

Aus dem Max–Planck–Institut für Psychiatrie München  
Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. Dr. Elisabeth Binder

**Mnemotechniken: Neuronale Hintergründe und Auswirkungen  
auf das kognitive Leistungsvermögen**

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig–Maximilians–Universität zu München

vorgelegt von  
Philipp Schuster

aus Augsburg

2020

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Axel Steiger

Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. Dieter Edbauer  
Dr. med. Sabine Liebscher

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter: Dr. rer. nat. Martin Dresler

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>A Einführung .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Gedächtnis.....</b>	<b>7</b>
1.1 Formen des Gedächtnisses .....	7
1.2 Neuronale Grundlagen .....	9
1.3 Geschlechts- und Menstruationseffekte auf das Gedächtnis .....	10
<b>2 Gedächtnissport und Mnemotechniken .....</b>	<b>11</b>
<b>3 Magnetresonanztomographie in der Neurowissenschaft.....</b>	<b>17</b>
<b>B Fragestellung.....</b>	<b>19</b>
<b>C Material und Methoden .....</b>	<b>21</b>
<b>1 Studiendesign.....</b>	<b>21</b>
1.1 Versuchsablauf .....	22
1.2 Diskussion des Studiendesigns.....	24
<b>2 Versuchspersonen.....</b>	<b>25</b>
<b>3 Voruntersuchung.....</b>	<b>26</b>
<b>4 Erste Testung .....</b>	<b>31</b>
4.1 Bildgebung .....	31
4.1.1 Strukturelle Bildgebung.....	32
4.1.2 Funktionelle Bildgebung: Resting State .....	33
4.1.3 Funktionelle Bildgebung: Gedächtnis–Aufgaben .....	33
4.2 Kognitive Tests und Fragebögen.....	34
4.2.1 Visuelle Analogskala .....	34
4.2.2 Resting State Vigilanz .....	34
4.2.3 Verbales visuelles Gedächtnis .....	35
4.2.4 BOMAT.....	35
4.2.5 ZVT .....	36
4.2.6 Backward digit-span .....	36
4.2.7 Alternative Uses .....	37
4.2.8 Dual n-back.....	37
4.2.9 Verbales auditives Gedächtnis (audio memory).....	40
4.2.10 Psychomotorischer Vigilanztest .....	41
4.2.11 Strategien .....	41
4.2.12 24–Stunden Retest .....	41
4.3 Datenauswertung .....	41

4.3.1	Visuelle Analogskala .....	41
4.3.2	Resting State Vigilanz .....	42
4.3.3	Verbales visuelles Gedächtnis .....	42
4.3.4	BOMAT .....	42
4.3.5	ZVT .....	42
4.3.6	Backward Digit-span .....	42
4.3.7	Alternative Uses .....	43
4.3.8	Dual n-back.....	43
4.3.9	Verbales auditives Gedächtnis (audio memory).....	43
4.3.10	Psychomotorischer Vigilanztest (PVT) .....	45
<b>5</b>	<b>Trainingsphase .....</b>	<b>45</b>
5.1	Einführung in Mnemotechniken.....	45
5.2	Memocamp.....	45
5.3	Training .....	46
<b>6</b>	<b>Zweite Testung.....</b>	<b>47</b>
6.1	Bildgebung .....	47
6.2	Kognitive Tests und Fragebögen.....	47
6.3	Datenauswertung .....	48
<b>7</b>	<b>Nachtestung.....</b>	<b>48</b>
7.1	Wörter.....	48
7.2	BOMAT .....	49
<b>8</b>	<b>Statistische Auswertung.....</b>	<b>49</b>
8.1	Kognitive Tests .....	49
8.2	Strukturelle Bildgebung .....	50
8.3	Funktionelle Bildgebung: Resting State.....	51
8.4	Funktionelle Bildgebung: Gedächtnisaufgaben .....	52
<b>D</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>54</b>
<b>1</b>	<b>Kognitive Tests .....</b>	<b>54</b>
1.1	Verbales Visuelles Gedächtnis.....	54
1.2	BOMAT, ZVT, Backward Digit-span, Alternative Uses, dual n-back, verbales auditives Gedächtnis, falsche Erinnerung und falsches Wiedererkennen .....	56
1.3	Weitere Ergebnisse aus den Vortests .....	64
<b>2</b>	<b>Bildgebung .....</b>	<b>65</b>
2.1	Strukturelle Bildgebung .....	65
2.2	Funktionelle Bildgebung: Resting State.....	65
2.3	Funktionelle Bildgebung: Gedächtnisaufgaben .....	66

<b>E Diskussion.....</b>	<b>68</b>
<b>1 Loci-Methode und deklaratives Gedächtnis .....</b>	<b>69</b>
<b>2 Loci-Methode und Arbeitsgedächtnis bzw. fluide Intelligenz.....</b>	<b>73</b>
<b>3 Bildgebung .....</b>	<b>76</b>
3.1 Strukturelle Bildgebung .....	76
3.2 Funktionelle Bildgebung .....	78
<b>4 Potentielle methodische Fehler und Störvariablen .....</b>	<b>81</b>
<b>5 Ausblick.....</b>	<b>84</b>
<b>F Zusammenfassung .....</b>	<b>86</b>
<b>G Anhang.....</b>	<b>89</b>
<b>H Literaturverzeichnis .....</b>	<b>97</b>

## A Einführung

Ununterbrochen nutzen wir unser Gedächtnis. Egal ob wir uns Passwörter und Geburtstage merken müssen, Telefonnummern oder Vokabeln. Auch ein einfacher Besuch im Supermarkt mit dem Auto umfasst eine ganze Fülle von Gedächtnisleistungen, die unser Gehirn zu erbringen hat. Es merkt sich, was wir einkaufen müssen, wie wir zum Ziel kommen, wie man Auto fährt, welche Verkehrsregeln es zu beachten gilt und und und...Manches davon geschieht bewusst, vieles unbewusst. Ohne Gedächtnis ist ein Bewusstsein, wie wir es kennen, nicht möglich. Wir brauchen das Gedächtnis, um eine zeitliche und inhaltliche Verbindung zwischen verschiedenen Wahrnehmungen und Erlebnissen herzustellen (Walker und Stickgold 2006). Seit jeher fasziniert das Gedächtnis die Menschheit, werden sein morphologisches Korrelat, sein Aufbau, seine Funktionen und unterschiedliche Einflussfaktoren untersucht. Eine Frage, die sich dabei immer wieder stellt, ist, inwieweit sich das menschliche Gedächtnis verbessern und sein Potential maximal ausschöpfen lässt (Yates 1966). Seit Jahrhunderten, ja Jahrtausenden, werden viele verschiedene Strategien und Methoden verwendet, um diesem Ziel näher zu kommen (Bellezza 1981), unter anderem das Peg-Word System (Bugelski 1968), die Link-Methode (Delin 1969), die Geschichten-Methode (Bower 1969) als Form der Link-Methode und auch die Loci-Methode (Bower 1970). Dass sich durch den Einsatz dieser Mnemotechniken ganz außerordentliche Leistungen erzielen lassen, beweisen zahlreiche Gedächtnissportler (Maguire, Valentine et al. 2003). Allerdings stellt sich die Frage, inwieweit auch ganz „normale“ Menschen vom Einsatz dieser Methoden profitieren (Anders Ericsson 2003).

Die moderne Hirnforschung sucht die Effekte dieser Methoden zu quantifizieren und nutzt neben vielerlei kognitiven Tests unter anderem auch elektrophysiologische Untersuchungen wie das Elektroenzephalogramm (EEG) und bildgebende Untersuchungen wie die Magnetresonanztomographie (MRT), insbesondere die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) zur bildlichen Darstellung von Durchblutungsänderungen bzw. Stoffwechselprozessen des Gehirns. Auf diese Weise erhofft man sich, den zerebralen Prozessen auf die Spur zu kommen, die beim Einsatz von Mnemotechniken ablaufen.

# 1 Gedächtnis

Wie genau unser Gedächtnis in allen Einzelheiten funktioniert, weiß noch niemand. Aber natürlich gibt es verschiedene Modelle für den Aufbau unseres Gedächtnisses und auch zahlreiche Theorien und Hinweise, die manche Modelle und Klassifikationen wahrscheinlicher werden lassen und andere nicht. Unter Gedächtnis generell versteht man die Fähigkeit des Nervensystems, Informationen aufzunehmen, abzuspeichern und wieder abzurufen. Dieser Vorgang kann bewusst oder unbewusst geschehen. Je nach Blickwinkel kann das Gedächtnis nach zeitlichen oder inhaltlichen Gesichtspunkten eingeteilt werden, wobei nie außer Acht gelassen werden darf, dass die Grenzen fließend sind und ineinander übergehen. Eine strikte Trennung der verschiedenen Klassifikationen und Systeme ist daher nicht möglich, jedoch werden unterschiedliche Schwerpunkte betont. Ebenso wenig ist eine strikte Trennung auf anatomischer Ebene möglich. Es gibt zwar sehr wohl bestimmte Regionen des Gehirns, die bei Schädigungen zu Ausfällen in bestimmten Gedächtnisleistungen führen, allerdings gibt es keinen an sich abgrenzbaren Gedächtnisbereich im Gehirn (anders als zum Beispiel die Sehrinde, die Hörinde oder den motorischen Kortex). Vielmehr entsteht das Gedächtnis durch das Zusammenspiel und die Verschaltung unterschiedlicher Areale, die zusätzlich auch andere Aufgaben erfüllen (Squire und Kandel 2009).

## 1.1 Formen des Gedächtnisses

Will man das Gedächtnis nach zeitlichen und inhaltlichen Gesichtspunkten einteilen, unterscheidet man ein sensorisches Gedächtnis, ein Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis und ein Langzeitgedächtnis (Cowan 2008, Berlit 2011). Das Langzeitgedächtnis lässt sich inhaltlich in ein prozedurales und deklaratives Gedächtnis kategorisieren, wobei das deklarative Gedächtnis noch in ein episodisches und semantisches Gedächtnis unterteilt werden kann. Im sensorischen Gedächtnis werden Informationen nur für den Bruchteil von Sekunden gespeichert. Es gibt für jede Sinnesmodalität ein eigenes sensorisches Gedächtnis, also zum Beispiel ein auditives und ein visuelles Gedächtnis. Der Umfang der im sensorischen Gedächtnis abgespeicherten Informationen ist immens, jedoch erfolgt der Gedächtnisprozess unbewusst und die Informationen verschwinden innerhalb von Millisekunden wieder, wenn sie nicht in das Kurzzeitgedächtnis überführt werden. Das geschieht aber nur bei einem

kleinen Teil aller aufgenommenen Sinneseindrücke (Sperling 1960, Hunt 1971, Darwin, Turvey et al. 1972).

Das Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis ist der nächste Schritt auf dem Weg zur sicheren Speicherung von Informationen. Hierher gelangt nur ein Bruchteil der aufgenommenen Eindrücke aus dem sensorischen Gedächtnis, indem diese bewusst aufgerufen und verarbeitet werden. Die Speicherung der Informationen liegt im Bereich von Sekunden bis maximal einigen Minuten. Eine bekannte Hypothese zur Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses ist das  $7\pm 2$  Modell (Miller 1956), demzufolge diese fixe Anzahl an Informationsblöcken, sogenannte *Chunks*, abgespeichert werden können. Allerdings deuten neuere Untersuchungen darauf hin, dass die Gedächtnisspanne auch reizabhängig ist (Hulme, Roodenrys et al. 1997) und eher weniger *Chunks* umfasst (Cowan, Chen et al. 2004). Das Modell des Kurzzeitgedächtnisses wurde später um das Modell des Arbeitsgedächtnisses erweitert (Baddeley 1974). Susanne M. Jaeggi konnte zeigen, dass ein gezieltes Training des Arbeitsgedächtnisses möglich ist und eine Verbesserung der fluiden Intelligenz (Cattell 1963) bewirken kann (Jaeggi, Buschkuhl et al. 2008) – wobei darauf hingewiesen werden muss, dass diese Ergebnisse auch mehrfach widerlegt wurden (Sala und Gobet 2019).

Der Ort, an dem Informationen mittel- und langfristig abgespeichert werden, ist das Langzeitgedächtnis. Hier bleiben die Gedächtnisinhalte bei entsprechender Wiederholung und Nutzung Jahre bestehen, teilweise das ganze Leben lang. Das Langzeitgedächtnis lässt sich unterteilen in ein deklaratives (explizites) und ein prozedurales (implizites) Gedächtnis. Während das prozedurale Gedächtnis Inhalte wie motorisches Lernen und kognitive Fähigkeiten umfasst, beinhaltet das deklarative Gedächtnis Tatsachen, Fakten und Ereignisse. Das prozedurale Gedächtnis ist also ein *wissen, wie* (z.B. Fahrradfahren), das deklarative Gedächtnis ein *wissen, dass* (z.B. Deutschland Fußballweltmeister 2014 in Brasilien), welches explizit erklärt und wiedergegeben werden kann. Dabei unterscheidet man beim deklarativen noch das sogenannte semantische vom episodischen Gedächtnis. Das semantische Gedächtnis beinhaltet das sogenannte Weltwissen, Fakten und Tatsachen, die man im Laufe der Zeit, sei es z. B. von den Eltern oder in der Schule erlernt hat, und die keinen direkten Bezug zur eigenen Person haben (z.B. Sturm auf die Bastille 1789 und Beginn der französischen Revolution, Ermordung Cäsars an den Iden des März 44 v.Chr.). Das episodische Gedächtnis hingegen umfasst Erinnerungen, die man selbst erlebt hat und daher in einem genauen Bezug zu Ort und Zeit stehen (z.B. kann man sich an den Strand beim letzten Urlaub erinnern) (Tulving 1985).

## 1.2 Neuronale Grundlagen

Das Langzeitgedächtnis und der Vorgang des Lernens sind begründet in der neuronalen Plastizität des menschlichen Gehirnes. Diese Plastizität ist bedingt durch die ständige Neuausbildung und Änderung synaptischer Verbindungen zwischen den Nervenzellen (Hebb 1949, Engert und Bonhoeffer 1999). Auf diese Weise können neue Gedächtnisinhalte abgespeichert werden, es gehen aber teilweise auch ältere, weniger relevante Bausteine verloren. Je nachdem um welche Gedächtnisinhalte es sich handelt (also zum Beispiel prozedurale und deklarative), findet die Speicherung unter Beteiligung unterschiedlicher Areale des Gehirns statt – ohne sich aber auf diese zu beschränken. So wird dem präfrontalen Kortex eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit dem Arbeitsgedächtnis zugeschrieben, während das Langzeitgedächtnis durch das Zusammenwirken vieler kortikaler und subkortikaler Einheiten geformt wird (Squire, Genzel et al. 2015). Eine entscheidende Rolle in diesem Zusammenhang spielen insbesondere bei der Akquirierung und Speicherung bzw. Übertragung neuer Gedächtnisinhalte vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis das limbische System und hippocampale Strukturen (Eichenbaum 2001, Eichenbaum 2001, Eichenbaum 2004, Squire, Genzel et al. 2015). So findet man bei isolierten Verletzungen bzw. degenerativen Erkrankungen von hippocampalen Strukturen oftmals nur eine Amnesie zu näher zurückliegenden Ereignissen, sind jedoch auch neokortikale Strukturen betroffen, reicht die Amnesie oft Jahrzehnte zurück (Bayley, Hopkins et al. 2006, Bright, Buckman et al. 2006). Auf das prozedurale Gedächtnis haben Kleinhirn und Basalganglien als motorische Zentren neben dem Motorkortex den größten Einfluss (Carlson 2001, Eichenbaum 2001, King, Hoedlmoser et al. 2017).

Betrachtet man das Gedächtnis nicht mehr aus einer makro- oder mikroskopischen Perspektive, sondern begibt sich auf molekulare Ebene, findet sich als bedeutendes molekulares Korrelat zur Gedächtnisbildung die Langzeitpotenzierung (LTP) im Hippocampus (Eichenbaum 2004). Nach dieser Theorie wird die synaptische Verbindung zwischen zwei Nervenzellen verstärkt, wenn beide Zellen wiederholt gleichzeitig aktiv sind (Singer 2001, Eichenbaum 2004). Hierbei hat der N-Methyl-D-Aspartat-Rezeptor (NMDA-Rezeptor) eine bedeutende Funktion. Der mit ihm verbundene Ionenkanal weist eine hohe Durchlässigkeit für  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen auf, ist aber bei Hyperpolarisation durch ein  $\text{Mg}^{2+}$ -Ion verschlossen. Nur bei gleichzeitiger Aktivierung korrespondierender Nervenzellen und hochfrequenter Stimulation wird die Aktivierungsschwelle dieser  $\text{Ca}^{2+}$ -Kanäle überschritten,

was einen  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen Einstrom in die Nervenzelle bzw. ihre Dendriten und demzufolge eine erhöhte intrazelluläre Kalziumkonzentration zur Folge hat (Malenka und Bear 2004). Diese erhöhte intrazelluläre Kalziumkonzentration bedingt eine Aktivierung von Proteinkinasen und Phosphatasen, welche die Expression bestimmter Gene und Neusynthese von Proteinen zur Folge hat (Sejnowski und Destexhe 2000). Sind diese Voraussetzungen erfüllt, kommt es zu dauerhaften strukturellen und unter dem Elektronenmikroskop sichtbaren Veränderungen (Singer 2001). Die mit NMDA-Rezeptoren besetzten Neurone werden auch über das *Aufsteigende Retikuläre Aktivierende System (ARAS)* gesteuert. Durch verschiedene Botenstoffe (Noradrenalin, Acetylcholin, Serotonin und Dopamin) kommt es zu einer Sensibilisierung oder Desensibilisierung der Rezeptoren, sodass diese mehr oder weniger empfindlich reagieren (Berlit 2011). Aufmerksamkeit spielt also eine wichtige Rolle bei Lernvorgängen – was auch jeder einzelne schon selbst erfahren haben dürfte.

Neben der Langzeitpotenzierung spielen noch weitere molekulare Vorgänge eine Rolle, die je nach Gedächtnisform bzw. Lokalisation im Gehirn unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Man unterscheidet zusätzlich zur Langzeitpotenzierung auch eine Langzeitdepression (zu der es bei einer nur schwachen Aktivierung der NMDA-Rezeptoren und damit schwacher Depolarisation kommt; der Langzeitdepression wird die Löschung von nur schwachen neuronalen Verbindungen ohne größere Relevanz nachgesagt), eine präsynaptische Verstärkung, eine posttetanische Potenzierung und noch einige weitere Mechanismen (Abraham und Bear 1996, Zhang und Linden 2003, Malenka und Bear 2004, Turrigiano und Nelson 2004).

### **1.3 Geschlechts- und Menstruationseffekte auf das Gedächtnis**

Die in der Allgemeinbevölkerung oftmals wahrgenommenen Unterschiede zwischen Männern und Frauen bzgl. ihrer kognitiven Fähigkeiten existieren tatsächlich und konnten wissenschaftlich belegt werden. Auch die landläufig vorherrschende Meinung zur Verteilung der entsprechenden Fähigkeiten stimmt überraschend genau mit den wissenschaftlichen Untersuchungen überein. Obwohl es natürlich interindividuell sehr unterschiedliche Ausprägungen der einzelnen kognitiven Fähigkeiten gibt und daher auch kein schwarz-weiß Bild gezeichnet werden kann, zeigt sich im Mittel eine signifikante Verteilung nach folgendem Muster: Aufgaben, die eine gewisse Geschicklichkeit und Feinmotorik erfordern, werden ebenso von Frauen besser gelöst wie Aufgaben, die die allgemeine Sinneswahrnehmung und verbale Fähigkeiten untersuchen. Demgegenüber schneiden Männer

im Mittel besser ab, wenn es um räumliches Vorstellungsvermögen sowie mathematische und naturwissenschaftliche Problemstellungen geht. (Postma, Winkel et al. 1999, Duff und Hampson 2001, Lewin, Wolgers et al. 2001, Weiss, Kemmler et al. 2003, Farage, Osborn et al. 2008).

Insgesamt ist bei Frauen auch von einer Abhängigkeit der kognitiven Leistungsfähigkeit vom weiblichen Zyklus auszugehen. Insbesondere klassisch „weibliche“ Aufgaben (s. oben) werden besser mit den hohen Spiegeln weiblicher Geschlechtshormone um den Eisprung herum bewältigt, während Frauen in den „männlichen“ Aufgaben (s. oben) insgesamt bessere Leistungen zu Zeiten der Menstruation erbringen (Genzel 2011, Hampson und Kimura 1988, Hampson 1990, Farage, Osborn et al. 2008).

Um die Geschlechts- und Hormoneinflüsse auf das Gedächtnis bzw. den Einfluss auf Studienergebnisse zu minimieren (solange natürlich nicht genau das Gegenstand der Forschung ist), scheint es also sinnvoll ein geschlechtergleiches Probandenkollektiv zu untersuchen.

## **2 Gedächtnissport und Mnemotechniken**

Seit 1991 finden jedes Jahr die Gedächtnisweltmeisterschaften statt. Ausgetragen und organisiert werden sie vom internationalen Gedächtnissportverband, dem *World Memory Sports Council*. Während sich anfangs die Teilnehmerzahlen im Rahmen von einigen wenigen bewegten, nehmen mittlerweile regelmäßig mehr als 100 Gedächtnissportler teil. Die zunehmende Popularität, insbesondere in Asien, führt zu einer Flut an Rekorden und neuen Bestleistungen, die für den Nicht-Gedächtnissportler unerreichbar scheinen. Und doch verstecken sich hinter diesen Gedächtnisleistungen in erster Linie Gehirne, die sich von denen anderer Menschen gar nicht so viel unterscheiden. So konnte eine Studie mit einer kleinen Stichprobe keine allgemeinen Intelligenzunterschiede und in anatomischen MRT-Untersuchungen keinen strukturellen Unterschied zwischen den Gehirnen von Gedächtnissportlern und Durchschnittsmenschen finden (Maguire, Valentine et al. 2003). Auch ist die außergewöhnliche Gedächtnisleistung oft auf ein bestimmtes Gebiet beschränkt (Anders Ericsson 2003, Takahashi, Shimizu et al. 2006). Was sich allerdings in funktionstomographischen Untersuchungen sehr wohl zeigte, waren Unterschiede in der Aktivierung bzw. Nutzung bestimmter Areale des Gehirns. So zeigten Gedächtnissportler im Vergleich zu Nicht-Gedächtnissportlern signifikante Unterschiede in der Aktivierung zum

Beispiel des rechten posterioren Hippocampus und anderer Regionen, die insbesondere dem räumlichen Lernen und Denken dienen (Maguire, Valentine et al. 2003). Die außergewöhnlichen Gedächtnisleistungen scheinen also wirklich auf die Anwendung und die jahrelange Übung bestimmter Gedächtnistechniken zurückzuführen zu sein.

Es gibt eine ganze Reihe von verschiedenen Techniken, die man nutzen kann, um sich Wörter, Zahlen, ja ganze Geschichten und Texte, besser zu merken. Auf einige dieser Techniken soll im Folgenden etwas genauer eingegangen und ihre Funktionsweise bzw. Einsatzmöglichkeiten, Vor- und Nachteile erläutert werden. Bei diesen Techniken handelt es sich zum einen um das Peg-Word System, die Link-Methode und, etwas ausführlicher, weil für diese Arbeit am relevantesten und auch insgesamt am häufigsten genutzt, die Loci-Methode.

Allen diesen Strategien liegen dieselben psychologischen Prozesse zugrunde: Ordnung bzw. Organisation, Ausarbeitung bzw. Ausschmückung und das Bilden von gedanklichen Bildern bzw. Metaphern (Worthen 2008).

Unter Ordnung bzw. Organisation versteht man, dass durch die Mnemotechnik der Inhalt, der memoriert und anschließend erinnert werden soll, in eine feste Ordnung bzw. Reihenfolge gebracht wird. Informationen, die geordnet sind, prägt sich unser Gehirn deutlich besser ein als Informationen, die auf es ohne Ordnung völlig willkürlich einwirken (Jenkins und Russell 1952, Bower, Clark et al. 1969). Ebenso ist es weitgehend akzeptiert, dass sowohl episodische als auch semantische Erinnerungen im Langzeitgedächtnis geordnet abgespeichert werden (Smith, Shoben et al. 1974, Anderson 1983, Tulving 1983). Unser Gehirn versucht generell, Daten und Informationen zu ordnen, auch wenn sie an sich keinen Zusammenhang aufweisen (Bousefield 1953, Tulving 1962). Indem nun Mnemotechniken die Organisation übernehmen, die unser Gehirn sowieso anstrebt, ersparen sie unserem Geist eine Menge Arbeit und erhöhen die Chance, dass die relevanten Informationen im Langzeitgedächtnis gespeichert werden. Zusätzlich gibt es Hinweise darauf, dass diese Art der Organisation auch zu einer verbesserten Wiedergabe der Informationen führt (Baddeley 1990).

Der zweite Gesichtspunkt, den die allermeisten Mnemotechniken aufweisen, ist die sogenannte Ausarbeitung bzw. Ausschmückung. Dabei wird der eigentlich zu memorierende Sachverhalt, wie der Name sagt, mit zusätzlichen Informationen ausgeschmückt (Baddeley 1990, Anderson 1995). Die Ausschmückung kann sinnvoll aber auch völlig abstrus sein. Sowohl eine sinnvolle Ausschmückung ( Craik und Tulving 1975, Rogers, Kuiper et al. 1977) als auch eine total unsinnige Ausarbeitung verbessern das Gedächtnis; die abstruse eventuell sogar mehr (Slamecka und Graf 1978, Pressley, McDaniel et al. 1987). Es scheint also

weniger auf den Inhalt der Ausschmückung anzukommen, als vielmehr auf die Ausschmückung und Ausarbeitung als solche (Craik und Tulving 1975). Die Mnemotechnik scheint durch die Ausschmückung der Information dazu beizutragen, dass sie unverwechselbar wird und unter den vielen anderen, irrelevanten Informationen hervorsticht und somit leichter wiederzufinden und wiederzugeben ist (Worthen 2008).

Einige der potentesten Mnemotechniken nutzen als eine Form der Ausschmückung gedankliche Bilder. Unter gedanklichen Bildern sind nicht generell nur visuelle Bilder zu verstehen (Kosslyn, Seger et al. 1990), auch wenn es sich bei Mnemotechniken typischerweise in erster Linie darum handelt (Worthen 2008). Aber auch alle anderen Sinneseindrücke können und sollen in das geistige Bild mit einfließen, da auf diese Weise sehr starke, lebhaft und damit einzigartige Bilder entstehen – und in diesem Sinne das Einprägen und später die Wiedergabe der relevanten Information erleichtern (Wollen, Weber et al. 1972, Yesavage, Rose et al. 1983). Auch hier gilt, dass es durchaus sinnvoll sein kann, möglichst bizarre, unsinnige und abstruse Bilder vor dem eigenen geistigen Auge zu kreieren, da dadurch ein hoher Wiedererkennungswert geschaffen wird und sich das Gehirn leichter tut, sich an die Bilder und die darin verschlüsselten Informationen zu erinnern (McDaniel und Einstein 1986, Worthen und Marshall 1996).

Aus der Zusammenschau des oben Genannten lässt sich also erkennen, dass Organisation, Ausschmückung und geistige Bilder nicht nur dazu beitragen, Informationen einfacher und sicherer im Gedächtnis abzuspeichern, sondern auch dazu, diese Informationen wieder leichter aus den Tiefen unseres Gehirnes hervorzuholen.

### *Die Link-Methode*

Die Link-Methode ist eine der einfachsten und am weitesten verbreiteten Mnemotechniken. Viele Leute nutzen sie in irgendeiner Form ohne je von ihr gehört zu haben. Sie lässt sich in verschiedene Untergruppen gliedern, je nachdem, wie die zu erinnernde Information „verlinkt“ wird. Das kann zum Beispiel durch das Erstellen eines Akronyms aus den Anfangsbuchstaben der relevanten Informationen geschehen oder, etwas aufwendiger aber auch effektiver, indem die Informationen untereinander zu einer Geschichte verknüpft werden (Worthen 2008). Insbesondere der Gebrauch von Akronymen dürfte vor allem unter Schülern und Studenten weit verbreitet sein. Allerdings lässt sich festhalten, dass diese Methode nur sehr bedingt (Nelson und Archer 1972, Stalder 2005) bzw. überhaupt nicht nützlich ist (Waite, Blick et al. 1971, Kibler und Blick 1972, Carlson, Zimmer et al. 1981).

Eine bessere und potentere Form der Link-Methode ist daher, die verschiedenen zu erlernenden Punkte zu einer Geschichte zu verknüpfen. Zusätzlich zur reinen Organisation, die auch durch das Erstellen eines Akronyms stattfindet, werden die Informationen innerhalb einer Geschichte zusätzlich ausgeschmückt. Es findet also zusätzlich zum Prozess der Ordnung bzw. Organisation der Informationen auch der Prozess der Ausarbeitung statt, was, wie oben erwähnt, zu einer deutlich besseren Einprägsamkeit und Wiedergabe führt. Die Nutzung der Link-Methode in der Geschichtenform zeigte in mehreren Untersuchungen Effekte sowohl bei jungen, gesunden Erwachsenen als auch bei älteren Leuten und Personen mit leichten kognitiven Einschränkungen (Glidden, Bilsky et al. 1983, Hill, Allen et al. 1991, Drevenstedt und Bellezza 1993). Ein Nachteil der Link-Methode ist jedoch durch die relativ freie Verknüpfung der einzelnen Informationen zu einer Geschichte bedingt. Sollte man aus irgendeinem Grund den Faden innerhalb der Geschichte verlieren, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass man sich an alle oder zumindest sehr viele Informationen nicht mehr erinnern kann, die nach diesem Bruch folgen. Oftmals geht auch nur ein Teil der Geschichte mit den entsprechend verknüpften Informationen verloren ohne dass man überhaupt bemerkt, dass man diesen Teil vergessen hat.

### *Das Peg-Word-System*

Das Peg-Word-System, im Deutschen auch als Zahl-Form-System bezeichnet, ist eine weitere, relativ effektive Mnemotechnik. Um das Peg-Word-System anwenden zu können, müssen eine Reihe von Wörtern (in der Regel zehn) erlernt werden. Diese Wörter haben entweder einen engen bildlichen oder klanglichen Bezug zu den Ziffern von null bis neun (teilweise auch zu den Zahlen eins bis zehn). So könnte man sich zum Beispiel die Drei als Dreizack merken oder die Zwei als Schwan (aufgrund der Ähnlichkeit der Form). Welche Wörter man im Einzelnen für welche Zahl hernimmt, spielt eine untergeordnete Rolle, wichtig ist nur, dass man jede Ziffer immer mit demselben Symbol verknüpft und dass man die Verknüpfungen hundertprozentig beherrscht. Diese Symbole oder Wörter bilden dann das Gerüst des Peg-Word-Systems. Um sich nun die eigentlich zu memorierenden Informationen einzuprägen, werden selbige in Form von mentalen Bildern mit den Peg-Words verknüpft. So entstehen zwischen jeder Information und jedem Peg-Word eine Bindung und ein gemeinsames Bild. Durch diese Verknüpfung gelingt es auch eine feste Reihenfolge in die Wiedergabe der einzelnen Punkte zu bekommen, da ja jedes Peg-Word gleichzeitig auch für eine bestimmte Ziffer steht. Hat man zum Beispiel auf einer „to do Liste“ als dritten Punkt stehen, dass man noch Brot einkaufen gehen muss, dann kann man sich möglicherweise als

mentales Bild einen Dreizack vorstellen, der einen Laib Brot aufspießt und man wird wissen, dass das der dritte Punkt auf der „to do Liste“ war. Die Peg-Word-Methode verknüpft also wieder die drei Grundeigenschaften, die eine gute Mnemotechnik aufweisen sollte: Organisation, Ausschmückung und mentale Bilder. Und obwohl es vielleicht im ersten Moment widersinnig und kontraproduktiv klingt, dass man zuerst eine Anzahl von Wörtern lernen soll, um diese dann mit anderen Wörtern zu verknüpfen, hat sich das Peg-Word-System in der Vergangenheit doch als durchaus nützlich und vorteilhaft erwiesen (Johnson 1970, Elliott und Gentile 1986, Veit, Scruggs et al. 1986, Wood 1987, Krinsky und Krinsky 1996, Wang und Thomas 2000).

