebnisse der fMRT-Daten-Auswertung werde ich in verschiedene Abschnitte getrennt aufführen. Zunächst soll ein Überblick über die Hirnareale gegeben werden, die insgesamt aktiv waren. Auf dieser Grundlage werden die Hypothesen zu der allgemeinen Anatomie des Arbeitsgedächtnismodells nach Baddeley überprüft, d.h. die aktiven Areale werden mit den Gebieten verglichen, die laut der Literatur in Arbeitsgedächtnisprozesse involviert sein sollten.

Im Anschluss daran werden die Gebiete vorgestellt, in denen die Varianzanalyse signifikante Aktivität, bedingt durch den Faktor Durchgang bzw. Lernstrategie, ergab. Die Aktivierungsdaten dieser so gefundenen Areale wurden aus SPM extrahiert und anschließend in SPSS statistisch detaillierter ausgewertet (s. Datenanalyse). Genaue Angaben hierzu folgen in den entsprechenden Abschnitten.

4.2.1 Allgemeine neuronale Aktivierungsmuster

Die Varianzanalyse mit drei Faktoren (Durchgang, Bedingung, Lernstrategie) zeigte signifikante Unterschiede in mehreren Arealen im Vergleich mit der baseline. Es fand sich Aktivität in supplementär motorischen Arealen, im superioren, medialen und inferioren Gyrus temporalis, in der Insula sowie im Bereich des inferioren Gyrus frontalis. Außerdem zeigten sich große Aktivierungskluster im Cerebellum.

Die mittleren Aktivierungsmuster, die generell über alle Durchgänge, Strategien und beim Hören und Sprechen für die gesamte Gruppe gefunden wurden, sind in Abb. 24 dargestellt. In der anschließenden Tab. 13 sind diese Areale nochmals mit ihren spezifischen Bezeichnungen aufgelistet.



1 2 3 4 (T-Wert)

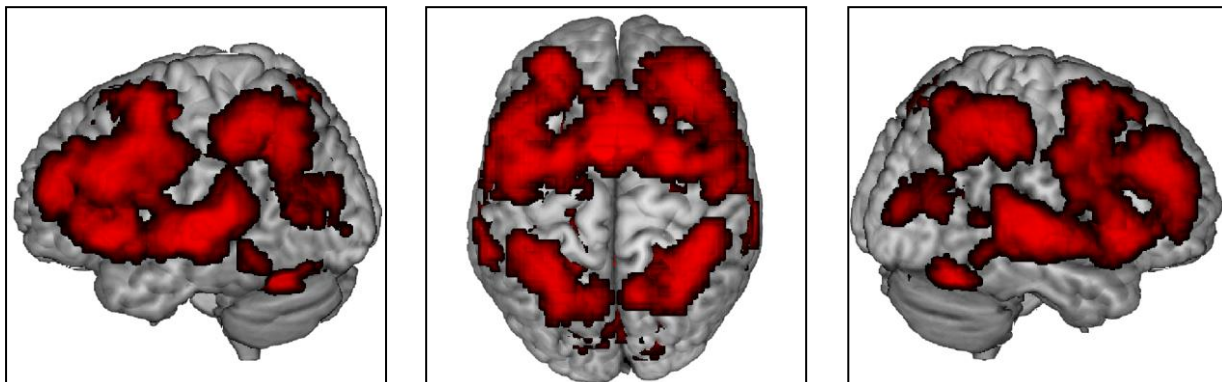


Abb. 42: Die Aktivierungsmuster der signifikant aktiven Areale über alle Durchgänge, Bedingungen und Strategien für die gesamte Gruppe.

Cluster (Größe in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Zytoarchitektonisch bestimmtes/funktio- nelles Areal und dessen Wahrscheinlichkeit	T- Wert (df=1, 190)	MNI- Koordinaten (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
1 (19550)	SMA (supplementär motorisches Areal)	L		10,87	0	14	54	0,000
	Superiorer Gyrus temporalis	R	IPC (PFcm): 10% (0- 10%)	10,07	51	-32	8	0,000
	Insula	L		9,24	-30	24	5	0,000
	Mittlerer Gyrus temporalis	L	TE 3: 90% (60-100%)	9,06	-62	-13	0	0,000
	Inferiorer Lobus frontalis	R		8,71	32	18	8	0,000

	Mittlerer Gyrus temporalis	L	TE 3: 10% (0-20%) TE 1.0: 10% (0-10%) OP 1: 10% (10-10%)	8,46	-62	-24	3	0,000
	Insula	R	Area 44: 10% (10-10%)	8,46	41	16	3	0,000
	Mittlerer Gyrus temporalis	L	TE 3: 50% (10-90%) OP 1: 10% (10-10%) IPC (PF): 10% (0-10%)	8,15	-65	-27	5	0,000
	SMA	L	Area 6: 70% (50-80%)	8,06	-5	5	65	0,000
	Inferiorer Gyrus frontalis	L		8,03	-38	22	-3	0,000
	Superiorer Gyrus temporalis	R		7,64	62	-22	5	0,000
2 (1983)	Cerebellum (VI)	R		7,41	30	-57	-24	0,000
	Cerebellum (VI)	R		7,00	16	-57	-19	0,000
	Cerebellum (IV-V)	R		6,79	8	-62	-13	0,000
	Vermis cerebellaris (4/5)			6,61	0	-57	-19	0,000
	Vermis cerebellaris (3)	R		6,31	3	-43	-19	0,000
	Cerebellum (VI)	R		6,09	35	-65	-24	0,000
	Cerebellum (VI)	L		6,06	-32	-57	-27	0,000
	Cerebellum (VI)	R		6,03	11	-70	-19	0,000

	Cerebellum (VI)	L		5,95	-8	-65	-13	0,000
	Cerebellum (VI)	L		5,95	-24	-59	-24	0,000
	Cerebellum (VI)	R		5,85	11	-65	-24	0,000
3 (56)	Inferiorer Gyrus temporalis	L		3,62	-46	-49	-11	0,000
	Inferiorer Gyrus temporalis	L		3,34	-51	-54	-13	0,001
4 (10)	Cerebellum (IV-V)	R		2,89	27	-38	-24	0,002
5 (10)	Medialer Lobus temporalis	R	evtl. Hippokampus	2,63	43	-19	-13	0,005

Tab. 13: Aktivierte anatomische Regionen für alle Probanden, alle Bedingungen (Hören, Sprechen) und alle Durchgänge (t-Test gegen baseline), $p < 0.01$, räumlicher Schwellwert=10 Voxel, FDR-korrigiert). Die signifikanten Aktivitätscluster sind mit ihren einzelnen Maxima aufgeführt. Dazu ist die anatomisch zuordenbare Region, sowie, soweit zu bestimmen, das zugehörige, zytoarchitektonisch bestimmte, funktionelle Areal angegeben. Außerdem sind die T-Werte und die p-Werte für jedes Maximum aufgeführt. Die MNI-Koordinaten beschreiben die genaue Lage von jedem Maximum. Die Angaben zu den zytoarchitektonischen Zuordnungen sowie die Wahrscheinlichkeiten mit denen sie zutreffen, stammen aus der Anatomy Toolbox 1.6 von Simon Eickhoff (Eickhoff et al. 2005).

4.2.2 Veränderungen über die fünf Durchgänge - Kurzzeitplastizität

Allgemein

Die Analyse der Areale, die über die fünf Durchgänge signifikante Aktivitätsänderungen aufwiesen, wurde über die Effekte für den Faktor „Durchgang“ (run) in der zuvor beschriebenen Varianzanalyse vorgenommen.

Zunächst werden hier alle Areale, die der Faktor „Durchgang“ (Hören und Sprechen zusammengefasst) moduliert, dargestellt (s. Abb. 25 und Tab. 14).

Die Areale, die unter diesen Bedingungen Aktivität zeigten, sind mittlere Bereiche des Cingulums und der superiore Gyrus medialis, außerdem Bereiche des superioren und inferioren Lobulus parietalis und die Präcuneus-Region.

In der späteren Besprechung der Daten werde ich nur noch auf die Gebiete eingehen, die in den Hypothesen erwähnt worden sind.

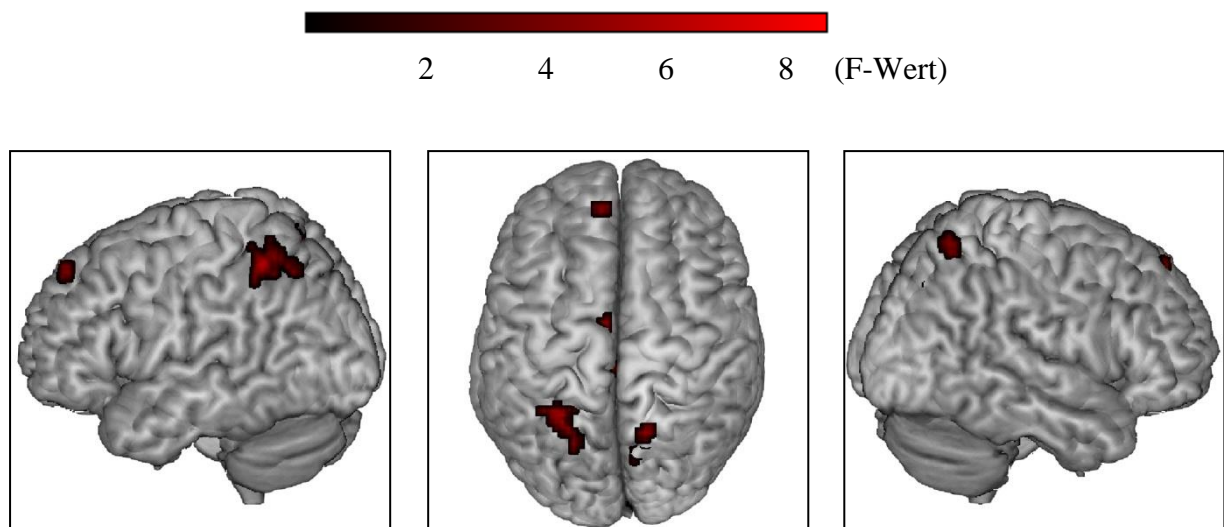


Abb. 25: Die Hirnareale, in denen über die 5 Durchgänge eine signifikante Aktivitätsänderung gefunden wurde.

Cluster (Größe in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Zytoarchitektonisch bestimmtes/funktio- nelles Areal und dessen Wahrscheinlichkeit	F- Wert (df=4, 190)	MNI- Koordinaten (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
1 (22)	Mittleres Cingulum	L		9,05	-8	-30	32	0,000
2 (80)	Inferiorer Lobulus parietalis	L	hIP3: 30% (0-30%) SPL (7PC): 30% (10-60%) Area 2: 20% (0-30%) SPL (7A): 10% (0-50%)	8,85	-30	-51	54	0,000
	Superiorer Lobulus parietalis	L	SPL (7A): 50% (30-60%) hIP3: 10% (10-20%)	5,98	-22	-65	51	0,000
	Superiorer Lobulus parietalis	L	SPL (7A): 60% (40-70%) Area 2: 30% (0-30%) Area 1: 20% (0-30%) SPL (7PC): 10% (10-30%) SPL (5L): 10% (0-20%)	5,31	-24	-54	65	0,000
	Superiorer Lobulus parietalis	L	Area 1: 30% (0-50%) SPL (7A): 10% (0-40%) SPL (7PC): 10% (0-50%) SPL (5L): 10% (0-40%)	5,1	-30	-46	62	0,001
3 (13)	Mittleres Cingulum	L	Area 6: 80% (50-80%)	8,06	-5	-5	49	0,000

4 (9)	Superiorer Gyrus medialis	L		7,52	-8	49	43	0,000
	Superiorer Gyrus medialis	L		6,86	-5	47	51	0,000
5 (20)	Präcuneus	R	SPL (7A): 80% (60-90%) SPL (5M): 10% (0-10%) SPL (7PC): 10% (0-10%)	7,4	15	-59	62	0,000
6 (19)	Präcuneus	R		6,74	16	-54	41	0,000
	Präcuneus	R	SPL (7A): 20% (10-20%) SPL (7M): 10% (0-30%)	5,98	8	-70	-41	0,000
	Präcuneus	R	SPL (7A): 10% (0-10%)	5,6	14	-57	46	0,000
7 (10)	BA 31, Lobus parietalis	R		6,49	14	-54	30	0,000

Tab. 14: Aktivierte anatomische Regionen, moduliert durch den Faktor Durchgang (Varianzanalyse mit den Faktoren Durchgang, Bedingung und Lernstrategie, $p < 0.001$, räumlicher Schwellwert=10 Voxel). Die signifikanten Aktivitätscluster sind mit ihren einzelnen Maxima aufgeführt. Dazu ist die anatomisch zuordenbare Region, sowie, soweit zu bestimmen, das zugehörige, zytoarchitektonisch bestimmte, funktionelle Areal angegeben. Außerdem sind die F-Werte und die p-Werte für jedes Maximum aufgeführt. Die MNI-Koordinaten beschreiben die genaue Lage jedes Maximums. Die Angaben zu den zytoarchitektonischen Zuordnungen sowie die Wahrscheinlichkeiten mit denen sie zutreffen, stammen aus der Anatomy Toolbox 1.6 von Simon Eickhoff (Eickhoff et al. 2005).

Detaillierte Analysen der relevanten Cluster

Wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, sind für die statistische Analyse nur noch die Aktivitätscluster herangezogen worden, welche anatomisch mit den aufgestellten Hypothesen

übereinstimmen. Hierzu zählen für die Effekte über den Durchgang Cluster 2 (superiore und inferiore parietale Aktivität), Cluster 3 (Cingulum bzw. Area 6) sowie die Cluster 5 und 6 (Aktivität in der Präcuneus-Region).

Um die folgenden Werte übersichtlicher zu gestalten, werde ich zunächst in einer Tabelle für alle vier untersuchten Cluster die entscheidenden Ergebnisse für die Haupteffekte darstellen. Sollten post-hoc-Tests angeschlossen sein, werde ich einen Verweis auf die entsprechende Tabelle einfügen. Die mittleren Aktivitätsverläufe in den Clustern, in denen signifikante Effekte, bedingt durch den Durchgang, nachgewiesen werden konnten, sind in den Graphen dargestellt, zu denen ebenfalls Verweise eingefügt sind.

Cluster	Bedingung	Faktor	F	Df	eta²	P	post-hoc-Tests	Aktivitätsverlauf
2 (sup. und inf. parietal)	Hören	Durchgang	3,537	4,16	0,469	0,030	Tab. 16	Abb. 26
	Sprechen	Durchgang	3,544	4,16	0,470	0,030	Tab. 16	Abb. 26
3 (Cingulum / BA6)	Hören	Durchgang	3,671	4,16	0,479	0,260		
	Sprechen	Durchgang	3,850	4,16	0,497	0,020	Tab. 16	Abb. 27
5 (Präcuneus)	Hören	Durchgang	5,710	4,16	0,588	0,005	Tab. 16	Abb. 28
	Sprechen	Durchgang	2,968	4,16	0,426	0,052		
6 (Präcuneus)	Hören	Durchgang	4,679	4,16	0,539	0,011	Tab. 16	Abb. 29
	Sprechen	Durchgang	1,112	4,16	0,218	0,385		

Tab. 15: Die statistischen Ergebnisse zu den Varianzanalysen für wiederholte Messungen zu den vier ausgewählten Clustern. Signifikante Ergebnisse mit ihren jeweiligen Verweisen zu

den zugehörigen post-hoc-Tests und graphischen Darstellungen der Aktivitätsverläufe sind fett markiert.

Graphische Darstellung der Aktivitätsverläufe

Die folgenden Abbildungen zeigen graphisch den Verlauf der Aktivitätsänderungen in den zuvor herausgestellten Clustern.

Cluster 2 (superior und inferior parietal)

Signifikante Unterschiede finden sich in Cluster 2 unter der Bedingung Hören im Vergleich zwischen Durchgang 1 mit Durchgang 3 und 4 (s. Tab. 16 und Abb. 26, links). Die Aktivität steigt von Durchgang 1 bis 4 an und nimmt zum fünften Durchgang wieder ab. Unter der Bedingung Sprechen sind ebenfalls signifikante Unterschiede im Vergleich zwischen Durchgang 1 mit Durchgang 3 und 4 zu finden (s. Tab. 16 und Abb. 26, rechts). Auch hier findet sich von Durchgang 1 bis 4 ein steigender Verlauf, der zu Durchgang 5 wieder fällt.