### *Die Loci-Methode*

Die Loci-Methode oder auch Routen-Methode ist wahrscheinlich die älteste noch verwendete Gedächtnismethode. Ihr Name geht zurück auf das lateinische Wort *locus*, was so viel wie Ort, Platz oder Stelle bedeutet. Sie existiert bereits seit der Antike und diente großen Rednern wie Cicero bei der Vorbereitung und Einprägung seiner Reden. In seinem Werk *De oratore* nennt Cicero den griechischen Dichter Simonides von Ceos (ca. 556 – 468 v. Chr.) als Begründer dieser bis heute genutzten Merktechnik und liefert gleich eine passende Anekdote dazu (Yates 1966): Simonides bekam den Auftrag, bei einem Fest eine Lobrede auf den Gastgeber zu halten. In diese Lobrede webte er auch immer wieder Huldigungen für die Götterzwillinge Castor und Pollux mit ein. Das jedoch missfiel dem Gastgeber und er zahlte Simonides nur die Hälfte des vereinbarten Lohnes mit dem spöttischen Hinweis, er könne sich die andere Hälfte ja bei seinen geliebten Göttern holen. Kurz darauf wurde Simonides vor die Tür gerufen, da angeblich zwei Männer auf ihn warteten. Als er das Haus verlassen hatte, fand er keine Männer vor, allerdings stürzte das Haus hinter ihm in sich zusammen und begrub alle Anwesenden unter sich. Die Leichen waren derart verstümmelt, dass nicht einmal ihre Angehörigen sie identifizieren konnten. Simonides allerdings hatte sich mit seinem hervorragenden Gedächtnis die Sitzordnung des Saales gemerkt und konnte sich so genau daran erinnern, wo welche Person gesessen hatte. Dies brachte ihn auf den Gedanken, zu lernende Informationen in einer vertrauten Umgebung in einer bestimmten Reihenfolge festzuhalten und diese bildliche Vorstellung als Gedächtnishilfe zu benutzen. Die Loci-Methode war geboren.

Die Routen-Methode funktioniert, wie der Name schon suggeriert, durch die Erstellung von Routen. Diese Routen enthalten viele einzelne Routenpunkte, welche sozusagen die Ankerpunkte für die eigentlich zu memorierenden Informationen bilden. Das Ganze

funktioniert nun folgendermaßen: man nimmt sich eine reale und vertraute Umgebung vor, zum Beispiel die eigene Wohnung. Und in dieser Wohnung wählt man einzelne, am besten markante, fixe, in einer logischen Reihenfolge und ähnlichem Abstand liegende Punkte aus, die sich zu einer Route zusammenfügen lassen. Zum Beispiel könnte der erste Punkt auf der Route die Wohnungstüre sein. Nach dem Betreten der Wohnung legt man in der Regel seine Jacke und Schuhe ab, der zweite Punkt wäre also die Garderobe im Flur. Von dort aus könnte man, nur als Beispiel, das Bad aufsuchen, weil man auf die Toilette muss. Dann wäre die Toilette folglich der dritte und da man sich danach die Hände wäscht, das Waschbecken der vierte Punkt auf der Route. Auf diese Weise lassen sich einzelne Orte einer vertrauten Umgebung ohne großen geistigen Aufwand zu einer zusammenhängenden Route formen. Die Auswahl der Punkte erfolgt nach mehreren Gesichtspunkten. Zum einen sollten sie, wie erwähnt, einer örtlichen, logischen und immer gleichen Ordnung folgen, zum anderen sollten sie sich aber auch deutlich unterscheiden und gleichzeitig eine ähnliche reale Größe haben. Zum Beispiel dürfte es deutlich schwieriger sein, die Route erfolgreich zu nutzen, wenn auf ein und derselben Route plötzlich vier Stühle zu finden sind oder einige Routenpunkte Fernseher, Türe, Heizung oder ähnliches heißen, daneben aber auch Routenpunkte wie Zahnpasta, Pinzette, Marmor oder Büroklammer zu finden sind. Es gilt, eine möglichst konstante und logische Route zu finden, die sich so einfach wie möglich einprägen lässt und fest im Gedächtnis verankert ist. Denn das ist Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der Loci-Methode: die Route bzw. verschiedenen Routen müssen schnell und zuverlässig abrufbar sein. Die Anzahl der Punkte auf ein und derselben Route bleibt jedem selbst überlassen. Es besteht die Möglichkeit kurze Routen mit vielleicht nur zehn Items zu bilden, genauso wie es möglich ist 100 Punkte auf eine einzige Route zu legen.

Hat man sich nun eine Route wirklich sehr gut eingepägt, beginnt erst der eigentliche Teil des Memorierens der relevanten und zu erlernenden Informationen: das Verknüpfen dieser Informationen mit den einzelnen Routenpunkten. Diese Verknüpfung erfolgt wieder durch mentale Bilder und Ausschmückung der selbigen, sodass einzigartige und interessante Bilder entstehen, die sich unser Gehirn gut merken und die es auch gut wiedergeben kann.

Betrachtet man das eben Erwähnte, wird deutlich, dass die Loci-Methode eine relativ aufwendige Mnemotechnik ist. Es gilt sich zuerst eine Route zu überlegen, diese dann zu lernen und beherrschen um sich schließlich in einem letzten Schritt erst die eigentlich wichtigen Information einzuprägen. Jedoch umfasst die Loci-Methode nicht nur ein hohes Maß an Organisation (es gibt eine feste Abfolge der Routenpunkte und selbst wenn ein Routenpunkt mit zugehöriger Information vergessen wird, ist es kein Problem, einfach zum

nächsten weiterzugehen und die Reihenfolge einzuhalten), auch die Nutzung von mentalen Bildern und die Ausschmückung der zu erlernenden Information macht die Loci-Methode zu einer der effektivsten Mnemotechniken überhaupt (Roediger 1980). Sie verbessert nicht nur die zeitnahe Wiedergabe der erlernten Information sondern auch die Wiedergabe nach dem Verstreichen einer gewissen Zeit (Wang und Thomas 2000). Außerdem kann ein und dieselbe Route mehrfach benutzt werden (De Beni und Cornoldi 1988, Massen und Vaterrodt-Plünnecke 2006). Aufgrund der Komplexität der Loci-Methode wird allerdings ein Einsatz bei lernbehinderten Menschen und Hirnverletzungen im Allgemeinen als eher ungeeignet erachtet (Mckinlay 1992, Richardson 1995).

### **3 Magnetresonanztomographie in der Neurowissenschaft**

Die Magnetresonanztomographie trägt einen bedeutenden Teil zur Erforschung des menschlichen Gehirnes und des faszinierenden Mysteriums *Gedächtnis* bei und sollte deshalb an dieser Stelle kurz erwähnt werden – nicht zuletzt, weil sie auch in dieser Studie ihre Anwendung fand.

Seit Paul C. Lauterbur Anfang der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts die Magnetresonanztomographie als bildgebendes Verfahren erfand (Lauterbur 1973), aufbauend auf den Entdeckungen von Erik Odeblad (Odeblad und Lindstrom 1955), hat sie sich als weltweit anerkanntes Tool in der Forschung und Diagnostik innerhalb der modernen Medizin etabliert. Ihr Einsatzgebiet wurde immer breiter, ihre Auflösung und Detailtreue immer besser und ihre Anwendung erfolgte in immer neuen Varianten. Eine vor allem in der Neurowissenschaft häufig genutzte Form ist die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT). Sie ermöglicht die hochauflösende Darstellung von Durchblutungsänderungen des Gehirnes anhand des Oxygenierungsgrades des Blutes, der auf Stoffwechselprozesse begründet ist und damit wiederum Hinweise auf die neuronale Aktivität gibt (Thulborn, Waterton et al. 1982, Belliveau, Kennedy et al. 1991, Ogawa, Menon et al. 1993). Eine weitere Form der Magnetresonanztomographie, die genauere Einblicke in das menschliche Gehirn, (insbesondere die weiße Substanz) gibt, ist die Diffusions-Tensor-Bildgebung (DTI = Diffusion-Tensor-Imaging).

Sowohl bei Untersuchungen zu morphologischen und strukturellen Besonderheiten als auch zu funktionellen Unterschieden in Gehirnen fanden und finden die verschiedenen Formen der Magnetresonanztomographie im Rahmen von Kognitionsstudien Anwendung. So konnte zum Beispiel in strukturellen Untersuchungen bei Londoner Taxifahrern (einer Berufsgruppe, die in hohem Maße ihre Orientierungsfähigkeit und ihr räumliches Vorstellungsvermögen beansprucht) ein zu Nicht-Taxifahrern signifikant vergrößerter posteriorer und signifikant kleinerer anteriorer Hippocampus gefunden werden. Diese Größenunterschiede korrelierten zusätzlich zu der Zeit, für die die Personen bereits als Taxifahrer tätig waren (Maguire, Gadian et al. 2000).

## **B Fragestellung**

Dass man eine Fähigkeit verbessern kann, die man häufig trainiert, scheint einen logischen Zusammenhang darzustellen. Es sollte sich also bei regelmäßigem Training auch eine Verbesserung der deklarativen Gedächtnisleistung erbringen lassen. Tatsächlich gibt es deutliche Hinweise, dass dem so ist (Bower 1970, Bellezza 1981, Ball, Berch et al. 2002, Brahler und Walker 2008) Allerdings stellt sich zusätzlich die Frage, ob die Verbesserung der Gedächtnisleistung auf das jeweilige Anwendungsgebiet beschränkt bleibt, oder ob es darüber hinaus positive Effekte auch auf andere Aspekte des Gedächtnisses, insbesondere Arbeitsgedächtnis und fluide Intelligenz, gibt. Dazu finden sich widersprüchliche Ergebnisse (Barnett und Ceci 2002, Zelinski 2009), wobei die Mehrheit der Untersuchungen eher darauf hindeutet, dass das nicht der Fall ist (Ball, Berch et al. 2002, Hertzog, Kramer et al. 2008, Lövdén, Bäckman et al. 2010, Dunlosky, Bailey et al. 2011). Außerdem wird diskutiert, ob Gedächtnistraining entsprechende funktionelle (Bor, Duncan et al. 2003, Kondo, Suzuki et al. 2005) und morphologische Änderungen des Gehirns schafft. Hierbei gibt es neben den Hinweisen auf Volumenänderungen der grauen Substanz (Draganski, Gaser et al. 2004, Engvig, Fjell et al. 2010) erste Vermutungen, dass es auch zu Zuwächsen der weißen Substanz kommt (Scholz, Klein et al. 2009).

Die vorliegende Arbeit untersucht mit Hilfe unterschiedlicher kognitiver Tests die Auswirkung von Mnemotechniken auf das Erlernen und die Wiedergabe deklarativer Gedächtnisinhalte. Zusätzlich wird untersucht, ob neben durch gezieltes Training hervorgerufene Auswirkungen auf das deklarative Gedächtnis auch Änderungen anderer kognitiver Funktionen erzielt werden. Des Weiteren soll erforscht werden, ob ein so kurzer Zeitraum wie sechs Wochen mäßig intensiven Gedächtnistrainings ausreichend ist, strukturelle und funktionelle Veränderungen des Gehirns hervorzurufen.

Zu diesem Zweck wird die Loci-Methode als Mnemotechnik genutzt und ihr Einsatz beim Erlernen und der Wiedergabe von deklarativen Gedächtnisinhalten untersucht. Es wird eruiert, inwieweit sich bei Probanden, welche die Loci-Methode erlernen und ihren Gebrauch über sechs Wochen hinweg üben, Verbesserungen einstellen im Vergleich zu Probanden, die das nicht tun. Man erwartet, dass die Probanden mit Nutzung der Loci-Methode eine deutliche Leistungssteigerung erfahren und im Gegensatz zu den Kontrollen besser

abschneiden, eventuell auch in Aufgaben, die keinen direkten Bezug zum Training haben. Ebenso ist eine in der Bildgebung sichtbare Veränderung möglich.

Genaue Fragestellung:

- Wird deklaratives Lernen im Sinne von verbalem visuellen Gedächtnis und verbalem auditiven Gedächtnis durch den Einsatz von Mnemotechniken, in diesem Fall der Loci-Methode, signifikant verbessert?
- Finden sich durch den Einsatz der Loci-Methode signifikante Verbesserungen nicht nur des deklarativen Gedächtnisses sondern auch der fluiden Intelligenz, der mentalen Geschwindigkeit, der Kreativität und des Arbeitsgedächtnisses, gemessen durch den Bochumer Matrizentest, den Zahlenverbindungstest, den Alternative-Uses Test, den Backward Digit-span und den dual n-back Test?
- Wird durch ein sechswöchiges Training in der Nutzung der Loci-Methode eine im MRT sichtbare Änderung der neuronalen Strukturen, die für das Memorieren und Wiedergeben von deklarativen Gedächtnisinhalten genutzt werden, erreicht?

## C Material und Methoden

### 1 Studiendesign

Die Studie setzte sich aus zwei Blöcken zusammen und wurde gemeinschaftlich von Frau Dr. Weisig, die zu neurokognitiven Effekten von Arbeitsgedächtnistraining eine separate Dissertation verfasste, und dem Autor der vorliegenden Studie am Max–Planck–Institut für Psychiatrie, München, durchgeführt. Die Dissertation von Frau Sarah Weisig wurde bereits von der Medizinischen Fakultät der Universität München angenommen (Weisig 2017).

Einerseits gab es eine Vortestung aller Interessenten, die darüber entschied, ob der jeweilige Proband für die Teilnahme an der eigentlichen Studie geeignet war oder nicht. Erwies sich der Proband als geeignet, konnte er an der Studie an sich teilnehmen. Der eigentliche Studienteil setzte sich aus einer ersten und zweiten Haupttestung im Abstand von etwa sechs bis sieben Wochen und einem Nachtest etwa vier Monate nach der zweiten Testung zusammen. Dieser grundlegende Ablauf war für alle Teilnehmer derselbe. Allerdings wurden die Probanden nach absolviertem erstem Test noch gleichmäßig auf drei Gruppen aufgeteilt, die eigentliche Studiengruppe, eine aktive Kontrollgruppe und eine passive Kontrollgruppe. Während die Probanden der passiven Kontrollgruppe zwischen den beiden Haupttestungen keiner weiteren Intervention unterzogen wurden, mussten die Probanden der beiden anderen Gruppen über sechs Wochen hinweg ein pro Tag halbstündiges Training (40 x 30 min) absolvieren. Nach Abschluss der zweiten Testung waren alle Teilnehmer bis zum Nachtest von allen Aufgaben entbunden.

*Studiengruppe (im Weiteren auch Loci-Gruppe oder Trainingsgruppe):*

Die der Studiengruppe zugeteilten Probanden erhielten nach der ersten Testung eine Einführung in die Loci-Methode (Yates 1966), hatten anschließend 40 Tage lang zu trainieren, um sich im Anschluss einer zweiten, vom Ablauf zur ersten identischen Testung zu unterziehen. Etwa vier Monate später fand ein Nachtest statt.

*Aktive Kontrollgruppe:*

Die der aktiven Kontrollgruppe zugeteilten Probanden hatten nach der ersten Testung 40 Tage lang einen dual n-back Task (Jaeggi, Seewer et al. 2003) zu trainieren, woran sich ebenfalls die zweite Testung und etwa vier Monate später der Nachtest anschlossen. Die Ergebnisse der aktiven Kontrollgruppe bzw. die Auswirkungen dieses Arbeitsgedächtnistrainings wurden in der oben genannten Dissertation genauer untersucht (Weisig 2017).

*Passive Kontrollgruppe:*

Die der passiven Kontrollgruppe zugeteilten Probanden mussten sich lediglich der ersten Testung, etwa sechs Wochen später der zweiten Testung und nach weiteren vier Monaten dem Nachtest unterziehen. Für sie entfiel der Trainingsteil.

**1.1 Versuchsablauf**

Alle Interessenten wurden in Kleingruppen bis zu vier Personen zur Vortestung eingeladen. Die Vortestung erstreckte sich in etwa über zwei Stunden und bestand aus einer ganzen Reihe von Fragebögen und Intelligenztests. Zuerst erhielten alle Teilnehmer einen Aufklärungsbogen zur MRT–Untersuchung, im Rahmen dessen sie in die Untersuchung und die Weitergabe von möglichen pathologischen Zufallsbefunden an den jeweiligen Hausarzt einwilligen mussten. Daran schloss sich der Vividness of Visual Imagery Questionnaire (Marks 1973) an, worauf einige Fragen zur Selbsteinschätzung der eigenen intellektuellen Leistungsfähigkeit folgten. Anschließend hatten die Probanden den Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest (Lehrl 1999), das State Trait Angst Inventar (Laux 1981), das Beck–Depressions–Inventar (Beck At 1961) und das Edinburgh Händigkeits Inventar (Oldfield 1971) zu bearbeiten. Es folgten der Need for Cognition Fragebogen (Cacioppo und Petty 1982), der Achievement Goal Questionnaire (Elliot und Murayama 2008) und die Santa Barbara Scale Sense of Direction Skala (Hegarty, Richardson et al. 2002). Im Anschluss an diese Fragebögen hatten die Probanden fünf Minuten Zeit sich eine möglichst große Zahl an Ziffern in der richtigen Reihenfolge zu merken, um sie anschließend im selben Zeitraum wiederzugeben. Hierauf folgte der erste Teil des Grundintelligenztests CFT 20 (Weiß 1978) und den Abschluss bildete der Lern-Gedächtnis-Test, Form A (Bäumler 1974).

Wurde in der Vortestung eine Eignung des Probanden für die Studie festgestellt, wurde er in der Folge zur ersten Haupttestung eingeladen. Sowohl die erste als auch die zweite Haupttestung, bestehend aus einer etwa ein– bis eineinhalbstündigen MRT-Untersuchung und

einer sich anschließenden circa zweistündigen Testbatterie außerhalb des Tomographen, erfolgten immer nachmittags oder am frühen Abend. Der Termin der ersten Testung begann mit einem Aufklärungsgespräch über die anstehende MRT–Untersuchung, der Erklärung über den Ablauf der Aufgaben und der Unterzeichnung des Studienteilnahmevertrags durch den Probanden. Noch vor Beginn der MRT–Untersuchung hatte der Proband auf einer visuellen Analogskala anzugeben, wie er seine Testleistungen im Vergleich zu anderen Personen einschätzte.

Die Untersuchung im MRT–Scanner bestand aus zwei Blöcken mit anatomischen Aufnahmen, zwei Blöcken mit Resting State fMRT–Aufnahmen (Biswal 2012) und einem dazwischen liegenden Block von Aufnahmen, währenddessen der Proband eine Lern– und Wiedergabeaufgabe zu erbringen hatte (siehe Absatz 4.1).

Direkt nach der Untersuchung im Tomographen musste der Teilnehmer angeben, ob er während der beiden Resting State Scans wach gewesen war und ob er in den Pausen der Lernaufgabe die Augen offen gehalten hatte. Danach sollte er möglichst viele der im MRT gelernten Wörter schriftlich wiedergeben. Anschließend folgten die Kurzversion des Bochumer Matrizentest (Hossiep, Turck et al. 2001), der Zahlenverbindungstest (Oswald und Roth 1987), der Backward Digit Span Task (Blankenship 1938) und der Alternative Uses Task (Guilford 1967). Diesen Aufgaben schloss sich der dual n-back Task (Jaeggi, Seewer et al. 2003) an. Als nächstes wurden dem Probanden akustisch 75 Wörter präsentiert, die er sich einzuprägen und anschließend wiederzugeben hatte, zunächst aktiv, indem er sie auf ein leeres Blatt Papier niederschrieb und anschließend passiv, indem ihm eine Liste von Wörtern vorgelegt wurde, die zusätzlich zu einem Teil der eben gehörten Wörter auch neue, nicht vorgekommene Wörter enthielt. Aus dieser gemischten Liste galt es die Wörter jeweils richtig in „gehört“ bzw. „nicht gehört“ zuzuordnen. Zu guter Letzt folgten noch der Psychomotorische Vigilanztest PVT (Wilkinson und Houghton 1982), erneut eine visuelle Analogskala, auf der die Probanden ihre Testleistungen einschätzen sollten, und die Frage, welche Strategien benutzt wurden, um sich sowohl die im MRT als auch die akustisch präsentierten Wörter und die Ziffern beim Backward Span einzuprägen. Die eingepprägten Wörter wurden einen Tag nach dem Test noch einmal telefonisch abgefragt.

Da die zweite Haupttestung vom Ablauf der Tests mit der ersten identisch war, war es nötig, für alle Tests bis auf den dual n-back Task und den Psychomotorischen Vigilanztest zwei unterschiedliche Versionen bereitzustellen. Dementsprechend erhielten alle Probanden, die bei der ersten Testung Version A bearbeiteten, bei der zweiten Testung Version B vorgelegt

und umgekehrt. Welcher Proband bei welchem Test welche Version erhielt, wurde zufällig entschieden.

Zwischen den beiden Haupttestungen fand das 40-tägige Training der Studiengruppe und der aktiven Kontrollgruppe statt. Die Probanden der Studiengruppe erhielten dafür eine etwa dreistündige Einführung in die Welt der Gedächtnistechniken, insbesondere die Loci-Methode wurde ihnen vermittelt. Diese Methode hatten sie im Anschluss für 40 Tage jeden Tag eine halbe Stunde zu trainieren. Die aktive Kontrollgruppe übte ebenfalls für 40 Tage eine halbe Stunde pro Tag den dual n-back Task. Für die passive Kontrollgruppe entfiel das Training.

Alle Gruppen hatten etwa vier Monate nach dem zweiten Haupttest noch einen Nachtest zu absolvieren. Dazu mussten sich die Probanden erneut eine gewisse Anzahl an Wörtern einprägen und den BOMAT bearbeiten. Sowohl die Wörter als auch die zu bearbeitende Version des BOMAT hatten sie bei der ersten Testung, mittlerweile mehr als sechs Monate zurückliegend, schon einmal gesehen.

## **1.2 Diskussion des Studiendesigns**

Die Studie bestand aus einer Studiengruppe, die durch das 40-tägige Training mit der Loci-Methode dezidiert ihr deklaratives Gedächtnis trainierte und zwei Kontrollgruppen, wovon die aktive Kontrolle über den gleichen Zeitraum durch den dual n-back Task ihr Arbeitsgedächtnis trainierte, dem deklarativen Gedächtnis aber keine gesonderte Aufmerksamkeit schenkte. Auf diese Weise konnte bei der zweiten Testung überprüft werden, inwieweit und in welchem Maße eine Leistungsänderung im Bereich des deklarativen Gedächtnisses wirklich vom Benutzen der Loci-Methode oder einfach nur von Training an sich abhängig war, beides zusätzlich in Relation zur passiven Kontrollgruppe. Die Zuteilung der Probanden zur jeweiligen Gruppe erfolgte anhand ihrer bei der Vortestung erbrachten Leistungen. Somit war es möglich, ähnlich leistungsstarke und ausgeglichene Gruppen zu schaffen. Von der Zuteilung zu ihrer jeweiligen Gruppe erfuhren die Probanden erst nach absolvierter erster Testung. Auf diese Weise sollte verhindert werden, dass einige der Probanden die Tests weniger motiviert angingen, wenn sie einer nicht gewünschten Gruppe zugeteilt worden waren. Die beiden großen Testungen zu Beginn und nach Ende des Trainingsprogrammes fanden immer nachmittags bzw. abends statt, um mögliche zirkadiane Leistungsschwankungen so gering wie möglich zu halten (Carrier und Monk 2000). Der Trainingszeitraum wurde auf etwa sechs Wochen festgesetzt, da man sich nach diesem

Zeitraum bereits ausreichende Trainingseffekte und außerdem bereits neuromorphologische und funktionelle Änderung der zerebralen Strukturen erhoffte (Buschkuehl, Jaeggi et al. 2012).

## **2 Versuchspersonen**

An der eigentlichen Studie an sich nahmen 51 gesunde, junge Männer im Alter zwischen 18 und 30 Jahren teil. Vor Studienbeginn wurden alle Probanden über Ziel und Durchführung der Studie inklusive der MRT-Untersuchungen informiert und hatten ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme zu geben. Die Probanden erhielten ein Honorar von insgesamt 260 Euro pro Proband der Studiengruppe bzw. der aktiven Kontrollgruppe und 110 Euro pro Proband der passiven Kontrollgruppe. Die Studie wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München zustimmend bewertet. Die Rekrutierung der Probanden erfolgte vornehmlich über Aushänge an den verschiedenen Fakultäten der Universitäten und Hochschulen Münchens und über entsprechende Email-Verteiler. Grundsätzliche Einschlusskriterien waren männliches Geschlecht (Begründung dazu siehe A1.3), Alter zwischen 18 und 30 Jahren, Deutsch als Muttersprache, Rechtshändigkeit und ein geregelter Tagesablauf (keine Schichtarbeit). Des Weiteren mussten die Teilnehmer laut Eigenanamnese körperlich und psychisch gesund sein; es durfte nur mäßiger Alkoholkonsum von durchschnittlich maximal 0,5 Liter Bier pro Tag und kein Abusus illegaler Drogen bestehen. Zusätzlich durften die Probanden keine Kontraindikation gegen eine MRT-Untersuchung aufweisen, was zum Ausschluss aller Studienanwärter führte, die unter Klaustrophobie litten bzw. ferromagnetische Metalle jeglicher Form im Körper trugen. Letztes Ausschlusskriterium waren Vorkenntnisse zu Gedächtnistechniken jeder Art. Diese Eigenschaften wiesen insgesamt 83 Interessenten auf. Jedoch hatten sich alle 83 Studienanwärter noch der Voruntersuchung zu unterziehen, die letztendlich den Ausschlag dafür gab, ob der jeweilige Proband an der Studie teilnehmen konnte oder nicht (siehe Absatz 3). Nach Abschluss der Voruntersuchungen und dem Verlust einiger Probanden auf Grund mangelnden Interesses oder terminlicher Probleme blieben am Ende noch 51 Teilnehmer übrig, die an der eigentlichen Studie teilnahmen.

Diese 51 Probanden wurden gleichmäßig den verschiedenen Versuchsbedingungen zugeteilt, d.h. sowohl Studiengruppe als auch aktive und passive Kontrollgruppe umfassten ein Kollektiv von je 17 Teilnehmern. Zusätzlich wurde bei der Einteilung der Probanden darauf

geachtet, altersmäßig und intellektuell möglichst ausgeglichene Gruppen zu schaffen. Als Basis dazu dienten die bei der Voruntersuchung gewonnenen Ergebnisse des Lern–Gedächtnis–Tests und des Grundintelligenztests CFT (siehe Absätze 3.1.11 und 3.1.12). Somit ergab sich folgende Aufteilung der Probanden:

<b>Gruppe</b>	<b>Alter</b>	<b>CFT</b>	<b>LGT</b>
Loci-Gruppe	23,71	117,35	103,82
	2,71	12,72	13,28
Aktive Kontrolle	24,19	118,24	102,00
	2,61	13,99	21,32
Passive Kontrolle	24,41	118,24	102,00
	3,81	13,18	15,80

**Tab. 1** Mittelwerte des Alters sowie der erzielten Ergebnisse des CFT und LGT mit jeweils direkt darunter aufgeführten Standardabweichungen für die verschiedenen Gruppen

### 3 Voruntersuchung

Im Folgenden werden die einzelnen Tests und Fragebögen aufgeführt und erklärt, welche die Probanden vor der Teilnahme an der eigentlichen Studie zu bearbeiten hatten. Nicht alle dieser Tests hatten jedoch Einfluss auf die Teilnahme an der Studie. Einige dienten nur einer orientierenden Einschätzung der Versuchspersonen, um ein differenzierteres Bild ihrer intellektuellen Leistungsfähigkeit und ihrer Motivation zu erlangen.

#### *Vividness of Visual Imagery Questionnaire*

Der Vividness of Visual Imagery Questionnaire VVIQ (Marks 1973) wird genutzt, um das bildhafte Vorstellungsvermögen der Versuchspersonen zu testen.

Das Abschneiden in dieser Aufgabe hatte weder Einfluss auf die Teilnahme an der Studie, noch auf die Zuteilung zu einer der drei Gruppen. Es diente lediglich der Einschätzung der jeweiligen visuellen Vorstellungskraft der Probanden und einer eventuellen Korrelation mit den mithilfe der Loci–Methode erzielten Leistungen (nicht Gegenstand dieser Arbeit).

#### *Fragebogen zur Selbsteinschätzung der Gedächtnisleistung*

Der Fragebogen zur Selbsteinschätzung der eigenen Gedächtnisleistung bestand aus mehreren, von Mitarbeitern des Max-Planck-Instituts für Psychiatrie zusammengestellten

Einzelfragen, die Rückschlüsse darüber gaben, wie der jeweilige Proband seine Merkfähigkeit selbst einschätzte. Eine Konsequenz für die Teilnahme an der Studie wurde daraus nicht gezogen.

#### *Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenz-Test*

Der Mehrfachwahl–Wortschatz–Intelligenz–Test MWT–B (Lehrl 1999) ist ein im Multiple–Choice–Verfahren gehaltener Leistungstest zur Messung des allgemeinen Intelligenzniveaus. In Relation zu den Leistungen einer repräsentativen Stichprobe deutscher Erwachsener können so entsprechende IQ-Punkte ermittelt werden (Lehrl 1999).

Die erzielten Leistungen beim MWT hatten keinen Einfluss auf die Teilnahme an der Studie, sie dienten ausschließlich einer orientierenden Einschätzung des Wortschatzes der Probanden.

#### *State-Trait Angst Inventar*

Das State-Trait Angst Inventar STAI (Laux 1981) ist ein im klinischen Alltag und in der Angst– und Stressforschung eingesetztes Werkzeug, um mittels zweier Fragebögen, nämlich STAI-X1 („State-Angst“) und STAI-X2 („Trait-Angst“) zwischen der Angst als momentanem, vorübergehendem Zustand („State“) und der Angst als dauerhafter persönlicher Eigenschaft („Trait“) zu unterscheiden (Spielberger 1972). Die Auswertung und Einschätzung der Ergebnisse erfolgte gemäß des revidierten Handbuchs (Spielberger 1983). Bei nicht eindeutiger Unterscheidung und gleichzeitig bestehender hoher Korrelation von (insbesondere) „Trait-Angst“ zu depressiven Erkrankungen (Kennedy, Schwab et al. 2001) wurden ähnlich dem unten aufgeführten Beck–Depressions–Inventar nur Probanden zur Studie zugelassen, deren Ergebnisse nicht auf das Vorliegen einer depressiven Erkrankung hindeuteten.

Den Probanden wurde das State-Trait Angst Inventar unter der neutralen Formulierung „Fragebogen zur Selbstbeschreibung“ präsentiert.

#### *Beck-Depressions-Inventar*

Das Beck–Depressions–Inventar BDI (Beck At 1961) ist ein psychologisches Testverfahren, dass der Erfassung von Depressionen und ihrer Schwere dient. Es existieren mittlerweile mehrere Versionen des BDI, die hier verwendete ist das BDI-V (Schmitt und Maes 2000).

Da der Cut-off Wert für das Vorliegen einer klinisch relevanten Depression bei einem Score von 35 liegt (Schmitt, Beckmann et al. 2003), wurden nur Probanden mit einem Score von kleiner 35 zugelassen. Testpersonen, die einen höheren Wert aufwiesen, wurden gebeten, sich

mit einem Arzt in Verbindung zu setzen, um die bestehende depressive Symptomatik abklären und gegebenenfalls behandeln zu lassen.