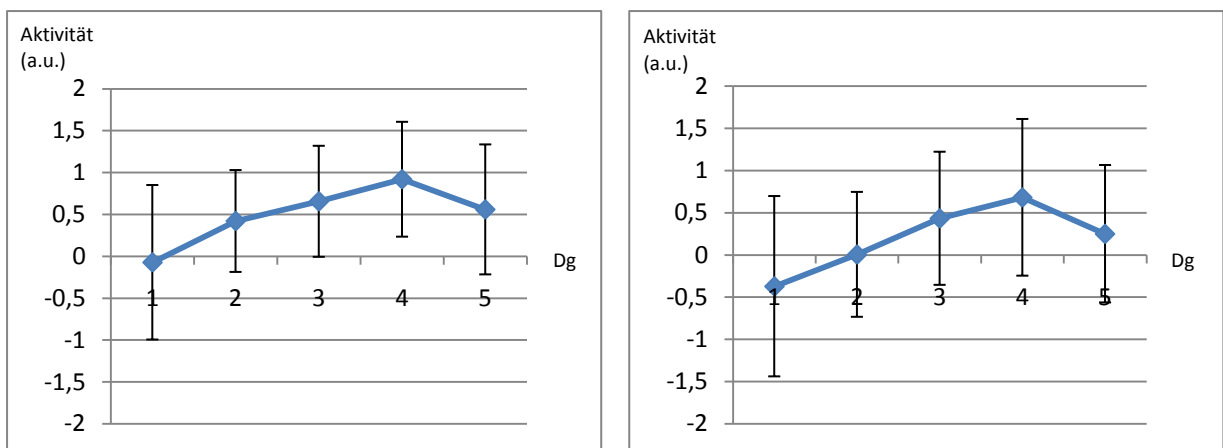


Abb. 26: Der mittlere Aktivitätsverlauf aller Probanden für Cluster 2 über alle fünf Durchgänge (Dg) unter den Bedingungen Hören (Abb. 26, links) und Sprechen (Abb. 26, rechts). Die Balken geben die Standardabweichung an.

Cluster 3 (Cingulum / BA6)

In Cluster 3 findet sich unter der Bedingung Sprechen ein signifikanter Unterschied zwischen Durchgang 3 und 4 (s. Tab. 16 und Abb. 27). Der hier gefundene Verlauf zeigt von Durchgang 1 bis 3 eine leichte Steigerung und fällt dann auf eine etwa gleich niedrige Aktivität in den Durchgängen 4 und 5.

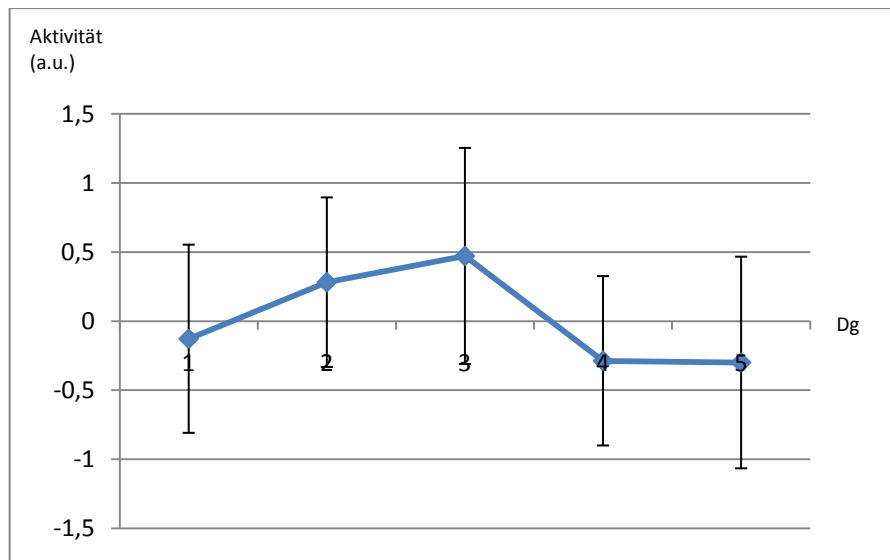


Abb. 27: Der mittlere Aktivitätsverlauf aller Probanden für Cluster 3 über alle fünf Durchgänge (Dg) unter der Bedingung Sprechen. Die Balken geben die Standardabweichung an.

Cluster 5 (Präcuneus)

In diesem Cluster fand sich unter der Bedingung Hören ein signifikanter Unterschied zwischen Durchgang 1 und 4 (s. Tab. 16 und Abb. 28). Die Aktivität nimmt insgesamt von Durchgang 1 bis 4 zu und fällt anschließend zu Durchgang 5 leicht ab.

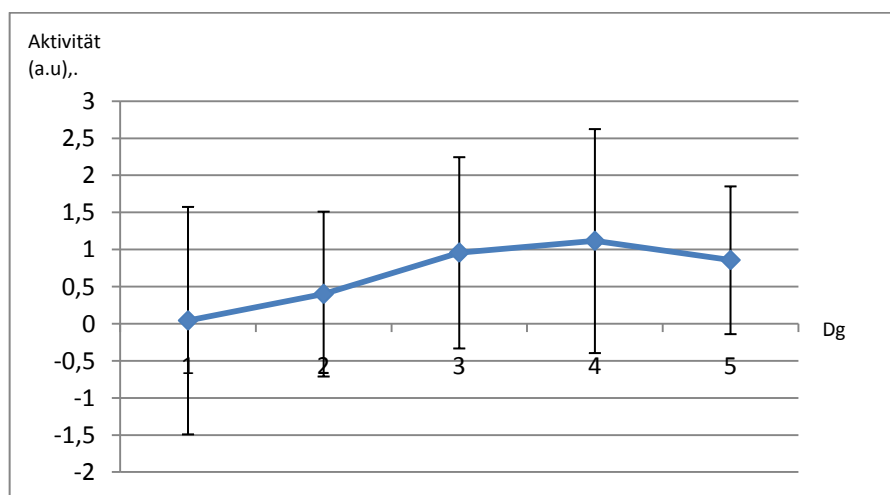


Abb. 28: Der mittlere Aktivitätsverlauf aller Probanden in Cluster 5 unter der Bedingung Hören über alle fünf Durchgänge (Dg). Die Balken geben die Standardabweichung an.

Cluster 6 (Präcuneus)

In Cluster 6 fanden sich signifikante Unterschiede im Vergleich zwischen Durchgang 1 mit den Durchgängen 2,3,4 und 5 (siehe Tab. 16 und Abb. 29). Die Aktivität nimmt vom ersten zum zweiten Durchgang zu, bleibt anschließend aber fast gleich hoch. Lediglich zu Durchgang 4 findet eine kleine Steigerung statt.

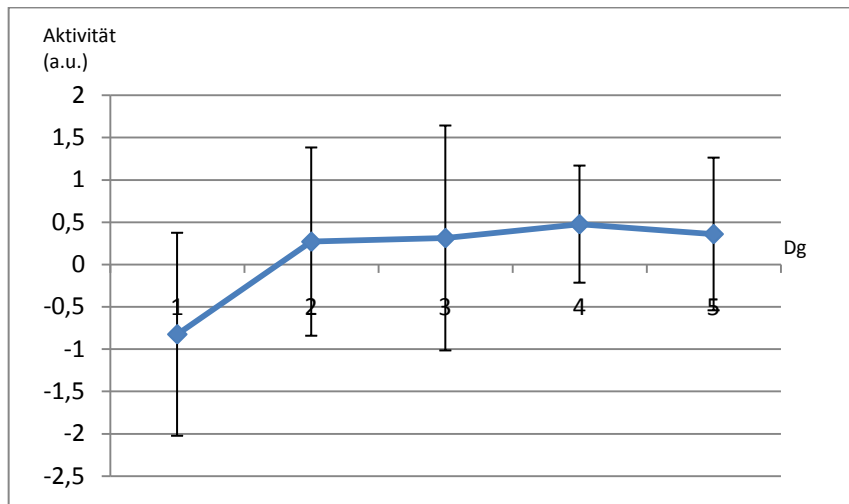


Abb. 29: Der mittlere Aktivitätsverlauf aller Probanden in Cluster 6 unter der Bedingung Hören über alle fünf Durchgänge (Dg). Die Balken geben die Standardabweichung an.

Post-hoc-t-Tests

Die folgende Tabelle 16 zeigt die paarweisen Vergleiche zwischen den einzelnen Durchgängen, sofern ein Haupteffekt durch die Variable Durchgang gegeben war.

	(I) Durchgang	(J) Durchgang	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz (Bonferroni- korrigiert)
Cluster 2 (sup. und inf. parietal) Hören	1	2	-0,508	0,244	0,507
		3	-0,793	0,224	0,022
		4	-1,000	0,249	0,007
		5	-0,676	0,276	0,240
	2	3	-0,285	0,175	1,000
		4	-0,492	0,231	0,468
		5	-0,168	0,198	1,000

	3	4	-0,207	0,153	1,000
		5	0,117	0,201	1,000
	4	5	0,324	0,229	1,000
Cluster 2 (sup. und inf. parietal) Sprechen	1	2	-0,405	0,258	1,000
		3	-0,829	0,246	0,032
		4	-1,114	0,303	0,016
		5	-0,671	0,312	0,448
	2	3	-0,424	0,224	0,737
		4	-0,709	0,254	0,115
		5	-0,266	0,236	1,000
	3	4	-0,285	0,228	1,000
		5	0,158	0,256	1,000
	4	5	0,443	0,242	0,827
Cluster 3 (Cingulum / BA6) Sprechen	1	2	-0,365	0,183	0,609
		3	-0,633	0,241	0,168
		4	0,150	0,203	1,000
		5	0,173	0,146	1,000
	2	3	-0,268	0,208	1,000
		4	0,515	0,195	0,162
		5	0,537	0,169	0,050
	3	4	0,782	0,234	0,034
		5	0,805	0,278	0,092
	4	5	0,023	0,236	1,000
Cluster 5 (Präcuneus) Hören	1	2	-0,333	0,261	1,000
		3	-0,959	0,344	0,118
		4	-1,163	0,246	0,001
		5	-0,926	0,431	0,450
	2	3	-0,625	0,291	0,449
		4	-0,830	0,353	0,296
		5	-0,592	0,355	1,000
	3	4	-0,205	0,315	1,000
5		0,033	0,317	1,000	

	4	5	0,237	0,358	1,000
Cluster 6 (Präcuneus) Hören	1	2	-1,122	0,335	0,034
		3	-1,245	0,359	0,026
		4	-1,344	0,304	0,003
		5	-1,201	0,325	0,015
	2	3	-0,123	0,310	1,000
		4	-0,222	0,275	1,000
		5	-0,079	0,332	1,000
	3	4	-0,098	0,341	1,000
		5	0,045	0,355	1,000
	4	5	0,143	0,246	1,000

Tab. 16: Paarweise Vergleiche der post-hoc-Tests für die Cluster, die signifikante Effekte, bedingt durch den Faktor Durchgang, zeigen. Angegeben sind mittlere Differenzen, Standardfehler sowie Bonferroni-korrigierte p-Werte. Signifikante Ergebnisse sind fett markiert.

4.2.3 Aktivierungsdaten der Unterschiede zwischen den Lernstrategien

Allgemein

Analog zu der Untersuchung der Effekte, bedingt durch den Faktor Durchgang, wurde ebenso der Einfluss des Faktors Lernstrategie untersucht. Die bereits beschriebene Varianzanalyse mit den Faktoren Durchgang, Bedingung und Lernstrategie zeigte Effekte in den folgenden Bereichen, moduliert durch den Faktor Lernstrategie: im mittleren und inferioren Gyrus frontalis sowie dem Rolandischen Operculum, im superioren Gyrus temporalis und im inferioren Lobulus parietalis sowie einigen intraparietalen Bereichen, die dem intraparietalen Sulcus zugeordnet werden können.

Auch hier werde ich zu Beginn wieder alle Areale auführen und später in der Analyse nur noch auf die Gebiete eingehen, die in den Hypothesen beschrieben wurden.



3 6 9 (F-Wert)

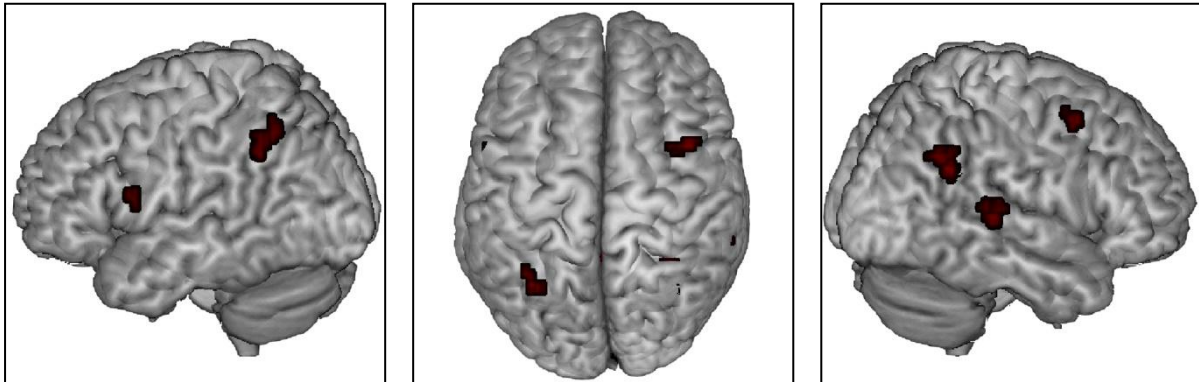


Abb. 30: Die Areale mit signifikanten Aktivitätsunterschieden zwischen den drei Lernstrategien.

Cluster (Größe in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Zytoarchitektonisch bestimmtes/funktio- nelles Areal und dessen Wahrscheinlichkeit	F-Wert (df=2,1 90)	MNI- Koordinaten (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
1 (16)	BA 29, Limbisches System			11,29	0	-43	5	0,000
2 (41)	Intraparietaler Sulcus	R	hIP1: 30% (20-60%) hIP2: 10% (0-10%)	11,00	38	-51	30	0,000
	Intraparietaler Sulcus	R	hIP3: 20% (10-30%) hIP1: 10% (0-40%)	8,93	32	-54	35	0,000
3 (17)	Mittlerer Gyrus frontalis	R	Area 44: 10% (0-10%)	8,00	43	8	51	0,000
4 (13)	Thalamus	R		7,04	5	-30	11	0,001
	Thalamus	L		6,76	-3	-27	11	0,001
5 (33)	Superiorer Gyrus temporalis	R	IPC (PF): 10% (0- 20%)	6,97	57	-32	8	0,001

	Superiorer Gyrus temporalis	R	OP 1: 30% (0-40%) TE 1.1: 10% (0-20%) IPC (PFcm): 10% (10-20%)	6,81	43	-32	14	0,001
	Superiorer Gyrus temporalis	R	TE 1.1: 10% (0-30%) IPC (PFcm): 10% (10-10%) TE 1.0: 10% (0-10%)	6,63	49	-30	11	0,002
	Superiorer Gyrus temporalis	R	IPC (PF): 30% (10-50%) IPC (PFcm): 10% (10-10%)	5,99	59	-38	14	0,003
6 (34)	Inferiorer Lobulus parietalis	L	hIP1: 50% (20-60%) IPC (PFm): 10% (0-20%) hIP3: 10% (0-40%)	6,50	-35	-57	43	0,002
	Inferiorer Lobulus parietalis	L	hIP3: 30% (20-40%) SPL (7A): 30% (10-40%) hIP: 10% (10-30%)	6,01	-32	-59	46	0,003
	Inferiorer Lobulus parietalis	L	hIP3: 40% (10-40%) SPL (7A): 30% (20-50%) SPL (7PC): 20% (0-20%) hIP1: 20% (10-20%) IPC (PFm): 20% (0-20%)	6,00	-35	-59	51	0,003
7 (12)	Rolandisches Operculum	L	Area 44: 40% (30-50%)	6,28	-51	5	11	0,002
	Inferiorer Gyrus frontalis	L	Area 44: 50% (40-60%) Area 3b: 10% (0-10%)	5,75	-57	8	16	0,004

			Area 45: 10% (0-10%)					
--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--

Tab. 17: Aktivierte anatomische Regionen, moduliert durch den Faktor Lernstrategie (Varianzanalyse mit den Faktoren Durchgang, Bedingung und Lernstrategie, $p < 0.01$, räumlicher Schwellwert=10 Voxel). Die signifikanten Aktivitätscluster sind mit ihren einzelnen Maxima aufgeführt. Dazu ist die anatomisch zuordenbare Region, sowie, soweit zu bestimmen, das zugehörige, zytoarchitektonisch bestimmte, funktionelle Areal angegeben. Außerdem sind die F-Werte und die p-Werte für jedes Maximum aufgeführt. Die MNI-Koordinaten beschreiben die genaue Lage jedes Maximums. Die Angaben zu den zytoarchitektonischen Zuordnungen sowie die Wahrscheinlichkeiten mit denen sie zutreffen, stammen aus der Anatomy Toolbox 1.6 von Simon Eickhoff (Eickhoff et al. 2005).

Detaillierte Analyse der relevanten Cluster

Auch für die Analyse der Effekte zwischen den drei Lernstrategien wurden nur noch die Cluster verwendet, die mit den Annahmen aus den Hypothesen übereinstimmten. Hierbei handelt es sich um Cluster 3 (Gyrus frontalis, evtl. Area 44), Cluster 6 (inferiore parietale Bereiche) sowie Cluster 7 (Operculum / Gyrus frontalis bzw. Area 44).

Um die folgenden Werte übersichtlicher zu gestalten, werde ich zunächst in einer Tabelle für alle vier untersuchten Cluster die entscheidenden Ergebnisse für die Haupteffekte darstellen. Sollten post-hoc-Tests angeschlossen sein, werde ich einen Verweis auf die entsprechende Tabelle einfügen. Die mittleren Aktivitätsverläufe in den Clustern, in denen signifikante Effekte, bedingt durch die Lernstrategie, nachgewiesen werden konnten, sind in den Graphen dargestellt, zu denen ebenfalls Verweise eingefügt sind.

Cluster	Bedingung	Faktor	F	df	eta ²	p	post-hoc-Tests	Aktivitätsverlauf
3 (mittl. Gyrus frontalis)	Hören	Durchgang	1,067	4,16	0,211	0,405		
		Strategie	7,133	2,19	0,429	0,005	Tab. 19	Abb. 31
	Sprechen	Durchgang	0,907	4,16	0,185	0,483		
		Strategie	2,095	2,19	0,181	0,151		

6 (inf. Lobulus parietalis)	Hören	Durchgang	2,357	4,16	0,371	0,097		
		Strategie	2,358	2,19	0,199	0,122		
	Sprechen	Durchgang	2,914	4,16	0,421	0,055		
		Strategie	3,884	2,19	0,290	0,039	Tab. 19	Abb. 32
7 (Rol. Opercu- lum)	Hören	Durchgang	0,338	4,16	0,078	0,849		
		Strategie	1,580	2,19	0,143	0,232		
	Sprechen	Durchgang	1,384	4,16	0,257	0,284		
		Strategie	3,888	2,19	0,290	0,038	Tab. 19	Abb. 33

Tab. 18: Die statistischen Werte zu den drei näher untersuchten Clustern. Fett markiert sind signifikante p-Werte, dazu ist jeweils der Verweis auf die Tabelle mit den entsprechenden post-hoc-Tests und zu der Abbildung mit der graphischen Auftragung des Aktivitätsverlaufs mit angegeben.

Graphische Darstellung der Aktivitätsverläufe

Die folgenden Abbildungen zeigen graphisch den Verlauf der Aktivitätsänderungen in den zuvor herausgestellten Clustern. Hierbei wird jede Lernstrategie einzeln aufgetragen, um die Unterschiede zwischen diesen darstellen zu können.

Cluster 3 (mittlerer Gyrus frontalis)

In diesem Cluster fand sich ein signifikanter Unterschied zwischen Lernstrategie 2 („elaborative“) und 3 („mixed“) unter der Bedingung Hören. Die „mixed strategy“ folgte hierbei im Aktivitätsverlauf der bereits zuvor beschriebenen U-Kurve, für die „elaborative strategy“ fand sich ein Verlauf, der in etwa über die fünf Durchgänge gleich blieb, jedoch in Durchgang 2 und 5 leichte Aktivitätssteigerungen zeigte. Die „rote strategy“ zeigte einen vom ersten zum zweiten Durchgang ansteigenden Aktivitätsverlauf, der anschließend jedoch wieder kontinuierlich abnahm (s. Tab. 19 und Abb. 31).

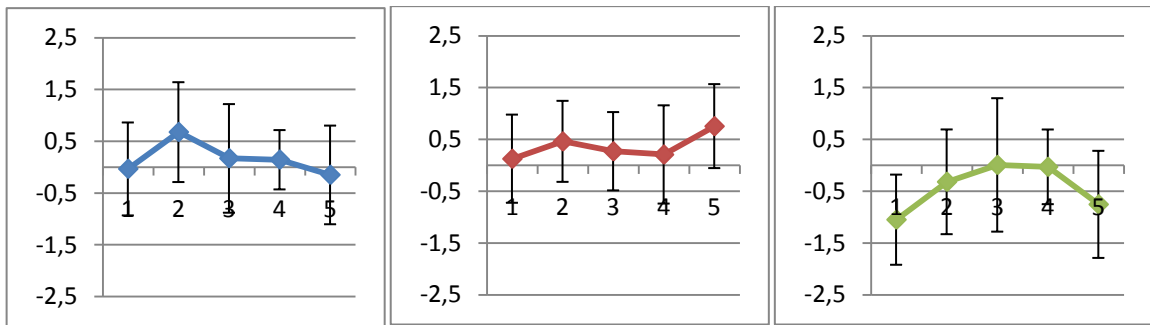


Abb. 31: Der mittlere Aktivitätsverlauf in den drei Lernstrategiegruppen (blau: „rote strategy“; rot: „elaborative strategy“; grün: „mixed strategy“) in Cluster 3 über alle fünf Durchgänge unter der Bedingung Hören. Die Balken geben die Standardabweichung an. Die y-Achse bezeichnet die gemessene Aktivität (a.u.), die x-Achse den Durchgang.

Cluster 6 (inferiorer Lobulus parietalis)

Im Bereich des inferioren Lobulus parietalis fand sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Lernstrategien 1 („rote“) und 3 („mixed“) unter der Bedingung Sprechen. Die Verläufe ähneln sich in diesen beiden Clustern, lediglich das Niveau der Aktivierung ist hier unterschiedlich. Es fand sich ein Anstieg vom ersten zum zweiten Durchgang und anschließend eine leichte Abnahme der Aktivität bis zu Durchgang 5, wobei im Verlauf der „mixed strategy“ der dritte Durchgang ein wenig herausfällt. Die „elaborative strategy“ zeigte einen Verlauf, der einer stark abgeflachten, inversen U-Kurve folgt (s. Tab. 19 und Abb. 32).

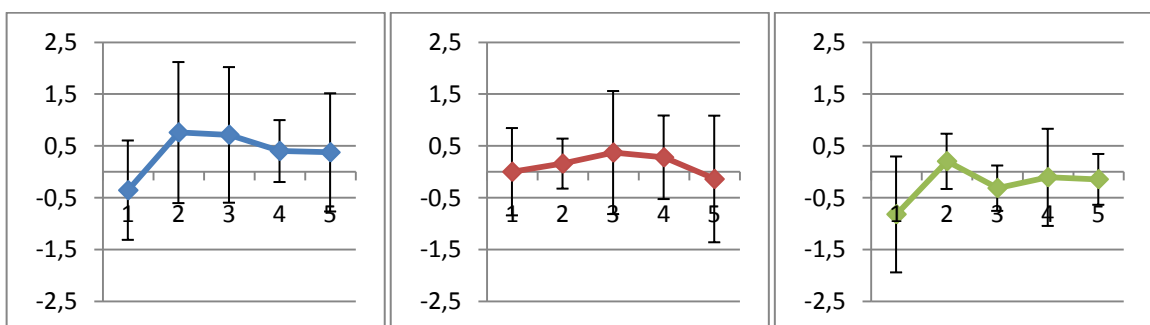


Abb. 32: Der mittlere Aktivitätsverlauf der einzelnen Lernstrategien (blau: „rote strategy“; rot: „elaborative strategy“; grün: „mixed strategy“) in Cluster 6 über alle fünf Durchgänge unter der Bedingung Sprechen. Die Balken geben die Standardabweichung an. Die y-Achse bezeichnet die gemessene Aktivität (a.u.), die x-Achse den Durchgang.

Cluster 7 (Rolandisches Operculum)

In Cluster 7 fand sich ein signifikanter Effekt in der Varianzanalyse, bedingt durch die Lernstrategie unter der Bedingung Hören, in post-hoc-Tests konnten aber keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Strategien nachgewiesen werden. Die „rote strategy“ zeigte hierbei vom ersten zum zweiten Durchgang steigende Aktivität, die anschließend etwa gleich stark blieb. Der Aktivitätsverlauf der „elaborative strategy“ nahm ebenfalls vom ersten zum zweiten Durchgang zu, fiel anschließend jedoch kontinuierlich wieder ab. Die „mixed strategy“ zeigte zunächst einen Aktivitätsabfall mit einem anschließenden Ansprung und von Durchgang 3 bis 5 wieder abnehmende Aktivität (s. Tab. 19 und Abb. 33).

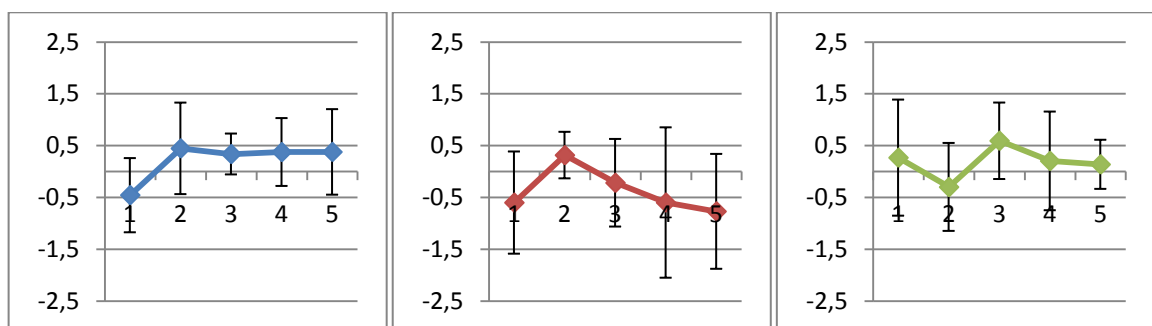


Abb. 33: Der mittlere Aktivitätsverlauf in den drei Lernstrategiegruppen (blau: „rote strategy“; rot: „elaborative strategy“; grün: „mixed strategy“) in Cluster 7 unter der Bedingung Sprechen über alle fünf Durchgänge. Die Balken geben die Standardabweichung an. Die y-Achse bezeichnet die gemessene Aktivität (a.u.), die x-Achse den Durchgang.

Post-hoc-t-Tests

Die folgende Tabelle 19 zeigt die paarweisen Vergleiche zwischen den einzelnen Durchgängen, sofern ein Haupteffekt durch die Variable Lernstrategie gegeben war.

	(I) Strategie	(J) Strategie	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz (Bonferroni-korrigiert)
Cluster 3 Hören	1	2	-0,204	0,204	0,987
		3	0,590	0,225	0,050
	2	3	0,794	0,213	0,004
Cluster 6 Sprechen	1	2	0,234	0,201	0,721
		3	0,616	0,222	0,036

	2	3	0,372	0,210	0,277
Cluster 7 Sprechen	1	2	0,590	0,239	0,070
		3	0,035	0,264	1,000
	2	3	-0,555	0,250	1,000

Tab. 19: Paarweise Vergleiche der post-hoc-Tests für die Cluster, die signifikante Effekte, bedingt durch den Faktor Lernstrategie, zeigen. Gegeben sind mittlere Differenzen, Standardfehler sowie Bonferroni-korrigierte p-Werte. Signifikante Ergebnisse sind fett markiert.

5 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley, in Verbindung mit verschiedenen Gedächtniseffekten, zu überprüfen. Einerseits wurde dabei in den Verhaltensdaten besonderer Wert auf eine breit gefächerte Untersuchung (Geschlechtsunterschiede, Primacy-Recency-Effekt, Lernstrategien und Lerngesetz) gelegt, andererseits auf der Ebene der Bildgebungsdaten verstärktes Augenmerk auf die neuronalen Plastizitätseffekte gerichtet. Die zuvor beschriebenen Ergebnisse werde ich jetzt zusammenfassen und, anhand der in der Einleitung vorgestellten Hypothesen und aktueller Literatur, bewerten.

5.1 Verhaltensdaten

5.1.1 Allgemeine Verhaltensdaten

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigten die von mir aufgestellte Hypothese, dass sich die Abrufleistung mit jedem Durchgang steigert. Ebenfalls kann festgehalten werden, dass sich dieser Leistungszuwachs als eine Potenzfunktion darstellen lässt und der Zugewinn zu Beginn des Lernens stärker ausfällt als in späteren Durchgängen. Somit lässt sich auch die zweite Hypothese bestätigen. Das Lerngesetz kann auf diesen Versuch übertragen werden und es kann angenommen werden, dass die Leistungssteigerung mit weiteren anschließenden Durchgängen weiter abnehmen würde, bis sie sich schließlich dem Maximum von 15 Wörtern

pro Durchgang annähern würde. Neben der Potenzfunktion, mit der die Leistungskurve beschrieben werden kann, fand sich aber auch die Möglichkeit, den Graphen als eine Gerade darzustellen. Diese Tatsache lässt sich in diesem Fall vermutlich auf die breit gestreuten individuellen Unterschiede in den einzelnen Durchgängen zurückführen (siehe Abb. 34 und 35). Der tendenzielle Verlauf ist in den Graphen zu erahnen, die breiten Streuungen sind deutlich zu erkennen. Sie sorgen in der Analyse für die nicht eindeutige Beschreibung der Mittelwertskurve, als eine Potenzfunktion oder eine lineare Gleichung.

Ein linearer Lernzuwachs widerspricht in diesem Fall auch der Obergrenze, die im VLMT erreichbar ist, nämlich 15 richtig genannte Worte pro Durchgang. Durch diese Obergrenze ist ein durchweg linearer Lernzuwachs schon experimentbedingt nicht möglich.