#### *Edinburgh-Händigkeit-Inventar*

Das Edinburgh-Händigkeit-Inventar EHI (Oldfield 1971) ist eine einfache quantitative Methode um die Händigkeit einer Person in Form eines Fragebogens festzustellen. Aus den gegebenen Antworten kann ein Lateralitätsquotient errechnet werden (Oldfield 1971).

Bei der Vortestung wurde ein Lateralitätsquotient von +40 und größer als ausreichender Hinweis für die Rechtshändigkeit der Testperson gewertet und der Proband in die Studie aufgenommen.

#### *Need for Cognition Scale*

Das Kognitionsbedürfnis (Need for Cognition) eines Menschen ist ein psychologisches Persönlichkeitsmerkmal und wurde erstmals Mitte der 50er Jahre des 20. Jahrhunderts postuliert (Cohen, Stotland et al. 1955). Es spiegelt das Bedürfnis einer Person wider, fordernde intellektuelle und kognitive Aufgaben anzugehen und zu meistern. Personen mit einem hohen Kognitionsbedürfnis haben ein großes Bedürfnis Ereignisse und Zusammenhänge in ihrer Umwelt zu verstehen und zu reflektieren, während Menschen mit einem niedrigen Kognitionsbedürfnis eher auf tradiertes Wissen und Altbekanntes vertrauen, ohne es genauer zu hinterfragen (Cacioppo, Petty et al. 1996). Dieses Kognitionsbedürfnis kann durch einen Fragebogen erfasst werden (Cacioppo und Petty 1982).

Die in dieser Studie verwendete Need for Cognition Scale entspricht nicht der originalen, 34 Items umfassenden Skala, sondern einer 16 Items umfassenden, deutschen Adaptation (Bless 1994).

Zwischen den verschiedenen Studienbedingungen wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden und eine Konsequenz für die Teilnahme an der Studie ergab sich nicht aus den Ergebnissen. Eine möglicherweise bestehende Korrelation der Resultate mit dem Abschneiden in den eigentlichen Testaufgaben könnte untersucht werden, ist allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit.

#### *Achievement Goal Questionnaire*

Der Achievement Goal Questionnaire AGQ (Elliot und McGregor 2001) ist ein Fragebogen, der die Motivation von Personen erfragt, aus welcher heraus sie die Lösung von Problemen und Aufgaben angehen. Elliot und McGregor unterscheiden dabei vier verschiedene

Motivationsansätze (*Mastery approach, performance approach, mastery avoidance, performance avoidance*).

Zusätzlich zu den zwölf Items des AGQ wurde auf dem Fragebogen noch die Motivation der Studienteilnehmer hinsichtlich eines primär finanziellen Aspektes oder des kognitiven Trainings als primärer Triebfeder für die Studienbewerbung abgefragt. Analog dem NFC hatten die Resultate keine Auswirkung auf eine Studienteilnahme, allerdings zeigten sich auch hier zwischen den verschiedenen Studienbedingungen keine signifikanten Unterschiede.

#### *Santa Barbara Sense of Direction Scale*

Die Santa Barbara Sense of Direction Scale (Hegarty, Richardson et al. 2002) besteht aus 15 Items, mit deren Hilfe die Testperson subjektive Aussagen über ihr räumliches Vorstellungsvermögen treffen kann. Diese Selbsteinschätzung spiegelt das tatsächliche räumliche Vorstellungsvermögen einer Person wider (Hegarty, Richardson et al. 2002).

#### *Zahlen memorieren*

Die erste eigentliche Gedächtnisaufgabe der Probanden in der Vortestung war das Memorieren von möglichst vielen Ziffern in der richtigen Reihenfolge (beginnend links oben und fortgeführt in Leserichtung) innerhalb von fünf Minuten. Anschließend hatten die Probanden erneut fünf Minuten Zeit, die eingprägten Ziffern aufzuschreiben. Die Liste umfasste 100 Ziffern:

5 3 7 9 2 5 9 7 8 8 9 1 3 9 2 5 7 6 8 7  
 4 1 0 5 1 5 3 5 2 9 9 8 2 2 4 4 3 1 1 4  
 0 8 9 7 7 3 0 6 9 8 4 7 6 5 6 6 3 9 9 0  
 3 2 1 2 4 7 0 9 7 7 1 0 7 6 0 2 7 0 4 4  
 7 6 8 8 2 4 2 7 2 5 9 8 9 8 1 2 5 4 0 2

Gewertet wurden alle Ziffern, die ohne Unterbrechung in der richtigen Reihenfolge wiedergegeben werden konnten. Die Anzahl der richtig wiedergegebenen Ziffern hatte weder Auswirkung auf die Teilnahme an der Studie, noch auf die Zuteilung zu einer der Gruppen, sie diente lediglich der Einschätzung des numerischen Gedächtnisses der Probanden.

### *Culture Fair Test CFT 20*

Der für den deutschen Sprachraum überarbeitete Culture–Fair–Test CFT 20 (Jacobs, Petermann et al. 2007) beansprucht, Testpersonen aus verschiedenen Kulturkreisen und Schichten Chancengleichheit in der Bearbeitung der Aufgaben zu bieten. Erreicht werden soll das durch den nahezu kompletten Verzicht auf Sprache und Mathematik bei der Aufgabenstellung. Allerdings ist diese postulierte Chancengleichheit mit Vorsicht zu genießen, da gezeigt wurde, dass das Abschneiden sehr wohl zu einem gewissen Grad vom kulturellen Hintergrund und sozialen Status abhängt (Rosselli und Ardila 2003).

Nichtsdestotrotz eignet sich der CFT 20 insbesondere um die fluide Intelligenz bzw. die allgemeine geistige Leistungsfähigkeit eines Menschen zu messen (Cattell 1968). Das Modell der fluiden Intelligenz beschreibt die Fähigkeit eines Menschen ohne besonderes Vorwissen neue Probleme zu lösen und sich unbekanntem Situationen anzupassen (Cattell 1968).

In dieser Studie wurde von den Probanden nur der erste Teil des CFT bearbeitet. Der zweite Teil und die Zusatztests „*Wortschatz*“ und „*Zahlenfolgen*“ entfielen.

Der erste Teil des CFT besteht aus insgesamt 56 Items, verteilt auf vier Subtests: *Reihenfortsetzen*, *Klassifikation*, *Matrizen* und *Topologien*. Die Testpersonen haben jeweils bestimmte logische Zusammenhänge herzustellen und mittels Multiple-Choice-Prinzip die richtige Lösung zu bestimmen und auf einem separaten Antwortbogen zu vermerken. Details zur Aufgabenstellung sowie zur Bearbeitung können im entsprechenden Handbuch nachgelesen werden (Jacobs, Petermann et al. 2007).

Für die Auswertung werden alle korrekten Lösungen der einzelnen Subtests aufsummiert. Der auf diese Weise gewonnene Rohwert wird anschließend mit Hilfe von Normtabellen altersabhängig in den IQ–Wert übertragen (Jacobs, Petermann et al. 2007).

In die Studie aufgenommen wurden nur Probanden, deren Ergebnisse innerhalb der doppelten Standardabweichung vom Mittelwert der Ergebnisse aller 83 Studieninteressenten lagen (118,01 +/- 27,08). Auf diese Weise sollte eine gewisse Ausgeglichenheit der mentalen Leistungsfähigkeit der Probanden innerhalb der Studie gewährleistet werden.

### *Lern- und Gedächtnistest*

Der Lern– und Gedächtnistest LGT-3 (Bäumler 1974) gibt insbesondere Aufschluss über die Merkfähigkeit einer Person und ermöglicht die Feststellung eines allgemeinen Gedächtnisquotienten (Bäumler 1974). Der LGT gliedert sich in sechs verschiedene Subtests, die je nach Test das Memorieren und die Wiedergabe von figuralen, verbalen oder

numerischen Inhalten überprüfen. Somit gibt der LGT auch Rückschlüsse über besondere Stärken oder Schwächen in der Merkfähigkeit eines Probanden.

Die durch die einzelnen Lösungen erhaltenen Rohpunkte werden für jeden Subtest einzeln anhand von Normtabellen in sogenannte Wertepunkte und anschließend die Wertepunkte, ebenfalls anhand von Normtabellen, in gewichtete Wertepunkte übertragen. Diese gewichteten Wertepunkte bilden die Ausgangswerte für die Übertragung in die Normwerte für den Lern- und Gedächtnisstandard und die Ermittlung des allgemeinen Gedächtniskoeffizienten bzw. IQ-Wertes. Diese Übertragung erfolgt erneut anhand von Normtabellen (Bäumler 1974).

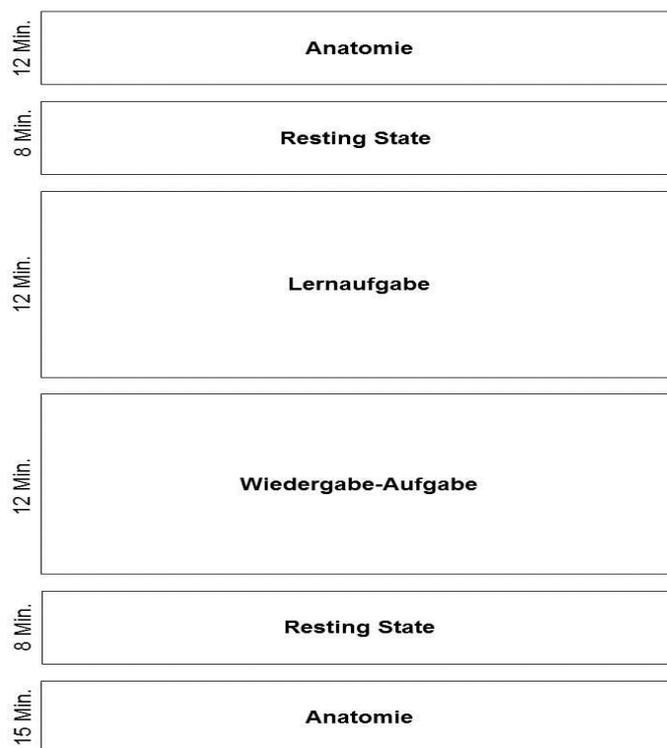
Das Abschneiden im LGT hatte Einfluss auf eine mögliche Studienteilnahme der Probanden. Es wurden nur Personen aufgenommen, deren IQ-Werte innerhalb von zwei Standardabweichungen vom Mittelwert der Ergebnisse aller 83 Studienanwärter lagen (103,05 +/- 31,30). Des Weiteren hatte das Abschneiden beim LGT, ebenso wie die Ergebnisse des CFT, Einfluss auf die Gruppenzuteilung innerhalb der Studie (siehe dazu Absatz C2).

## **4 Erste Testung**

Zeigte sich in der Vortestung, dass der Proband ein geeigneter Studienteilnehmer war, wurde er zur ersten Testung eingeladen. Diese bestand wie erwähnt aus einer Untersuchung im MRT und einer Testbatterie außerhalb des Gerätes, wobei die MRT-Untersuchung stets vor den anderen Tests erfolgte.

### **4.1 Bildgebung**

Vor der MRT-Untersuchung wurden die Testpersonen noch einmal über den Ablauf der Untersuchung aufgeklärt und gebeten während der kompletten Untersuchungsdauer ruhig zu liegen. Jeder Proband erhielt einen Notfallknopf an die Hand, um bei etwaigen Problemen sofort das Untersucherteam verständigen zu können. Die Gesamtzeit im Tomographen betrug im Schnitt etwas mehr als 60 Minuten und setzte sich nach folgendem Schema aus den verschiedenen Untersuchungen zusammen.



**Abb. 1** Ablauf der MRT-Untersuchung. Auf einen ersten anatomischen Scan folgte eine fMRT Resting State Untersuchung, dem sich eine Sequenz anschloss, während der sich die Probanden 72 Wörter einprägen sollten. Im Anschluss fand die Wiedergabe des Erlernten während einer weiteren fMRT Sequenz statt mit darauffolgender nochmaliger Resting-State Untersuchung. Zum Abschluss erfolgte noch einmal ein anatomischer Scan.

Alle Aufnahmen wurden mit einem 3 Tesla Scanner (Modell: GE Discovery MR750; Milwaukee, USA) mit einer 12-Kanal-Kopfspule durchgeführt.

#### 4.1.1 Strukturelle Bildgebung

Die anatomische Untersuchung war in zwei Blöcke aufgeteilt, einen zwölfminütigen Block zu Beginn der Scans und einen 15-minütigen am Ende. Sie diente unter anderem zum Nachweis potentiell sichtbarer morphologischer Veränderungen, was einen Ausschluss des Probanden von der Studie zur Folge gehabt hätte. Die anatomischen Scans wurden dazu von einem Radiologen auf das Vorliegen morphologischer Veränderungen und Erkrankungen untersucht. Zur Darstellung der grauen Hirnsubstanz wurde nach Standard-Localizer und Spulenkalisierung eine T1-Gewichtung des Gehirns durchgeführt (TR 7,1ms, TE 2,2ms, Schichtdicke 1,3mm, FOV 240mm, 320x320x128 Matrix, 12° Flip Angle). Zusätzlich wurde eine Diffusion-Tensor-Bildgebung (DTI) durchgeführt, um Nervenfaserverbindungen virtuell rekonstruieren und somit weiße Substanz besser darstellen zu können.

#### 4.1.2 Funktionelle Bildgebung: Resting State

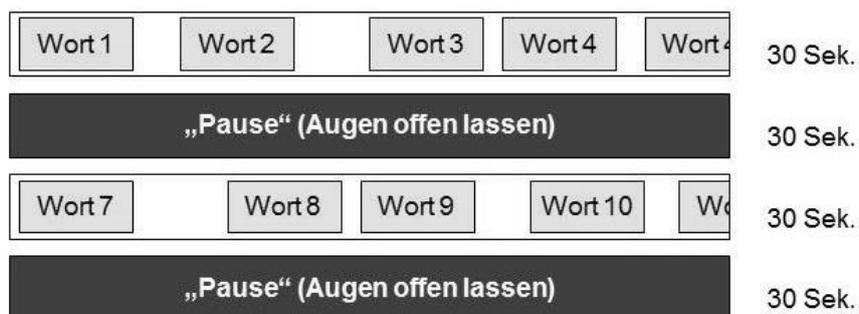
Während der Resting State Untersuchung mussten die Probanden bei geschlossenen Augen versuchen an nichts zu denken. Auf diese Weise wurde durch eine funktionstomographische Untersuchung ein „Ruhezustand“ des Gehirns abgebildet, die Probanden wurden dazu angewiesen, die Gedanken schweifen zu lassen, an nichts Besonderes zu denken und nicht einzuschlafen.

#### 4.1.3 Funktionelle Bildgebung: Gedächtnis–Aufgaben

Die Aufgaben im MRT bestanden zum einen aus einer Lernphase und zum anderen aus einer Wiedergabephase.

##### *Lernphase*

Während der Lernphase wurden der Versuchsperson insgesamt 72 Wörter in Blöcken zu jeweils sechs Wörtern visuell präsentiert. Ein Block à sechs Wörtern war 30 Sekunden lang, wobei die Wörter in leicht unterschiedlichen zeitlichen Abständen präsentiert wurden. Zwischen den 30 Sekunden langen Wörterblöcken lagen ebenfalls 30 Sekunden lange Pausen. In diesen Pausen musste der Proband die Augen geöffnet haben und durfte nicht mehr über das eben Gelernte nachdenken.



**Abb. 2** Ablauf der Lernphase im MRT: Insgesamt 72 Wörter in Blöcken zu je sechs Wörtern mussten vom Probanden memoriert werden, auch in Bezug auf ihre Reihenfolge. Zwischen den 30sekündigen Einprägeböcken waren jeweils 30 Sekunden Pause, in denen der Proband nicht an das eben Gelernte denken durfte und die Augen geöffnet halten musste

##### *Wiedergabephase*

In der Wiedergabephase, die sich direkt an die Lernphase anschloss, wurden den Probanden gleichzeitig drei untereinander geschriebene Wörter präsentiert und die Testpersonen hatten zu entscheiden, ob diese Wörter in derselben Reihenfolge gezeigt wurden, wie sie sie kurz zuvor in der Lernphase memoriert hatten. Die Wörter, die gleichzeitig erschienen, waren immer jeweils einem der 6–Wort–Blöcke entnommen.

Um dem Untersucher ihre Entscheidung mitzuteilen hatten die Versuchspersonen einen von vier Knöpfen einer Fernbedienung zu drücken, je nachdem wie sicher sie sich bei der Entscheidung waren. Zwischen diesen eigentlichen Wiedergabeaufgaben wurde jeweils immer eine Distraktoraufgabe eingeschoben. Hierbei wurden den Probanden wiederum drei Wörter gleichzeitig gezeigt und sie mussten entscheiden, ob sie gemäß ihrer Silbenanzahl in der richtigen Reihenfolge geordnet waren.

Erinnern:	Wort 7 Wort 8 Wort 9	Reihenfolge richtig? ja! ~ja ~nein nein!	9 + 3 Sek.
Silbenzählen:	Hund Katze Mausehabicht	Reihenfolge richtig? ja! ~ja ~nein nein!	9 + 3 Sek.
Erinnern:	Wort 20 Wort 19 Wort 21	Reihenfolge richtig? ja! ~ja ~nein nein!	9 + 3 Sek.

**Abb. 3** Jeweils drei Wörter wurden neun Sekunden lang gleichzeitig gezeigt und der Proband musste entscheiden, ob sie in der richtigen Reihenfolge präsentiert wurden. Danach hatte er drei Sekunden Zeit für seine Antwort mittels Fernbedienung. Als Distraktoren wurden Blöcke eingefügt, bei denen die Testperson Wörter anhand ihrer Silbenanzahl einordnen und ebenfalls die Reihenfolge als richtig oder falsch einstufen musste.

## 4.2 Kognitive Tests und Fragebögen

### 4.2.1 Visuelle Analogskala

Jeder Proband musste vor dem eigentlichen Beginn der Testung seine Motivation und seine Einschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit in Bezug auf andere, nicht an der Studie teilnehmende Personen, auf zwei visuellen Analogskalen eintragen. Je weiter rechts der Strich eingezeichnet wurde, desto motivierter war der Proband in diesem Moment bzw. desto stärker schätzte er die eigene Leistungsfähigkeit ein.

Nach dem Ende der kompletten Testbatterie wurde der Testperson erneut eine visuelle Analogskala vorgelegt, auf der nach demselben Verfahren erneut die eigene Leistungsfähigkeit einzuschätzen war.

### 4.2.2 Resting State Vigilanz

Als nächstes wurden die Vigilanz und die Mitarbeit der Probanden während der Resting-State Scans und der Lernaufgaben im MRT erfragt. Der Fragebogen ist im Anhang einzusehen.

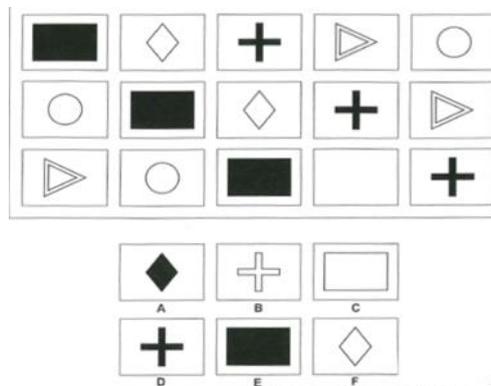
### 4.2.3 Verbales visuelles Gedächtnis

Die Probanden hatten fünf Minuten Zeit, die 72 Wörter, die sie im MRT erlernt hatten, wiederzugeben. Es galt, sich nur an die im MRT zu erlernenden Wörter zu erinnern. Diejenigen Wörter, deren Silben die Probanden in der Distraktionsaufgabe zählen mussten, waren nicht relevant. Bei der Wiedergabe spielte die Reihenfolge der Wörter keine Rolle, auch Rechtschreibfehler wurden vernachlässigt.

### 4.2.4 BOMAT

Der Bochumer Matrizenest BOMAT (Hossiep, Turck et al. 2001) ist ein sprachfreier Intelligenztest, der die geistige Leistungsfähigkeit einer Person durch das Lösen von Matrizenaufgaben ermittelt. Jede Matrix besteht aus 5x3 Feldern, die nach einem gewissen Schema mit Symbolen bzw. Bildern gefüllt sind. Nur eines dieser 15 Felder bleibt leer. Aufgabe der Testperson ist nun, aus einer Auswahl von sechs möglichen Antwortbildern dasjenige herauszufinden, welches das Schema am besten ergänzt und folglich an die Stelle des leeren Feldes passt. Die von der Testperson als richtig erachtete Lösung ist auf einem separaten Antwortbogen anzukreuzen.

Beispiel:



**Abb. 4** BOMAT, Advanced Short Version, Beispielaufgabe Lösung F

In dieser Studie wurde der BOMAT in der Advanced Short Version verwendet, jedoch in etwas abgewandelter Form. Statt der eigentlich vorgesehenen 45 Minuten Bearbeitungszeit hatten die Probanden in Anlehnung an die Studie von Jaeggi et al. (2008) nur zehn Minuten um so viele Aufgaben wie möglich zu lösen. Es musste dabei nicht der Reihenfolge nach vorgegangen werden, allerdings wurden die Testpersonen darauf hingewiesen, dass die Aufgaben prinzipiell dem Schwierigkeitsgrad nach aufsteigend geordnet sind. Da die Zeit so knapp bemessen war, dass es nahezu unmöglich war alle Aufgaben zu lösen, wurden die

Probanden auf diesen Umstand hingewiesen und auch aufgefordert, sich nicht zu lange mit der Lösung einer Aufgabe aufzuhalten, sondern gegebenenfalls zur nächsten zu springen.

#### **4.2.5 ZVT**

Der Zahlenverbindungstest ZVT (Oswald und Roth 1987) ist ebenfalls ein sprachfreier Intelligenztest, der die mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit einer Person misst. Diese basale kognitive Leistungsfähigkeit entspricht dem Bereich der Intelligenz, der je nach Intelligenzmodell als *fluide Intelligenz* (Cattell 1963), als *perceptual speed* (Thurstone 1938) oder als *Verarbeitungsgeschwindigkeit* (Jäger 1982) bezeichnet wird.

Aufgabe beim Zahlenverbindungstest ist es, Zahlen von eins bis 90 auf einem DIN A4 Blatt in möglichst kurzer Zeit mit einem Stift in der richtigen Reihenfolge zu verbinden. Dabei sind diese Zahlen systematisch so angeordnet, dass immer eine direkte Verbindung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zahlen hergestellt werden kann; es kann also nicht sein, dass eine Verbindung quer über das ganze Blatt hergestellt werden muss.

Es existieren vier Versionen A, B, C und D des ZVT. Die Probanden hatten entweder in der ersten Testung die Versionen A und B oder C und D zu lösen, in der zweiten Testung dann jeweils die anderen beiden Versionen.

#### **4.2.6 Backward digit-span**

Der Digit-span Task ist eine häufige Komponente in zahlreichen Intelligenztests, wie zum Beispiel der *Wechsler Adult Intelligence Scale* (Wechsler 1955), da er als probates Mittel gilt, die Aufnahme- und Prozessierungsfähigkeit des Arbeitsgedächtnisses zu untersuchen (Baddeley 1974). Der Digit-span Task kann vorwärts oder, erschwerend, rückwärts ausgeführt werden. Der in dieser Studie verwendete Backward Digit-span verlangte von den Probanden, sich eine Reihe von Zahlen in der richtigen Reihenfolge einzuprägen und sie dann rückwärts wiederzugeben. Dies geschah nach folgendem Prinzip: der Proband bekam via PowerPoint mehrere Ziffern gezeigt, die im Abstand von einer Sekunde aufeinander folgten. Es erschien beispielsweise die „3“, dann war der Bildschirm für eine Sekunde weiß, dann eine „2“, dann wieder eine Sekunde blanker Bildschirm und dann die „1“. Daraufhin forderte eine Folie die Testperson auf, die Ziffern wiederzugeben, und zwar in umgekehrter Reihenfolge. Das bedeutete in diesem Beispiel, dass der Proband die Ziffern, die ja in der Reihenfolge „3-2-1“ erschienen waren, jetzt in der Reihenfolge „1-2-3“ aufschreiben musste. Es war der Testperson dabei nicht erlaubt, die Ziffern einfach von rechts nach links in der Reihenfolge aufzuschreiben, in der er sie gesehen hatte – was auf dem Papier dann ebenfalls die umgekehrte Reihenfolge und damit die korrekte Lösung ergeben hätte – sondern er musste die

Ziffern von links nach rechts ohne Unterbrechung wiedergeben, damit das Ergebnis als korrekt gewertet wurde. Die Aufgabe begann relativ einfach mit zwei Runden à drei Ziffern und wurde dann alle zwei Runden um eine Zahl verlängert, sodass auf die zwei Runden à drei Ziffern zwei Runden à vier Ziffern folgten, dann zwei Runden à fünf Ziffern usw. Dieses Procedere wurde solange fortgesetzt, bis der Proband vier Runden in Folge nicht mehr lösen konnte. Eine Zeitvorgabe für die Wiedergabe der Zahlenreihen bestand nicht.

Es gab für die erste und die zweite Testung zwei unterschiedliche Zusammenstellungen der Zahlenkombinationen.

#### **4.2.7 Alternative Uses**

Der „Alternative Uses“-Task (Guilford 1967) bestand pro Testung aus jeweils drei Fragen. Pro Frage hatten die Probanden zwei Minuten Zeit um möglichst viele und möglichst kreative Antworten darauf zu finden. In der ersten Version handelte es sich dabei um die Fragen

- Was kann man alles mit einer Büroklammer machen?
- Was kann man riechen?
- Wie können Studenten Geld verdienen?

und in der zweiten Version um die Fragen

- Was kann man alles mit einer Zeitung machen?
- Was kann man hören?
- Wie kann man die Zeit an der Kasse angenehmer gestalten?

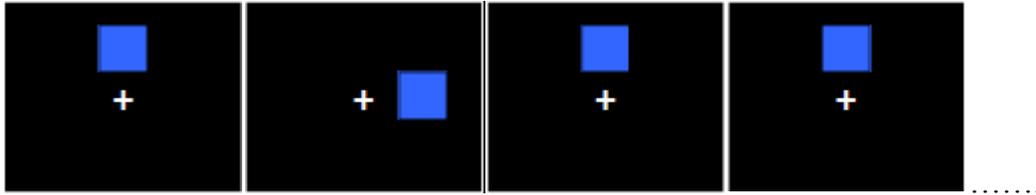
Die Probanden wurden angehalten, ihre Antworten in Stichpunkten zu formulieren.

#### **4.2.8 Dual n-back**

Die dual n-back Aufgabe (Jaeggi, Seewer et al. 2003) ist eine Erweiterung der einfachen n-back Aufgabe um eine weitere Komponente. Während bei der einfachen n-back Aufgabe nur ein Stimulus (akustisch oder visuell) präsentiert wird, sind es bei der dual n-back Aufgabe zwei Reize, also sowohl akustisch als auch visuell. Auf diese Weise wird die Menge an Informationen, die die Testperson verarbeiten muss, verdoppelt, was die Aufgabe im Vergleich zum einfachen n-back deutlich erschwert. Beim dual n-back Task wird also genau das gefordert, was Aufgabe des Arbeitsgedächtnisses ist, nämlich die Aufnahme, Prozessierung, kurzfristige Speicherung und Wiedergabe von Informationen (Baddeley 1974).

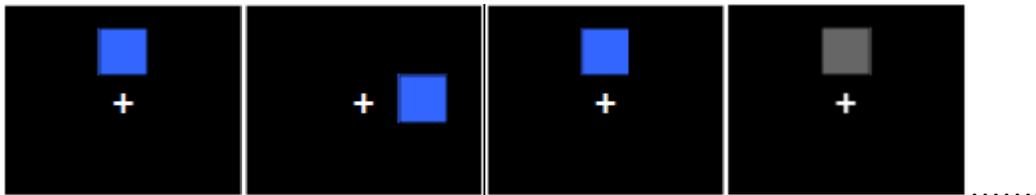
Ablauf des dual n-back Tasks in der Studie:

Der Proband saß am PC und sah im Abstand von drei Sekunden blaue Quadrate auf sonst schwarzem Bildschirm an verschiedenen Positionen aufleuchten.



**Abb. 5** Dual n-back Task, visueller Stimulus, die blauen Quadrate leuchten kurz auf, verschwinden dann wieder und leuchten nach drei Sekunden an derselben oder einer anderen Stelle wieder auf

Forderte das Programm den Probanden auf, einen 1-back Task (n also gleich 1) durchzuführen, hatte die Testperson immer dann den Buchstaben „A“ auf der Computertastatur zu drücken, wenn das blaue Quadrat nochmals an derselben Stelle aufleuchtete wie direkt zuvor (d.h. der Proband musste sich eine Position in der Abfolge zurückerinnern). War das nicht der Fall, durfte die Taste „A“ nicht gedrückt werden.



**Abb. 6** Dual n-back Task, 1-back Aufgabe. Der Proband hat beim grau eingefärbten Quadrat die „A“-Taste zu drücken, da das Quadrat an derselben Stelle aufleuchtet, wie eine Position zuvor

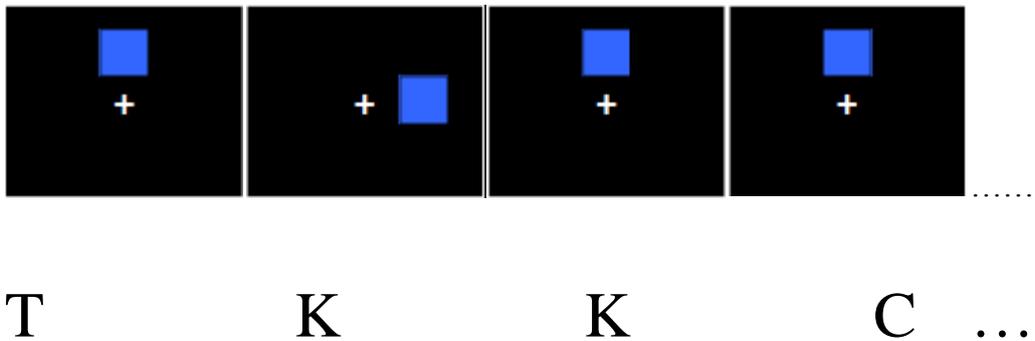
Beim 2-back Task (n also gleich 2) hatte die Testperson immer dann den Buchstaben „A“ auf der Tastatur zu drücken, wenn das blaue Quadrat an derselben Stelle aufleuchtete wie beim vorletzten Mal (d.h. der Proband musste sich zwei Positionen in der Abfolge zurückerinnern). War das nicht der Fall, durfte die Taste „A“ nicht gedrückt werden.



**Abb. 7** Dual n-back Task, 2-back Aufgabe. Der Proband hat beim grau eingefärbten Quadrat die „A“-Taste zu drücken, da das Quadrat an derselben Stelle aufleuchtet, wie zwei Positionen zuvor

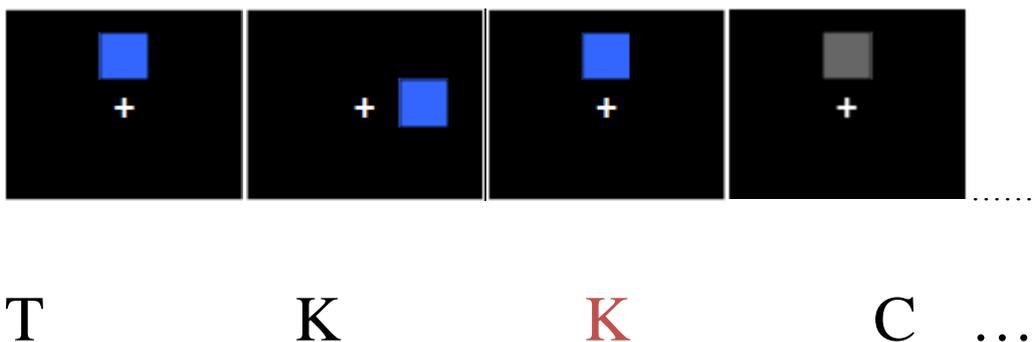
Nach exakt dem gleichen Prinzip funktionierten die n-back Tasks für n=3, n=4, n=5 usw.

Bis jetzt handelte es sich bei diesem Versuchsaufbau allerdings nur um eine einfache n-back Aufgabe. Um eine dual n-back Aufgabe zu erhalten, wurden nun zeitgleich zu den visuellen noch akustische Stimuli gesetzt. Das bedeutete, dass in dem Moment, in dem das blaue Quadrat aufleuchtete, auch noch ein Buchstabe aus dem Lautsprecher des Computers ertönte.



**Abb. 8** Dual n-back Task, visueller und zeitgleicher akustischer Stimulus

Für die akustischen Stimuli galt nun dasselbe Prinzip wie für die visuellen auch, nur dass statt des Buchstaben „A“ der Buchstabe „L“ auf der Tastatur gedrückt werden musste. Beim 1-back Task musste der Proband also immer dann „A“ drücken, wenn das Quadrat an derselben Stelle wie direkt zuvor aufleuchtete und „L“ wenn er denselben Buchstaben wie direkt zuvor hörte.



**Abb. 9** Dual n-back Task, 1-back Aufgabe. Der Proband hat beim grau eingefärbten Quadrat „A“ zu drücken und beim rot eingefärbten Buchstaben „L“

Dieses Prinzip ließ sich wieder beliebig erweitern auf  $n=2$ ,  $n=3$ ,  $n=4$ , usw.

Der Schwierigkeitsgrad war dabei immer für beide Modalitäten identisch. Es ergaben sich bei jeder neuen Präsentation von Quadrat und Buchstabe damit für die Testperson folgende Alternativen:

- Es galt nur „A“ bei einem passenden Quadrat zu drücken
- Es galt nur „L“ bei einem passenden Buchstaben zu drücken
- Es galt „A“ und „L“ bei einem passenden Quadrat und einem passenden Buchstaben zu drücken
- Es galt keine Taste zu drücken, da weder Quadrat noch Buchstabe passten

Je nachdem, wie gut der Proband bei einem Durchgang abschnitt, wurde er im folgenden Durchgang vom Programm automatisch ein Level höher gestuft (z.B. von 1-back auf 2-back), blieb im gleichen Level oder fiel ein Level zurück. Nach einem Testlauf zum Kennenlernen des Programms hatten die Probanden zehn Durchgänge zu absolvieren. Vor jedem Durchgang bekam der Proband die Info, welches Level er in der nächsten Runde zu bewältigen hatte. Nach Abschluss der zehn Durchgänge beendete das Programm sich selbstständig.

#### **4.2.9                    Verbales auditives Gedächtnis (audio memory)**

Bei dieser Aufgabe hörten die Probanden 75 Wörter, die ihnen im Abstand von jeweils ca. fünf Sekunden vorgespielt wurden. Anders als bei den Wörtern im MRT handelte es sich dieses Mal nicht ausschließlich um Nomen, auch Adjektive waren unter die Wörter gemischt. Allerdings waren die 75 Wörter in fünf Gruppen zu je 15 Wörtern unterteilt, die einen gewissen thematischen Bezug zueinander hatten. Aufgabe der Probanden war es, sich möglichst viele dieser Wörter einzuprägen und anschließend innerhalb von fünf Minuten aufzuschreiben. Die Reihenfolge spielte bei der Wiedergabe keine Rolle.

An diese aktive Wiedergabe schloss sich noch eine passive an. Zu diesem Zweck wurde der Testperson ein Bogen vorgelegt, auf dem 40 Wörter aufgeführt waren. 20 Wörter davon hatte der Proband kurz zuvor wirklich gehört, 15 Wörter waren frei erfunden und als Distraktoren unter die anderen Wörter gemischt und fünf Wörter hatte der Proband ebenfalls nicht gehört, allerdings besaßen diese fünf Wörter einen engen thematischen Bezug zu den Wörtern, welche die Testperson gehört hatte. Diese fünf Wörter werden als „critical lures“ bezeichnet (Roediger III und McDermott 1995). Der Proband hatte nun auf dem Bogen anzukreuzen, ob er das jeweilige Wort gehört hatte („ja, das Wort kam vor“ oder „nein, das Wort kam nicht vor“), wie sicher er sich dabei war (von „ich bin absolut sicher“, über „ich bin eher sicher“ und „ich bin eher unsicher“ zu „ich musste raten“) und, falls er meinte, das Wort gehört zu haben, ob er eine bewusste Erinnerung an den Merkvorgang und das Vorkommen des Wortes hatte, oder ob das eher ein unbestimmtes Gefühl war, das ihn glauben ließ, das Wort hätte er gehört („ich erinnere mich bewusst“ oder „keine bewusste Erinnerung ans Lernen“).

#### **4.2.10 Psychomotorischer Vigilanztest**

Der Psychomotorische Vigilanztest PVT (Wilkinson und Houghton 1982) ist ein einfacher Test, um die Aufmerksamkeit und das Reaktionsvermögen einer Person zu messen. Der Test erstreckte sich über zehn Minuten. In dieser Zeit wurden der Testperson an einem Computerbildschirm in unregelmäßigen Abständen visuelle Stimuli (in dieser Studie sich vergrößernde Zahlen) präsentiert. Sobald der Proband den Stimulus wahrnahm, hatte er auf die linke Maustaste zu drücken. Auf diese Weise wurde die Reaktionszeit gemessen und über die Reaktionszeit Rückschlüsse auf die Aufmerksamkeit der Testperson gezogen.

#### **4.2.11 Strategien**

Am Ende der Testung wurde den Probanden ein kleiner Fragebogen vorgelegt, auf dem sie anzugeben hatten, welche Strategien sie benutzt hatten, um sich die Wörter im MRT, die akustisch präsentierten Wörter und die Ziffern beim Backward Digit Span einzuprägen. Während kein einziger der Probanden in allen drei Gruppen die Loci-Methode kannte und nutzte und auch andere Methoden wie das Peg-Word-System nicht verwendet wurden, ergaben sich daraus trotzdem Hinweise, dass die Probanden in einigen Fällen eigene, persönliche Merkstrategien nutzten, die unter anderem mit Bildern und Geschichten arbeiteten und damit zumindest einen Punkt von Mnemotechniken erfüllten.

#### **4.2.12 24-Stunden Retest**

Einen Tag nach der Testung am Max Planck Institut für Psychiatrie folgte ein kurzer telefonischer Retest. Bei diesem kleinen Test wurden noch einmal die Wörter abgefragt, die die Probanden am Vortag im MRT erlernt hatten. Ebenso wurden die Wörter erneut abgefragt, die sie tags zuvor als Audiodatei präsentiert bekommen hatten.

### **4.3 Datenauswertung**

#### **4.3.1 Visuelle Analogskala**

Für die Auswertung der Visuellen Analogskala wurde auf den Millimeter genau gemessen, wo die Testperson ihren Querstrich auf der zehn Zentimeter langen Linie gesetzt hatte. Es waren auf diese Weise sowohl für die eigene Leistungseinschätzung vor und nach den Tests wie auch für die Motivation Werte zwischen 0,0 (Querstrich am linken Ende der Linie) und 10,0 (Querstrich am rechten Ende der Linie) möglich.

### **4.3.2 Resting State Vigilanz**

Die Auswertung der Vigilanz und Alertness während der Resting State Untersuchung bzw. der Testaufgabe im MRT erfolgte anhand oben erwähnten Fragebogens. Dazu wurden den verschiedenen Aussagen Punktwerte zugeordnet. Für die Resting State Untersuchung bedeutete das „wach“ = 1, „müde“ = 2, „gedöst“ = 3, „geschlafen“ = 4, „Augen geöffnet“ = 5. Für die Testaufgabe wurde untersucht, ob der Proband die Augen während der Pausen geöffnet oder geschlossen hatte, „Augen offen“ = 1, „Augen geschlossen“ = 2. Aus diesen Werten konnte rückgeschlossen werden, wie genau der Proband bzw. die Probanden der einzelnen Gruppen die Aufgabenstellung befolgten.

### **4.3.3 Verbales visuelles Gedächtnis**

Es wurden für jede Version alle richtig und falsch wiedergegebenen Wörter gezählt und separat aufgelistet. Auf diese Weise hatte jeder Proband pro Testung jeweils einen Wert an richtigen und einen Wert an falschen Wörtern. Die erreichten Werte im ersten und im zweiten Test wurden dann miteinander verglichen und auf eine etwaige Verbesserung der Probanden untersucht.

### **4.3.4 BOMAT**

Die Auswertung des BOMAT erfolgte mithilfe des zugehörigen Lösungsblatts. Die Lösungsvorschläge der Probanden wurden mit den korrekten Antworten des Lösungsblatts verglichen. Jedes richtig gesetzte Kreuz ergab einen Punkt. Die Summe aller richtigen Lösungen der ersten Testung wurde mit der Summe aller richtigen Lösungen der zweiten Testung verglichen.

### **4.3.5 ZVT**

Für jede Version A, B, C und D wurde die Zeit auf die Zehntelsekunde genau gestoppt und auf einem Auswertungsbogen schriftlich festgehalten. Jeweils aus den Versionen A und B bzw. C und D wurde der Mittelwert gebildet. Die Einzelwerte sowie auch die Mittelwerte von erster bzw. zweiter Testung wurden miteinander verglichen und auf eine Verbesserung des Probanden überprüft.

### **4.3.6 Backward Digit-span**

Die Auswertung des Backward Digit-span verlief nach mehreren Gesichtspunkten. Zum einen wurde die Gesamtzahl aller richtig wiedergegebenen Zahlenfolgen berücksichtigt. Zum anderen auch die längste Zahlenfolge, die ein Proband noch korrekt rückwärts wiedergeben

konnte. Diese maximale Zahlenfolge ist der eigentliche „Digit-span“ einer Person. In den meisten Fällen ist dieses Maximum bei 7 +/- 2 Ziffern erreicht (Miller 1956).

#### **4.3.7 Alternative Uses**

Abweichend von der ursprünglichen Auswertung (Guilford 1967) wurden die Antworten nach nur einem statt vier Gesichtspunkten ausgewertet, nämlich der *Fluency*: es wurden die Antworten über alle drei Fragen hinweg aufsummiert und somit die Gesamtheit der Antworten pro Testsession festgehalten.

Zwei weitere Punkte der ursprünglichen Auswertung, *Originality* und *Flexibility*, die anfangs ebenfalls noch in die Auswertung aufgenommen werden sollten, wurden gestrichen, könnten aber theoretisch noch nachbetrachtet werden, um einen besseren Eindruck von der Kreativität der einzelnen Probanden bei der Antwortwahl zu erhalten.

#### **4.3.8 Dual n-back**

Für die Auswertung des Dual n-back Tasks wurde das maximal erreichte Level, sowie das durchschnittliche Level einer jeder Session und insgesamt betrachtet und unter den verschiedenen Probanden bzw. Gruppen verglichen. Zusätzlich wurde eine Vielzahl von untergeordneten Parametern bestimmt, so zum Beispiel wie viele akustische bzw. visuelle Treffer erzielt wurden. Diese Parameter wurden in dieser Arbeit aber nicht näher in die Untersuchung und die Auswertung der Ergebnisse miteinbezogen.

#### **4.3.9 Verbales auditives Gedächtnis (audio memory)**

Bei der aktiven Wiedergabe der kurz zuvor gehörten Wörter erfolgte die Auswertung analog zur Auswertung der im MRT gelernten Wörter (siehe Absatz 4.3.4).

Die Auswertung der passiven Wiedergabe war komplexer. Da in der 40 Items umfassenden Liste sowohl Wörter vorkamen, die die Probanden kurz zuvor gehört hatten, als auch solche, die nicht erschienen waren, gab es folgende vier Möglichkeiten für den Probanden, sein Kreuz zu setzen:

1. Das Wort wurde akustisch präsentiert und der Proband hatte das noch richtig in Erinnerung, er setzte also sein Kreuz bei „ja“. Diese Kategorie wurde als „richtig, das Wort kam vor“ bezeichnet.
2. Das Wort wurde akustisch präsentiert, der Proband hatte das allerdings nicht mehr in Erinnerung, er setzte also sein Kreuz bei „nein“. Diese Kategorie wurde als „falsch, das Wort kam vor“ bezeichnet (falsches Erinnern).

3. Das Wort wurde nicht akustisch präsentiert und der Proband hatte auch keine Erinnerung daran, er setzte also sein Kreuz richtigerweise bei „nein“. Diese Kategorie wurde als „richtig, das Wort kam nicht vor“ bezeichnet.
4. Das Wort wurde nicht akustisch präsentiert, der Proband dachte aber fälschlicherweise sich daran zu erinnern, er setzte also sein Kreuz bei „ja“. Diese Kategorie wurde als „falsch, das Wort kam nicht vor“ bezeichnet (falsches Wiedererkennen).

Für jede einzelne dieser Kategorien wurden die gesetzten Kreuze aufsummiert. Zusätzlich zu diesen vier Kriterien wurde auch noch untersucht, wie sicher sich die Probanden mit ihrer Antwort waren und ob sie sich bewusst an den Merkvorgang und das Wort erinnerten.

Um die bewusste Erinnerung zu werten, wurde für jedes angekreuzte „ja“ in dieser Rubrik kein Punkt vergeben, für jedes „nein“ einer. Je weniger Punkte ein Proband also in dieser Kategorie aufwies, desto öfter hatte er eine (vermeintlich) bewusste Erinnerung an den Einprägungsvorgang.

Wie sicher der Proband sich bei seiner Entscheidung war, ein bestimmtes Wort gehört oder nicht gehört zu haben, wurde in einem Score ermittelt, dessen minimaler Wert 40 und dessen maximaler Wert 160 war. Dieser Score berechnete sich wie folgt:

Kreuzte der Proband auf dem Antwortbogen „Ich bin mir absolut sicher“ an, wurde dieser Aussage der Wert „1“ zugeteilt. Kreuzte er „Ich bin mir eher sicher“ an, erhielt er den Wert „2“. Der Aussage „Ich bin mir eher unsicher“ wurde der Wert „3“ und der Antwort „Ich musste raten“ der Wert „4“ zugeteilt. Für alle 40 Items auf dem Antwortbogen wurden diese Werte aufsummiert, sodass ein minimaler Wert von 40 (im Sinne, dass sich der Proband bei jeder Antwort absolut sicher war) und ein maximaler Wert von 160 (der Proband musste bei jeder Antwort raten) möglich waren. Je niedriger also der Gesamtwert, desto sicherer war sich der Proband mit seinen Antworten.

Von besonderem Interesse bei der aktiven und vor allem der passiven Wiedergabe waren die sogenannten „critical lures“, jene fünf Wörter, welche die Probanden nicht gehört hatten, die jedoch einen so engen thematischen Bezug zu den tatsächlich präsentierten Wörter hatten, dass sich die Probanden oftmals fälschlicherweise daran zu erinnern glaubten (Roediger III und McDermott 1995). Für diese fünf Wörter pro Testversion wurde noch einmal einzeln untersucht, wie oft die Testpersonen diese Wörter als tatsächlich gehört markiert hatten. Für jedes fälschlicherweise als gehört markierte Wort wurde ein Punkt vergeben. Maximal konnten also fünf Punkte erreicht werden, wenn sich ein Proband fälschlicherweise an alle „critical lures“ zu erinnern glaubte.

#### **4.3.10 Psychomotorischer Vigilanztest (PVT)**

Das Computerprogramm zeichnete automatisch die Anzahl der Mausklicks, alle einzelnen Reaktionszeiten sowie die mittlere Reaktionszeit aller Versuche des Probanden auf. Die mittleren Reaktionszeiten und damit die Aufmerksamkeit des Probanden während der ersten und zweiten Testung wurden auf diese Weise miteinander verglichen.

## **5 Trainingsphase**

### **5.1 Einführung in Mnemotechniken**

Diejenigen Probanden, die der Gruppe zugeteilt wurden, die über einen Zeitraum von sechs Wochen ein tägliches Gedächtnistraining mit der Loci-Methode durchzuführen hatten, wurden an einem etwa dreistündigen Termin am Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München von Boris Nikolai Konrad, einem führenden deutschen Gedächtnissportler und erfahrenen Gedächtnistrainer, in die Materie der Gedächtnistechniken eingeführt. Sie erhielten Informationen zum geschichtlichen Hintergrund und insbesondere der Funktionsweise der Loci-Methode. Den Großteil der Einführung machte das unter Anleitung von Boris Konrad stattfindende Erstellen einer ersten, 75 Punkte umfassenden Route aus. Diese Route, im Folgenden als MPI-Route bezeichnet, war für alle Testpersonen identisch, sowohl in Reihenfolge als auch in Auswahl der einzelnen Punkte. Zudem erfolgte an diesem Termin eine Einweisung in das Online-Gedächtnisportal [www.memocamp.de](http://www.memocamp.de). Es bildete die Basis für das Training der Probanden im Laufe der 40 Trainingstage.

### **5.2 Memocamp**

Diese webbasierte Trainingsmöglichkeit für Gedächtnissportler und Interessierte, entwickelt vom Berliner Gedächtnistrainer Michael Gloschewski, bietet die Möglichkeit, zahlreiche verschiedene Mnemotechniken und Gedächtnisdisziplinen zu trainieren. Von den zahlreichen verschiedenen Rubriken wurden in dieser Studie von den Probanden nur die Disziplinen „Wörter“ und „abstrakte Bilder“ genutzt.

*Memocamp* bietet dem Benutzer die Möglichkeit eigenständige Routen zu entwickeln und in das jeweilige Nutzerprofil einzutragen. Mit diesen Routen kann der Proband dann üben. Er kann wählen, welche Route er für sein Training benutzen will, zusätzlich kann er sich anfangs

als Hilfestellung die gesamte Route oder einen Teil während des Trainings auch noch anzeigen lassen. Jede abgeschlossene Trainingseinheit wird im Trainingstagebuch des Nutzers aufgeführt, mit Anzahl an versuchten Wörtern und richtigen Lösungen. Auch die Dauer der Einpräge- und Wiedergabezeit ist aufgelistet, sodass das Trainingstagebuch nicht nur für die Testperson selbst eine Übersicht über Training und Erfolg bietet, sondern im Rahmen dieser Studie auch eine Möglichkeit bot, den Lerneinsatz und -fortschritt der Probanden zu überprüfen. Es konnten somit säumige Probanden zu mehr Einsatz aufgefordert werden, sodass am Ende der 40-tägigen Trainingsphase alle Testpersonen einen ähnlich großen Lern- und Zeitaufwand aufwiesen.

### 5.3 Training

Nach Freischaltung der *memocamp* Accounts für die Probanden begann ihr sechswöchiges Training. Es setzte sich aus sechs Tagen *memocamp* Training von zuhause aus und einem Tag Training am Max-Planck-Institut zusammen. Jeden Tag sollte eine halbe Stunde trainiert werden. Die Probanden erhielten bei jedem Vor-Ort Termin am MPI einen exakten Trainingsplan für die folgende Woche (siehe Anhang). Der Großteil des Trainings bestand aus der Trainingsrubrik „Wörter“ im *memocamp*. Das bedeutete für die Probanden, dass ihnen von *memocamp* eine gewisse Anzahl an Wörtern in Form einer Tabelle präsentiert wurde, die sie sich mit Hilfe der Loci-Methode binnen fünf bzw. 15 Minuten in der richtigen Reihenfolge einprägen mussten. Nach Ende der Einprägephase hatten die Probanden die memorierten Wörter in der korrekten Reihenfolge in eine nun leere Tabelle einzutragen. Erfolgsabhängig verblieben die Probanden im selben Schwierigkeitslevel oder wurden ein Level hochgestuft. Je höher das Level, desto mehr Wörter hatte sich die Testperson im selben Zeitrahmen einzuprägen. Zusätzlich zu der Rubrik „Wörter“ fand an einigen Tagen das Training in der Rubrik „abstrakte Bilder“ statt. Diese Kategorie bestand aus verschieden geformten, abstrakten Figuren und Bildern, die sich die Probanden ebenso wie die Wörter in der richtigen Reihenfolge einprägen mussten. Zu diesem Zweck musste der Proband für jedes Bild eine für ihn in dieser Figur erkennbare und greifbare Assoziation herstellen, die er dann wiederum mit einem Punkt auf der Route verknüpfte. Wenn eine Testperson also zum Beispiel in einem ungeformten, seltsam gemusterten schwarzgrauen Fleck eine Eule erkannte – aus welchem Grund auch immer – war das die Assoziation, über die er das abstrakte Bild mit seinem Routenpunkt verband. Nach Ende der Einprägephase wurden die Bilder durchmischt und der Proband hatte sie der korrekten Reihenfolge nach zu nummerieren.

In der Zeit zwischen der ersten und der zweiten Testung trainierten die Probanden der Studiengruppe im Mittel 14,01 Stunden (SD 1,71 Stunden) auf der digitalen Trainingsplattform, wobei die minimale Trainingszeit bei 10,8 Stunden und die maximale Trainingszeit bei 17,28 Stunden lagen.

## **6 Zweite Testung**

Nach dem 40-tägigen Training der Studiengruppe bzw. der aktiven Kontrollgruppe, sowie einer entsprechend langen Pause der passiven Kontrollgruppe, erfolgte eine zweite Testung, die im Prinzip analog zur ersten Testung ablief. Alle Probanden durchliefen erneut die MRT–Untersuchung und die sich daran anschließenden Tests außerhalb des Tomographen.

### **6.1 Bildgebung**

Die MRT–Untersuchung verlief nahezu exakt nach dem gleichen Schema wie bei der ersten Testung. Einzige Unterschiede waren die entfallende Aufklärung über die Untersuchung und die anstehenden Aufgaben, da diese noch als bekannt vorausgesetzt wurden und eine Änderung der Wörter, die die Probanden memorieren sollten. Für den genauen Ablauf der Untersuchung siehe Absatz 4.1.

### **6.2 Kognitive Tests und Fragebögen**

Die Fragebögen aus der ersten Testung, sprich die Visuelle Analogskala, der Fragebogen zur Wachheit während der Resting State Phasen im MRT und der Fragebogen zu den verwendeten Einpräge–Strategien, wurden unverändert übernommen.

Ebenso wurden die dual n-back–Aufgabe und der Psychomotorische Vigilanz Test unverändert zur ersten Testung durchgeführt. Alle weiteren Tests wurden inhaltlich insofern abgeändert, dass die Probanden eine andere Version zu bearbeiten hatten. Das bedeutete, dass die Probanden, die bei der ersten Testung beispielsweise Version A des BOMAT zu lösen hatten, jetzt mit der Version B konfrontiert wurden und diejenigen, die zuerst Version B vor sich hatten, jetzt Version A vorgelegt bekamen. Dasselbe galt auch für die Wiedergabe der im MRT und der als Audiodatei präsentierten Wörter, der Bearbeitung des ZVT, des Backward digit-span Tests und der Alternative Uses Fragen. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass

die Probanden mit neuen Aufgaben konfrontiert wurden und die richtige Lösung nicht über eventuelles Restwissen aus dem vorherigen Test erzielen konnten.

Der genaue Aufbau und Ablauf der einzelnen Tests wird im Kapitel 4.2 erläutert.

### **6.3 Datenauswertung**

Die Datenauswertung der zweiten Testung erfolgte analog der Datenanalyse der ersten Testung. Siehe dazu Absatz 4.3.

## **7 Nachtestung**

Etwa vier bis fünf Monate nach der zweiten Testung erschienen die Probanden erneut am Max-Planck-Institut um sich noch einmal einer ca. 30 minütigen Testung zu unterziehen. Dieser Termin bestand aus zwei Aufgaben bzw. Untersuchungen. Sie sollten Aufschluss darüber geben, ob durch das Training auch längerfristig Erfolge erzielt werden konnten. Zwischen der zweiten Testung und der Nachtestung fand keinerlei Training statt.

### **7.1 Wörter**

Der erste Task verlangte von den Testpersonen sich möglichst viele Wörter einzuprägen, die ihnen in Form einer PowerPoint-Präsentation vorgelegt wurden. Bei diesen Wörtern handelte es sich um eine der beiden Versionen der Wortlisten, die die Probanden bereits bei den vorherigen Testungen im MRT memoriert hatten. Und zwar wurde jedem Probanden die Version zugeteilt, die er bei der ersten Testung gelernt hatte um auf diese Weise eine möglichst große zeitliche Distanz zwischen dem Memorieren der gleichen Liste zu bringen. Die 72 Wörter der jeweiligen Version wurden in der Form präsentiert, dass jedes Wort für drei Sekunden auf dem Bildschirm erschien, worauf eine einsekündige Pause in Form eines weißen Bildschirms folgte. Im Anschluss daran wurde wieder für drei Sekunden ein Wort eingeblendet, worauf wieder eine Pause folgte. Dieses Schema wurde bis zum Ende der Präsentation fortgeführt.

Die Wiedergabe der Wörter erfolgte erst nach einer erneuten Bearbeitung des Bochumer Matrizentests, sodass ein Abstand von etwas mehr als zehn Minuten zwischen Einpräge- und

Wiedergabephase lag. Für die Wiedergabe der erlernten Wörter an sich standen den Testpersonen maximal zehn Minuten zur Verfügung.

## **7.2 BOMAT**

Zwischen Einpräge- und Wiedergabephase hatten die Probanden, wie auch in den vorherigen Testungen schon, eine der beiden Versionen des Bochumer Matrizentest innerhalb von exakt zehn Minuten zu bearbeiten. Auch hier erfolgte die Wahl des Tests anhand der Version, die die Probanden jeweils bei der ersten Testung vorgelegt bekommen hatten, sprich ein Proband, der in der ersten Testung die Version A bearbeitet hatte, musste auch jetzt die Version A bearbeiten; ein Proband der in der ersten Testung Version B zu lösen hatte, musste jetzt Version B lösen. Auf diese Weise wurde durch einen möglichst großen zeitlichen Abstand das Risiko minimiert, dass die Probanden sich noch an die Aufgaben des BOMAT erinnern konnten.

## **8 Statistische Auswertung**

Aus der Fülle an Daten wurden einige Zusammenhänge genauer untersucht und diese Ergebnisse neben den Rohdaten in die Arbeit aufgenommen. Im Folgenden wird kurz auf die statistischen Methoden eingegangen, die dazu benutzt wurden.

### **8.1 Kognitive Tests**

Zur Analyse der Trainingseffekte auf die verbale visuelle Lernaufgabe im Scanner wurden drei Varianzanalysen (ANOVAs) mit dem Zwischensubjektfaktor Trainingsgruppe (drei Stufen: Loci-Training, aktive Kontrolle mit dual n-back Training, passive Kontrolle) für die Differenz zwischen der sofortigen Wiedergabe der prä- vs. post-Training-Session, der 24-Stunden-Wiedergabe der prä- vs. post-Training-Session, und der sofortigen Wiedergabe der prä-Training- und Nachtest-Session gerechnet. Anschließend wurden für signifikante ANOVAs Bonferroni-korrigierte posthoc-Tests gerechnet um die spezifischen Unterschiede zwischen den Trainingsgruppen zu ermitteln.

Zur Analyse der Trainingseffekte auf die kognitive Testbatterie wurde zunächst eine multivariate Varianzanalyse (MANOVA) mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Zeit, dem Zwischensubjektfaktor Trainingsgruppe und acht Variablen gerechnet: BOMAT, ZVT, Backward Digit Span, Alternative Uses, dual n-back, verbales auditives Gedächtnis, falsche Erinnerung und falsches Wiedererkennen.

Da die Probanden auf die drei Trainingsgruppen pseudozufällig verteilt wurden und mögliche allgemeine Test-Retest-Verbesserungen nicht von Interesse waren, wurden vornehmlich die spezifischen Effekte der einzelnen Trainingsbedingungen geprüft, im Falle einer signifikanten Interaktion Zeit  $\times$  Trainingsbedingung wurden anschließend univariate ANOVAs gerechnet. Für spezifische Vergleiche wurden schließlich LSD-Posthoc-Tests gerechnet.

Zur Untersuchung eines modulierenden Zusammenhangs des Ausgangsniveaus der Intelligenz mit den Trainingseffekten wurde innerhalb der Loci-Trainingsgruppe eine Pearson-Korrelation zwischen den CFT-Ergebnissen aus dem Screening und den Veränderungen der unmittelbaren Wiedergabe, der 24h-Wiedergabe, und des Nachtests nach vier Monaten gerechnet.

Alle Analysen wurden mit IBM SPSS Statistics (Version 21) gerechnet, für alle Analysen wurde ein Alpha von  $p < 0,05$  als signifikant betrachtet. Alle Werte in Tabellen sind als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung angegeben (bzgl. der statistischen Auswertung der kognitiven Tests vergleiche Weisig 2017).

## **8.2 Strukturelle Bildgebung**

Für die strukturellen Untersuchungen wurden die T1-gewichteten Aufnahmen mittels Voxelbasierter Morphometrie (VBM) der FMRIB Software Library (FSL 4.1) analysiert. Nach Hirnextrahierung mittels Brain Extraction Tool und Gewebetypsegmentierung mittels FAST4 wurden die Aufnahmen der grauen Substanz mittels FLIRT zum MNI152 Standardraum ausgerichtet und mittels FNIRT registriert. Zum direkten Vergleich des Volumens wurden die individuellen Aufnahmen der grauen Substanz zu einem studienspezifischen Template gemittelt, zu dem dann die nativen Aufnahmen der grauen Substanz nichtlinear registriert wurden. Die registrierten partiellen Volumenaufnahmen wurden anschließend durch Division durch die Jacobi-Matrix des Warpfeldes moduliert. Die

modulierten segmentierten Aufnahmen wurden dann durch einen isotropischen Gauss'schen Kernel mit  $\sigma=3\text{mm}$  geglättet. Schließlich wurde zum Test signifikanter Unterschiede zwischen post- und prä-Trainingszustand ein voxelweises Allgemeines Lineares Modell mit permutations-basiertem nichtparametrischem Test entsprechend der Implementierung in FSL gerechnet. Als Signifikanzniveau wurde ein FWE-korrigiertes Alpha von  $p=0,05$  gewählt (bzgl. der Auswertung der Bildgebung vergleiche Weisig 2017). Die diffusionsgewichteten MRT-Analysen sind nicht Teil dieser Arbeit.

### **8.3 Funktionelle Bildgebung: Resting State**

Die Resting State Daten wurden mittels der FMRIB Software Library (FSL 4.1) analysiert. Zur Reduktion von Bewegungsartefakten sowie zur Reduktion von Hintergrundrauschen und Korrektur anatomischer Abweichungen wurde ein 6mm FWHM (full-width at half maximum) Gauß'scher Kernel verwendet. Die Daten wurden mittels affin-linearer Bildregistrierung zum MNI152 Standardraum ausgerichtet. Anschließend erfolgte eine Regression von Verzerrungen durch Bewegung in der weißen Substanz, im Liquor sowie in der Gesamtheit des erhaltenen Signals. Zusätzlich wurden die Daten mittels eines Bandpass-Filters von 0,01 – 0,1 Hz gefiltert, um die Analyse der Daten auf niedrigfrequente BOLD Schwankungen zu beschränken. Die funktionelle Konnektivität (functional connectivity, FC) wurde für alle Probanden über 71 ROIs (region of interest) hinweg berechnet. Die sechs verschiedene neuronale Netzwerke umfassenden 71 ROIs wurden bereits im Vorfeld anhand ihrer Relevanz für das Gedächtnis bzw. das räumliche Vorstellungsvermögen und ihrer damit potentiell gegebenen Relevanz für Gedächtnistraining ausgewählt. Bei diesen sechs ausgewählten Netzwerken handelte es sich um das dorsale und ventrale Ruhezustandsnetzwerk (default mode network), das visuell-räumliche und höhere visuelle Netzwerk sowie den linken und rechten medialen Temporallappen (Shirer, Ryali et al. 2012, Dresler, Shirer et al. 2017). Die mittlere Zeitfolge für jede ROI wurde extrahiert und der Pearson Korrelationskoeffizient für die Zeitreihen aller ROIs berechnet. Die prä- und post- Training FC wurde mittels abhängigem t-Test verglichen, jeweils gesondert für alle drei Trainingsbedingungen. Als Signifikanzniveau wurde ein FWE-korrigiertes Alpha von  $p = 0,05$  gewählt.