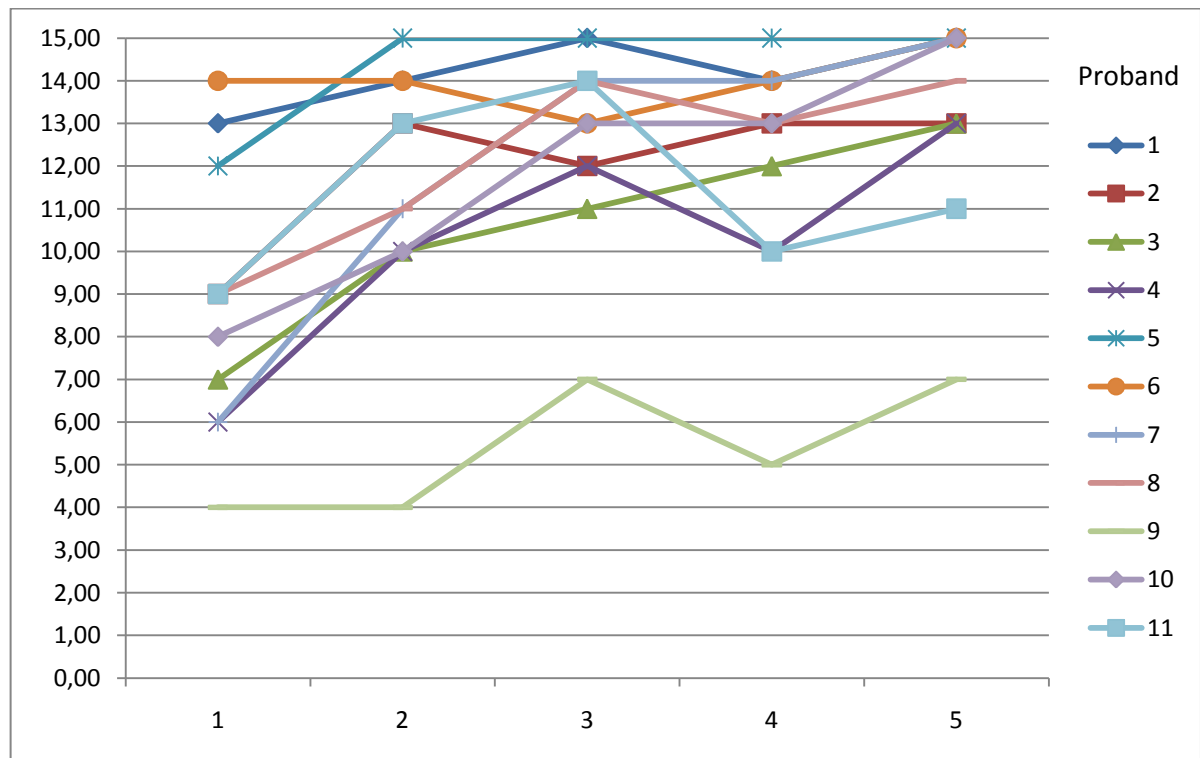


Abb. 34: Die individuellen Ergebnisse pro Durchgang von jedem einzelnen männlichen Probanden (1-11).

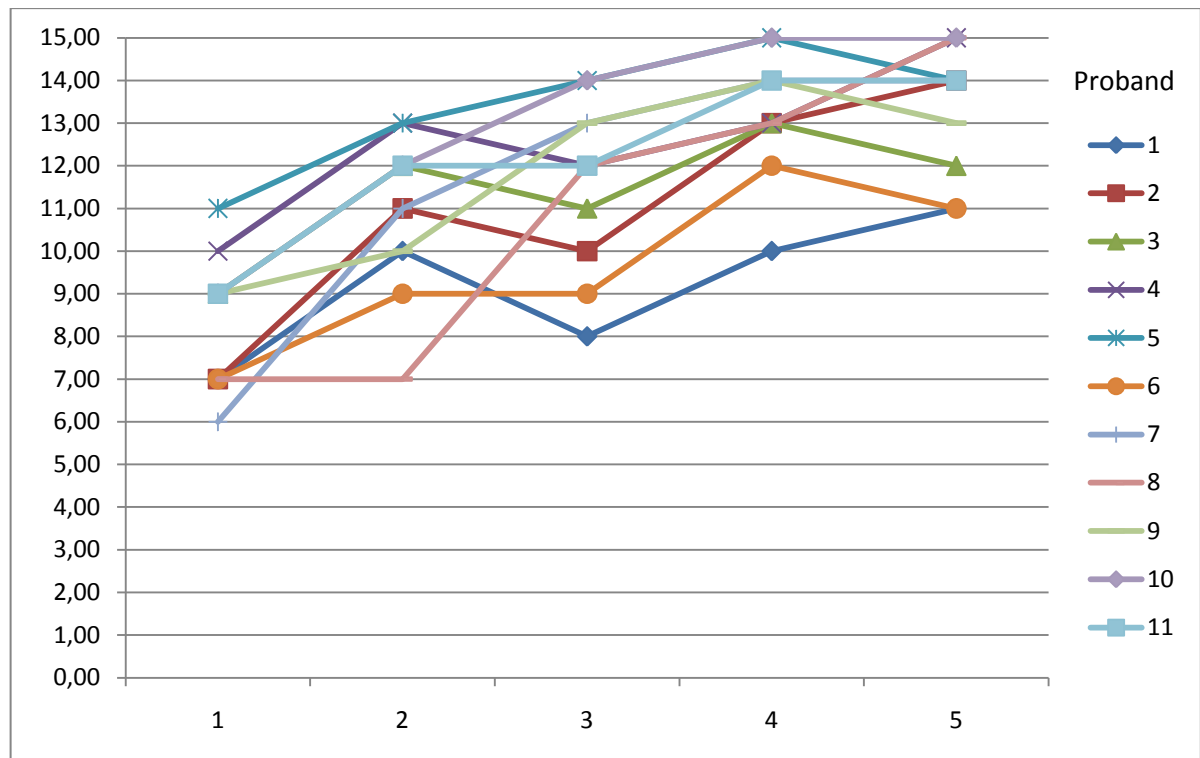


Abb. 35: Die individuellen Ergebnisse pro Durchgang von jedem einzelnen weiblichen Probanden (1-11).

Geschlechtsunterschiede, wie in Hypothese 3 zugunsten der Frauen angenommen, konnten nicht nachgewiesen werden. Dies steht im Gegensatz zu Studien, die eindeutig einen Vorteil für Frauen in Tests, die das verbale Gedächtnis beanspruchen, finden (Bleecker et al. 1988). Neben diesen Arbeiten gibt es aber auch Studien, die diesen Effekt nicht zeigen oder ihn zumindest als fragwürdig darstellen (Teruya et al. 2009; Wallentin 2009). Ein Experiment von Teruya et al., in dem eine portugiesische Variante des VLMT verwendet wurde, zeigte keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Einfluss des Bildungslevels auf die erbrachte Leistung im Test. Bedenkt man, dass, in der meiner Arbeit zugrunde liegenden Studie, ausschließlich Studenten als Probanden teilnahmen, könnte man zu dem Schluss kommen, dass der Bildungsgrad einer Person auf das verbale Gedächtnis einen deutlich höheren Einfluss hat, als es das Geschlecht hat. Dies mag einleuchtend klingen, wird aber vielleicht neben der Frage nach dem Geschlechtsunterschied oft vernachlässigt. In der Regel wird bei der Probandenauswahl für Studien jedoch darauf geachtet, Teilnehmer eines einheitlichen Bildungsniveaus auszuwählen, wie z.B. nur Studenten. So wird ein möglicher Effekt, der sich durch Bildungsunterschiede zeigen würde, von Beginn an ausgeschlossen.

In einer Studie, mit Jungen und Mädchen verschiedenen Alters von Ptok aus dem Jahre 2010, wird ein Geschlechtsunterschied beim VLMT erst ab einem Alter von 9 Jahren gefunden (Ptok 2010). Es wird von einer besseren verbalen Leistung von Mädchen bzw. Frauen ausgegangen, die sich erst mit dem Alter entwickelt. Die Entwicklung vom Mädchen zur Frau bzw. vom Jungen zum Mann wird durch unterschiedliche Hormonausprägungen gesteuert. Hier möchte ich auf die Dissertation von Kathrin Behrens verweisen, die die hier vorliegenden VLMT-Ergebnisse im Hinblick auf Geschlechtshormonspiegel untersucht hat (Behrens 2008). Sie fand in ihrer Arbeit keine geschlechtsbedingten Unterschiede in den Verhaltensdaten, jedoch einige Unterschiede im Aktivierungsmuster zwischen Männern und Frauen beim Absolvieren des VLMT. Diese Unterschiede bezogen sich hauptsächlich auf Fragen der mehr oder weniger stark ausgeprägten Lateralisation der fMRT-Aktivität (Behrens 2008).

Anhand der unklaren Literaturlage lässt sich lediglich festhalten, dass Frauen bessere Leistungen zugeschrieben werden, diese aber nicht immer auch in diesem Maße nachgewiesen werden können. In diese Arbeiten reiht sich der Befund der vorliegenden Studie ein.

5.1.2 Primacy- und Recency-Effekt

Meine Untersuchungen ergaben einen signifikanten Primacy-Effekt (die ersten Items einer Liste werden besonders gut erinnert), bei einer mittleren Differenz zwischen der Primacy-Gruppe (die ersten drei Wörter der Gesamtliste) und der mittleren Vergleichsgruppe (Wörter sieben bis neun) von 0,864 Worten. Von den drei ersten Worten werden im Mittel 0,864 Worte mehr wiedergegeben, als aus der Gruppe der mittleren drei Worte. Bei drei Wörtern pro Gruppe ist dies ein beachtlicher Unterschied. Ein Recency-Effekt (die letzten Items einer Liste werden besonders gut erinnert) wurde hingegen nicht signifikant nachgewiesen. Die mittlere Differenz zwischen diesen beiden Gruppen betrug 0,545 Worte. Dieser Unterschied zeigt zwar eine bessere Erinnerungsleistung für spätere Wörter, im Test ist dieser jedoch nicht signifikant ausgeprägt. Somit bestätigt sich Hypothese Nr. 4 („Es findet sich ein Primacy-Effekt“), Hypothese Nr. 5 („Es findet sich ein Recency-Effekt“) muss jedoch abgelehnt werden.

Dies steht im Gegensatz zu mehreren Arbeiten, die den Primacy- und Recency-Effekt untersuchten und einen stärker ausgeprägten Recency-Effekt fanden (Zhang et al. 2003). Ein

Grund hierfür könnte in der Annahme der Probanden gelegen haben, dass sie die vorgegebene Reihenfolge einzuhalten hätten, was ihnen aber nicht vorgeschrieben war und auch keine Anweisung des VLMTs ist. Die Überprüfung der Reihenfolge der Nennungen war nicht explizit Bestandteil dieser Arbeit, bei mehreren Probanden fiel jedoch auf, dass einige Wörter in derselben Reihenfolge wiedergegeben wurden, in der sie auch präsentiert worden waren. Einige gaben die Wörter komplett in der vorgetragenen Reihenfolge wieder, zumindest bis zu dem letzten erinnerten Wort. So wurden die ersten Wörter von diesen Probanden genannt, die letzten, die in die Recency-Gruppe zählten, jedoch nicht. Neben diesem Grund könnte auch eine zu weite Definition des Recency-Effektes in meiner Untersuchung die Ursache für eine schwächere Ausprägung sein. Der Effekt könnte nur dann deutlich zu finden sein, wenn die Items, die ihm zugeordnet werden, wirklich nur die allerletzten sind oder ihm auch nur das letzte Item angerechnet wird. In den vorliegenden Daten findet sich diese Tendenz. Meine Ergebnisse stehen im Gegensatz zu den Analysen von Wiswede, die einen starken Recency-Effekt für eine Gruppe von Wörtern am Ende einer Liste fanden (Wiswede et al. 2007). Im ersten Durchgang des VLMT, welcher die Grundlage für die Primacy- und Recency-Untersuchungen war, wird das drittletzte Wort (Farbe) von zehn, das vorletzte (Haus) von fünfzehn und das letzte Wort (Fluss) von vierzehn Probanden genannt. Die beiden letzten Wörter werden von knapp 50% mehr Probanden genannt, als das drittletzte Wort. Ließe man dieses drittletzte Wort aus der Recency-Gruppe heraus, würde sich möglicherweise auch ein Recency-Effekt nachweisen lassen.

Wenn man nur vom letzten Item ausgeht, für das der Recency-Effekt zutrifft, so wäre seine Bedeutung, auch bei stärkerer Erinnerung für dieses eine Item im Vergleich zum Primacy-Effekt, meiner Meinung nach aber neu zu überdenken, da der Primacy-Effekt anscheinend auch für Gruppen, die mehrere Items enthalten, gefunden wird. Der Primacy-Effekt wäre in der Summe der Informationen, die er enthält, gewichtiger als der Recency-Effekt. So könnten einzelne Informationen, wie Fakten, evtl. zum Schluss einer Liste am geeignetsten platziert sein, während größere Informationscluster eher zu Beginn einer Liste präsentiert werden sollten, um möglichst gut erinnert zu werden. Dies wäre ein guter Ansatz, um Lernstoff gut durchzustrukturieren oder in Vorträgen darauf zu achten, die wichtigen Aspekte an den richtigen Stellen zu nennen. In einer Studie von Antonia Mantonakis wurde der Einfluss von Primacy- und Recency-Effekt auf die Auswahl von Weinproben untersucht. Bei Probanden, die ungeübte Weintrinker waren, fand sich eine deutliche Tendenz dazu, den ersten probierten Wein als den ihnen am besten schmeckenden einzuordnen. Bei Weinkennern fand sich

zusätzlich auch eine starke Neigung dazu, den letzten präsentierten Wein zu bevorzugen (Mantonakis et al. 2009). Ähnlich wie für Wein, müsste dies auch für alle anderen Wahlmöglichkeiten, bei Entscheidungen zwischen mehreren zur Auswahl stehenden Möglichkeiten, gelten.

Wie erwartet, wurden keine Effekte, bedingt durch das Geschlecht, auf den Primacy- und den Recency-Effekt beobachtet. Da bisher dazu keine Aussagen in der Literatur zu finden waren, scheint auch niemand vorher einen Einfluss des Geschlechts untersucht zu haben. Die Ursache für die Ausprägung der beiden Effekte scheint demnach geschlechtsunabhängig zu sein.

Als eine besondere Auffälligkeit am VLMT möchte ich an dieser Stelle anmerken, dass die Wörter Nummer 5 und 6, nämlich Schule und Eltern, überdurchschnittlich häufig genannt wurden. Die Anzahl der Nennungen für alle Wörter pro Proband betrug im Mittel 3,85. Die Wörter Schule und Eltern wurden durchschnittlich 4,05- und 4,73-mal pro Proband genannt. Sie fielen in der Untersuchung aufgrund ihrer Position in der Liste des VLMT in eine der Zwischengruppen und hatten somit keinen Einfluss auf das Ergebnis der Primacy- und Recency-Untersuchung. Die häufige Nennung dieser zwei Wörter auch als Paar lässt darauf schließen, dass viele Probanden Schule und Eltern, zumindest unterbewusst, miteinander in Verbindung brachten. Diese Verbindung mag logisch erscheinen, interessant daran ist jedoch, dass dies anscheinend im Design des VLMT nicht berücksichtigt wurde. Die Wörter sollten eigentlich semantisch unabhängig voneinander ausgewählt worden sein, um solche „Verbindungseffekte“ auszuschließen und die tatsächliche verbale Lern- und Merkfähigkeitsleistung zu testen. Mein Vorschlag diesbezüglich wäre eine Änderung dieser Worte oder zumindest eines der beiden im VLMT.

5.1.3 Lernstrategien

Anders als von mir in den Hypothesen erwartet, wurde kein Unterschied bzgl. der Leistungen zwischen den verschiedenen Lernstrategien festgestellt. Die Ergebnisse der drei Gruppen waren sehr ähnlich, mit nur sehr geringen Differenzen in der Gesamtleistung. Dies widerspricht einerseits Arbeiten, die aussagen, dass eine elaborative Lernstrategie zu besseren Erinnerungsleistungen führt (Fabiani et al. 1990). Andererseits bestätigt es aber auch die Annahme von Benjamin und Bjork, dass eine elaborative Lernstrategie nur dann zu besseren Lernleistungen führt, wenn genügend Zeit für das Lernen zur Verfügung steht (Benjamin und

Bjork 2000). In der Studie von Benjamin und Bjork mussten Probanden mit verschiedenen Lernstrategien unter stärkerem oder geringerem Zeitdruck Wörter wiedererkennen. Bei längerer gegebener Zeit, diese Wörter zu erinnern, konnte die elaborative Strategie bessere Ergebnisse erzielen, als es bei wenig Zeit möglich war. In der hier vorliegenden Arbeit betrug die Zeit, in der die Wortliste präsentiert wurde, knapp 33 Sekunden. Diese Zeit könnte schlichtweg einfach nicht immer ausgereicht haben, eine semantische Erinnerungsstütze zu den Wörtern der Liste aufzubauen. Andere Gründe für die fehlenden Unterschiede könnten entweder ein fehlendes Training der Probanden sein, die eine elaborative Strategie verwendeten und diese die Strategie so nicht gut anwenden konnten, oder aber, dass bereits gut erlernte Lernstrategien auf beiden Seiten der verschiedenen Strategien vorlagen. Da alle Probanden Studenten waren, kann davon ausgegangen werden, dass sie mittlerweile alle eine Strategie entwickelt haben, um zu lernen und sich neue Informationen zugänglich zu machen. Wenn die Ergebnisse keine Unterschiede zwischen diesen Strategien aufzeigen können, könnte eine Erklärung hierfür auch in der möglicherweise fehlenden Überlegenheit elaborativer Strategien bei kurzen Wortlisten zu finden sein. Zu dieser Idee fand sich keine Literatur, die dies bestätigen oder widerlegen kann.