## 8.4 Funktionelle Bildgebung: Gedächtnisaufgaben

Die fMRT-Daten, die während der Lernaufgabe und der Wiedergabe-Aufgabe gewonnen werden konnten, wurden mittels SPM8 analysiert (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>). Die ersten fünf aufgezeichneten Volumina wurden verworfen, um eine T1-Äquibilierung zu ermöglichen. Die verbleibenden Volumina wurden bezüglich der Aufnahmezeit korrigiert und zu einem über die Sessions entstandenen mittleren Bild ausgerichtet. Der strukturelle Scan wurde mit diesem mittleren funktionellen Bild verschmolzen und unter Nutzung des „New Segmentation“ Algorithmus in graue Substanz, weiße Substanz und Liquor unterteilt. Alle generierten Bilder (funktionell und strukturell) wurden gemäß der EPI Vorlage des Montreal Neurological Institute (MNI) mittels „Diffeomorphic Anatomical Registration Through Exponentiated Lie Algebra“ DARTEL (Ashburner 2007) dreidimensional normiert und die funktionellen MRT-Bilder wurden weiterhin mit einem 8mm FWHM Gauß'schen Kernel geglättet.

Die von der Blutsauerstoffkonzentration abhängige (blood-oxygen level dependent, BOLD) Signalantwort während des Einprägeprozesses wurde für alle Lernaufgaben als einzelner Regressor modelliert, zeitlich verknüpft mit dem Beginn jedes Prozesses. Die Stichworte wurden in einen eigenen Regressor ohne weiteres Interesse ausgelagert. Alle Ereignisse wurden als Boxcar-Funktion mit einer Dauer von 3 s (Einprägeprozess) oder 5 s (Stichworte) veranschlagt und mit einer kanonischen Funktion der hämodynamischen Reaktion (hemodynamic response function HRF) gefaltet. Zusätzlich wurden die sechs Ausrichtungs-Parameter (six realignment parameters) (Zafar, Malik et al. 2015), deren erste Ableitungen sowie die ersten Ableitungen im Quadrat in die Regressormatrix eingeschlossen. Schlussendlich wurde noch ein Hochpassfilter mit einer Höchstgrenze von 128 s appliziert. Beide Sessions (sowohl prä- als auch post- Training) wurden in das eine Modell eingeschlossen. Die Aufgaben-Regressoren wurden dem implizierten Nullwert gegenübergestellt. Für die Gruppenanalyse wurden die Erstlevel-Kontraste in einer Zweitlevel-ANOVA mit Trainingsbedingung als Zwischensubjektfaktor und Zeitpunkt als Innersubjektfaktor verwendet. Als Kovariate wurden die behavioralen Ergebnisse des Gedächtnistests verwendet. Als Signifikanzniveau wurde ein FWE-korrigiertes  $p < 0,05$  gewählt; zur Clusterdefinition ein Schwellenwert von  $p < 0,001$ .

Während der Wiedergabephase, in der sich die Probanden an die richtige Reihenfolge der Wörter zu erinnern hatten, wurde die BOLD für alle Wiedererkennungsprozesse als einzelner Aufgaben-Regressor modelliert, ebenfalls zeitlich verknüpft mit dem Beginn jedes Prozesses.

Die Stichworte wurden in einen eigenen Regressor ohne weiteres Interesse ausgelagert. Alle Ereignisse wurden als Boxcar-Funktion mit einer Dauer von 10 s (Wiedererkennungsprozesse) oder 3 s (Stichworte) veranschlagt und mit einer kanonischen HRF gefaltet. Identisch zur Analyse der Einprägungsaufgabe wurden die sechs Neuausrichtungsparameter, deren erste Ableitungen sowie die ersten Ableitungen zum Quadrat in die Regressormatrix eingeschlossen und ein Hochpassfilter mit der Obergrenze von 128 s appliziert. Beide Sessions (prä- und post-Training) wurden in das Modell aufgenommen. Die Aufgaben-Regressoren wurden wiederum dem implizierten Nullwert gegenübergestellt. Für die Gruppenanalyse wurden die Erstlevel-Kontraste in einer Zweitlevel-ANOVA mit Trainingsbedingung als Zwischensubjektfaktor und Zeitpunkt als Innersubjektfaktor verwendet. Als Kovariate wurden die behavioralen Ergebnisse des Wiedererkennungstests verwendet. Als Signifikanzniveau wurde ein FWE-korrigiertes  $p < 0,05$  gewählt; zur Clusterdefinition ein Schwellenwert von  $p < 0,001$ .

## **D Ergebnisse**

### **1 Kognitive Tests**

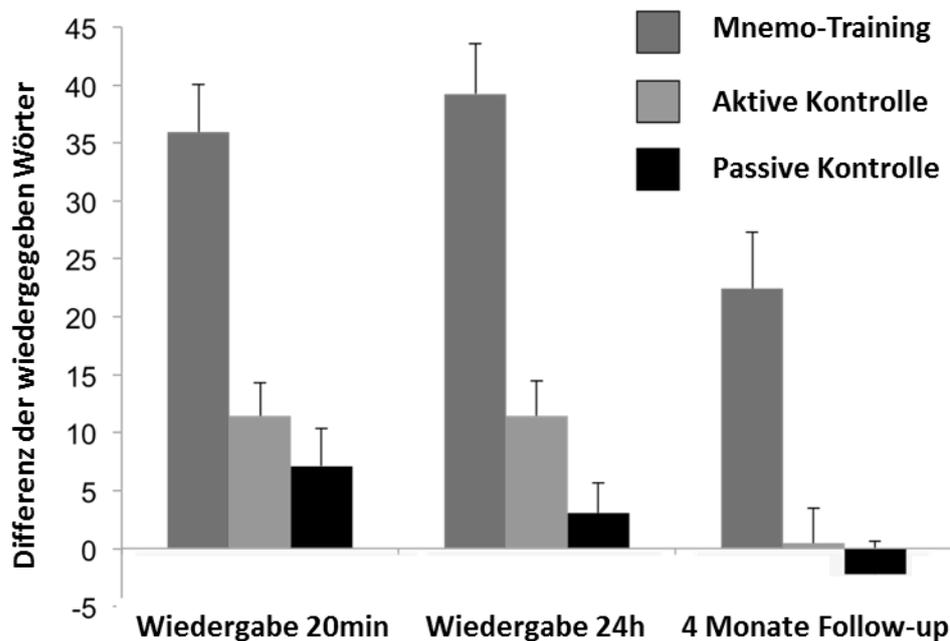
In den nachfolgenden Tabellen und Grafiken sind die Ergebnisse getrennt für die jeweiligen kognitiven Tests dargestellt.

#### **1.1 Verbales Visuelles Gedächtnis**

Die ANOVA für das verbale visuelle Lernen im Scanner zeigte einen signifikanten Effekt der Trainingsbedingung für die unmittelbare freie Wiedergabe außerhalb des Scanners ( $F_{2,48}=20,4$ ,  $p<0,001$ ,  $\eta^2=0,46$ ). Bonferroni-korrigierte posthoc-Tests zeigten, dass sich die Loci-Trainingsgruppe von den beiden Kontrollgruppen unterschied (jeweils  $p<0,001$ ), nicht jedoch die Kontrollgruppen untereinander ( $p>0,9$ ). Auch für die Wiedergabe nach 24 Stunden zeigte sich ein signifikanter Effekt ( $F_{2,48}=30,4$ ,  $p<0,001$ ,  $\eta^2=0,56$ ), bei dem sich ebenfalls die Loci-Trainingsgruppe von den beiden Kontrollgruppen unterschied (jeweils  $p<0,001$ ), nicht jedoch diese untereinander ( $p=0,27$ ). Weiterhin zeigte sich ein signifikanter Effekt für den Leistungszuwachs im Retest nach vier Monaten ( $F_{2,43}=13,4$ ,  $p<0,001$ ,  $\eta^2=0,39$ ), wobei sich erneut die Loci-Trainingsgruppe von den beiden Kontrollgruppen unterschied (jeweils  $p<0,001$ ), nicht jedoch diese untereinander ( $p=0,9$ ).

	<b>Loci-Gruppe</b>	<b>Aktive Kontrolle</b>	<b>Passive Kontrolle</b>
prä-Training 20min	26.5 ±16.2	31.3 ±14.8	29.5 ±16.1
post-Training 20min	62.5 ±11.1	42.7 ±17.1	36.6 ±19.5
Training Differenz 20min	+35.9 ±17.0	+11.4 ±11.8	+7.1 ±13.3
prä-training 24h	16.5 ±14.0	19.6 ±12.7	18.7 ±15.7
post-training 24h	55.7 ±16.9	31.1 ±18.6	21.8 ±19.1
Training Differenz 24h	+39.2 ±17.8	+11.4 ±12.7	+3.1 ±10.7
4 Monate Follow-up 15min	50.3 ±16.5	30.4 ±9.5	27.4 ±9.8
4 Monate Diff. 20/15min	+22.4 ±18.9	+0.5 ±11.8	-2.2 ±11.4

**Tab. 2** Ergebnisse der verbalen visuellen Gedächtnistests. Aufgelistet sind die erzielten Werte als Mittelwert ± Standardabweichung in den einzelnen Testungen und die dabei erzielten Veränderungen im Vergleich zur ersten Testung vor dem Training (prä-Training 20min/24h)



**Abb. 10** Veränderungen in der Gedächtnisleistung in den drei Gruppen. Es ergaben sich signifikante ( $p < 0,001$ ) Verbesserungen der Gedächtnisleistung der Trainingsgruppe sowohl für die 20min, 24h als auch die 4 Monate follow-up Bedingung. Außerdem unterschied sich die Loci-Gruppe auch in allen drei Fällen signifikant ( $p < 0,001$ ) von den Kontrollgruppen, die Kontrollgruppen sich untereinander jedoch nicht ( $p(20min) > 0,9$ ;  $p(24h) = 0,27$ ;  $p(4m) = 0,9$ )

## 1.2 BOMAT, ZVT, Backward Digit-span, Alternative Uses, verbales auditives Gedächtnis, falsche Erinnerung und falsches Wiedererkennen

Die MANOVA für die Testbatterie zeigte neben einem signifikanten Zeiteffekt ( $F_{9,40}=22,43$ ,  $p<0,001$ ) und einem signifikanten Trainingsgruppeneffekt ( $F_{18,80}=4,63$ ,  $p<0,001$ ) eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Trainingsgruppe ( $F_{18,80}=8,66$ ,  $p<0,001$ ). Die anschließenden univariaten ANOVAs zeigten signifikante Zeit  $\times$  Trainingsgruppe-Interaktionen für verbales auditives Gedächtnis ( $F_{2,48}=5,82$ ,  $p=0,005$ ), n-back Mittelwert ( $F_{2,48}=87,00$ ,  $p<0,001$ ) und n-back Maximalwert ( $F_{2,48}=60,59$ ,  $p<0,001$ ) an. Keine der anderen Variablen zeigte eine signifikante Zeit  $\times$  Trainingsgruppe-Interaktion, wobei der ZVT einen Trend aufwies ( $F_{2,48}=3,09$ ,  $p=0,055$ ). Die statistischen Ergebnisse der ANOVAs sind in Tab. dargestellt.

Die LSD-posthoc-Tests zeigten, dass die Loci-Trainingsgruppe signifikant höhere Zuwächse als die passive Kontrollgruppe ( $p<0,046$ ) und nicht signifikant höhere Zuwächse als die n-back-Trainingsgruppe ( $p<0,084$ ) im Test verbales auditives Gedächtnis aufwies. Weiterhin wies die n-back-Trainingsgruppe signifikant höhere Zuwächse als die Loci-Trainingsgruppe und die Kontrollgruppe sowohl für den n-back Mittelwert ( $p<0,001$ ) als auch den n-back Maximalwert ( $p<0,001$ ) auf (Weisig 2017).

Task	$F_{2,48}$	p	$\eta^2$
Verbales Gedächtnis	5.82	.005*	.195
Falsches Erinnern	1.40	.258	.055
Falsches Wiedererkennen	0.91	.411	.036
n-back Mittelwert	87.01	.001*	.784
BOMAT	1.08	.347	.043
ZVT	3.09	.055	.114
Backward Digit-span	1.54	.225	.060
Alternative Uses	0.02	.977	.001

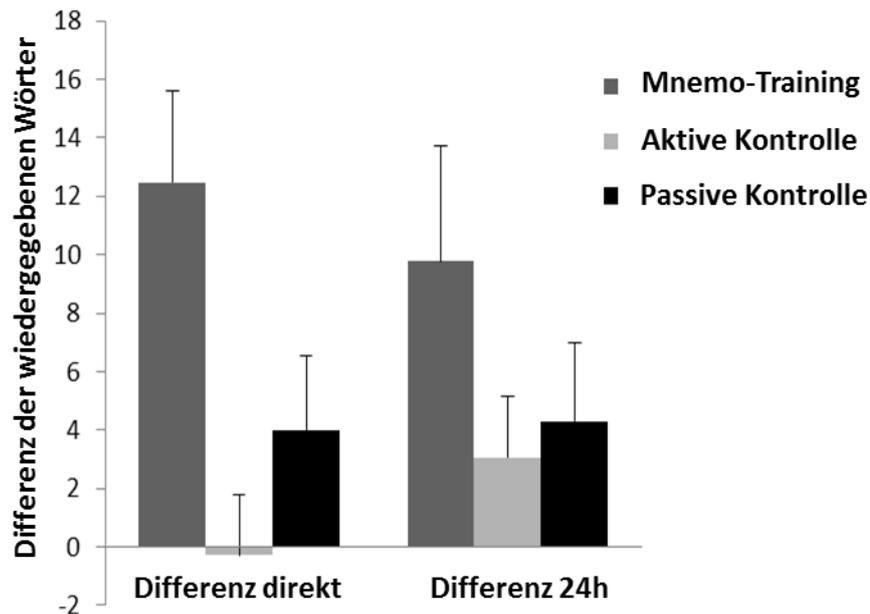
**Tab. 3** Ergebnisse der Zeit  $\times$  Trainingsbedingung-Analysen der ANOVAs für die Testbatterie außerhalb des Scanners. Einzig die mit \* markierten Werte sind signifikant zu  $p<0,05$ ; beim ZVT lässt sich ein Trend erkennen (s. dazu auch Weisig 2017).

Im Folgenden sind die Ergebnisse der einzelnen Tests aufgeführt.

*Verbales auditives Gedächtnis*

	<b>Loci-Gruppe</b>	<b>Aktive Kontrolle</b>	<b>Passive Kontrolle</b>
prä-Training direkt	39.2 ±7.6	40.5 ±9.9	37.5 ±6.7
post-Training direkt	51.6 ±13.4	40.1 ±10.6	41.6 ±10.4
Training Differenz direkt	+12.5 ±13.3	-0.3 ±8.8	+4.0 ±10.8
prä-Training 24h	30.4 ±7.2	27.8 ±9.1	26.0 ±9.2
post-Training 24h	40.2 ±17.2	30.8 ±12.3	30.3 ±12.3
training Differenz 24h	+9.8 ±16.9	+3.1 ±8.9	+4.3 ±11.4

**Tab. 4** Ergebnisse der verbalen auditiven Gedächtnistests. Aufgelistet sind die erzielten Werte als Mittelwert ± Standardabweichung in den einzelnen Testungen und die dabei erzielten Veränderungen im Vergleich zur ersten Testung vor dem Training (prä-Training direkt/24h) (s. dazu auch Weisig 2017).



**Abb. 11** Veränderungen des verbalen auditiven Gedächtnistest. Es ergaben sich signifikante ( $p=0,005$ ) Verbesserungen der Gedächtnisleistung der Trainingsgruppe sowohl für die direkte Wiedergabe als auch für die erneute Wiedergabe 24h später. Außerdem unterschieden sich die Zuwächse der Loci-Gruppe signifikant ( $p<0,046$ ) von der passiven Kontrollgruppe und nicht signifikant von der aktiven Kontrolle ( $p<0,084$ ), allerdings zeigte sich hier ein Trend (s. dazu auch Weisig 2017).

Die univariaten ANOVAs zeigten signifikante Zeit × Trainingsgruppe-Interaktionen für verbales auditives Gedächtnis ( $F_{2,48}=5,82$ ,  $p=0,005$ ). In den LSD-posthoc-Tests zeigte sich, dass die Loci-Trainingsgruppe signifikant höhere Zuwächse als die passive Kontrollgruppe

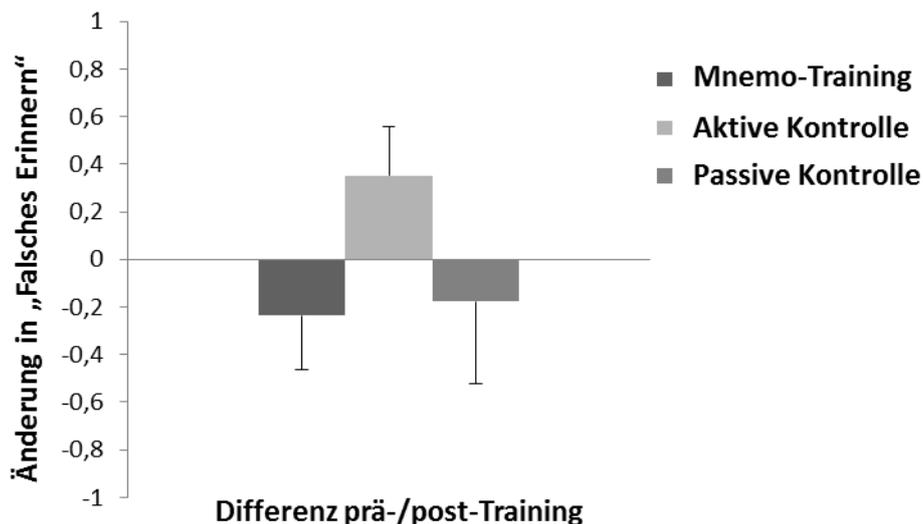
( $p < 0,046$ ) und nicht – signifikant höhere Zuwächse als die n-back-Trainingsgruppe ( $p < 0,084$ ) im Test *verbales auditives Gedächtnis* aufwies, wobei hier ein Trend zu erkennen war.

### Falsche Erinnerung

Die Bedingung „Falsche Erinnerung“ bezieht sich auf die sogenannten „Critical lures“, die in den auditiven Gedächtnistest eingebaut waren. Und zwar wurden als falsch erinnert diejenigen „Critical lures“ gewertet, an die sich der Proband aktiv zu erinnern glaubte, obwohl die Wörter tatsächlich gar nicht gehört wurden.

	Loci-Gruppe	Aktive Kontrolle	Passive Kontrolle
prä-Training	1.1 ±0.9	0.6 ±0.8	1.4 ±1.1
post-Training	0.8 ±0.9	0.9 ±0.9	1.2 ±1.1
Training Änderung	-0.2 ±1.0	+0.4 ±0.9	-0.2 ±1.5

**Tab. 5** Ergebnisse der „Falschen Erinnerung“. Aufgelistet sind die Ergebnisse in den Tests vor und nach Training sowie die erzielten Veränderungen zwischen prä-Training und post-Training. Die Ergebnisse sind als Mittelwert ± Standardabweichung dargestellt (s. dazu auch Weisig 2017).



**Abb. 12** Veränderungen der Ergebnisse der Bedingung „Falsches Erinnern“. Es ergaben sich keine signifikanten ( $p = 0,258$ ) Verbesserungen der Gedächtnisleistung der Trainingsgruppe (s. dazu auch Weisig 2017).

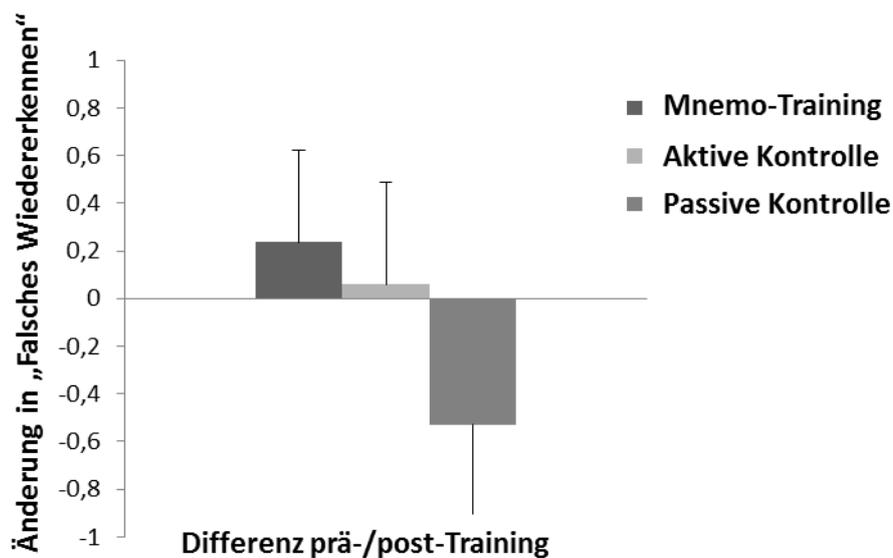
In den univariaten ANOVAs zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe-Interaktion für die Variable „Falsches Erinnern“ ( $F_{2,48} = 1,40$ ,  $p = 0,258$ ).

### Falsches Wiedererkennen

Die Bedingung „Falsches Wiedererkennen“ bezieht sich auf die sogenannten „Critical lures“, die in den auditiven Gedächtnistest eingebaut waren. Und zwar wurden als falsch wiedererkannt diejenigen „Critical lures“ gewertet, an die sich der Proband passiv zu erinnern glaubte, obwohl die Wörter tatsächlich gar nicht gehört wurden.

	Loci-Gruppe	Aktive Kontrolle	Passive Kontrolle
prä-Training	3.1 ±1.5	2.3 ±1.4	3.2 ±1.6
post-Training	3.3 ±1.8	2.4 ±1.2	2.7 ±1.3
Training Änderung	+0.2 ±1.6	+0.1 ±1.8	-0.5 ±1.7

**Tab. 6** Ergebnisse des „Falschen Wiedererkennens“. Aufgelistet sind die Ergebnisse in den Tests vor und nach Training sowie die erzielten Veränderungen zwischen prä-Training und post-Training. Die Ergebnisse sind als Mittelwert ± Standardabweichung dargestellt (s. dazu auch Weisig 2017).



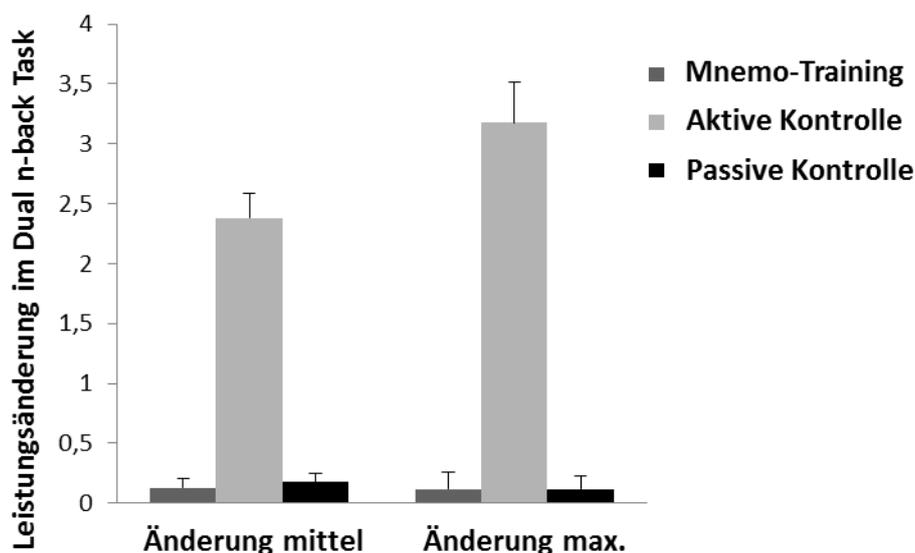
**Abb. 13** Veränderungen der Ergebnisse der Bedingung „Falsches Wiedererkennen“. Es ergaben sich keine signifikanten ( $p=0,411$ ) Verbesserungen der Gedächtnisleistung der Trainingsgruppe (s. dazu auch Weisig 2017).

In den univariaten ANOVAs zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe-Interaktion für die Variable „Falsches Wiedererkennen“ ( $F_{2,48}=0,91$ ,  $p=0,411$ ).

*Dual n-back*

	<b>Loci-Gruppe</b>	<b>Aktive Kontrolle</b>	<b>Passive Kontrolle</b>
prä-Training mittel	2.2 ±0.3	2.2 ±0.5	2.2 ±0.2
post-Training mittel	2.3 ±0.3	4.6 ±1.1	2.3 ±0.3
Training Änderung mittel	+0.1 ±0.3	+2.4 ±0.9	+0.2 ±0.3
prä-Training max	2.9 ±0.4	3.1 ±0.9	2.9 ±0.2
post-Training max	3.1 ±0.4	6.3 ±1.8	3.1 ±0.4
Training Änderung max	+0.1 ±0.6	+3.2 ±1.4	+0.1 ±0.5

**Tab. 7** Ergebnisse des Dual n-back Tasks. Aufgelistet sind die erzielten durchschnittlichen und maximal erreichten Level als Mittelwert ± Standardabweichung in den Testungen vor und nach dem Trainingszeitraum und die dabei erzielten Veränderungen (s. dazu auch Weisig 2017).



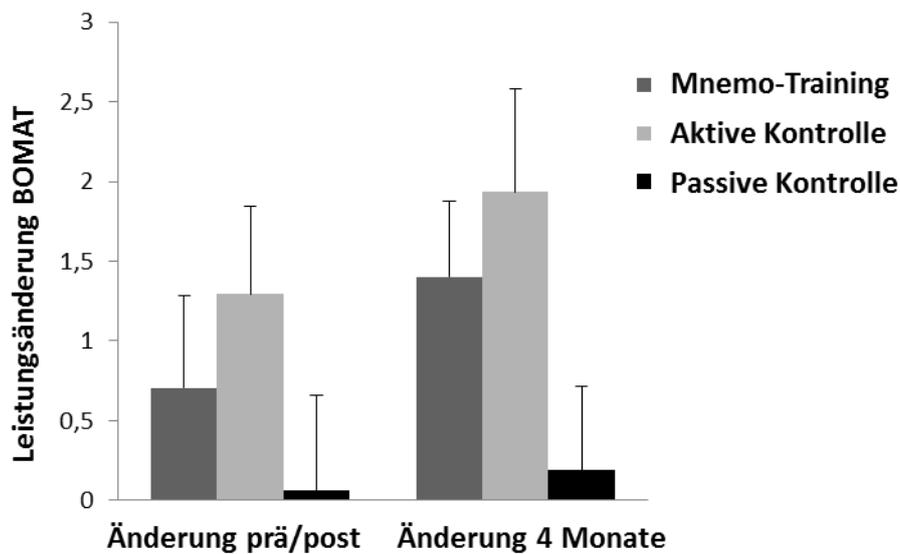
**Abb. 14** Veränderungen der Leistungen im Dual n-back Task von der ersten zur zweiten Testung. Es ergaben sich signifikante ( $p < 0,001$ ) Verbesserungen der Leistungen der aktiven Kontrollgruppe sowohl für den erreichten Level Mittelwert als auch für das maximal erreichte Level. Die Loci-Gruppe wies keine Verbesserungen auf (s. dazu auch Weisig 2017).

Es zeigte sich, dass die aktive Kontrollgruppe, die sechs Wochen zu Hause den dual n-back Task trainierte, signifikant bessere Ergebnisse in der zweiten Testung erzielte als die Loci-Trainingsgruppe und die passive Kontrollgruppe, und zwar sowohl für den Level-Mittelwert ( $F_{2,48}=87,00$ ,  $p < 0,001$ ) als auch für das maximal erreichte Level ( $F_{2,48}=60,59$ ,  $p < 0,001$ ). Es zeigte sich kein positiver Einfluss der Nutzung der Loci-Methode auf den Dual n-back Task.

*BOMAT*

	<b>Loci-Gruppe</b>	<b>Aktive Kontrolle</b>	<b>Passive Kontrolle</b>
prä-Training	8.6 ±2.6	8.4 ±2.2	9.0 ±2.0
post-Training	9.3 ±2.5	9.7 ±2.2	9.1 ±2.9
Training Änderung	+0.7 ±2.5	+1.3 ±2.3	+0.1 ±2.5
4 Monate Follow-up	10.3±2.9	10.2 ±2.3	9.3 ±3.1
4 Monate Änderung	+1.4 ±1.9	+1.9 ±2.6	+0.2 ±2.2

**Tab. 8** Ergebnisse des BOMAT. Aufgelistet sind die Ergebnisse in den Tests vor und nach Training, dem Follow-up Test nach vier Monaten sowie die erzielten Veränderungen zwischen prä-Training und post-Training bzw. prä-Training und Follow-up. Die Ergebnisse sind als Mittelwert ± Standardabweichung dargestellt (s. dazu auch Weisig 2017).



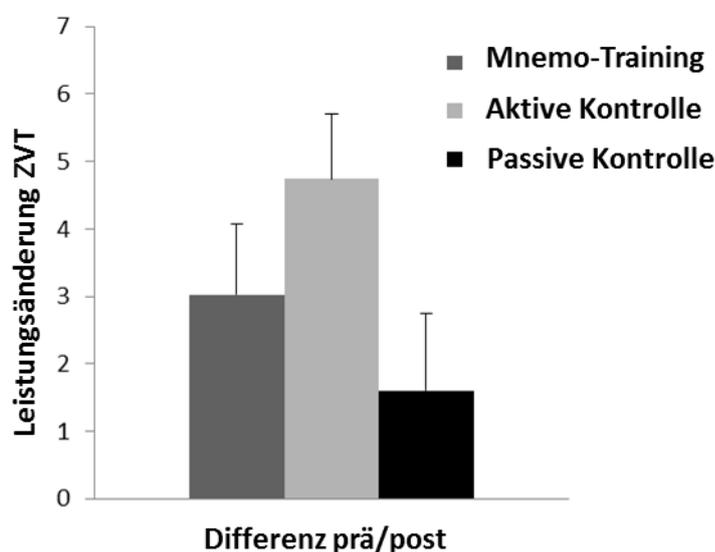
**Abb. 15** Mittlere Verbesserungen der BOMAT Testleistungen von prä- zu post-Trainingszeitraum und des Weiteren im Nachtest. Es zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe-Interaktion ( $p=0,347$ ) (s. dazu auch Weisig 2017).

In den univariaten ANOVAs zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe-Interaktion für die Variable BOMAT ( $F_{2,48}=1,08$ ,  $p=0,347$ ).

## ZVT

	Loci-Gruppe	Aktive Kontrolle	Passive Kontrolle
prä-Training (sec)	52.9 ±7.8	57.7 ±8.3	54.1 ±8.3
post-Training (sec)	49.8 ±6.8	52.9 ±7.4	52.5 ±7.8
training Differenz (sec)	-3.0 ±4.4	-4.7 ±5.5	-1.6 ±4.7

**Tab. 9** Ergebnisse des ZVT in Sekunden: Aufgelistet sind die Ergebnisse der Tests vor und nach dem Training sowie die erzielten Veränderungen, jeweils als Mittelwert ± Standardabweichung dargestellt (s. dazu auch Weisig 2017).