Ebenfalls zu hinterfragen ist die Befragung der Probanden nach der Durchführung des Tests. Bei direkter Anweisung vor Beginn der Untersuchung, dass sich nur auf eine klar definierte Strategie konzentriert werden sollte, hätten sich unter Umständen andere Ergebnisse ergeben. Dass keine Unterschiede zwischen den Strategien auf der Ebene der Verhaltensdaten gefunden worden sind, lässt aber noch keinen Schluss auf mögliche Unterschiede in den fMRT-Daten zu. Die Möglichkeit, unter der Einbeziehung verschiedener Hirnregionen zu dem gleichen Ergebnis auf der Ebene der Verhaltensdaten zu kommen, scheint interessant und diskussionswürdig zu sein.

5.2 fMRT-Daten

5.2.1 Allgemeine neuronale Aktivierungsmuster

Die allgemeinen Aktivierungen in den fMRT-Daten zeigten Aktivität in einigen dem Arbeitsgedächtnis zugeordneten Bereichen des Hirns. So fand sich signifikante Aktivität im supplementär motorischen Areal (Area 6) sowie dem inferioren Gyrus frontalis (unter anderem Area 44), die beide direkt dem Phonological loop zugerechnet werden können. Die

Aktivierungen im Bereich der Area 44 wurden jedoch, entgegen der Annahme in den Hypothesen, auch rechtsseitig gefunden. Aktivität der Brodmann Area 6 wurde hingegen linkshemisphärisch nachgewiesen. Beide Bereiche zusammen bilden laut Baddeley den Übungsanteil des Phonological loop (PL) (Baddeley 2003). Bei einer verbalen Arbeitsgedächtnisaufgabe war Aktivität in diesen Bereichen sicher zu erwarten. Für den Speicher des PL, der hauptsächlich im inferioren parietalen Bereich lokalisiert sein soll, fand sich hingegen keine signifikante Aktivität.

In den dem Visuospatial sketchpad (VSS) zugeordneten Arealen fand sich lediglich linkshemisphärische Aktivität für Bereiche, die grundsätzlich Aufgaben des VSS innehaben, jedoch laut den Hypothesen eher Aktivität auf der rechten Hemisphäre zeigen müssten. Zu diesen Arealen zählen der inferiore Gyrus frontalis sowie der inferiore Gyrus temporalis. Daneben werden auch hier der BA 6 Übungsfunktionen zugewiesen, die ebenfalls linkshemisphärisch aktiv war.

Für die Central Executive ließ sich keine frontale bzw. präfrontale Aktivität zeigen. Dies widerspricht meiner Annahme in den Hypothesen, dass die Central Executive für die Vermittlung zwischen PL und VSS zuständig ist und sie in den Daten durch Aktivität in frontalen und präfrontalen Hirnarealen gekennzeichnet wäre. Die Central Executive soll selbst nur als Vermittler zwischen PL und VSS dienen, hierbei hauptsächlich aufmerksamsorientierte Aufgaben ausführen und komplexere Aufgabenstellungen mit direkter Manipulation der Information in PL und VSS bewerkstelligen (Baddeley 2003). Möglicherweise ist der VLMT als Test nicht anspruchsvoll genug gewesen, um diese Aufgabenbereiche anzusprechen. Der Test ist prinzipiell recht simpel gehalten, so dass hier durchaus ein möglicher Grund für die fehlende Aktivität der CE zu finden sein könnte.

Neben den vorgestellten Bereichen wurde auch Aktivität in Arealen gefunden, die der primären Hörrinde angehören und auf dem linksseitigen mittleren Gyrus temporalis liegen. Auch wenn dieser Bereich zuvor in den Hypothesen nicht explizit erwähnt wurde, war Aktivität hier zu erwarten. Die Hypothesen zu den fMRT-Daten sollten sich von Beginn an auf das Arbeitsgedächtnismodell beschränken und nicht direkt Regionen wie die Hörrinde mit einbeziehen, um die Arbeit vom Umfang her übersichtlich zu halten. Dass sich bei einer verbalen Aufgabe Aktivität im Bereich der Hörrinde finden lässt, war aber anzunehmen.

Neben den Aktivitätsclustern im Großhirn fand sich jedoch auch Aktivität im Kleinhirn (Cerebellum). Die Aufgaben des Cerebellums scheinen einerseits motorischer Natur zu sein und reichen von Bewegungsplanung über die exakte Bewegungskontrolle unter

Berücksichtigung feinmotorischer Aspekte bis hin zur Einberechnung von Gleichgewichtsaspekten in Bewegungen (Schünke et al. 2006). Auf der anderen Seite wird in mehreren Studien aber auch von nicht-motorischen Aufgaben, die das Cerebellum erfüllt, gesprochen. Eine Meta-Analyse von Stoodley und Schmahmann zeigt, dass eine cerebellare Aktivität auch mit verbalen und arbeitsgedächtnisrelevanten Aufgaben in Verbindung gebracht werden kann (Stoodley und Schmahmann 2009). Hierbei soll besonders der rechtsseitige Lobulus VI des Cerebellums eine Rolle spielen. Aktivität in genau diesem Gebiet konnte auch in meinen Daten gezeigt werden. Die Funktionen, die diesem Bereich zugeordnet werden, sind verschieden. Bengtsson et al. ordnen hier Aufgabenbereiche ein, die für ein gut geordnetes Timing bei rhythmisch anspruchsvollen Aufgaben sorgen sollen (Bengtsson et al. 2005). Aber auch subvokale Sprachwiederholung wird für diesen Bereich angenommen (Ackermann et al. 1998). Genau diese Aufgabe müsste von Probanden, die die „rote strategy“ verfolgten, ausgeführt worden sein. Die Aktivität in diesem Gebiet des Cerebellums könnte demnach für eine starke Ausführung von subvokalen Wiederholungen sprechen.

Prinzipiell müsste davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Verbindung, die laut Baddeleys Modell zwischen dem PL und dem VSS besteht, eine Übertragung von Informationen aus dem PL in den VSS stattfindet (Baddeley 2003). Dies sollte besonders für Probanden zutreffen, die auf eine elaborative Strategie setzten und diese durch innerlich vorgestellte Bilder verstärkten. Die Literatur, die ich vorgestellt habe, um die anatomischen Zuordnungen zu den Subsystemen des Arbeitsgedächtnisses herzustellen, postuliert für den VSS Bereiche, die stärker rechtshemisphärisch aktiv sein sollen, was aber eine linksseitige Aktivierung nicht ausschließt. Bei einer Arbeitsgedächtnisaufgabe, die das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis beansprucht, mag diese Aktivität rechtshemisphärisch stärker ausgeprägt sein, evtl. wird aber bei einer verbalen Aufgabe die Information nicht bis in die andere Hemisphäre übertragen, sondern ebenfalls linkshemisphärisch verarbeitet. Dies würde ebenso bedeuten, dass visuell-räumliche Information, die in verbale Information umkodiert wird, auf der rechten Hemisphäre verbleibt. Nach dieser Überlegung müssten im Grunde zwei große Untereinheiten des Arbeitsgedächtnisses existieren, die jeweils eine dominante Ausprägung (entweder PL oder VSS) besitzen. Die Inhalte würden dann nur im Falle einer Übertragung in den Episodic buffer beidseitig verarbeitet werden. Zu dieser Annahme findet sich keinerlei Literatur, die ähnliche Funde berichtet. Die relativ strikte Trennung von verbaler Informationsverarbeitung auf der linken Hemisphäre und visuell-räumlicher Verarbeitung auf

der rechten, wird hingegen in vielen Arbeiten beschrieben (Baddeley 2003; Logie et al. 2003; Wager und Smith 2003). Ein Grund für diese Funde in meiner Arbeit könnte darin liegen, dass die Vorgehensweise der Sprachaufnahme während der fMRT-Messung neu ist und so bisher noch nicht beschrieben wurde. Genauso könnte diese Art der Verarbeitung auch für räumlich-visuelle Aufgaben zutreffen, so dass räumliche Information, nachdem sie in verbale Information übertragen wurde, auch auf der rechten Hemisphäre weiter verarbeitet wird.

Ob meine Vermutungen hierzu richtig sind, ließe sich nur durch weiterführende Studien klären, die ebenfalls mit der hier angewandten Methodik eine solch „einseitige“ Aktivierung finden würden.

In meinen Hypothesen wurden neben Aktivität in den Subsystemen des Arbeitsgedächtnisses auch Effekte im Langzeitgedächtnis erwartet, dies auch vor dem Hintergrund des Dual-Store-Modells, welches eine Langzeitgedächtnisbeteiligung als Grund für die Entstehung des Primacy-Effekts betrachtet (Talmi et al. 2005). In einer Studie von Daniel Wiswede wurde als Marker für Langzeitgedächtnisaktivität messbare Aktivität im Hippokampus angenommen (Wiswede et al. 2007). Ich wollte ebenfalls auf diese Weise vorgehen. Im allgemeinen Aktivitätsmuster über alle Durchgänge fand sich ein Aktivitätscluster, der zu einem geringen Anteil im rechtshemisphärischen Hippokampus liegt. Somit kann meine Hypothese hierzu zumindest teilweise bestätigt werden.

Dies könnte als vorsichtig zu deutendes Argument für das Dual-Store-Modell gelten. Es geht davon aus, dass der Primacy-Effekt auf Langzeitgedächtnisspeicherung von Informationen beruht. Da in den Verhaltensdaten ein deutlich ausgeprägter Primacy-Effekt zu finden war, scheint dieser mit einer Langzeitgedächtnisaktivität zustande gekommen sein. Hierbei muss aber auch beachtet werden, dass der Primacy-Effekt streng genommen lediglich für neue Wortlisten gilt, also nur im ersten Durchgang des VLMT wirklich auftreten konnte (Zhang et al. 2003). Eine genaue Untersuchung auf Hinweise zu Single-Store oder Dual-Store-Modellen hätte nur durchgeführt werden können, wenn für den ersten Durchgang jeweils die Wörter, die unter den Primacy- oder Recency-Effekt fallen, exakt einzelnen fMRT-Bildern zugeordnet worden wären. Dies war leider in diesem Fall, aufgrund der ungenügenden zeitlichen Auflösung der fMRT, nicht möglich. Die Bilder wurden in Abständen von mehreren Sekunden aufgenommen, die Worte von den Probanden aber schneller aufgesagt. Auch hier findet sich ein Ansatzpunkt für weitere Studien.

Die Hippokampusaktivität kann aber andererseits natürlich auch für die Speicherung von Worten stehen, die bereits öfter wiederholt werden konnten, weil sie ab dem ersten

Durchgang erinnert wurden. Diese Aktivität hätte dann aber Unterschiede zwischen den fünf Durchgängen zeigen müssen, da erst mit zunehmender Anzahl an Wiederholungen eine Übertragung in das Langzeitgedächtnis stattfinden kann (Pape 2003).

Fest steht laut dieser Aktivierung jedoch, dass eine Langzeitgedächtnisüberführung von Gedächtnisinhalten bereits nach kurzer Zeit möglich ist und auch bei Gedächtnisaufgaben stattfindet, die primär das Arbeits- bzw. Kurzzeitgedächtnis beanspruchen.

5.2.2 Veränderungen über die fünf Durchgänge - Kurzzeitplastizität

Neben der Frage nach Aktivität in den verschiedenen Bereichen im Hirn, die ich anhand der Literaturangaben den einzelnen Subsystemen des Arbeitsgedächtnisses zuordnen konnte, war die zentrale Frage dieser Doktorarbeit die nach Plastizitätseffekten, die bereits in wenigen Sekunden bis Minuten darzustellen waren. In dieser Studie betrug diese Zeit von Durchgang 1 bis 5 knapp 7,5 Minuten.

Die Hirnbereiche, die in den Ergebnissen beschrieben wurden und einen signifikanten Unterschied über die fünf Durchgänge zeigten, waren Aktivitätscluster im linken superioren und inferioren parietalen Lobulus unter den Bedingungen Hören und Sprechen. Neben ihnen fanden sich das linke Cingulum bzw. BA 6 (Bedingung Sprechen) und zwei verschiedene Cluster in der rechten Präcuneus-Region (Bedingung Hören) als Cluster mit signifikanten Aktivitätsänderungen über die fünf Durchgänge.

Insgesamt kann zum beobachteten Aktivitätsverlauf gesagt werden, dass, bis auf in einem Ausnahmefall, in allen Clustern, in denen ein signifikanter Effekt, bedingt durch den Durchgang, nachgewiesen werden konnte, dieser Verlauf einer umgekehrten U-Kurve folgte. Dieser Verlauf wurde von mir nicht erwartet, womit die von mir aufgestellten Hypothesen komplett abgelehnt werden müssen, da die gemessene Aktivität, wie in meinen Hypothesen vermutet, in keiner Region strikt zunimmt. Dazu muss jedoch gesagt werden, dass meine Annahmen zu diesen Plastizitätseffekten auf Arbeiten beruhten, die nur über längere Zeiträume berichteten. Deshalb war dieser Verlauf nicht leicht vorhersagbar gewesen.

Die parietalen Bereiche können dem Speichersystem des Arbeitsgedächtnisses zugeordnet werden. Die Aktivität nimmt hierbei zunächst von Durchgang 1 bis 4 zu, um zum letzten Durchgang hin wieder abzunehmen. Letztendlich liegt die Aktivität hier im letzten Durchgang höher als im ersten, der Unterschied hierbei fällt aber nicht signifikant aus. Signifikante Differenzen finden sich in beiden Fällen lediglich zwischen Durchgang 1 und den

Durchgängen 3 und 4. So kann in diesen beiden Clustern der Aktivitätsverlauf als umgekehrte U-Kurve dargestellt werden. Allerdings fanden sich nicht zwischen allen einzelnen Durchgängen signifikante Unterschiede.

Laut einem Review von Clare Kelly, in dem ein Überblick über verschiedene Plastizitätsstudien gegeben wird, steigt die Aktivität in Arealen, die genauen Aufgabenbereichen zugeordnet sind, mit zunehmendem Training an (Kelly et al. 2006). Dies lässt sich in meinen Ergebnissen für die parietalen Cluster nur bis zu Durchgang 4 hin bestätigen. Interessanterweise scheint der von mir gefundene Verlauf unter beiden Bedingungen konstant erhalten zu sein. Die Verläufe für die beiden Bedingungen Hören und Sprechen unterscheiden sich kaum. Dies entspricht auch meinen Annahmen, dass der Speicher des Arbeitsgedächtnisses, der diesen parietalen Bereichen zugeordnet wird, sowohl bei der Aufnahme als auch bei der Wiedergabe von Inhalten aktiv sein muss. Der Verlauf an sich könnte zunächst für eine zunehmende Rekrutierung von schlicht mehr Hirngewebe sprechen, um anschließend eine möglicherweise effizientere Aufgabenbewältigung und somit einen Aktivitätsabfall darzustellen. Dies sind in Plastizitätsstudien Ansätze, mit denen versucht wird, diese beiden widerläufigen Effekte zu erklären (Kelly et al. 2006).