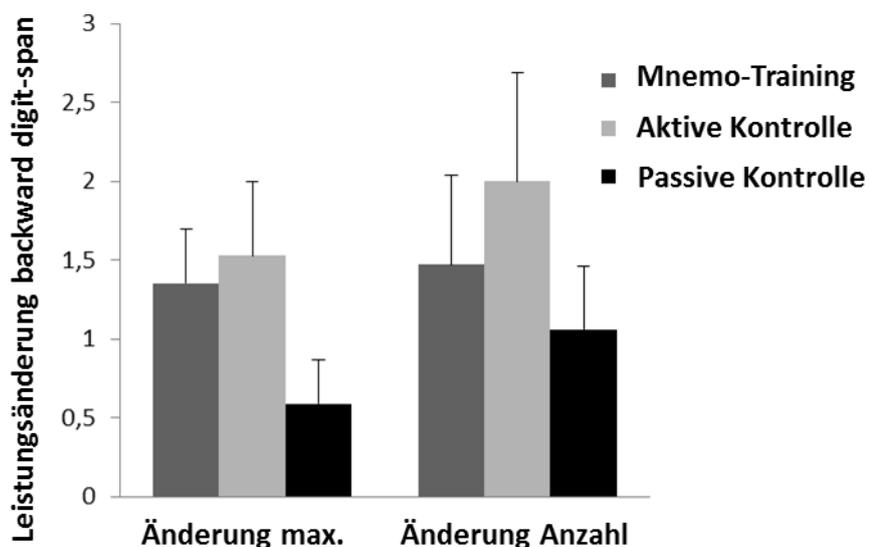
**Abb. 16** Veränderungen der ZVT-Ergebnisse von prä- zu post-Trainingszeitraum. Auf der y-Achse ist die mittlere Zeit in Sekunden angegeben, in welcher der Test schneller gelöst werden konnte. Es zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe-Interaktion (s. dazu auch Weisig 2017).

In den univariaten ANOVAs zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe-Interaktion für die Variable ZVT. Allerdings ließ sich ein Trend erkennen ( $F_{2,48}=3,09$ ,  $p=0,055$ ).

*Backward Digit-span*

	<b>Loci-Gruppe</b>	<b>Aktive Kontrolle</b>	<b>Passive Kontrolle</b>
prä-Training max	6.6±1.0	6.9 ±1.4	6.9 ±1.4
post-Training max	8.0±1.7	8.4 ±2.3	7.5 ±1.5
Training Änderung max	+1.4 ±1.5	+1.5 ±2.0	+0.6 ±1.2
prä-Training Anzahl	8.3 ±1.9	8.5 ±2.5	8.1 ±2.4
post-Training Anzahl	9.8 ±2.7	10.5 ±3.2	9.1 ±2.7
Training Änderung Anzahl	+1.5 ±2.4	+2.0 ±2.9	+1.1 ±1.7

**Tab. 2** Ergebnisse des Backward Digit-span. Aufgeführt sind die Ergebnisse der Tests vor und nach dem Training und zwar jeweils die längste Zahlenfolge, welche erinnert wurde (max) und die Gesamtanzahl an richtigen Lösungen (Anzahl). Die Werte sind als Mittelwert ± Standardabweichung dargestellt (s. dazu auch Weisig 2017).



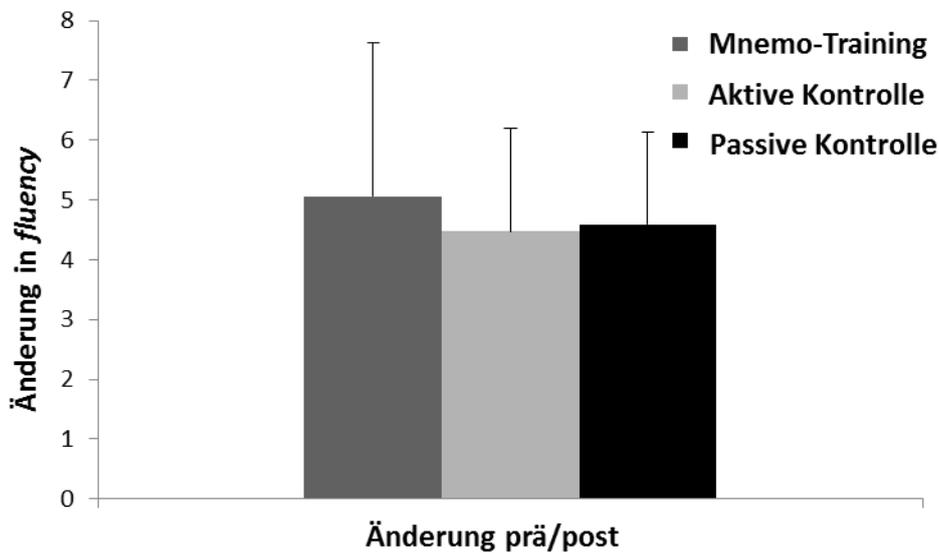
**Abb. 17** Verbesserungen der Leistungen im Backward Digit-Span. Angegeben sind die Veränderungen für die Bedingung „was war die längste Zahlenkombination, die der Proband richtig wiedergeben konnte“ (Änderung max.) und die Gesamtanzahl an richtigen Lösungen des Probanden (Änderung Anzahl). Es zeigte sich für beide Bedingungen keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe–Interaktion (s. dazu auch Weisig 2017).

Es zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe–Interaktion in den ANOVAs für die Variable Backward Digit-span ( $F_{2,48}=1,54$ ,  $p=0,225$ ).

*Alternative Uses*

	Loci-Gruppe	Aktive Kontrolle	Passive Kontrolle
prä-Training <i>fluency</i>	37.8±11.6	33.2±7.5	36.4 ±10.2
post-Training <i>fluency</i>	42.9±13.5	37.7 ±10.0	41.0 ±10.4
Training Änderung <i>fluency</i>	+5.1 ±10.9	+4.5 ±7.3	+4.6 ±6.7

**Tab. 3** Ergebnisse des Alternative Uses Task: Ausgewertet wurde nur unter dem Gesichtspunkt *fluency*, es sind die Ergebnisse der prä- und post-Training Testungen als Mittelwert ± Standardabweichung aufgeführt (s. dazu auch Weisig 2017).



**Abb. 18** Veränderungen der *Fluency* des Alternative Uses Tasks von erster zu zweiter Testung. Es zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe–Interaktion ( $p=0,977$ ) (s. dazu auch Weisig 2017).

Es zeigte sich keine signifikante Zeit × Trainingsgruppe–Interaktion in den ANOVAs für die Variable Alternative Uses ( $F_{2,48}=0,02$ ,  $p=0,977$ ).

### 1.3 Weitere relevante Ergebnisse und Daten

#### *PVT*

In den Messungen der Aufmerksamkeit der Probanden ergab sich kein signifikanter Unterschied für erste und zweite Testung bzw. für die einzelnen Probandenkollektive (Testung 1: Loci-Gruppe 292,4±33,1ms, aktive Kontrolle 312,4±31,4ms, passive Kontrolle 283,1±32,2ms; Testung 2: Loci-Gruppe 307,1±23,6ms, aktive Kontrolle 290,5±34,8ms, passive Kontrolle 300,5±23,4ms).

*NFC*

Der *Need for Cognition* Test erbrachte keine signifikanten Unterschiede der Motivation zwischen den einzelnen Trainingsbedingungen (Loci-Gruppe:  $21,1 \pm 10,5$  Punkte; aktive Kontrolle:  $21,5 \pm 9,9$  Punkte; passive Kontrolle:  $22,4 \pm 10,1$  Punkte).

*Visuelle Analogskala der Motivation*

Über alle Trainingsgruppen hinweg fand sich ein leichter Motivationsverlust von der ersten zur zweiten Testung (Studiengruppe Motivation 1. Testung  $7,6 \pm 1,3$ , 2. Testung  $6,8 \pm 1,6$ ; aktive Kontrolle Motivation 1. Testung  $7,1 \pm 1,1$ , 2. Testung  $6,6 \pm 1,1$ ; passive Kontrollgruppe 1. Testung  $6,8 \pm 0,8$ , 2. Testung  $5,8 \pm 1,2$ ).

*Abstand der Testungen und Training*

Der Abstand der zweiten von der ersten Testung betrug gemittelt über die Gruppen hinweg  $46,2 \pm 7,2$  Tage, innerhalb der Studiengruppe  $49,5 \pm 5,8$  Tage, in der aktiven Kontrollgruppe  $42,8 \pm 4,1$  Tage und in der passiven Kontrollgruppe  $46,3 \pm 7,2$  Tage. Die Abstände von der zweiten Testung zur Nachtestung respektive  $142,3 \pm 23,3$  Tage über alle Gruppen hinweg,  $136,1 \pm 13,2$  Tage bei der Studiengruppe,  $154,5 \pm 30,7$  Tage bei der aktiven Kontrollgruppe und  $136,6 \pm 18,8$  Tage bei der passiven Kontrolle.

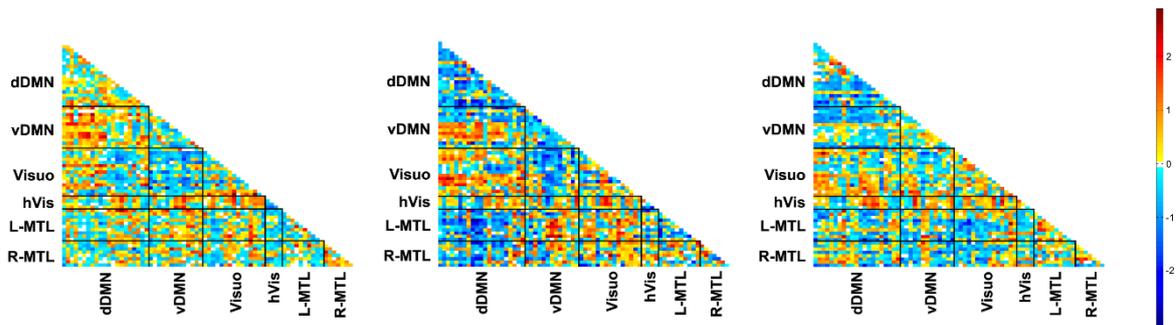
## **2 Bildgebung**

### **2.1 Strukturelle Bildgebung**

In keiner der drei Trainingsbedingungen wurden signifikante Unterschiede in der grauen Substanz nach der Trainingsphase im Vergleich zum Ausgangsniveau gefunden (s. dazu auch Weisig 2017).

### **2.2 Funktionelle Bildgebung: Resting State**

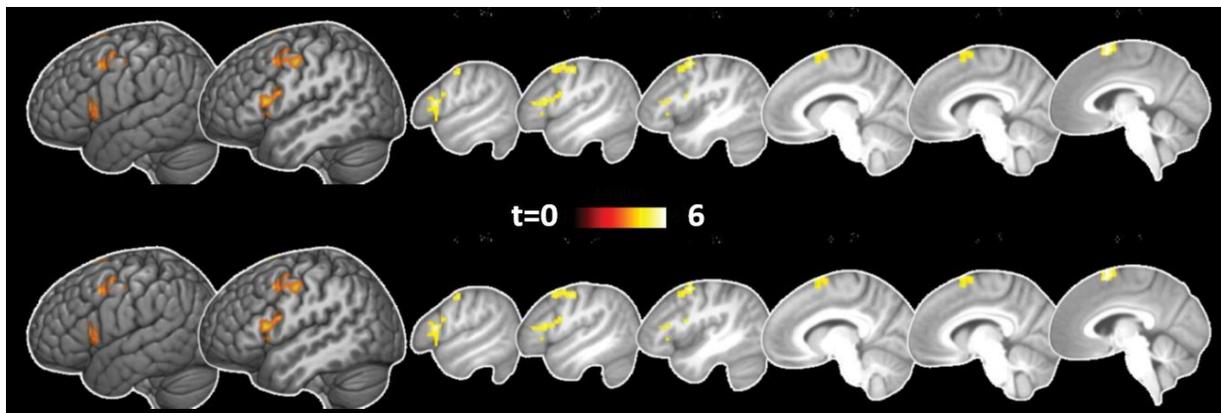
In keiner der drei Trainingsbedingungen wurden signifikante Unterschiede in der FWE-korrigierten funktionellen Konnektivität zwischen den betrachteten  $71 \times 71$  ROI nach der Trainingsphase im Vergleich zum Ausgangsniveau gefunden (s. Abb. 19).



**Abb. 19:** Unterschiede in der Konnektivität zwischen 71x71 ROIs vor vs. nach Loci-Training (links), n-back-Training (Mitte), bzw. passiver Kontrollgruppe (rechts). Die Farbkodierung zeigt t-Werte der gepaarten t-Tests an. Nach FWE-Korrektur ist keiner der Konnektivitätsunterschiede signifikant.

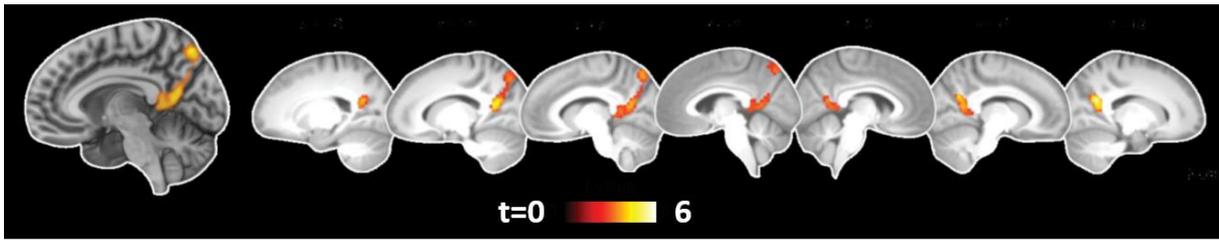
### 2.3 Funktionelle Bildgebung: Gedächtnisaufgaben

In der Enkodierungsaufgabe zeigte sich eine Interaktion zwischen Bedingung und Zeitpunkt: Im Vergleich zu den Kontrollgruppen wiesen Probanden der Loci-Trainingsgruppe signifikant weniger Aktivität im dorsalen anterioren cingulären Kortex sowie im linken ventro- und dorsolateralen präfrontalen Kortex (PFC) auf (s. Abb. 20).



**Abb. 20:** Ergebnisse der Enkodierungsaufgaben: oben Loci-Trainingsgruppe vs. aktive Kontrollgruppe, unten Loci-Trainingsgruppe vs. passive Kontrollgruppe. Es zeigt sich in der Loci-Trainingsgruppe jeweils signifikant weniger Aktivität im Bereich des dorsolateralen anterioren cingulären Kortex, des linken ventrolateralen präfrontalen Kortex und des linken dorsolateralen präfrontalen Kortex im Vergleich zu den beiden Kontrollgruppen.

Im Reihenfolge-Wiedererkennen zeigte sich eine ähnliche Interaktion zwischen Bedingung und Zeitpunkt: Im Vergleich zu den Kontrollgruppen wiesen Probanden der Loci-Trainingsgruppe weniger Aktivität im linken Gyrus angularis, linken Parahippocampus, und im linken, medialen und rechten retrosplenischen Kortex auf (s. Abb. 21). Dieser Effekt war im Vergleich zwischen Loci-Gruppe und beiden Kontrollgruppen sichtbar, jedoch nur im Vergleich zur passiven Kontrollgruppe signifikant.



**Abb. 21:** Ergebnisse der Wiedergabeaufgabe, Signifikanz nur für den Vergleich Loci-Trainingsgruppe vs. passive Kontrollgruppe gegeben: Es zeigt sich für die Loci-Trainingsgruppe signifikant weniger Aktivität im Bereich des Gyrus angularis, des linken parahippocampalen Kortex und des linken medialen und rechten retrosplenischen Kortex im Vergleich zur passiven Kontrollgruppe.

## **E Diskussion**

Bei der Auswertung der verschiedenen Tests zeigte sich eine signifikante Verbesserung des deklarativen Gedächtnisses im Sinne von verbalem visuellem Gedächtnis durch den Einsatz der Loci - Methode und eine nichtsignifikante Tendenz zur Verbesserung des deklarativen Gedächtnisses im Sinne von verbalem auditivem Gedächtnis.

Eine Verbesserung der zerebralen Leistungsfähigkeit über das deklarative Gedächtnis hinaus im Sinne einer Verbesserung der fluiden Intelligenz bzw. der mentalen Geschwindigkeit und des Arbeitsgedächtnisses, gemessen mit dem Bochumer Matrizentest, dem Zahlenverbindungstest, dem Alternativ - Uses Test, dem Backward Digit - span und dem dual n-back Task, konnte durch den Einsatz der Loci - Methode nicht erreicht werden.

Mittels struktureller MRT - Untersuchungen ließen sich keine makroskopisch fassbaren morphologischen Änderungen im Sinne einer messbaren Volumenzunahme der grauen Substanz erkennen, funktionelle Änderungen waren nur in der Enkodierungsaufgabe und der Wiedergabe nachzuweisen, nicht jedoch in den Resting State Untersuchungen.

Damit zeigt sich die Hypothese einer Verbesserung der deklarativen Gedächtnisleistung durch den Einsatz der Loci - Methode bestätigt. Die These einer Verbesserung des Arbeitsgedächtnis und der fluiden Intelligenz durch den Einsatz der Loci - Methode muss nach den hier vorliegenden Ergebnissen hingegen verworfen werden.

Bezüglich der Hypothese einer mittels MRT nachweisbaren Änderung der zerebralen Strukturen lassen sich letztlich zwei unterschiedliche, jedoch nicht zwangsläufig konträre Aussagen treffen. Eine Volumenzunahme der grauen Substanz als Ausdruck einer dauerhaften morphologischen und strukturellen Änderung konnte nicht nachgewiesen werden, allerdings lässt sich auf funktioneller Ebene während der Enkodierung und Wiedergabe von Gedächtnisinhalten eine sichtbare Veränderung im fMRT nachweisen.

Die einzelnen Hypothesen werden im Folgenden im Detail diskutiert. Zudem wird zum Schluss noch auf einige Rahmenbedingungen und potentielle Störvariablen eingegangen, die teilweise schon in der Diskussion des Studiendesigns erwähnt wurden, hier aber zum Teil noch einmal aufgegriffen bzw. erweitert und genauer dargestellt werden sollen.

## 1 Loci-Methode und deklaratives Gedächtnis

Schon eine Metaanalyse aus dem Jahr 1992 (Verhaeghen, Marcoen et al. 1992) konnte den positiven Effekt von Mnemotechniken auf das Gedächtnis von älteren Menschen herausstellen. Dabei wurde auch festgestellt, dass die verbesserte Leistungsfähigkeit in erster Linie auf Aufgaben beschränkt war, die eine Anwendung der erlernten Mnemotechnik auf eben diese Aufgaben zuließ und keine Transferleistung verlangte. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen dieser Studie, auch wenn hier das Teilnehmerkollektiv ein bedeutend jüngeres Spektrum umfasste als in den Studien, welche die Metaanalyse einschloss. Dass sich jedoch durch den Einsatz der Loci-Methode ganz erhebliche Verbesserungen des deklarativen Gedächtnisses erzielen lassen, konnte diese Studie ebenfalls zeigen. Sie reiht sich damit ein in eine lange Reihe von Untersuchungen, die ebenfalls zu diesem Schluss kamen (De Beni und Cornoldi 1985, Kliegl, Smith et al. 1987, Verhaeghen, Marcoen et al. 1992, Wang und Thomas 2000, Cavallini, Pagnin et al. 2003).

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Merk- und Wiedergabefähigkeit von Wortlisten durch den Einsatz der Loci-Methode deutlich steigern lässt ( $p < 0,001$ ). Diese Verbesserung ist nicht nur kurzfristig bei der direkten Wiedergabe im Anschluss an die Einprägephase vorhanden sondern auch nach einem Zeitintervall von 24 Stunden. Es lässt sich also vermuten, dass durch den Einsatz der Loci-Methode die im Gehirn gespeicherten Informationen besser und fester verankert sind als ohne den Gebrauch der Routenmethode. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch andere, ältere Untersuchungen (Carney und Levin 1998, Carney und Levin 2000). Sie kamen ebenfalls zu dem Schluss, dass vor allem der Einsatz bildhafter Mnemotechniken wie der Loci-Methode zu einem Benefit bei der sofortigen Wiedergabe und der Langzeitspeicherung von deklarativen Gedächtnisinhalten führt.

Die Loci-Methode verfügt als sehr potente Mnemotechnik über alle drei entscheidenden Kriterien einer guten Gedächtnisstrategie: Organisation, Elaboration und mentale Bilder. Die Erfüllung dieser Kriterien ermöglicht es unserem Gehirn, neue unbekannte Informationen mit bekannten, schon abgespeicherten Informationen auf lebhaft Art und Weise zu verknüpfen und sie auf diese Weise fester im Gedächtnis zu verankern. Diese Verknüpfung und die Einzigartigkeit der dafür verwendeten Bilder macht es zusätzlich einfacher, die relevanten Informationen von unwichtigen zu unterscheiden und erleichtert somit unserem Gehirn diese Informationen wieder hervorzuholen und wiederzugeben. Der bei weitem größte Teil der Leistungssteigerung dürfte auf diesen Gesichtspunkt zurückzuführen sein.

Die Studiengruppe zeigte im Mittel jedoch nicht nur bessere Leistungen bei der direkten Wiedergabe und nach 24 Stunden beim verbalen visuellen Gedächtnistask, sie schnitt auch beim Nachtest nach vier Monaten signifikant besser ab als die Kontrollgruppen. Da dabei eine Wortliste memoriert werden musste, auf die die Probanden die Loci-Methode noch nicht angewendet hatten, kann das bessere Abschneiden also nicht darauf zurückgeführt werden, dass eventuell noch Gedächtnisinhalte von der zweiten Testung und den mit der Route verknüpften Informationen zurückgeblieben wären. Das wäre auch äußerst unwahrscheinlich, denn auch wenn die Loci-Methode zu einer verbesserten langfristigen Abspeicherung von Gedächtnisinhalten führt, so ist ihre Leistungsfähigkeit doch begrenzt und für eine dauerhafte Abspeicherung der Inhalte im Langzeitgedächtnis über Monate ein Wiederholen der abzuspeichernden Informationen unerlässlich. Das bessere Abschneiden der Studiengruppe im Vergleich zu den Kontrollen muss vielmehr darauf zurückzuführen sein, dass die Teilnehmer auch vier Monate ohne Gebrauch der Loci-Methode ihre Anwendung noch parat hatten und sie zu ihrem Vorteil nutzen konnten. Das ist insofern erwähnenswert, da es auch ohne regelmäßiges Training und nur bei gelegentlicher Nutzung der Loci-Methode immer noch von Vorteil ist, sie in einer geeigneten Situation anzuwenden. Diese Ergebnisse zeigen sich im Einklang mit älteren Untersuchungen (Neely und Bäckman 1993). Auch in ihren Untersuchungen konnten Neely und Bäckman nachweisen, dass Personen, die im Intervall zwischen spezifischem Gedächtnistraining und einem später erfolgten Re-Test kein Training absolvierten, in diesen spezifischen Aufgaben besser abschnitten als Kontrollpersonen. Ebenfalls kongruent zu den Resultaten dieser Studie zeigte sich allerdings auch eine relativ begrenzte Übertragungsmöglichkeit auf andere Gedächtnisaufgaben (Neely und Bäckman 1993).

Im Vergleich des verbalen visuellen Gedächtnistasks mit dem verbalen auditiven Gedächtnistask zeigte sich eine deutlichere Leistungssteigerung der Studiengruppe beim verbalen visuellen Gedächtnistask. Während beim verbalen visuellen Gedächtnistask zusätzlich auch die Zuwächse der Studiengruppe gegenüber den Kontrollgruppen deutlich signifikant waren, war das beim verbalen auditiven Gedächtnistask nur bedingt (passive Kontrollgruppe) bzw. nicht der Fall (aktive Kontrollgruppe).

Für diese Beobachtung können mehrere Ursachen diskutiert werden.

Obwohl die Probanden während ihrer Trainingszeit neben der „Standardroute“, die sie zusammen während des Einführungsseminars erlernten, noch eine weitere 75 Punkte umfassende Route erlernten und trainierten, besteht die nicht geringe Wahrscheinlichkeit,

dass die Standardroute für viele Probanden auch zu einer Art „Paraderoute“ wurde, die bevorzugt trainiert wurde und daher auch im Rahmen der zweiten Testung für den visuellen Gedächtnistask hergenommen wurde. Diese Vermutung bestätigte sich durch die Antworten auf die Frage, welche Strategien zur Einprägung sowohl im Rahmen des visuellen als auch des akustischen Tasks benutzt wurden. Bis auf einen Probanden (siehe unten), der die Loci-Methode bei keiner der beiden Aufgaben anwandte, nutzten alle Probanden die Standardroute für den visuellen Task und ihre eigens erschaffene Route für den akustischen Task.

Ein weiterer Punkt, der gegebenenfalls der Standardroute einen gewissen Vorteil gegenüber der selbst kreierten Route verschaffte und für die bessere Performance im Rahmen der visuellen Gedächtnisaufgabe verantwortlich war, könnte darin begründet liegen, dass die Standardroute durch einen Gedächtnissportler mit großer Erfahrung in der Erstellung und Anwendung der Loci-Methode entworfen worden war. Es ist also möglicherweise davon auszugehen, dass die Zusammenstellung der einzelnen Routenpunkte der Standardroute harmonischer und für eine erfolgreiche Wiedergabe effektiver war als bei den von den Probanden selbständig entworfenen Routen.

Neben der gewählten Route als Werkzeug für das Einprägen der Wörter und deren Wiedergabe könnten die zu memorierenden Begriffe selbst eine Rolle gespielt haben. Während die 72 Begriffe umfassende Wortliste des visuellen Tasks durchweg aus sehr distinkten Substantiven bestand, die auch untereinander keinerlei thematischen Bezug hatten, wurden die Probanden in der akustischen Aufgabe auch mit Adjektiven und teilweise thematisch sehr ähnlichen Begriffen konfrontiert. Diese Ähnlichkeit machte es sehr wahrscheinlich zum einen dem „Laien“ ohne Anwendung der Routenmethode deutlich einfacher sich mehr Begriffe einzuprägen, da bereits eine gewisse intrinsische Organisation innerhalb der Liste vorlag. Zum anderen erschwert die Anwesenheit von thematisch ähnlichen Wörtern und abstrakten Begriffen dem Anwender der Loci-Methode eine eindeutige Zuordnung eines Routenpunktes zu einem bestimmten Begriff.

So ist in der Zusammenschau dieser Aspekte das im Vergleich zum visuellen Task schwächere Abschneiden der Trainingsgruppe bzw. bessere Abschneiden der Vergleichsgruppen bei der akustischen Aufgabe nicht so überraschend, wie vielleicht initial vermutet.

Bei der Auswertung der individuellen Ergebnisse des visuell verbalen Gedächtnistasks der einzelnen Probanden innerhalb der Studiengruppe fiel auf, dass sich bis auf einen Probanden auch wirklich alle von der ersten zur zweiten Testung verbesserten – auch wenn die

Leistungssteigerungen unterschiedlich ausfielen. Nur dieser eine Proband konnte sich im Vergleich zur ersten Testung bei der zweiten Testung nicht mehr Worte einprägen, obwohl eigentlich zu erwarten gewesen wäre, dass der Einsatz der Loci-Methode auch bei ihm zu einer Steigerung hätte führen müssen. Allerdings fiel bei der genaueren Untersuchung ebenfalls auf, dass eben jener Proband bei der Frage nach der angewendeten Strategie (um sich die Wörter einzuprägen), nicht die Loci-Methode als seine Strategie angab. Er nutzte trotz der ausdrücklichen Anweisung selbige zu benutzen seine eigene Strategie, die er bereits bei der ersten Testung verwendet hatte. Es besteht also die Möglichkeit, dass sich dieser Proband nur deswegen nicht verbessert hat, weil er die Loci-Methode überhaupt nicht angewendet hat. Seine fehlende Leistungssteigerung darf in diesem Fall also nicht als Versagen der Loci-Methode gewertet werden. Auf dasselbe Problem stießen auch schon früher andere Untersuchungen. So machten Verhaeghen et al. mangelnde Compliance beim Einsatz der Loci-Methode vor allem unter älteren Leuten zu einem Teil dafür verantwortlich, dass ältere Menschen im Vergleich zu jüngeren in Untersuchungen zur Effektivität der Loci-Methode schlechter abschneiden (Verhaeghen, Marcoen et al. 1992, Verhaeghen und Marcoen 1996). Diese mangelnde Bereitschaft, die Loci-Methode einzusetzen, scheint umso ausgeprägter zu sein, wenn ein Proband bereits für sich selbst eine gewisse Strategie entwickelt hat, mit der er seiner Meinung nach gute Erfahrungen gemacht hat und die ihm dabei geholfen hat, in der ersten Testung relativ gut abzuschneiden (Verhaeghen und Marcoen 1996). Ein Gedanke, den ebenfalls Verhaeghen und Marcoen in diesem Zusammenhang äußerten, stellt allerdings in Frage, inwieweit die Aussage, welche Strategie tatsächlich benutzt wurde, denn auch wirklich verlässlich ist (Verhaeghen und Marcoen 1996). So besteht ja prinzipiell auch die – wenn auch geringe – Möglichkeit, dass der Proband zwar die Loci-Methode genutzt hat, es aber nur nicht zugeben wollte, weil er selbst bemerkt hat, dass er keine Verbesserung erzielen konnte. Eine Hypothese, die theoretisch möglich wenn auch nicht sehr wahrscheinlich ist.

Neben der Feststellung von Verhaeghen und Marcoen in Bezug auf die höhere Effektivität der Loci-Methode bei der Anwendung durch jüngere Menschen finden sich allerdings auch davon abweichende Untersuchungen. Diese weisen auf eine sehr ähnliche Effektivität der Loci-Methode im Sinne einer Leistungssteigerung bei jüngeren und älteren Probanden hin – auch wenn die Leistungen der jüngeren Teilnehmer insgesamt besser sind (Cavallini, Pagnin et al. 2003).

Da in dieser Studie nur jüngere Menschen bis zu einem Alter von 30 Jahren untersucht wurden und in den meisten Fällen ältere Menschen ab 60 Jahren aufwärts definiert wurden,

entfällt die direkte vergleichende Komponente zwischen Jung und Alt in dieser Untersuchung. Um zu der Diskussion um die Effektivität der Loci-Methode in der verschiedenen Altersstufen beitragen und Hinweise für die Richtigkeit des einen oder anderen Standpunktes liefern zu können, müsste diese Studie mit demselben Ablauf (oder zumindest mit dergleichen Methodik und Schwerpunktsetzung auf das verbale visuelle Gedächtnis) auch bei älteren Menschen durchgeführt werden. Da in dieser Studie der Trainingsumfang insgesamt relativ hoch, die einzelnen Trainingssessions mit maximal einer halben Stunde Länge dafür aber eher kurz waren und eine fundierte Einarbeitung in die Loci-Methode erfolgte, würde sich das Studiendesign dafür durchaus anbieten, zumal es Indizien dafür gibt, dass eine gute Einweisung in die Mnemotechnik und kurze Trainingseinheiten älteren Menschen zu Gute kommen bzw. zu lange Trainingssessions kontraproduktiv wirken (Verhaeghen, Marcoen et al. 1992).

## **2 Loci-Methode und Arbeitsgedächtnis bzw. fluide Intelligenz**

Die Hypothese, dass fluide Intelligenz und Arbeitsgedächtnis durch regelmäßiges Training und die Anwendung von Gedächtnisstrategien (wie der Loci-Methode) eine Verbesserung erführen, konnte nicht bestätigt werden. Das Ergebnis steht somit im Widerspruch zu Untersuchungen, die einen solchen Zusammenhang postulieren (McNamara und Scott 2001, Turley-Ames und Whitfield 2003, Carretti, Borella et al. 2007) und reiht sich auf der Seite der Arbeiten ein, die zu einem ähnlichen Ergebnis kamen (Ball, Berch et al. 2002, Cavallini, Pagnin et al. 2003, Lépine, Parrouillet et al. 2005, Hertzog, Kramer et al. 2008, Lövdén, Bäckman et al. 2010). Eine Erklärungsmöglichkeit dieses Ergebnisses liefern Lépine et al. gleich mit: laut ihrer Untersuchung zeigt sich kein positiver Einfluss von Gedächtnisstrategien auf die Kapazität und damit Leistungsfähigkeit des Arbeitsgedächtnisses, wenn die Aufgaben von den Probanden in einer vom Untersucher vorgegebenen Zeit erfüllt werden müssen. Laut ihrer Studie können die Techniken nur erfolgreich eingesetzt werden, wenn sich die Probanden für die Arbeitsgedächtnisaufgaben ihre Zeit selbst einteilen können. Dies war aber im Rahmen dieser Studie nicht bzw. nur sehr bedingt der Fall. Sowohl bei den Aufgaben BOMAT, Alternative Uses, dual n-back und bei der Einprägephase während des Backward Digit Span war den Probanden ein festes Zeitfenster vorgegeben, entweder durch den Untersucher (BOMAT, Alternative Uses) oder durch die Aufgabe an sich (sowohl beim Dual n-back als auch beim Backward Digit Span erschienen die relevanten Informationen in

kurzem zeitlichen Abstand hintereinander auf dem Computerbildschirm). Der einzige Bereich einer dieser Aufgaben, bei der die Probanden das Tempo selbst bestimmen konnten, war der Wiedergabebereich des Backward Digit Span. Hier waren den Teilnehmern keine zeitlichen Grenzen gesetzt. Der ZVT bildete in gewisser Weise eine Sonderrolle. Prinzipiell waren den Probanden bei der Bearbeitung keine Limits gesetzt, allerdings war und ist es ja Sinn, den Test in möglichst kurzer Zeit zu lösen.

Die Befürworter eines Zusammenhangs zwischen dem Einsatz von Gedächtnisstrategien und einer Verbesserung des Arbeitsgedächtnisses berufen sich vor allem auf ein Modell, das 1995 erstmals von Ericsson und Kintsch propagiert wurde und das auch von anderen Autoren aufgenommen und untersucht wurde (Cowan 1995, Engle 1999, Miyake 1999). Ericsson und Kintsch entwickelten anhand ihrer Untersuchungen das Konzept eines Langzeit-Arbeitsgedächtnisses als Teil des Langzeitgedächtnisses. Dieses Langzeit-Arbeitsgedächtnis ist dann wiederum direkt verknüpft und in Austausch mit dem altbekannten Kurzzeit-Arbeitsgedächtnis. Auf diese Weise kann das Arbeitsgedächtnis auf Ressourcen zurückgreifen, die dem Langzeitgedächtnis zugeordnet werden und somit zum Beispiel neue Informationen mit alten, bereits abgespeicherten Informationen verknüpfen und damit seine Kapazität erhöhen (Ericsson und Kintsch 1995). Ähnlich diesem Modell hat auch Baddeley, der Begründer des Arbeitsgedächtnismodells seine Theorie um den sogenannten „episodischen Puffer“ als Verknüpfung zwischen Arbeitsgedächtnis und Langzeitgedächtnis erweitert (Baddeley und Andrade 2000).

Folgt man dieser Annahme, dann sollte eigentlich ein regelmäßiges Training der Loci-Methode als eine der potentesten Gedächtnisstrategien eine Erhöhung der verfügbaren Informationen im Arbeitsgedächtnis bedingen und demzufolge zu besseren Leistungen in Tests führen, die die Kapazität und Leistungsfähigkeit des Arbeitsgedächtnisses messen (Kintsch 1994). Es würden die ursprünglichen Leistungsgrenzen des Arbeitsgedächtnisses aufgehoben und durch die verbesserten Wiedergabestrategien angehoben werden (McNamara und Kintsch 1996).

Diese Theorie konnte in vorliegender Arbeit allerdings nicht bestätigt werden. Neben der in Anlehnung an Lépine et al. gelieferten Erklärung gibt es aber auch noch weitere denkbare Ursachen.

So könnte das Ausbleiben von positiven Effekten des Loci-Trainings auf die fluide Intelligenz und das Arbeitsgedächtnis in dieser Studie auch in den Tests begründet liegen, die

zur Messung dieser Auswirkung eingesetzt wurden. Die Loci-Methode ist eine bildhafte Mnemotechnik, bei der in erster Linie verbale Gedächtnisinhalte miteinander verknüpft und abgespeichert werden. Demzufolge wären möglicherweise Tests zur Messung des Arbeitsgedächtnisses besser geeignet, die eine ausgeprägtere verbale Komponente aufweisen, ähnlich den Tests, wie sie zum Beispiel Carretti et al. und McNamara und Scott nutzten (McNamara und Scott 2001, Carretti, Borella et al. 2007). Die in der vorliegenden Studie genutzten Tests zur Messung des Arbeitsgedächtnisses bzw. insbesondere der mit dem Arbeitsgedächtnis eng verknüpften fluiden Intelligenz sind weitaus abstrakter und allgemeiner gestaltet als zum Beispiel der *Categorization Working Memory Span Task* (De Beni 1998), wie ihn Carretti et al. in ihrer Studie verwendeten. Die hier vorliegenden Tests legten das Gewicht außerdem vor allem auf den Gesichtspunkt der geistigen Geschwindigkeit (*mental speed*), also der Fähigkeit neue Informationen aufnehmen und verarbeiten zu können. Insbesondere BOMAT und ZVT sind Paradebeispiele dafür. Aufgrund der ausbleibenden Verbesserungen trotz intensiven Gedächtnistrainings bleibt allerdings festzuhalten, dass die Nutzung von Gedächtnisstrategien wie der Loci-Methode keinen Einfluss auf diese geistige Geschwindigkeit bzw. die fluide Intelligenz zu haben scheint.

Und das gilt, wie diese Untersuchung zeigen konnte, auch für die Gehirne junger Erwachsener. Die Aussage von Verhaeghen et al. (Verhaeghen, Marcoen et al. 1992) kann also ebenso wie Ergebnisse von Cavallini et al. (Cavallini, Pagnin et al. 2003) verallgemeinert werden und bleibt nicht auf ältere Menschen beschränkt.

Insgesamt zeigt sich also ein deutlich positiver Effekt der Loci-Methode auf das deklarative Gedächtnis und dies auch längerfristig; eine Übertragbarkeit dieser verbesserten Gedächtnisleistung auf andere kognitive Fähigkeiten lässt sich allerdings nicht bestätigen bzw. erkennen.

Passend dazu zeigten auch die Untersuchungen an Gedächtnissportlern als Meister des Einsatzes von Gedächtnistechniken keine strukturellen Unterschiede der Gehirne bzw. Unterschiede der allgemeinen Intelligenz von Gedächtnissportlern und Nicht-Gedächtnissportlern (Maguire, Valentin et al. 2003)

Auch dass die außergewöhnlichen Gedächtnisleistungen oft auf ein bestimmtes Gebiet beschränkt bleiben (Anders Ericsson 2003) scheint passend zu den Resultaten dieser Studie. Es lässt sich durch – im Falle von Gedächtnissportlern teils jahrelanges – Training zwar eine exorbitante Steigerung des deklarativen Gedächtnisses durch den Einsatz von

Mnemotechniken erzielen, signifikante Auswirkungen auf die fluide Intelligenz bzw. die allgemeinen kognitiven Fähigkeiten eines Menschen finden sich jedoch nicht.

### **3 Bildgebung**

#### **3.1 Strukturelle Bildgebung**

Es zeigten sich in keiner der Trainingsbedingungen signifikante Unterschiede bezüglich der grauen Substanz nach der Trainingsphase im Vergleich zum Ausgangsbefund (Weisig 2017). Dieses Ergebnis deckt sich mit früheren Untersuchungen, die zu einem ähnlichen Resultat kamen (Maguire, Valentine et al. 2003). Maguire et al. untersuchten in ihrer Studie (ebenfalls gemessen mittels Voxelbasierter Morphometrie) die Gehirne von erfahrenen Gedächtnissportlern im Vergleich zu Novizen in diesem Bereich. Während sie erwartungsgemäß deutliche Unterschiede in der Gedächtnisleistung der beiden Gruppen nachweisen konnten, zeigte die graue Substanz keinerlei signifikante Unterschiede. Aus der damaligen Arbeit und der untersuchten Personengruppe lässt sich für diese Studie vermutlich eine weitere Schlussfolgerung treffen: auch ein längerer Trainingszeitraum mit intensiverem Studium der Loci-Methode hätte zu keiner im MRT nachweisbaren morphologischen Änderung der grauen Substanz geführt. Schließlich untersuchten Maguire et al. Personen, die sich über viele Jahre hinweg mit Gedächtnistechniken beschäftigten und diese oft täglich nutzten und trainierten. Auch innerhalb der damaligen Studienpopulation zeigte sich keine Abhängigkeit der grauen Substanz von der Erfahrung oder den Leistungen, die die Gedächtnissportler erbrachten. Somit bleibt festzuhalten, dass mithilfe von Gedächtnistechniken wie der Loci-Methode zwar exorbitant stärkere Gedächtnisleistungen zu erbringen sind, diese Mnemotechniken aber nicht zwingend die morphologische Struktur des Gehirns als solche sichtbar verändern.

Eine potentielle Ursache für diese fehlende Veränderung bzw. möglicherweise erwartbare Volumenzunahme der grauen Substanz als Ausdruck einer stärkeren Gedächtnisleistung liegt gegebenenfalls im anatomischen Korrelat der grauen Substanz zugrunde.

Der Großteil und damit morphologisch bestimmende Teil der grauen Substanz des Gehirnes wird gebildet von den Zellkörpern der Neurone, dem Zytosoma bzw. Perikaryon. Dieses muss von den Dendriten als feinsten Verästelungen des Zellkörpers und dem Axon des Neurons (die Axone in ihrer Gesamtheit bilden dann die weiße Substanz) abgegrenzt werden. Um eine

relevante, auch mittels MRT sichtbar zu machende Größenzunahme der grauen Substanz durch den Einsatz von Mnemotechniken zu erreichen, könnte möglicherweise also entweder eine zahlenmäßige Zunahme (Hyperplasie) oder eine Volumenzunahme bei gleichbleibender Zellzahl (Hypertrophie) der Neurone nötig sein.

Ob es auch noch im Erwachsenenalter zu einer Neubildung von Neuronen kommt, ist ein viel und widersprüchlich diskutiertes Thema in der Neurowissenschaft. Während die vorherrschende Meinung bis Ende des 20. Jahrhunderts eine adulte Neurogenese trotz auch anderslautender Forschungsergebnisse (Altman 1962) eher anzweifelte (Rakic 1985, Gross 2000) und auch neuere Untersuchungen einer Neurogenese beim erwachsenen Menschen kritisch gegenüber stehen (Sorrells, Paredes et al. 2018), kamen zahlreiche Untersuchungen seitdem zu einem anderen Schluss (Eriksson, Perfilieva et al. 1998, Knoth, Singec et al. 2010, Spalding, Bergmann et al. 2013). Insbesondere auch in dem für die Bildung bzw. Konsolidierung des Arbeitsgedächtnisses eminent wichtigen Hippocampus scheint eine Neurogenese aus neuronalen Stamm- und Progenitorzellen auch im Erwachsenenalter zu erfolgen (Eriksson, Perfilieva et al. 1998). Täglich werden etwa 700 neue Nervenzellen pro Hippocampus eines Erwachsenen gebildet, was dazu führt, dass jährlich knapp zwei Prozent der Neurone im Hippocampus erneuert werden. Eine Quote, die auch im Alter beim Gesunden nur unwesentlich abfällt (Squire und Kandel 2009, Spalding, Bergmann et al. 2013).

Sollte tatsächlich auch beim Erwachsenen eine Neurogenese stattfinden, scheint diese jedoch nicht ausreichend zu sein bzw. durch Gedächtnistechniken nicht ausreichend stimuliert zu werden, um einen mittels MRT messbaren signifikanten Volumenunterschied in der grauen Substanz auszumachen.

Zudem scheint die Neogenese tatsächlich auf einige evolutionär sehr alte Gebiete des Gehirns wie den Hippocampus (speziell den Gyrus dentatus), die primären Riechzellen des Riechepithels sowie einige subventrikuläre Gebiete beschränkt – insbesondere der Neokortex weist vermutlich keine relevante Anzahl an neuronalen Stammzellen und daraus resultierende Neogenese auf (Huttner, Bergmann et al. 2014).

Insgesamt scheint also eine Volumenzunahme der grauen Substanz bedingt durch eine Neubildung von Neuronen und damit potentiell mögliche Hyperplasie sehr unwahrscheinlich – zumal es neben der Neubildung von Neuronen gleichzeitig mit fortschreitendem Alter auch zu einem zahlenmäßig weitaus größeren Untergang von Neuronen kommt.

Gegen die These einer primären Definition des Volumens der grauen Substanz in erster Linie über die Anzahl bzw. Größe der Neuronen spricht allerdings, dass in einigen Erkrankungen

eine normale Anzahl an zudem hypertrophierten Neuronen vorliegt, jedoch dennoch im MRT eine Atrophie der kortikalen Bereiche zu sehen ist.

Verfolgt man diesen Ansatz, muss ein Großteil der im MRT messbaren grauen Substanz des Neokortex durch das sogenannte Neuropil (also den „Neuronenfilz“, bestehend aus den dendritischen Verzweigungen der Neurone sowie den Gliafortsätzen der Gliazellen) generiert werden (Bothwell, Meredith et al. 2001). Das wiederum bedeutet allerdings, dass eine vermehrte dendritische Verzweigung und Ausbildung von Synapsen im Rahmen der neuronalen Plastizität prinzipiell eine Zunahme der Dichte und konsekutiv auch des Volumens der grauen Substanz nach sich ziehen könnte – was wiederum messbar sein müsste und z.B. im Rahmen des Einsatzes von Mnemotechniken oder bei Gedächtnissportlern der Fall sein könnte.

Dass es durchaus strukturelle Veränderungen im Bereich der grauen Substanz des Hippocampus durch langjährige Übung und Expertise im Bereich der Navigation und des räumlichen Vorstellungsvermögens geben kann, zeigten Maguire et al. in ihren Untersuchungen zu Londoner Taxifahrern (Maguire, Gadian et al. 2000). Jedoch scheint dieser Effekt trotz eines im Rahmen der Loci-Methode ebenfalls überdurchschnittlich beanspruchten räumlichen Vorstellungsvermögens nicht ausreichend für messbare strukturelle Änderungen zu sein. Zumindest ergibt sich weder aus dieser Arbeit noch aus einer späteren Arbeit von Maguire et al. (2003) ein Hinweis darauf.

### **3.2 Funktionelle Bildgebung**

In der funktionellen Bildgebung zeigten sich in dieser Untersuchung auf die Trainingsgruppen bezogen keine signifikanten Unterschiede in den Resting-State-Daten im Sinne signifikanter prä/post-Training-Veränderungen.

In einer weiterführenden Studie von Dresler et al. wurden die gewonnenen Resting-State-Daten jedoch zusätzlich noch mit den Resting-State-Daten von Gedächtnissportlern verglichen (Dresler, Shirer et al. 2017).

In den dort durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die mittels fMRT dargestellten neuronalen Netzwerke von Probanden nach Durchführung des Loci-Trainings (gleiches zugrunde liegende Probandenkollektiv wie in der vorliegenden Arbeit mit gleicher Einteilung der Trainingsgruppen und -bedingungen) während des Resting-States signifikante Ähnlichkeit mit den neuronalen Netzwerken von Gedächtnisathleten aufwiesen.

Interessanterweise war die Annäherung an das bei Gedächtnissportlern beobachtete Profil der funktionellen Kapazität bei den Testpersonen umso ausgeprägter, je besser diese in den Gedächtnisaufgaben außerhalb des MRTs abschnitten.

Dass Dresler et al. jedoch in den Vergleichen der einzelnen Trainingsgruppen keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen fanden, deckt sich mit den Ergebnissen der eigenen Studie, da sich auch hier keine signifikanten Unterschiede in der FWE-korrigierten funktionellen Konnektivität zwischen den betrachteten 71x71 ROI nach der Trainingsphase im Vergleich zum Ausgangsniveau fanden.

Während die Resting-State-Daten bzgl. der hier untersuchten Gruppen keine signifikanten Unterschiede zueinander aufwiesen, fanden sich mittels fMRT messbare signifikante Interaktionen zugunsten der Loci-Gruppe in den Enkodierungs- und Wiedergabeaufgaben.

Die beobachteten Veränderungen im dorsalen anterioren cingulären Kortex sowie im ventro- und dorsolateralen präfrontalen Kortex während der Enkodierung sowie die Veränderungen im linken Gyrus angularis, linken Parahippocampus und linken, medialen und rechten retrosplenischen Kortex während der Wiedergabe weisen erneut auf die bereits in früheren Untersuchungen herausgearbeitete besondere Relevanz dieser zerebralen Strukturen für das visuell-räumliche Gedächtnis und Gedächtnisaufgaben generell hin (Maguire, Valentine et al. 2003, Nyberg, Marklund et al. 2003, Kondo, Suzuki et al. 2005). Dies erscheint plausibel, da Gedächtnistechniken wie die Loci-Methode abstrakte und unzusammenhängende Informationen in geordnete, durch eine durch die gewählte Route hergestellte räumliche Beziehung stellen.

Im Detail stehen die Ergebnisse dieser Studie im Vergleich zu den Ergebnissen von Maguire et al. allerdings in einem gewissen Widerspruch: während Maguire et al. in ihren Untersuchungen eine vermehrte Aktivität im Bereich von hippocampalen und retrosplenischen Strukturen bei Gedächtnisathleten im Vergleich zu Normalpersonen fanden, konnte in der vorliegenden Studie bei den Probanden nach Loci-Training in diesen Bereichen interessanterweise sichtbar weniger Aktivität nachgewiesen werden. Maguire et al. begründeten die vermehrte Aktivierung primär als Ausdruck der Nutzung der Loci-Methode – sei es bei der Verknüpfung neuer Inhalte mit den Routenpunkten oder beim Abruf der auf diese Weise gespeicherten Gedächtnisinhalte. Folgt man dieser Theorie, hätte auch bei den Probanden nach Loci-Training eigentlich eine vermehrte Aktivierung auftreten müssen.

Ein möglicher Erklärungsansatz, warum es zu einer verminderten Aktivierung der oben genannten neuronalen Strukturen bei der Trainingsgruppe im Vergleich zu den

Kontrollgruppen kam, ist möglicherweise eine effizientere Wiedergabe der Informationen durch den Einsatz der Loci-Methode und damit ein messbar geringerer metabolischer Aufwand des Gehirnes zur Wiedergabe der Informationen. Auch die bei der im Rahmen der Enkodierung gefundene verminderte Aktivität im dorsalen anterioren cingulären Kortex sowie im linken ventro- und dorsolateralen PFC könnte in einer verbesserten Effizienz in der Speicherung von Informationen begründet sein.

Neben der Erklärung dieser verminderten Aktivität durch eine verbesserte Effizienz in der Wiedergabe ließe sich noch eine weitere, in eine ähnliche Richtung gehende Erklärung dafür finden. Während die Kontrollgruppen mit der Speicherung und Wiedergabe der Informationen ohne den Einsatz der Loci-Methode an ihre persönlichen Grenzen stießen und daher eine nahezu vollständige Auslastung ihrer funktionellen zerebralen Kapazität angenommen werden kann, scheint die Herausforderung der Trainingsgruppe durch die Gedächtnisaufgabe geringer gewesen zu sein. Zumindest lassen ausgeprägte Ceiling-Effekte der Leistungen in der Trainingsgruppe post-Training sowohl in dieser Studie als auch bei Dresler, Shirer et al. diesen Rückschluss zu (Dresler, Shirer et al. 2017).

Maguire et al. nutzten in ihren Untersuchungen deutlich anspruchsvollere Tests (Maguire, Valentine et al. 2003), sodass die Gedächtnisathleten im Einsatz der Gedächtnistechniken ggf. mehr gefordert waren, Deckeneffekte nicht in diesem Ausmaße auftraten und daher auch eine erhöhte Auslastung der (durch den Einsatz von Gedächtnistechniken überlegenen) funktionellen Kapazität der Gedächtnissportler zu finden war.

Dass die verminderte Aktivität im präfrontalen Kortex sowie in retrosplenischen und (para)hippocampalen Strukturen bei der Trainingsgruppe im Vergleich zu den Kontrollgruppen insgesamt ein Ausdruck für eine verminderte Nutzung dieser Strukturen im Rahmen des Einsatzes von Gedächtnistechniken generell ist, scheint unwahrscheinlich. Dazu ist eine Relevanz dieser Strukturen im Rahmen von Gedächtnistechniken und des deklarativen Gedächtnisses im Allgemeinen zu oft nachgewiesen worden (Stern, Corkin et al. 1996, Gabrieli, Brewer et al. 1997, Squire und Kandel 2009, Woollett, Spiers et al. 2009).

Insbesondere der dorsolaterale präfrontale Kortex scheint mit dem Einsatz von Gedächtnistechniken stark verknüpft zu sein (Dresler, Shirer et al. 2017), ganz besonders während der Verarbeitung von Informationen mithilfe von visuell-räumlichen Gedächtnistechniken wie der Loci-Methode (Kondo, Suzuki et al. 2005). Ältere Untersuchungen zeigten, dass durch Verletzungen oder Schäden in diesem Bereich

insbesondere der Einsatz von Gedächtnistechniken eingeschränkt ist bzw. Personen mit Beeinträchtigungen in diesem Hirnareal überproportional schlecht in Gedächtnisaufgaben abschneiden, wenn sie Gedächtnisstrategien anwenden (Chase, Clark et al. 2008, Manenti, Tettamanti et al. 2010).

Letztlich lässt sich der Widerspruch zwischen den Ergebnissen dieser Studie und den Resultaten von Maguire et al. jedoch nicht ohne weiteres auflösen und sollte Anlass zu weiteren Forschungsarbeiten in diesem Bereich geben.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Task-Effekte durch das Mnemo-Training stark, Resting-State-Effekte nur schwach ausgeprägt sind, was die Interpretation zulässt, dass die MRT-Daten die Ergebnisse der behavioralen Daten bestätigen. In beiden Testmodalitäten (sowohl beim fMRT als auch bei den Untersuchungen außerhalb des Tomographen) fanden sich jeweils starke Effekte des Gedächtnistrainings auf direkt damit in Zusammenhang stehende Gedächtnisaufgaben, die Effekte ließen sich jedoch nicht auf andere kognitive Tests außerhalb der Encodierung und Wiedergabe von rein deklarativen Gedächtnisinhalten übertragen.

Postuliert man, dass mit den im fMRT sichtbar gemachten Änderungen der neuronalen Netzwerke quasi neuronale Plastizität gemessen wird und neuronale Plastizität die Grundlage von Langzeitspeicherung von Gedächtnisinhalten ist (Engert und Bonhoeffer 1999), dann erscheint jedoch plausibel, dass durch Mnemotechniken das deklarative Gedächtnis als Teil des Langzeitgedächtnisses deutlich gestärkt werden und dies mittel fMRT nachgewiesen werden kann.

## **4 Potentielle methodische Fehler und Störvariablen**

### *Probandenaufteilung auf die Gruppen*

Wie unter Kapitel C2 *Versuchspersonen* erläutert, fand die Aufteilung der Probanden auf die Gruppen semi-randomisiert statt. Die Zuordnung geschah prinzipiell zufällig, allerdings wurde darauf geachtet, dass die Leistungsfähigkeit der einzelnen Gruppen im Durchschnitt sehr ähnlich war. Dies wurde an den Ergebnissen der Vortestung im LGT und CFT festgemacht. Auf diese Weise sollte eine möglichst gute Vergleichbarkeit der einzelnen Gruppen auf Grund der ähnlichen durchschnittlichen Leistungsstärke garantiert werden. Es

sollte so verhindert werden, dass sich in einer Gruppe besonders viele starke Probanden und in einer anderen Gruppe besonders viele schwächere Probanden wiederfanden, was bei der Auswertung zu Verzerrungen und Fehlinterpretationen der Ergebnisse hätte führen können. Eine im Vergleich zu den anderen Gruppen insgesamt deutlich stärker besetzte Studiengruppe hätte die Frage aufkommen lassen, inwieweit die Ergebnisse wirklich durch das Training bedingt waren, oder ob nicht in erster Linie die gute Merkfähigkeit der Probanden generell für die Diskrepanz zu den Kontrollgruppen verantwortlich waren. Andersherum hätte eine zu schwach besetzte Studiengruppe die tatsächlichen Unterschiede als zu gering eingeschätzt. Durch die hier angewendete Verteilung der Versuchspersonen konnte diese mögliche Störvariable eliminiert werden.

#### *Ablauf der Untersuchung, Uhrzeit der Testungen und Aufmerksamkeit der Probanden*

Um In-Test Variabilität so gering wie möglich zu halten, wurde jede Testung in der exakt gleichen Reihenfolge durchgeführt. Auch die Tageszeit wurde möglichst konstant gehalten. Für diese Studie bedeutete das, dass alle Testungen nachmittags oder am frühen Abend stattfanden. Ziel dabei war es, den Einfluss der zirkadianen Rhythmik auf Gedächtnisleistungen zu reduzieren. Dass es diesen Einfluss gibt, ist belegt (Carrier und Monk 2000), auch wenn die Zusammenhänge teilweise unterschiedlich diskutiert werden (Kleitmann 1963, Colquhoun 1971, Folkard 1979, Folkard 1983, Monk, Weitzman et al. 1983, Monk und Carrier 1998). Da die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der zirkadianen Rhythmik aber auch interindividuell verschieden ist, und jeder Mensch – bedingt durch die Lebensumstände und genetische Faktoren (Duffy, Zeitzer et al. 2002, Scheiermann, Kunisaki et al. 2013, Krishnan und Lyons 2015, Bass und Lazar 2016) – seine eigene zirkadiane Rhythmik besitzt (Folkard, Wever et al. 1983, Folkard, Åkerstedt et al. 1999), kann nicht ausgeschlossen werden, dass es trotz des Versuches, eine zeitliche Vergleichbarkeit zu schaffen, aufgrund verschiedener Chronotypen Leistungsunterschiede unter den Probanden zu eben diesen Zeiten gab – es ist sogar eher wahrscheinlich (Facer-Childs, Campos et al. 2019). Zwar wurde von den Probanden ein geregelter Schlaf–Wach–Rhythmus verlangt und sie wurden auch aufgefordert, diesen insbesondere vor den großen Testungen einzuhalten, allerdings war damit das Problem von potentiell sehr unterschiedlichen Chronotypen innerhalb des Probandenkollektivs nicht gelöst. Eine Testung auf verschiedene Chronotypen fand jedoch nicht statt, da angenommen wurde, dass sich etwaige Abweichungen der zirkadianen Rhythmik der Probanden relativ gleichmäßig auf die verschiedenen Gruppen verteilten und damit der Einfluss auf die durchschnittlichen Ergebnisse gering war.

Um die Aufmerksamkeit der Probanden direkt beurteilen zu können, wurden die Ergebnisse des PVT miteinander verglichen. Da sich auch hierbei im Mittel keine relevanten Unterschiede zwischen den Gruppen und den Testungen ergaben, konnte angenommen werden, dass die Probanden bei beiden Testungen eine ähnliche Aufmerksamkeit und Vigilanz zeigten – ein Hinweis darauf, dass dadurch das Ergebnis der Testungen nicht relevant beeinflusst wurde.

#### *Abstand der Testungen und Training*

Da sich die Abstände zwischen den Testungen für die verschiedenen Trainingsgruppen nicht relevant unterschieden, kann davon ausgegangen werden, dass es keine Beeinflussung der Ergebnisse der zweiten Testung und der Nachtestung durch den Abstand von der jeweils zuvor stattgefundenen Testung gab. Insgesamt wiesen thematisch ähnliche Studien, die sich ebenfalls mit dem Einsatz und den Effekten der Loci-Methode auseinandersetzten, eine große Spannweite des Trainingszeitraumes auf. Beispielhaft wären hier Zeiträume von nur einem Tag bis zu einem Jahr zu nennen (Kliegl, Smith et al. 1987, Cavallini, Pagnin et al. 2003, Kondo, Suzuki et al. 2005, Engvig, Fjell et al. 2010).

#### *Motivation*

Ein letzter wichtiger Störfaktor ist die Motivation und die persönliche Ambition, die die Probanden in die Studie mitbringen. Es ist weitgehend akzeptiert, dass motivierte und wissbegierige Personen bessere Gedächtnisleistungen erbringen als nicht motivierte (Locke und Braver 2008, Robinson, Stevens et al. 2012) und dass es unterschiedliche Formen der Motivation gibt (Deci 1985, Tremblay, Goldberg et al. 1995, Elliot und McGregor 2001). Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wurden der Need for Cognition-Test und der Achievement Goal Questionnaire durchgeführt. Eine Verschiebung der durchschnittlichen Motivation und Wissbegier zugunsten einer Gruppe hätte so erkannt werden können. Allerdings zeigte sich in dieser Hinsicht kein signifikanter Unterschied im NFC, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Störfaktor *Motivation und Wissbegier* bei dieser Studie vor allem bei der ersten Testung keine relevante Rolle spielte. Nicht ausschließen lässt sich jedoch eine Ab- bzw. Zunahme des Interesses und der Motivation im Laufe der Zeit, da die Ergebnisse vor der zweiten Testung nicht reevaluiert wurden. Es besteht die Möglichkeit, dass auch die Einteilung zu einer der drei Gruppen nach der ersten Testung einen Einfluss auf die weitere Motivation hatte – angenommen zum Beispiel ein Proband wollte unbedingt in die Studiengruppe um eine Mnemotechnik zu erlernen und wurde aber der passiven Kontrolle

zugeteilt. Dieser potentielle Motivationsverlust (ebenso wie Schwankungen durch persönliche Stimmungslage, private oder berufliche Probleme usw.) ließ sich leider nicht verhindern. Es wurde allerdings versucht insbesondere dem Problem der Gruppenzuordnung entgegenzuwirken, indem allen Probanden der Kontrollgruppe angeboten wurde, nach Ablauf der Studie an einem Trainingsseminar zur Erlernung der Loci-Methode teilzunehmen.

Um die Größenordnung dieser zusätzlichen Störvariablen abzuschätzen, wurde im Sinne einer visuellen Analogskala die Motivation der Probanden direkt vor den Testungen noch einmal erfragt. Obwohl sich über alle Gruppen hinweg ein leichter Motivationsverlust von der ersten zur zweiten Testung feststellen lässt, dürften die Motivationsunterschiede in dieser Studie nicht ausreichend sein, um eine gravierende Rolle beim Zustandekommen der Ergebnisse gespielt zu haben. Nichtsdestotrotz ist es dennoch wichtig die Motivation zumindest im Hinterkopf zu behalten und bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

## **5 Ausblick**

In dieser Studie konnten die Effekte von Gedächtnistraining anhand der Nutzung der Loci-Methode auf das deklarative Gedächtnis unter Beweis gestellt werden. Zudem konnten in funktionellen MRT-Untersuchungen nachgewiesen werden, dass bei der Enkodierung und Wiedergabe von deklarativen Gedächtnisinformationen eine Änderung der Aktivität in multiplen zerebralen Arealen stattfindet – darunter im anterioren cingulären Kortex, im linken ventro- und dorsolateralen präfrontalen Kortex, im linken Gyrus angularis, im linken Parahippocampus sowie im medialen und rechten retrosplenischen Kortex. Interessanterweise und anders als bei früheren Untersuchungen (Maguire, Valentine et al. 2003) zeigte sich jedoch eine Abnahme der Aktivität in einigen dieser Bereiche durch den Einsatz der Loci-Methode. Erklärungsansätze für diesen Umstand wurden in dieser Arbeit aufgeführt, letztlich ist dieser Unterschied zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht eindeutig aufzulösen. Zur Klärung sind daher weiterführende Studien nötig.

Die oben erwähnten Effekte von Gedächtnistraining auf den anterioren cingulären Kortex, den linken ventro- und dorsolateralen präfrontalen Kortex, den linken Gyrus angularis, den linken Parahippocampus sowie den medialen und rechten retrosplenischen Kortex unterstreichen erneut deren Relevanz für das deklarative Gedächtnis.