Für den Aktivitätscluster im Cingulum und der BA 6 zeigt sich ein tendenziell ähnlicher Aktivitätsverlauf unter der Bedingung Sprechen. Diese Region in der BA 6 wird dem Phonological Loop und in ihm speziell der Übungskomponente zugeordnet, die für das subvokale Wiederholen von verbaler Information verantwortlich ist. Wenn dieser Bereich auch Aktivität unter der Bedingung des „wirklichen Sprechens“ zeigt, könnte ein Grund hierfür eine Wiedergabe der Wörter direkt aus dem Speicher des PL sein. Der Unterschied zum rein subvokalen Wiederholen wäre dann nur die zusätzliche Aktivierung von Kortexarealen, die ausgesprochene Sprache produzieren. Dies konnte aber in meinen Aktivitätsdaten nicht nachgewiesen werden. Trotzdem scheint die Übungsfunktion auch gleichzeitig eine aktive Wiedergabe zu ermöglichen. Jede ausgesprochene Wiederholung kann außerdem auch zum Übungseffekt beitragen und somit Aktivität in den entsprechenden Arealen, wie hier im Cingulum, hervorrufen. Der Aktivitätsverlauf in diesem Cluster folgt, ähnlich wie schon zuvor in den parietalen Regionen, einem umgekehrten U. Bis zum dritten Durchgang folgt eine leichte Steigerung, die abrupt in Durchgang 4 beendet wird und sogar unter das Ausgangsniveau an Aktivität in Durchgang 1 fällt. Signifikant ist der Unterschied zwischen den Durchgängen 3 und 4. Die Interpretationen, die für diesen Verlauf in Frage kommen, sind dieselben, die auch zuvor für die parietalen Cluster gegolten haben. Einer

verstärkten Beanspruchung von mehr Hirngewebe folgt eine effizientere Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen und zeigt sich in dem Verlauf der gemessenen fMRT-Aktivität. Für das subvokale Wiederholen von Wörtern bedeutet dies, dass der Vorgang innerhalb weniger Minuten und Übungsvorgängen effizienter wird und nur in den ersten Übungsversuchen eine verstärkte Rekrutierung von Hirngewebe nötig ist.

Im Aktivitätscluster, der zum Bereich des rechten Präcuneus gezählt wird, findet sich ebenfalls ein Aktivitätsverlauf, der einer umgekehrten U-Kurve folgt. Dem Präcuneus werden Aufgaben zugeordnet, die mit dem Erstellen von mentalen Bildern zusammenhängen, sich also beispielsweise Wörter wie Haus bildlich vorstellen zu können (Cavanna und Trimble 2006). Die Aktivität in diesem Cluster nimmt bis zu Durchgang 4 kontinuierlich zu und fällt in Durchgang 5 wieder ab, bleibt jedoch auf einem höheren Level, als sie zu Beginn in Durchgang 1 war. Ein signifikanter Unterschied findet sich hier zwischen Durchgang 1 und 4.

In einem weiteren dem rechten Präcuneus zugeordneten Cluster fand sich ein Aktivitätsverlauf, der nach dem ersten Durchgang zunimmt, anschließend aber für die restlichen vier Durchgänge fast gleich bleibt. Signifikante Unterschiede finden sich hierbei im Vergleich zwischen Durchgang 1 mit jedem der vier anderen Durchgänge.

In mehreren Arbeiten wurde die Plastizität des Arbeitsgedächtnisses thematisiert, allerdings wurde in ihnen immer von größeren Zeitunterschieden zwischen den einzelnen Messungen ausgegangen. So wurde in einer PET-Untersuchung nach zweiwöchigem Training ein geringerer Blutfluss in den arbeitsgedächtnisrelevanten Gebieten festgestellt (Andreasen et al. 1995). In einer fMRT-Studie zum visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis wurde dieser Effekt ebenfalls beobachtet, hier sogar schon nach 20 Minuten (Garavan et al. 2000). Garavan et al. schlossen aus dieser abnehmenden Aktivität, in Bereichen des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses, auf eine zunehmende Effizienz in der Verarbeitung der Informationen. Ebenso existieren Studien, die andere Verläufe postulieren. Zum einen über mehrere Wochen hinweg beobachtete Aktivitätsverläufe, die einer umgekehrten U-Kurve folgen, zum anderen auch Aktivitätszunahmen über die gesamte Trainingszeit. In der Untersuchung von Hempel et al., die auf einer räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe basierte, wurden insgesamt drei Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt. Eine im Zustand ohne Übung, eine nach zwei Wochen Training und die dritte nach vier Wochen Übungszeit. Sie fanden einen Aktivitätsverlauf, der einer inversen U-Kurve folgte (Hempel et al. 2004). Gaab et al. führten jeweils vor Trainingsbeginn und nach fünf Tagen Übung eine fMRT-Messung in einer

Arbeitsgedächtnisstudie durch und fanden einen zunehmenden Aktivitätsverlauf (Gaab et al. 2006).

Die widersprüchliche Literaturlage könnte zumindest teilweise dadurch erklärt werden, dass in vielen Studien lediglich ein Ausgangszustand mit einem Trainingszustand verglichen wurde. So sind unter Umständen vorhandene, komplexere Aktivitätsverläufe überhaupt nicht zu entdecken, da bei zwei Messpunkten immer nur eine Zu- oder Abnahme gefunden werden kann. Die einzige Ausnahme hierbei stellt die Studie von Hempel et al. dar, die ähnliche Ergebnisse, wie die von mir gefundenen, zeigt.

Zusammenfassend kann zu den vier Clustern gesagt werden, dass, auch wenn die Verläufe nicht immer klar und signifikant zu finden sind, die Aktivität einer umgekehrten U-Kurve folgt. Man kann hierbei, aufgrund der fehlenden Signifikanz in den Unterschieden zwischen allen einzelnen Durchgängen, vielleicht nur eingeschränkt von verlässlichen Ergebnissen sprechen, die starke Häufung genau dieses Verlaufs scheint aber nicht nur Zufall zu sein. Dies auch vor dem Hintergrund betrachtet, dass ähnliche Verlaufskurven in einer anderen Studie gefunden wurden. Ein solches Ergebnis vereint außerdem beide Erklärungsansätze für einerseits zunehmende, andererseits aber auch abnehmende Aktivität.

Auffällig an meinen Ergebnissen ist auch die kurze Zeitdauer, in der diese Effekte zu finden sind. Im Vergleich zu Trainingszeiten von mehreren Wochen, wirkt die Gesamtzeit von weniger als acht Minuten sehr kurz. Hierdurch wird im Grunde deutlich herausgestellt, dass es um einen Trainingseffekt geht, der unabhängig davon ausgeprägt ist, wie lange tatsächlich geübt wird, sondern bereits mit der ersten Wiederholung einer Aufgabe auftritt. Der Aktivitätsverlauf in der Form der inversen U-Kurve könnte so den gesamten Übungsfortschritt bis zur Beherrschung der Aufgabe darstellen. Die Steigerungsmöglichkeit bei einer Wortliste von 15 Wörtern, die auswendig gelernt werden muss, ist nur begrenzt vorhanden. Viele Probanden konnten nach dem fünften Durchgang alle Wörter aufzählen. An diesem Punkt müsste davon ausgegangen werden, dass zumindest im engeren Sinn keine Steigerung dieser Leistung mehr möglich ist, lässt man Aspekte, wie die Reihenfolge der Nennungen oder die Zeit, die für das Aufsagen benötigt wird, außen vor. Da in der Regel im fünften Durchgang fast alle 15 Wörter genannt werden konnten, könnte die wieder abnehmende Aktivität hier das Ende des Lernvorgangs beschreiben. Möglicherweise wäre in nachfolgenden Durchgängen, die dann wahrscheinlich nur noch kaum bessere Leistungen der Probanden ergeben hätten (siehe 5.1.1, Lerngesetz S. 78 ff.), noch eine weitere Abnahme der fMRT-Aktivität in den beschriebenen Regionen gefunden worden.

Solch ein Lernvorgang kann sich aber auch über längere Zeit erstrecken, je nach Anspruch der Aufgabe. So ließe sich erklären, dass Hempel et al. denselben Aktivitätsverlauf, wie ich ihn in meinen Daten finde, in ihrer Arbeit, die einen Lernzeitraum von vier Wochen abdeckte, beschrieben. Der Anspruch der Aufgabe in dieser Studie müsste somit für die Probanden höher gewesen sein, da sich der Lernerfolg in Form einer abnehmenden Aktivität erst später eingestellt hat.

Solch eine Aktivitätskurve müsste sich demnach über viele verschiedene Zeiträume erstrecken können, leichtere Aufgaben könnten diesen Verlauf früher zeigen, schwerere erst nach längerer Übungszeit. Dass eine solche Kurve gefunden werden kann, setzt natürlich voraus, dass an mehr als zwei Zeitpunkten gemessen wird und nicht nur vor und nach der Übungszeit. Hier findet sich, meiner Meinung nach, ein Manko in vielen beschriebenen Studien zu Plastizitätsverläufen, da diese lediglich Aussagen über eine Zu- oder Abnahme machen können. Wenigstens eine dritte Messung in der Mitte des Trainingszeitraums würde schon grob aufzeigen können, ob sich ein Aktivitätsverlauf, wie von mir gefunden, ebenfalls finden lässt und auch auf andere Aufgabenbereiche übertragen lässt.

5.2.3 Aktivitätsunterschiede zwischen den Lernstrategien

Die von mir in der Einleitung vorgestellte Literatur bezieht sich ausschließlich auf Unterschiede bezüglich verschiedener Lernstrategien auf der Ebene der Verhaltensdaten und für den Bereich des verbalen Gedächtnisses. Aussagen zu möglicherweise uneinheitlichen Aktivierungsmustern werden nicht gemacht und wurden von mir bei meiner Literaturrecherche auch nicht gefunden. Lediglich die Arbeiten der Arbeitsgruppe um Stephen Kosslyn berichten von Aktivität in visuellen Arealen bei verbalen Aufgaben, bei denen sich die Probanden Worte verbildlichen sollten (Ganis et al. 2004). Diese Studien dienten aber nicht explizit der Untersuchung des Arbeitsgedächtnisses, so dass auch diese Aussagen, wenn überhaupt, nur vorsichtig auf meine Ergebnisse übertragen werden dürfen. Letztendlich sind die Hirnareale, in denen die Bedingung Lernstrategie einen signifikanten Effekt ergab, auch keine Gebiete, die dem Aufgabenbereich des „Sehens“ (ob real oder mental) zugeordnet werden. Hiernach wurde auch nicht primär gesucht. Ziel war es vielmehr, einen Überblick über die Hirnbereiche zu bekommen, die unterschiedliche Aktivitätsmuster in Abhängigkeit der verwendeten Lernstrategie zeigten. Unterschiedliche Vorgehensweisen müssten

verschiedene Aufgabenbereiche beinhalten und dementsprechend auch spezifische Hirnareale beanspruchen.

Wie in den Ergebnissen beschrieben, fanden sich drei Cluster, in denen signifikante Unterschiede, bedingt durch den Faktor Lernstrategie, gefunden wurden. Bei einem von ihnen konnte trotz eines Haupteffektes, der, bedingt durch den Faktor Lernstrategie, in der Varianzanalyse gefunden wurde, in post-hoc-t-Tests kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den drei Strategien nachgewiesen werden.

Zusammenfassend muss zu den Unterschieden, bedingt durch die Lernstrategie, gesagt werden, dass meine aufgestellten Hypothesen nicht bestätigt wurden. Die Unterschiede zwischen den Lernstrategien waren auf der Ebene der fMRT-Analyse nur sehr gering ausgeprägt.

Der erste Cluster liegt im Bereich des rechten mittleren Gyrus frontalis, mit evtl. kleinen Anteilen am inferioren Gyrus frontalis, welcher wiederum zur BA 44 zählen würde. In diesem Cluster fand sich unter der Bedingung Hören ein signifikanter Unterschied in der Aktivität zwischen den Lernstrategien 2 („elaborative“) und 3 („mixed“). Grob beschrieben, findet sich in der elaborativen Lernstrategiegruppe ein Aktivitätsverlauf, der in den ersten vier Durchgängen ähnlich hoch bleibt und zum fünften Durchgang zunimmt. Die „mixed Gruppe“ zeigt in diesem Cluster eine deutlich niedrigere Aktivität und folgt in ihrem Verlauf der zuvor bereits beschriebenen, umgekehrten U-Kurve. Diese Unterschiede sind nicht einfach zu deuten. Anteile dieses Clusters liegen laut der Anatomy Toolbox nach Eickhoff in der Brodmann Area 44. Die elaborative Strategiegruppe zeigt eine höhere Aktivität, obwohl die BA 44, zumindest linkshemisphärisch, klassischerweise als Broca-Areal direkt dem Sprechen an sich zugeordnet wird. Eine Funktion, die im Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley dem Phonological Loop zugerechnet wird. So müsste zumindest theoretisch die „rote strategy“ in diesem Gebiet die höchste Aktivität aufweisen, da sie nur darauf beruht, die vorgelesenen Worte innerlich zu wiederholen und somit auswendig zu lernen. Auch in der Gruppe der „mixed strategy“ sollte sich hier eine recht hohe Aktivität finden, lediglich die „elaborative strategy“-Gruppe müsste hier geringe Aktivität zeigen. Die Ergebnisse zeigen jedoch ein völlig unerwartetes Bild. Zwischen der „elaborative“ und der „rote strategy“ findet sich kein signifikanter Unterschied, während die „elaborative strategy“ eine signifikant höhere Aktivität als die „mixed strategy“ zeigt.

In einer Studie mit 24 psychotischen Patienten, die unter auditorischen Halluzinationen litten, also eingebildeter Sprache, wurde während dieser Einbildungen eine verstärkte Aktivität in

den rechtshemisphärischen Korrelaten zu den klassischen Spracharealen gefunden (Sommer et al. 2008). Auch die rechtshemisphärische BA 44 gehörte zu diesen Arealen. Bei innerlich wiederholten Wörtern fand sich jedoch bei denselben Probanden eine eher linkshemisphärische Aktivierung des Broca-Areals (Sommer et al. 2008). Diese Aktivierungen der Sprachgebiete der rechten Hemisphäre treten laut Sommer et al. jedoch nur bei psychotisch erkrankten Patienten auf. Menenti et al. beschrieben in einer Arbeit eine rechtsseitige Aktivierung der Broca-Region bei gelesenen Sätzen, die aufeinander aufbauten und inhaltlich nicht stimmig waren (Menenti et al. 2009). Hier findet sich ein interessanter Ansatzpunkt, der erklären könnte, warum gerade die Probanden der „elaborative-Gruppe“ in diesem Cluster eine stärkere Aktivität zeigten als die der „mixed-Gruppe“. Laut der Definition der Gruppen war eine semantische Verarbeitung der Wörter ausschlaggebend für eine Zuteilung zu der elaborativen Gruppe. Wenn die Probanden nun versuchten, eine Geschichte oder verschiedene Bilder zu den Wörtern zu erfinden, war dies sicherlich nicht immer realistisch. Schon aufgrund des Zeitdruckes und der Zusammenstellung der Wörter konnte kaum eine logische Geschichte erdacht werden. Wenn der rechte Gyrus frontalis inferior, wie von Menenti et al. postuliert, für die Verarbeitung von inhaltlich inkorrekten Informationen verantwortlich ist, könnte die dortige Aktivierung in meiner Arbeit für genau dieses Erdenken einer unwahr erscheinenden Geschichte stehen. Als unwahr werden von Menenti et al. Informationen bezeichnet, die widersprüchlich der gängigen Information in unserem Langzeitgedächtnis sind (Menenti et al. 2009).

Neben der zytoarchitektonischen Zuordnung aus der Anatomy Toolbox nach Eickhoff kann der Aktivitätscluster rein anatomisch auch dem mittleren Gyrus frontalis und hierin der BA 6 zugeordnet werden. Nicht für alle Hirnregionen existieren in der Toolbox Wahrscheinlichkeitskarten. Somit könnte dieser Zusammenhang deshalb nicht in der Toolbox darzustellen gewesen sein. Dieser Bereich scheint an der Übungsfunktion des Visuospatial sketchpad teilzuhaben und wäre im Grunde der Übungseinheit für den Phonological Loop auf visueller Ebene gleichzusetzen (Baddeley 2003). Hierfür spricht ebenfalls, dass der Cluster auf der rechten Hemisphäre liegt, die tendenziell eher Aufgaben des visuellen Arbeitsgedächtnisses ausführt. Unter dieser Annahme wäre eine verstärkte Aktivität in diesem Cluster durchaus plausibel, da eine elaborative Strategie oft die Verbildlichung von Informationen beinhaltet (Benjamin und Bjork 2000). Hierfür wäre neben dem verbalen auch das visuelle Arbeitsgedächtnis gefragt, was sich in dieser vermehrten Aktivität gegenüber

einer „mixed strategy“ niederschlägt. Warum kein Unterschied zwischen der „elaborative“ und der „rote strategy“ zu finden ist, lässt sich auf diese Weise aber ebenfalls nicht erklären. Ein zweiter Cluster, in dem sich signifikante Unterschiede fanden, in diesem Fall zwischen der „mixed“ und der „rote strategy“ unter der Bedingung Sprechen, ist ein Bereich, der zum linken inferioren Parietallappen gezählt werden kann. Im inferioren parietalen Areal werden die Speicher des Arbeitsgedächtnisses angesiedelt. Der Unterschied zwischen der „rote“ und der „mixed strategy“ ist auch hier nicht eindeutig zu erklären. Dass die Gruppe, die die „rote strategy“ anwandte, dort mehr Aktivität zeigt, ist prinzipiell nachzuvollziehen, rein verbale Information wird im verbalen Speicher abgelegt. Dass es sich hierbei um einen verbalen Speicher handelt, leite ich daraus ab, dass der Cluster auf der linken Hemisphäre liegt und somit laut der anatomischen Zuordnung dem verbalen Arbeitsgedächtnis zugeordnet werden muss (Baddeley 2003). Der signifikante Unterschied zu der „mixed-Gruppe“ macht aber auch hier wieder stutzig. Der größte Unterschied sollte eigentlich zu der „elaborative strategy-Gruppe“ zu finden sein, da hier die verbalen Informationen elaborativ verarbeitet werden (z. B. durch Verbildlichung) und somit auch den Weg in den Speicher des visuellen Arbeitsgedächtnisses finden müssten. Dieser wird auf der rechten Hemisphäre vermutet. Die Aktivitätsmuster der „elaborative strategy“ und der „rote strategy“ unterscheiden sich höchstens gering und dies auch in keinem Fall signifikant.

Im dritten Aktivitätscluster, der dem Bereich des Rolandischen Operculums zugeordnet werden konnte, fand sich zunächst in der Varianzanalyse zwar ein signifikanter Haupteffekt, bedingt durch den Faktor Lernstrategie, jedoch konnte dieser Fund in den post-hoc-t-Tests nicht bestätigt werden. Aus diesem Grund werde ich auf diesen Bereich nicht näher eingehen. Es wurden keinerlei Interaktionen zwischen den Lernstrategiegruppen und den Durchgängen gefunden, die auf evtl. gegensätzliche Verläufe oder direkte Zusammenhänge hingewiesen hätten. Dies passt zu diesen gering ausgeprägten Gruppeneffekten.

An dieser Stelle muss die Frage gestellt werden, ob die Einteilung der Probanden in die verschiedenen Lerngruppen richtig war. Die gewählte Unterteilung könnte nicht differenziert genug gewesen sein, um deutliche Unterschiede herausstellen zu können. Auch die Zuweisung im Anschluss an die Durchführung der fMRT-Messung könnte Fehler mit sich bringen. Probanden antworteten auf die Frage nach ihrer Art des Lernens oft nur kurz und unpräzise. Auch Wechsel zwischen Strategien könnten innerhalb des Tests stattgefunden haben. Auch die Fähigkeit selbstreflektiv beantworten zu können, wie die Aufgabe gelöst wurde, könnte unterschiedlich gut ausgeprägt sein. Unterschiede im Aktivierungsmuster

könnten nur bei entsprechend detaillierter Strategieanweisung vor der Durchführung der Studie zu finden sein. Diesen Schluss legen meine Ergebnisse zumindest nahe. Eine zweite Möglichkeit könnte ebenso sein, dass unterschiedliche Lernstrategien einfach keine stark unterschiedlichen Aktivierungsmuster im fMRT ergeben. In der Literatur war dazu auch keine Information zu finden, die solche Unterschiede für Arbeitsgedächtnisaufgaben nachweisen konnte.

Das Ziel dieser Studie war jedoch von Anfang an nicht darauf ausgelegt, verschiedene Lernstrategien zu untersuchen. Die Idee, dass es zwischen den Probanden deutliche Unterschiede geben könnte, kam damit auf, dass die Antworten auf die Frage nach der Strategie, die jeweils verwendet wurde, um die Wortliste zu lernen, sehr verschieden waren. Die Einteilung in die drei Lerngruppen erfolgte analog zu der, die auch Wiswede et al. in ihrer Studie vornahm (Wiswede et al. 2007). Dies schließt jedoch nicht aus, dass diese Art der Einteilung in meiner Studie nicht funktioniert hat. Die Gruppen könnten zu unscharf getrennt gewesen sein, um klare Effekte finden zu können. Dies könnte in Folgestudien berücksichtigt werden. Es würde sicherlich einen Unterschied erbringen, wenn von vornherein festgelegt wäre, mit welcher Strategie einzelne Probanden lernen sollten. Nachfolgende Studien sollten dies berücksichtigen, was von Anfang an aber eine klare Fokussierung auf die Untersuchung der Strategieunterschiede notwendig macht.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ziel meiner Arbeit war es, Kurzzeitplastizitätsvorgänge im menschlichen verbalen Arbeitsgedächtnis mit Hilfe einer fMRT-Untersuchung von 22 Probanden zu analysieren. Als Grundlage hierfür diente das Arbeitsgedächtnismodell nach Alan Baddeley. Neben diesem zentralen Punkt der Arbeit sollten auch andere Effekte, die im Zusammenhang mit dem Arbeitsgedächtnis stehen, untersucht werden. Hierbei ging es auf der Ebene der Verhaltensdaten um das Potenzgesetz des Lernens, Geschlechterunterschiede, den Primacy-Recency-Effekt sowie um Unterschiede zwischen verschiedenen Lernstrategien. Die Strategieunterschiede sollten auch auf der Ebene der Bildgebungsdaten untersucht werden.

Für die Untersuchung wurden von 22 Probanden fMRT-Aktivierungsdaten erhoben, während diese den Verbalen Lern- und Merkfähigkeitstest absolvierten. Die Wiedergabe der Wörter erfolgte hierbei im fMRT-Scanner selbst mit Hilfe eines Richtmikrofons, das die Stimmen der

Probanden hörbar machte. Diese Vorgehensweise ist so bisher noch nicht in der Literatur beschrieben worden. Für meine Analysen verwendete ich lediglich die ersten fünf Durchgänge des VLMTs, also die fünfmalige Wiederholung einer aus 15 Wörtern bestehenden Wortliste. In mehreren Varianzanalysen wurden die Effekte der Faktoren Geschlecht, Durchgang und Lernstrategie für die Verhaltensdaten und der Faktoren Durchgang, Lernstrategie und der Bedingung Hören oder Sprechen für die Bildgebungsdaten untersucht. Die Einteilung der Probanden geschah in drei Lernstrategiegruppen, dem reinen „rote“ Lernen, dem rein „elaborativen“ Lernen sowie einer Mischform aus diesen beiden Strategien („mixed strategy“). Diese Einteilung wählte ich auf der Basis der Arbeit von Wiswede et al. aus dem Jahr 2007.

Die Daten zeigten sowohl erwartete als auch unerwartete Ergebnisse. Das Potenzgesetz des Lernens kann anhand meiner Daten gut nachvollzogen werden, es fand sich eine zunehmende Steigerung der richtig erinnerten Wörter. Diese folgte einer Potenzfunktion mit zunächst stärkeren Lernanstiegen und in den späteren Durchgängen mit nur noch kleinen Verbesserungen. Leistungsunterschiede in den richtig wiedergegebenen Wörtern zwischen männlichen und weiblichen Probanden konnten nicht festgestellt werden. Ein deutlich ausgeprägter Primacy-Effekt konnte, im Gegensatz zum fehlenden Recency-Effekt, signifikant nachgewiesen werden. Die ersten drei Wörter der Liste, die ich in die Primacy-Gruppe eingeordnet habe, wurden signifikant besser erinnert als die Wörter, die in der Mitte der Liste standen. Für die letzten drei Wörter (Recency-Gruppe) traf dies nicht zu. Würde man den Recency-Effekt jedoch auf die letzten beiden oder nur das letzte Wort beschränken, so wäre der Effekt evtl. auch in meinen Daten zu finden gewesen. Der Recency-Effekt scheint somit eher für wenige zu erinnernde Items zu gelten, wohingegen der Primacy-Effekt auch größere Itemgruppen einschließen kann. Die Ergebnisse hinsichtlich des Vergleichs der Lernstrategien sind weniger deutlich. Es fand sich, anders als in den Hypothesen von mir erwartet, kein Unterschied in der Erinnerungsleistung zwischen den drei Strategiegruppen. So zeigt keine der Gruppen einen signifikant höheren Gesamtwert an erinnerten Wörtern als eine der anderen Gruppen. Ein Grund für das Fehlen dieses Effektes könnte in der Einteilung der Gruppen gelegen haben. Die Aufteilung könnte zu unscharf gewesen sein, um Unterschiede herausstellen zu können. Für nachfolgende Studien, die nach Strategieunterschieden suchen, würde es sich anbieten, die Probanden vor der Messung bestimmten Gruppen zuzuweisen, um jeden Probanden eine klare, gut abgrenzbare Strategie verfolgen zu lassen.

Die Untersuchung der Bildgebungsdaten brachte einige interessante Ergebnisse hervor. Die allgemeinen Aktivierungen über alle Bedingungen zeigten Aktivität in einigen Hirngebieten, die direkt dem Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley zugeordnet werden können. Hierzu zählen die linkshemisphärischen Brodmann Areale 44 und 6, die beide zusammen die Übungseinheit des Phonological loop bilden. Diese Aktivierungen waren aufgrund der verbalen Aufgabenstellung zu erwarten und stellen den Wert des subvokalen Wiederholens für die Erinnerungsleistung des verbalen Arbeitsgedächtnisses heraus. Bereiche des Visuospatial sketchpads, namentlich der inferiore Gyrus frontalis und der inferiore Gyrus temporalis, wurden entgegen meiner Annahmen nicht rechts- sondern linkshemisphärisch aktivitätszeigend gefunden. Dies könnte für eine linkshemisphärische Untereinheit des VSS sprechen, die dann aktiv wird, wenn verbale Information, die auf der linken Hemisphäre verarbeitet wird, in räumlich-visuelle Information überführt wird. Ich leite daraus ab, dass jede der beiden Hemisphären beide Subsysteme des Arbeitsgedächtnismodells nach Baddeley besitzt. Auf der linken Seite ist der PL dominant, auf der rechten der VSS. Diese Vorschläge sind in der Literatur zur Arbeitsgedächtnisforschung nicht zu finden, evtl. bringt die methodisch neue Herangehensweise in meiner Studie auch in Folgestudien weitere dieser Ergebnisse.

Neben der Aktivität im Großhirn konnte auch Aktivität im Cerebellum nachgewiesen werden. Gerade der rechte Lobulus VI des Cerebellums wird mit einer subvokalen Übungsfunktion in Verbindung gebracht. Hier fand sich auch in meinen Daten Aktivität. Die Übungsfunktion des PL scheint also nicht nur auf die Brodman Areale 44 und 6 beschränkt zu sein, sondern auch im Cerebellum stattzufinden. Sollten sich diese Funde replizieren lassen, so muss über eine Überarbeitung des Modells nach Baddeley nachgedacht werden, um dem Cerebellum seine entsprechende Rolle zuzuweisen.

Zusätzlich zu der Aktivität der Arbeitsgedächtnisareale, fand sich ein Aktivitätscluster im Bereich des rechtshemisphärischen Hippokampus, der mit dem Langzeitgedächtnis in Verbindung gebracht werden kann. Dies zeigt, dass bereits wenige Wiederholungen von Informationen ausreichen, um eine Überführung in das Langzeitgedächtnis zu ermöglichen. Die Aktivität hier könnte außerdem einen möglichen Hinweis auf eine Ursache für den Primacy-Effekt liefern. Laut dem Dual-Store-Modell entsteht der Primacy-Effekt, weil Items zu Beginn einer Liste innerlich öfter wiederholt werden und deshalb auch früher ins Langzeitgedächtnis überführt werden können. Passend zu dieser Annahme fand sich, wie bereits beschrieben, eine deutliche Aktivität in solchen subvokalen Übungsbereichen.

Die Untersuchung der Plastizitätseffekte über die fünf Durchgänge zeigte ebenfalls interessante Ergebnisse. So konnte für mehrere Aktivitätscluster, über die fünf Durchgänge, ein Verlauf nachgewiesen werden, der dem einer umgekehrten U-Kurve gleicht und so zwei verschiedene Annahmen zur neuronalen Plastizität (einerseits Aktivitätszunahme, andererseits Aktivitätsabnahme mit zunehmender Übung) miteinander verbindet. Diese Ergebnisse zeigen, dass selbst in kürzesten Zeitabständen bereits Adaptationsprozesse im Hirn ablaufen. Hier findet sich ein Ansatzpunkt für zukünftige Studien zum Thema der Plastizität. Es sollte grundsätzlich nicht ein Ausgangszustand mit einem Trainingszustand verglichen werden, sondern eine möglichst durchgehende Messung erfolgen, die in kurzen, regelmäßigen Abständen die Hirnaktivität beurteilen kann. Die durchgehende Messung, wie sie in dieser Arbeit stattgefunden hat, ermöglicht sozusagen ein direktes Mitverfolgen des Lernprozesses auf der Bildgebungsebene. Der von mir beschriebene Verlauf wurde bereits in anderen Studien beobachtet, bisher aber noch nicht für eine solch kurze Zeitspanne beschrieben. Dass sich dieser Effekt auch innerhalb von knapp acht Minuten finden lässt, legt die Vermutung nahe, dass leichte Aufgaben, wie sie der VLMT darstellt, schneller zu wiederabnehmenden Aktivitätswerten im Gehirn führen, als es schwierige Aufgaben tun. Nach anfangs verstärkter Rekrutierung von Hirngewebe, die sich in erhöhten Aktivitätswerten widerspiegelt, findet sich bereits nach wenigen Wiederholungen eine effizientere Ausführung der Aufgabe und somit eine Abnahme der zu messenden Aktivität.

An diesem Punkt sollten nachfolgende Studien anschließen. Die von mir gefundenen Plastizitätseffekte müssen bestätigt werden und noch weiter untersucht werden. Dies unter anderem in Hinblick auf mögliche Geschlechtsunterschiede oder auch Differenzen zwischen verschiedenen Lernstrategien.

In meinen Daten fanden sich wenige Unterschiede zwischen den drei Lernstrategiegruppen, lediglich für zwei Aktivitätscluster ließen sich signifikante Unterschiede nachweisen. Diese Unterschiede fanden sich jedoch nicht zwischen den beiden direkt entgegengesetzten Gruppen, der „rote“ und der „elaborative strategy“. Hier könnte der Grund dafür in der ungenügenden Aufteilung der Strategiegruppen gelegen haben. Die Probanden gaben unterschiedliche Lernstrategien nach der Durchführung des Tests an. Diese ließen sich aber in meinen Daten nicht exakt genug voneinander trennen. Auch das sollte eine Aufgabe sein, der sich Folgestudien widmen können.

Abschließend betrachtet denke ich, dass gerade auf dem Gebiet der neuronalen Plastizität noch viel an möglichen Erkenntnissen verborgen ist, die mit detaillierten und umfassenden Untersuchungen in bildgebenden Studien gefunden werden können. Die Ergebnisse meiner Arbeit zeigen, dass Plastizität im Arbeitsgedächtnis bereits mit der ersten Wiederholung einer Aufgabe stattfindet und sich auch mittels funktioneller Magnetresonanztomographie darstellen lässt. Auf diese Erkenntnis sollte in nachfolgenden fMRT-Untersuchungen eingegangen werden. Plastizitätseffekte müssen nicht unbedingt durch große Aufgaben oder lange Übungszeiten bedingt sein, denn es sind ja oft nur die kleinen Erinnerungsleistungen und Wiederholungen in geringer Anzahl, die in unserem Alltag eine Rolle spielen, um sich wie in der Einleitung erwähnt, eine Telefonnummer oder einen Geburtstag zu merken. Unser Gedächtnis muss innerhalb kürzester Zeit neue Informationen aufnehmen und speichern können. Die Möglichkeit, die neuronalen Korrelate hierzu darzustellen, ermöglicht neue Einblicke in eine Eigenschaft unseres Gehirns, die einerseits viel untersucht wird, andererseits aber doch immer noch ein großes Fragezeichen darstellt.

7 Anhang

7.1 VLMT-Wortlisten

Liste A	Liste B	Wiedererkennensliste	
Trommel	Tisch	Vorhang	Locke
Vorhang	Förster	Sonne	Jäger
Glocke	Vogel	Boot	Fluss
Kaffee	Schuh	Vase	Gewehr
Schule	Ofen	Farbe	Stille
Eltern	Berg	Glocke	See
Mond	Handtuch	Ofen	Haus
Garten	Brille	Lehrer	Handtuch
Hut	Wolke	Kuh	Mut
Bauer	Boot	Hut	Mauer
Nase	Lamm	Schuh	Truthahn
Truthahn	Gewehr	Schule	Vogel
Farbe	Bleistift	Fenster	Bein
Haus	Kirsche	Förster	Brille
Fluss	Arm	Mond	Schaf
		Tisch	Garten
		Fisch	Warten
		Kuchen	Eltern
		Lamm	Pauke
		Nase	Berg
		Garbe	Trommel
		Bleistift	Kinder
		Maus	Bauer
		Wolke	Arm
		Kaffee	Kirsche

(Helmstaedter et al. 2001)

7.2 Genehmigung der fMRT-Studie durch die Ethikkommission

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT GÖTTINGEN



DER VORSITZENDE DER ETHIK-KOMMISSION

ETHIK-KOMMISSION DER MED. FAKULTÄT, ROBERT-KOCH-STR. 40, 37075 GÖTTINGEN

Frau
Dr. med. Kirsten Jordan
Abt. Medizinische Psychologie und
Medizinische Soziologie

Waldweg 37

Robert-Koch-Straße 40
D-37075 Göttingen

Telefon: Referent/in +49(0)5 51 39-86 44
Sekretariat +49(0)5 51 39-66 29

Telefax: +49(0)5 51 39-95 36

Internet: www.mi.med.uni-goettingen.de/ethik

E-Mail: ethik@med.uni-goettingen.de

Datum:

8. 6. 2007 b-we-f

Antragsnummer: 39/3/07 (bitte stets beim Schriftwechsel angeben)
Studientitel: Entwicklung und Validierung von neuen fMRT-Paradigmen zur Untersuchung des Einflusses von Sexualhormonen auf die kortikalen Korrelate verbaler und räumlicher kognitiver Funktionen
Antragstellerin: Dr. med. Kirsten Jordan, Abt. für Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie

Sehr geehrte Frau Kollegin Jordan,

wir bestätigen den Eingang Ihres Schreibens am 16.05.2007. Nach Ergänzung der vorliegenden Dokumente und Beantwortung der im vorläufigen Votum aufgeführten Fragen bestehen nunmehr keine ethischen und rechtlichen Bedenken gegen die Durchführung des oben genannten Forschungsvorhabens.

Wir wünschen viel Erfolg bei der Durchführung Ihres Projektes.

Die Ethik-Kommission weist darauf hin, dass die ärztliche und juristische Verantwortung bei den jeweiligen Prüfarzten verbleibt. An der Beratung und Beschlussfassung haben die im Anhang aufgeführten Mitglieder der hiesigen Ethik-Kommission teilgenommen. Es wird bestätigt, dass Prüfarzte, die an der o.g. Studie beteiligt sind, nicht an der Abstimmung teilgenommen haben. Die zustimmende Bewertung ist für die im Anhang aufgeführten Personen/Einrichtungen gültig. Auf die Einhaltung einschlägiger Gesetze und Rechtsvorschriften wird hingewiesen. Die nach Rechtslage notwendigen Unterrichtungen (u. A. Prüfplanänderungen, entsprechende Zwischenfallereignisse, neue Datenlage, Abschlussbericht) sind den jeweils zuständigen Ethik-Kommissionen unverzüglich vorzulegen. Die Ethik-Kommission bestätigt, dass sie auf Grundlage nationaler Gesetze, Vorschriften sowie der GCP/ICH-Richtlinie arbeitet. Gegen den vorliegenden Bescheid kann innerhalb von einem Monat nach Bekanntmachung Widerspruch erhoben werden. Der Widerspruch ist schriftlich oder zur Niederschrift der Geschäftsstelle bei der Geschäftsstelle der Ethik-Kommission der Georg-August-Universität Göttingen, Robert-Koch-Str. 40, 37075 Göttingen einzureichen und mit einer Begründung zu versehen.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. med. J. Brockmüller
Vorsitzender der Ethik-Kommission

8 Literaturverzeichnis

Ackermann H, Wildgruber D, Daum I, Grodd W (1998): Does the cerebellum contribute to cognitive aspects of speech production? A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study in humans. *Neurosci Lett* 247 187-190

Anderson J: Kognitive Psychologie. 3. Auflage; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin 2001

Andreasen NC, O'Leary DS, Cizadlo T, Arndt S, Rezai K, Watkins GL, Ponto LL, Hichwa RD (1995): II. PET studies of memory: novel versus practiced free recall of word lists. *Neuroimage* 2 296-305

Baddeley A (2003): Working memory: looking back and looking forward. *Nat Rev Neurosci* 4 829-839

Baddeley A: Working memory, thought and action. Oxford Univ Press, Oxford 2007

Behrens, K: Geschlechterunterschiede verbaler Funktionen - Leistungen, neuronale Netzwerke und deren Modulation durch Sexualhormone. Med Diss Göttingen 2008

Bengtsson SL, Ehrsson HH, Forssberg H, Ullen F (2005): Effector-independent voluntary timing: behavioural and neuroimaging evidence. *Eur J Neurosci* 22 3255-3265

Benjamin AS, Bjork RA (2000): On the relationship between recognition speed and accuracy for words rehearsed via rote versus elaborative rehearsal. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 26 638-648

Bleecker ML, Bolla-Wilson K, Agnew J, Meyers DA (1988): Age-related sex differences in verbal memory. *J Clin Psychol* 44 403-411

Caspers S, Eickhoff SB, Geyer S, Scheperjans F, Mohlberg H, Zilles K, Amunts K (2008): The human inferior parietal lobule in stereotaxic space. *Brain Struct Funct* 212 481-495

Cavanna AE, Trimble MR (2006): The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain* 129 564-583

Choi HJ, Zilles K, Mohlberg H, Schleicher A, Fink GR, Armstrong E, Amunts K (2006): Cytoarchitectonic identification and probabilistic mapping of two distinct areas within the anterior ventral bank of the human intraparietal sulcus. *J Comp Neurol* 495 53-69

D'Esposito M, Detre JA, Alsop DC, Shin RK, Atlas S, Grossman M (1995): The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature* 378 279-281

Draganski B, May A (2008): Training-induced structural changes in the adult human brain. *Behav Brain Res* 192 137-142

Eickhoff SB, Stephan KE, Mohlberg H, Grefkes C, Fink GR, Amunts K, Zilles K (2005): A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *Neuroimage* 25 1325-1335

Eickhoff SB, Schleicher A, Zilles K, Amunts K (2006): The human parietal operculum. I. Cytoarchitectonic mapping of subdivisions. *Cereb Cortex* 16 254-267

Fabiani M, Karis D, Donchin E (1990): Effects of mnemonic strategy manipulation in a Von Restorff paradigm. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 75 22-35

Friston K, Ashburner J, Kiebel S, Nichols T, Penny W: *Statistical Parametric Mapping - The Analysis Of Functional Brain Images*. Elsevier Science & Technology Books, New York 2007

Gaab N, Gaser C, Schlaug G (2006): Improvement-related functional plasticity following pitch memory training. *Clin Neurophysiol* 31 255-263

Ganis G, Thompson WL, Kosslyn SM (2004): Brain areas underlying visual mental imagery and visual perception: an fMRI study. *Brain Res Cogn Brain Res* 20 226-241

Garavan H, Kelley D, Rosen A, Rao SM, Stein EA (2000): Practice-related functional activation changes in a working memory task. *Micros Res Tech* 51 54-63

Helmstaedter C, Lendt M, Lux S: *Verbaler Lern- und Merkfähigkeitstest. Manual*; Beltz Test GmbH, Göttingen 2001

Hempel A, Giesel FL, Garcia Caraballo NM, Amann M, Meyer H, Wustenberg T, Essig M, Schroder J (2004): Plasticity of cortical activation related to working memory during training. *Am J Psychiatry* 161 745-747

Hickok G, Poeppel D (2000): Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends Cogn Sci* 4 131-138

Hickok G, Poeppel D (2007): The cortical organization of speech processing. *Nat Rev Neurosci* 8 393-402

Hinrichs S: *Experimentalpsychologische Untersuchungen zu Navigationsstrategien unter Berücksichtigung physiologischer und endokrinologischer Variablen. Mathematisch-Naturwiss. Diss. Göttingen 2008*

Kelly C, Foxe JJ, Garavan H (2006): Patterns of normal human brain plasticity after practice and their implications for neurorehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 87 20-29

Kolb B, Wishaw I: *Fundamentals Of Human Neuropsychology. 5. Auflage*; Worth Publishers, New York 2003

Kramer JH, Delis DC, Kaplan E, O'Donnell L, Prifitera A (1997): Developmental sex differences in verbal learning. *Neuropsychology* 11 577-584

Lautenbacher S, Güntürkün O, Hausmann M: *Gehirn und Geschlecht. Kognitive Geschlechtsunterschiede. Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2007*

Logie RH, Venneri A, Della SS, Redpath TW, Marshall I (2003): Brain activation and the phonological loop: the impact of rehearsal. *Brain Cogn* 53 293-296

Mantonakis A, Rodero P, Lesschaeve I, Hastie R (2009): Order in Choice: Effects of Serial Position on Preferences. (*Psychol Sci*, im Druck)

Menenti L, Petersson KM, Scheeringa R, Hagoort P (2009): When elephants fly: differential sensitivity of right and left inferior frontal gyri to discourse and world knowledge. *J Cogn Neurosci* 21 2358-2368

Morosan P, Schleicher A, Amunts K, Zilles K (2005): Multimodal architectonic mapping of human superior temporal gyrus. *Anat Embryol (Berl)* 210 401-406

Newell A, Rosenbloom S: Mechanisms of Skill Acquisition and the Law of Practice; in *Cognitive skills and their acquisition*; hrsg. v. Anderson, JR u.a. Erlsdale, Hillsdale, NJ 1981, 3-17

Ogawa S, Lee TM, Kay AR, Tank DW (1990): Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 87 9868-9872

Pape H: Lernen und Gedächtnis; in *Lehrbuch Vorklinik Teil D Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie* hrsg. v. Schmidt RF, Unsicker K u.a. Deutscher-Ärzte-Verlag, Köln 2003 129-140

Poeppel D, Hickok G (2004): Towards a new functional anatomy of language. *Cognition* 92 1-12

Ptok M (2010): [Gender-dependent differences in auditory verbal learning and memory skills in children?]. *HNO* 2010, I 48-50

Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker, K: *Prometheus Lernatlas der Anatomie: Kopf und Neuroanatomie*. Thieme, Stuttgart 2006

Smith EE, Jonides J (1998): Neuroimaging analyses of human working memory. Proc Natl Acad Sci U S A 95 12061-12068

Sommer IE, Diederer KM, Blom JD, Willems A, Kushan L, Slotema K, Boks MP, Daalman K, Hoek HW, Neggers SF, Kahn, RS (2008): Auditory verbal hallucinations predominantly activate the right inferior frontal area. Brain 131 3169-3177

Stoodley CJ, Schmahmann JD (2009): Functional topography in the human cerebellum: a meta-analysis of neuroimaging studies. Neuroimage 44 489-501

Talmi D, Grady CL, Goshen-Gottstein Y, Moscovitch M (2005): Neuroimaging the serial position curve. A test of single-store versus dual-store models. Psychol Sci 16 716-723

Teruya LC, Ortiz KZ, Minett TS (2009): Performance of normal adults on Rey Auditory Learning Test: a pilot study. Arq Neuropsiquiatr 67 224-228

Wager TD, Smith EE (2003): Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis. Cogn Affect Behav Neurosci 3 255-274

Wallentin M (2009): Putative sex differences in verbal abilities and language cortex: a critical review. Brain Lang 108 175-183

Weishaupt D, Köchli V, Marincek B: How Does MRI Work? 2. Auflage; Springer Verlag, Berlin / Heidelberg 2006

Weiss E, Kemmler G, Deisenhammer E, Fleischhacker W, Delazer M (2003): Sex differences in cognitive functions. Pers Individ Dif 35 863-875

Westerberg H, Klingberg T (2007): Changes in cortical activity after training of working memory--a single-subject analysis. Physiol Behav 92 186-192

Wiswede D, Russeler J, Munte TF (2007): Serial position effects in free memory recall--An ERP-study. Biol Psychol 75 185-193

Zhang DR, Li ZH, Chen XC, Wang ZX, Zhang XC, Meng XM, He S, Hu XP (2003):
Functional comparison of primacy, middle and recency retrieval in human auditory short-term
memory: an event-related fMRI study. *Brain Res Cogn Brain Res* 16 91-98

Danksagung

Als erstes möchte ich Frau Dr. Kirsten Jordan meinen Dank dafür aussprechen, dass sie sich die viele Arbeit damit gemacht hat, meine Dissertation zu betreuen. Sie stand mir immer mit vielen Ratschlägen und guten Ideen zur Seite und hat sich immer die Zeit dafür genommen, mich in jeder Phase der Arbeit zu unterstützen. Besonders der Weg durch die leider doch recht komplizierte Statistik wäre mir ohne sie um einiges schwerer gefallen.

Auch das eigentliche Schreiben der Dissertation hätte ohne ihre Hilfe niemals so gut geklappt. Eine bessere Betreuung für meine Doktorarbeit hätte ich mir nicht wünschen können.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Torsten Wüstenberg, der besonders in der Planungsphase meiner Arbeit viel dazu beigetragen hat, dass die Ziele der Arbeit klar herausgestellt werden konnten. Auch die Einarbeitung in die Programme zur fMRT-Analyse verdanke ich zu einem großen Teil seinen Erklärungen.

Dank gesagt werden soll an dieser Stelle auch allen, die sich die Mühe gemacht haben, meine Arbeit nach Fehlern durchzusehen. Dies sind Nina Jomrich, meine Eltern und Frau Sigrid Hackspiel gewesen.

Schließlich möchte ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Müller, dafür danken, dass er mich mit meiner Doktorarbeit in seinem Institut betreut hat. Auch für seine Anregungen und Ideen, die mir geholfen haben, meine Arbeit fertigzustellen, bin ich ihm sehr dankbar.

Lebenslauf

Mein Name ist Jan Lübke. Ich wurde am 22.08.1985 in Henstedt-Ulzburg geboren. Knapp zwei Jahre nach mir wurde meine erste Schwester, Lisa Lübke, geboren. Kurz nach meinem fünften Geburtstag zogen wir in die Nähe von Freising, wo auch meine zweite Schwester, Nora Lübke, 1990 geboren wurde.

Nach einem erneuten Umzug nach Peine wurde ich 1992 eingeschult. Im Juli 2005 beendete ich meine schulische Laufbahn mit dem Abitur am Martino-Katharineum-Gymnasium in Braunschweig.

Ebenfalls in diesem Juli begann ich meinen Zivildienst in einer Kindertagesstätte der Caritas für Kinder aus sozial benachteiligten Familien.

Direkt im Anschluss an meinen Ersatzdienst in der Kindertagesstätte begann ich zum Sommersemester 2006 an der Georg-August-Universität in Göttingen mein Studium der Humanmedizin. Nach vier Semestern bestand ich mein Physikum und studiere jetzt aktuell im 9. Semester.