Dennoch ist weitere Forschung zum besseren Verständnis unseres Gedächtnisses und der dafür genutzten neuronalen Netzwerke unserer Gehirne notwendig. Insbesondere die unter

anderem auch von Dresler et al. beobachteten Unterschiede bezüglich der Organisation der neuronalen Plastizität zwischen Resting–State–Phasen und Phasen der tatsächlichen Enkodierung sind bis dato noch weitgehend unklar (Dresler, Shirer et al. 2017) und sollten weiter erforscht werden.

Im Rahmen der Vortests wurden die Probanden unter anderem darum gebeten, mittels der Santa Barbara Sense of Direction Scale eine Einschätzung ihrer räumlichen Orientierungsfähigkeiten abzugeben. Eine Beziehung zwischen dem räumlichen Vorstellungsvermögen und dem erfolgreichen Einsatz der Routenmethode (in Form von Enkodierung und Wiedergabe möglichst vieler deklarativer Gedächtnisinhalte) wurde in dieser Arbeit nicht genauer untersucht, wäre aber aufgrund der Eigenschaften der Loci-Methode durchaus denkbar. Sollte tatsächlich eine Korrelation vorliegen, könnte derjenige Personenkreis einfach und unkompliziert (z.B. anhand von Fragebögen) herausgefiltert werden, der durch den Einsatz der Loci-Methode ganz besonders profitiert und seine deklarative Gedächtnisleistung mit dann relativ geringem Aufwand exorbitant verbessern kann. Einsatzgebiete sind neben dem kleinen Feld des Gedächtnissports insbesondere im schulischen oder auch studentischen Alltag zu sehen.

Schlussendlich muss in einer stets weiter alternden Gesellschaft mit einer Zunahme der Anzahl degenerativer Hirnerkrankungen wie z.B. dem weiten Formenkreis der Demenzen die Frage erlaubt sein, inwieweit die Nutzung von (auch in früheren Jahren erlernten) Mnemotechniken diese zerebralen Abbauprozesse verlangsamen kann bzw. den betroffenen Menschen zumindest in Alltagssituationen eine Hilfestellung bietet. Die Studienlage hierzu ist leider äußerst rar, es gibt diskrete Hinweise, dass zumindest Arbeitsgedächtnistraining in frühen Stadien von Alzheimer–Demenz leichte positive Effekte aufweist (Huntley, Hampshire et al. 2017).

## **F Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wurden der Einsatz der Loci-Methode (oder auch genannt Routenmethode), und ihr Effekt auf die Gedächtnisleistungen junger, gesunder, männlicher Probanden untersucht. Die Loci-Methode gilt als eine der potentesten Gedächtnistechniken, da sie alle für eine gute Gedächtnistechnik relevanten Eigenschaften verkörpert: Ordnung/Organisation, Ausschmückung/Ausarbeitung und das Bilden von gedanklichen Bildern bzw. Metaphern.

Eine Route enthält zahlenmäßig und in der Reihenfolge eindeutig festgelegte jedoch individuell selbst bestimmbare Routenpunkte, die als Anker für die eigentlich zu memorierenden Informationen dienen. Die Verknüpfung der Information mit den Routenpunkten (in der Regel ein Informationsinhalt pro Routenpunkt) erfolgt über möglichst lebendige oder auch abstrakte mentale Bilder, sodass neben der durch die Routenpunkte vorgegebenen Organisation auch die Komponenten der Ausschmückung und des Generierens von mentalen Bildern erfüllt werden.

Das Gedächtnis an sich kann – je nach theoretischem Modell – in verschiedene Unterformen unterteilt werden und die an der Gedächtnisbildung beteiligten neuronalen Strukturen können mittels funktioneller Magnetresonanztomographie sichtbar gemacht werden. In dieser Arbeit lag der Schwerpunkt auf der Erforschung der Auswirkungen von Gedächtnistraining zum einen auf das deklarative Gedächtnis und zum anderen auf das Arbeitsgedächtnis und die fluide Intelligenz, zudem sollten durch das Training hervorgerufene morphologische und/oder funktionelle neuronale Änderungen aufgezeichnet werden.

Aus diesen Gesichtspunkten ergaben sich folgende Fragestellungen:

- Wird deklaratives Lernen durch den Einsatz von Mnemotechniken, in diesem Fall der Loci-Methode, signifikant verbessert?
- Finden sich durch den Einsatz der Loci-Methode signifikante Verbesserungen nicht nur des deklarativen Gedächtnisses sondern auch der fluiden Intelligenz und des Arbeitsgedächtnisses?
- Wird durch ein sechswöchiges Training in der Nutzung der Loci-Methode eine im MRT sichtbare Änderung der neuronalen Strukturen, die für das Memorieren und Wiedergeben von deklarativen Gedächtnisinhalten genutzt werden, erreicht?

Das Probandenkollektiv zur Klärung dieser Fragen umfasste 51 junge und gesunde Männer ohne Vorerfahrung im Einsatz der Loci-Methode, aufgeteilt auf drei verschiedene Gruppen zu je 17 Probanden (angepasst für Alter und Intelligenz, gemessen mittels CFT 20 sowie LGT-3) sodass sich folgende Trainingsbedingungen ergaben:

1. Trainingsgruppe, auch Studien- oder Loci-Gruppe genannt

(diese Gruppe wurde in der Nutzung der Loci-Methode unterrichtet und trainierte selbige zwischen einer ersten Ausgangstestung und einer zweiten Verlaufstestung über sechs Wochen auf der Gedächtnisplattform [www.memocamp.de](http://www.memocamp.de))

2. Aktive Kontrollgruppe

(diese Gruppe absolvierte in den sechs Wochen zwischen erster und zweiter Testung ein spezifisches Arbeitsgedächtnistraining, jedoch kein Training der Loci – Methode)

3. Passive Kontrollgruppe

(diese Gruppe absolvierte in den sechs Wochen zwischen erster Ausgangstestung und zweiter Verlaufstestung weder ein Arbeitsgedächtnistraining noch ein Training der Loci – Methode)

In den Ergebnissen zeigten sich eine signifikante Verbesserung des verbalen visuellen Gedächtnisses und ein nichtsignifikanter Trend zur Verbesserung des verbalen auditiven Gedächtnisses durch den Einsatz der Loci-Methode. Eine positive Beeinflussung des Arbeitsgedächtnisses sowie der fluiden Intelligenz und allgemeiner kognitiver Fähigkeiten war jedoch nicht nachzuweisen. In den strukturellen MRT-Untersuchungen konnte keine Zunahme der grauen Substanz durch den Einsatz der Loci-Methode nachgewiesen werden, es fanden sich jedoch funktionelle Änderungen in den Enkodierungs- und Wiedergabeaufgaben im MRT, die sich als Aktivitätsabnahme im anterioren cingulären Kortex, im linken ventro- und dorsolateralen präfrontalen Kortex, im linken Gyrus angularis, im linken Parahippocampus sowie im medialen und rechten retrosplenischen Kortex darstellten.

Somit konnte die These, dass deklaratives Lernen durch den Einsatz der Loci-Methode signifikant verbessert werden kann, bestätigt werden. Auch die These, dass das sechswöchige

Training der Loci-Methode eine im MRT sichtbare Änderung der für das Memorieren und Wiedergeben von deklarativen Gedächtnisinhalten genutzten neuronalen Strukturen hervorruft, konnte auf funktioneller Ebene bestätigt werden.

Die Hypothese, dass durch gezieltes deklaratives Gedächtnistraining auch Arbeitsgedächtnis und fluide Intelligenz verbessert werden, muss verworfen werden.

Zusammenfassend unterstützt die vorliegende Arbeit damit vorangegangene Forschungsergebnisse, die ebenfalls eine signifikante Verbesserung des deklarativen Gedächtnisses durch den Einsatz von Gedächtnistechniken nachgewiesen haben, einen Transfer auf andere Bereiche des Gedächtnisses wie das Arbeitsgedächtnis und die fluide Intelligenz jedoch negieren. Diese Arbeit zeigt insbesondere, dass im Einsatz von Gedächtnistechniken völlig unerfahrene junge Menschen durch die Nutzung der Loci-Methode bereits in einem kurzen Zeitraum ausgeprägte und vor allem auch lang anhaltende Steigerungen ihrer deklarativen Gedächtnisleistungen erzielen und dass diese Änderung der Leistungsfähigkeit tatsächlich ein funktionell messbares neuronales Korrelat besitzt. Durch den Einsatz der Loci-Methode findet sich eine Änderung der mittels fMRT gemessenen Aktivität in mehreren kortikalen Bereichen sowohl während des Memorierens als auch der Wiedergabe der Gedächtnisinhalte. Im Detail beobachtet man eine Abnahme der Aktivität im dorsalen anterioren cingulären Kortex sowie im linken ventro- und dorsolateralen präfrontalen Kortex während des Memorierens und eine Abnahme der Aktivität im linken Gyrus angularis, linken Parahippocampus, und im linken, medialen und rechten retrosplenischen Kortex während der Wiedergabe der memorierten Inhalte.

Insbesondere diesbezüglich sollten auch zukünftige Studien durchgeführt werden, um ein besseres Verständnis der an den Gedächtnisprozessen beteiligten neuronalen Strukturen und Netzwerke sowie ihrer Plastizität zu erlangen.

## G Anhang

### Resting-State Vigilanz-Fragebogen

*Während des ersten Resting State Scans (8 Minuten Augen zu)*

- war ich durchgehend wach
- war ich teilweise müde
- habe ich mitunter etwas ‚gedöst‘
- bin ich zeitweise eingeschlafen
- habe ich die Augen versehentlich offen gehalten

*Während der Lernaufgabe habe ich in den Pausen*

- die Augen offen gehalten
- die Augen geschlossen gehalten

*Während des zweiten Resting State Scans (8 Minuten Augen zu)*

- war ich durchgehend wach
- war ich teilweise müde
- habe ich mitunter etwas ‚gedöst‘
- bin ich zeitweise eingeschlafen
- habe ich die Augen versehentlich offen gehalten

**Wortliste MRT, Version A**

Bienenstock	Industrie	Knopf	Apfel	Note	Kirmes
Holz	Geld	Schachtel	Steckdose	Pyramide	Wetter
Roller	Patient	Papier	Bett	Gewei	Schach
Elefant	Lama	Hirsch	Kellner	Wasser	Tinte
Griff	Familie	Bohne	Tastatur	Schlaf	Karte
Vorhang	Kanne	Boden	Gold	Vogel	Hemd
Handtasche	Landschaft	Zaun	Teller	Zebra	Geschirr
Eis	Drache	Weste	Lkw	Zeitschrift	Auto
Wirbel	Farbe	Sekretärin	Netz	Teig	Rauch
Marine	Lachs	Späne	Beleg	Popcorn	U-Bahn
Ball	Spinne	Lineal	Schiedsrichter	Sänger	Frau
Palast	Zimmer	Bach	Weg	Schrott	Socken

**Wortliste MRT, Version B**

Diskette	Museum	Dieb	Regal	Tiger	Gabel
Ring	Stadt	Lappen	Zitrone	Limonade	Himmel
Abfall	Flasche	Nase	Hund	Tulpe	Kuh
Diamant	Deckel	Fax	Kiste	Gruppe	Wanne
Blut	Kilometer	Wolle	Statue	Brot	Wohnung
Porto	Wanze	Bühne	Schloss	Reifen	Maus
Eisenbahn	Sammlung	Stall	Retter	Hopfen	Traktor
Meer	Klebstoff	Dose	Lehrerin	Kaffee	Musik
Ritter	Küche	Kranken- schwester	Tür	Schmied	Stuhl
Gemälde	Storch	Zollstock	Fahne	Schnecke	Bronze
Brief	Bluse	Dudelsack	Radio	Garten	Mann
Schlange	Küste	Fluss	Nacht	Biss	Knöchel

**Wortliste Audiodatei, Version A:**

Apfel	Stehlen	heiß	Netz	LKW
Gemüse	Räuber	Schnee	Insekt	Bus
Orange	Gauner	warm	behaart	Fahrzeug
Kiwi	Einbrecher	Winter	Schreck	Wagen
Zitrone	Geld	Eis	Fliege	Vehikel
reif	Polizist	nass	Schlange	fahren
Baum	böse	kühl	krabbeln	Jeep
Banane	ausrauben	frostig	Tarantel	Mercedes
Erdbeere	Gefängnis	Hitze	Gift	Rennen
Kirsche	Handtasche	Wetter	Biss	Schlüssel
Korb	Ganove	Frost	gruselig	Garage
Saft	Verbrechen	Luft	Tier	Straße
Salat	Bank	zittern	hässlich	Limousine
Schale	Bandit	Arktis	Fühler	PKW
Bowle	kriminell	frieren	klein	Taxi

**Wortliste Audiodatei, Version B:**

Butter	Krankenschwester	weiß	Tiger	Frau
Nahrung	krank	dunkel	Zirkus	Gatte
Essen	Visite	Katze	Dschungel	Herr
Sandwich	Medizin	verkohlt	Dompteur	Dame
Roggen	Gesundheit	Nacht	Höhle	Maus
Marmelade	Krankenhaus	Beerdigung	Zoo	maskulin
Milch	Zahnarzt	Farbe	Afrika	Vater
Mehl	Arzt	Trauer	Mähne	stark
Gelee	übel	blau	Käfig	Freund
Teig	Patient	Tod	Raubkatze	Bart
Kruste	Praxis	Tinte	Gebrüll	Person
Schnitte	Stethoskop	Schatten	wild	stattlich
Wein	Chirurg	Kohle	Panther	muskulös
Laib	Klinik	braun	Jagd	Anzug
Toast	Heilung	grau	Puma	alt

**Wortliste Audiodatei, passive Wiedergabe, Version A**

<i>False memories:</i>	<b>Obst</b>	<b>Dieb</b>	<b>kalt</b>	<b>Spinne</b>	<b>Auto</b>
<i>Listen Items:</i>	Apfel	stehlen	heiß	Netz	LKW
	Zitrone	Geld	Eis	Fliege	Vehikel
	Kirsche	Handtasche	Wetter	Biss	Schlüssel
	Schale	Bandit	Arktis	Fühler	PKW
<i>Distraktoren:</i>	Pause	Staat	Nähgarn	Sand	Wasser
	Oberhaupt	wehen	Stille	Gebäude	Himmel
	robust	Plüsch	offen	stabil	zeichnen

**Wortliste Audiodatei, passive Wiedergabe, Version B**

<i>False memories:</i>	<b>Brot</b>	<b>Doktor</b>	<b>schwarz</b>	<b>Löwe</b>	<b>Mann</b>
<i>Listen Items:</i>	Butter	Kranken-	weiß	Tiger	Frau
		schwester			
	Roggen	Gesundhei	Nacht	Höhle	Maus
	Teig	Patient	Tod	Raubkatze	Bart
	Laib	Klinik	braun	Jagd	Anzug
<i>Distraktoren:</i>	Temperament	Flagge	Strecke	Stuhl	Tür
	steil	U-Bahn	groß	Palast	Klebstoff
	Konzert	niedrig	Emblem	Uniform	Dorf

**Backward Digit-Span Lösungen, Version A**

9 7 6  
 5 7 3  
 7 1 4 5  
 6 9 3 8  
 5 2 9 6 3  
 1 7 4 9 6  
 7 2 4 8 1 9  
 2 8 4 5 3 6  
 6 4 3 5 8 2 1  
 5 7 9 4 1 8 2  
 4 7 1 5 9 2 8 3  
 7 4 6 2 8 1 9 5  
 7 5 2 9 4 7 6 1 8  
 2 7 6 4 8 1 9 3 5  
 6 4 3 1 5 9 8 4 7 2  
 3 8 2 7 5 4 3 9 1 6  
 8 6 2 9 1 4 0 3 5 2 7  
 8 2 5 3 0 7 1 6 9 3 4  
 6 8 3 9 2 7 4 1 0 7 5 8  
 1 5 2 6 9 7 3 6 8 1 0 4  
 6 0 3 1 9 2 5 8 4 7 0 2 3  
 2 5 9 7 4 8 1 9 0 6 3 1 5  
 8 5 3 0 4 9 1 6 7 4 3 8 5 2  
 9 7 1 8 2 4 0 1 9 3 5 8 2 6  
 1 2 8 5 3 4 6 3 8 2 9 5 1 7 4  
 2 8 1 4 9 7 5 1 8 2 6 4 5 9 7

**Backward Digit-Span Lösungen, Version B**

3 9 4  
 6 2 5  
 4 1 8 3  
 5 9 7 1  
 2 7 9 2 6  
 7 2 5 8 4  
 6 8 2 5 1 7  
 4 6 9 1 3 8  
 8 2 1 9 3 7 4  
 5 6 3 9 2 1 8  
 4 2 1 7 9 5 8 2  
 7 5 6 4 8 2 9 1  
 8 5 7 9 2 7 4 1 6  
 5 7 2 4 6 1 8 3 9  
 6 2 3 4 5 1 8 9 7 4  
 6 3 2 8 5 7 3 4 1 9  
 7 2 5 3 0 4 1 9 2 6 8  
 4 3 9 6 1 7 0 3 5 2 8  
 8 5 7 0 1 4 7 2 9 3 8 6  
 4 0 1 8 6 3 7 9 6 8 5 1  
 3 2 0 7 4 8 5 2 9 1 3 0 6  
 5 1 3 6 0 9 2 8 4 7 9 5 2  
 2 5 8 3 4 7 6 1 9 4 0 3 5 8  
 6 2 8 5 3 9 1 0 4 2 8 1 7 9  
 4 7 1 5 9 2 8 3 6 4 3 5 8 2 1  
 7 9 5 4 6 2 8 1 5 7 9 4 1 8 2

## Trainingsplan

### Trainingswoche 1:

- Tag 1: Üben der MPI-Route
- Tag 2: Erstellen einer weiteren, individuellen, 75 Items umfassenden Route
- Tag 3: Üben der neuen 75 Item-Route
- Tag 4: Üben der MPI-Route
- Tag 5: Erstellen einer neuen 50 Items umfassenden Route (50 Item-Route 1)
- Tag 6: Üben der neu erstellten 50 Item-Route 1
- Tag 7: Übungstag am MPI (Üben der MPI-Route)

### Trainingswoche 2:

- Tag 1: Üben der 50 Item-Route 1
- Tag 2: Üben der MPI-Route
- Tag 3: Üben der individuellen 75 Item-Route
- Tag 4: Üben der 50 Item-Route 1
- Tag 5: Üben der MPI-Route
- Tag 6: Üben der individuellen 75 Item-Route
- Tag 7: Übungstag am MPI (Üben der 50 Item-Route 1)

### Trainingswoche 3:

- Tag 1: Erstellen einer neuen 50 Item-Route (50 Item-Route 2)
- Tag 2: Üben der 50 Item-Route 2
- Tag 3: Üben der MPI-Route
- Tag 4: Üben der 50 Item-Route 1
- Tag 5: Üben der individuellen 75 Item-Route
- Tag 6: Üben der 50 Item-Route 2
- Tag 7: Übungstag am MPI (Einführung in die Memocamp-Rubrik „Abstrakte Bilder“)

## Trainingswoche 4:

- Tag 1: Üben der MPI-Route
- Tag 2: Üben der 50 Item-Route 1, Rubrik „abstrakte Bilder“
- Tag 3: Üben der individuellen 75 Item-Route
- Tag 4: Üben der MPI-Route
- Tag 5: Üben der 50 Item-Route 1, Rubrik „abstrakte Bilder“
- Tag 6: Üben der 50 Item-Route 1
- Tag 7: Übungstag am MPI (Üben der individuellen 75 Item-Route)

## Trainingswoche 5:

- Tag 1: Üben der MPI-Route
- Tag 2: Üben der 50 Item-Route 2
- Tag 3: Üben der individuellen 75 Item-Route
- Tag 4: Üben der 50 Item-Route 1, Rubrik „abstrakte Bilder“
- Tag 5: Üben der MPI-Route
- Tag 6: Üben der 50 Item-Route 2
- Tag 7: Übungstag am MPI (Üben der individuellen 75 Item-Route)

## Trainingswoche 6:

- Tag 1: Üben der 50 Item-Route 1
- Tag 2: Üben der MPI-Route
- Tag 3: Üben der 50 Item-Route 2
- Tag 4: Üben der individuellen 75 Item-Route
- Tag 5: Üben der 50 Item-Route 1
- Tag 6: kein Training
- Tag 7: Termin der zweiten Testung

## H Literaturverzeichnis

Abraham, W. C. and M. F. Bear (1996). "Metaplasticity: the plasticity of synaptic plasticity." Trends in Neurosciences **19**(4): 126-130.

Altman, J. (1962). "Are new neurons formed in the brains of adult mammals?" Science **135**(3509): 1127-1128.

Anders Ericsson, K. (2003). "Exceptional memorizers: made, not born." Trends in Cognitive Sciences **7**(6): 233-235.

Anderson, J. R. (1983). The Architecture of Cognition. Cambridge, MA, Harvard University Press.

Anderson, J. R. (1995). Cognitive Psychology and Its Implications. New York, Freeman.

Ashburner, J. (2007). "A fast diffeomorphic image registration algorithm." Neuroimage **38**(1): 95-113.

Baddeley, A. (1990). Human Memory: Theory and Practice. London, Allyn & Bacon.

Baddeley, A. D. and J. Andrade (2000). "Working memory and the vividness of imagery." J Exp Psychol Gen **129**(1): 126-145.

Baddeley, A. D., Hitch, G.J. (1974). Working Memory. The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory. G. H. Bower. New York, Academic Press. **8**: 47-89.

Ball, K., D. B. Berch, K. F. Helmers and et al. (2002). "Effects of cognitive training interventions with older adults: A randomized controlled trial." JAMA **288**(18): 2271-2281.

Barnett, S. M. and S. J. Ceci (2002). "When and where do we apply what we learn?: A taxonomy for far transfer." Psychological Bulletin **128**(4): 612-637.

Bass, J. and M. A. Lazar (2016). "Circadian time signatures of fitness and disease." Science **354**(6315): 994-999.

Bäumler, G. (1974). Lern- und Gedächtnistest : LGT-3 ; Handanweisung. Göttingen, Verlag für Psychologie Hogrefe.

Bayley, P. J., R. O. Hopkins and L. R. Squire (2006). "The fate of old memories after medial temporal lobe damage." J Neurosci **26**(51): 13311-13317.

Beck At, W. C. M. M. J. E. J. (1961). "AN inventory for measuring depression." Archives of General Psychiatry **4**(6): 561-571.

- Bellezza, F. S. (1981). "Mnemonic Devices: Classification, Characteristics, and Criteria." Review of Educational Research **51**(2): 247-275.
- Belliveau, J., D. Kennedy, R. McKinstry, B. Buchbinder, R. Weisskoff, M. Cohen, J. Vevea, T. Brady and B. Rosen (1991). "Functional mapping of the human visual cortex by magnetic resonance imaging." Science **254**(5032): 716-719.
- Berlit, P. (2011). Klinische Neurologie, Springer.
- Biswal, B. B. (2012). "Resting state fMRI: A personal history." NeuroImage **62**(2): 938-944.
- Blankenship, A. B. (1938). "Memory span: a review of the literature." Psychological Bulletin **35**(1): 1-25.
- Bless, H. W., M.; Bohner, G.; Fellhauer, R.; Schwarz, N. (1994). "Need for Cognition : eine Skala zur Erfassung von Freude und Engagement bei Denkaufgaben." Zeitschrift für Sozialpsychologie **25**(2): 147-154.
- Bor, D., J. Duncan, R. J. Wiseman and A. M. Owen (2003). "Encoding Strategies Dissociate Prefrontal Activity from Working Memory Demand." Neuron **37**(2): 361-367.
- Bothwell, S., G. E. Meredith, J. Phillips, H. Staunton, C. Doherty, E. Grigorenko, S. Glazier, S. A. Deadwyler, C. A. Donovan and M. Farrell (2001). "Neuronal Hypertrophy in the Neocortex of Patients with Temporal Lobe Epilepsy." The Journal of Neuroscience **21**(13): 4789.
- Bousefield, W. A. (1953). "The occurrence of clustering in the recall of randomly arranged associates." Journal of General Psychology **49**: 229.
- Bower, G. H., M. C. Clark, A. M. Lesgold and D. Winzenz (1969). "Hierarchical retrieval schemes in recall of categorized word lists." Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior **8**(3): 323-343.
- Bower, G. H., Clark, M.C. (1969). "Narrative stories as mediators for serial learning." Psychon. Sci. **14**: 181-182.
- Bower, H. G. (1970). "Analysis of a Mnemonic Device: Modern psychology uncovers the powerful components of an ancient system for improving memory." American Scientist **58**(5): 496-510.
- Brahler, C. J. and D. Walker (2008). Learning scientific and medical terminology with a mnemonic strategy using an illogical association technique.
- Bright, P., J. Buckman, A. Fradera, H. Yoshimasu, A. C. Colchester and M. D. Kopelman (2006). "Retrograde amnesia in patients with hippocampal, medial temporal, temporal lobe, or frontal pathology." Learn Mem **13**(5): 545-557.
- Bugelski, B. R. (1968). "Images as mediators in one-trial paired-associate learning: II. Self-timing in successive lists." Journal of Experimental Psychology **77**(2): 328-334.
- Buschkuehl, M., S. M. Jaeggi and J. Jonides (2012). "Neuronal effects following working memory training." Dev Cogn Neurosci **2 Suppl 1**: S167-179.

- Cacioppo, J. T. and R. E. Petty (1982). "The need for cognition." Journal of Personality and Social Psychology **42**(1): 116-131.
- Cacioppo, J. T., R. E. Petty, J. A. Feinstein and W. B. G. Jarvis (1996). "Dispositional differences in cognitive motivation: The life and times of individuals varying in need for cognition." Psychological Bulletin **119**(2): 197-253.
- Carlson, L., J. W. Zimmer and J. A. Glover (1981). "First-letter mnemonics: DAM (Don't aid memory)." Journal of General Psychology **104**: 287.
- Carlson, N. R. (2001). Learning and memory: Basic mechanisms. Physiology of Behavior, Allyn and Bacon.
- Carney, R. N. and J. R. Levin (1998). "Do Mnemonic Memories Fade as Time Goes By? Here's Looking Anew!" Contemporary Educational Psychology **23**(3): 276-297.
- Carney, R. N. and J. R. Levin (2000). "Fading Mnemonic Memories: Here's Looking Anew, Again!" Contemporary Educational Psychology **25**(4): 499-508.
- Carretti, B., E. Borella and R. De Beni (2007). "Does Strategic Memory Training Improve the Working Memory Performance of Younger and Older Adults?" Experimental Psychology (formerly Zeitschrift für Experimentelle Psychologie) **54**(4): 311-320.
- Carrier, J. and T. H. Monk (2000). "Circadian rhythms of performance: new trends." Chronobiol Int **17**(6): 719-732.
- Cattell, R. B. (1963). "Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment." Journal of Educational Psychology **54**(1): 1-22.
- Cattell, R. B. (1968). "Are IQ-Tests intelligent?" Psychology Today **2**: 56-62.
- Cavallini, E., A. Pagnin and T. Vecchi (2003). "Aging and everyday memory: the beneficial effect of memory training." Archives of Gerontology and Geriatrics **37**(3): 241-257.
- Chase, H. W., L. Clark, B. J. Sahakian, E. T. Bullmore and T. W. Robbins (2008). "Dissociable roles of prefrontal subregions in self-ordered working memory performance." Neuropsychologia **46**(11): 2650-2661.
- Cohen, A. R., E. Stotland and D. M. Wolfe (1955). "An experimental investigation of need for cognition." The Journal of Abnormal and Social Psychology **51**(2): 291-294.
- Colquhoun, W. P. (1971). Biological rhythms and human performance. London, Academic.
- Cowan, N. (1995). Attention and memory: An integrated framework. New York, Oxford University Press.
- Cowan, N. (2008). "What are the differences between long-term, short-term, and working memory?" Prog Brain Res **169**: 323-338.

- Cowan, N., Z. Chen and J. N. Rouder (2004). "Constant Capacity in an Immediate Serial-Recall Task: A Logical Sequel to Miller (1956)." Psychological Science **15**(9): 634-640.
- Craik, F. I. M. and E. Tulving (1975). "Depth of processing and the retention of words in episodic memory." Journal of Experimental Psychology: General **104**(3): 268-294.
- Darwin, C. J., M. T. Turvey and R. G. Crowder (1972). "An auditory analogue of the sperling partial report procedure: Evidence for brief auditory storage." Cognitive Psychology **3**(2): 255-267.
- De Beni, R. and C. Cornoldi (1985). "Effects of the mnemotechnique of loci in the memorization of concrete words." Acta Psychologica **60**(1): 11-24.
- De Beni, R. and C. Cornoldi (1988). "Does the repeated use of Loci create interference?" Perceptual and Motor Skills **67**(2): 415-418.
- De Beni, R., Palladino, P., Pazzaglia, F., & Cornoldi, C. (1998). "Increases in Intrusion Errors and Working Memory Deficit of Poor Comprehenders." Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A **51**(2): 305-320.
- Deci, E. L., & Ryan, R.M. (1985). Intrinsic motivation and self determination in human behaviour. New York, Plenum Press.
- Delin, P. S. (1969). "The learning to criterion of a serial list with and without mnemonic instructions." Psychon. Sci. **16**: 169-170.
- Draganski, B., C. Gaser, V. Busch, G. Schuierer, U. Bogdahn and A. May (2004). "Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training." Nature **427**(6972): 311-312.
- Dresler, M., W. R. Shirer, B. N. Konrad, N. C. J. Muller, I. C. Wagner, G. Fernandez, M. Czisch and M. D. Greicius (2017). "Mnemonic Training Reshapes Brain Networks to Support Superior Memory." Neuron **93**(5): 1227-1235 e1226.
- Drevenstedt, J. and F. S. Bellezza (1993). "Memory for self-generated narration in the elderly." Psychology and Aging **8**(2): 187-196.
- Duff, S. J. and E. Hampson (2001). "A Sex Difference on a Novel Spatial Working Memory Task in Humans." Brain and Cognition **47**(3): 470-493.
- Duffy, J. F., J. M. Zeitzer, D. W. Rimmer, E. B. Klerman, D. J. Dijk and C. A. Czeisler (2002). "Peak of circadian melatonin rhythm occurs later within the sleep of older subjects." Am J Physiol Endocrinol Metab **282**(2): E297-303.
- Dunlosky, J., H. Bailey and C. Hertzog (2011). Memory Enhancement Strategies: What Works Best for Obtaining Memory Goals? Enhancing Cognitive Fitness in Adults. P. E. Hartman-Stein and A. LaRue, Springer New York: 3-23.
- Eichenbaum, H. (2001). "The hippocampus and declarative memory: cognitive mechanisms and neural codes." Behavioural Brain Research **127**(1-2): 199-207.

- Eichenbaum, H. (2004). "Hippocampus: Cognitive Processes and Neural Representations that Underlie Declarative Memory." Neuron **44**(1): 109-120.
- Eichenbaum, H., Cohen, N.J. (2001). From conditioning to conscious recollection: memory systems of the brain. Oxford, Oxford University Press.
- Elliot, A. J. and H. A. McGregor (2001). "A 2 × 2 achievement goal framework." Journal of Personality and Social Psychology **80**(3): 501-519.
- Elliot, A. J. and K. Murayama (2008). "On the measurement of achievement goals: Critique, illustration, and application." Journal of Educational Psychology **100**(3): 613-628.
- Elliott, J. L. and J. R. Gentile (1986). "The Efficacy of a Mnemonic Technique for Learning Disabled and Nondisabled Adolescents." Journal of Learning Disabilities **19**(4): 237-241.
- Engert, F. and T. Bonhoeffer (1999). "Dendritic spine changes associated with hippocampal long-term synaptic plasticity." Nature **399**(6731): 66-70.
- Engle, R. W., Kane, M.J., & Tuholski, S.W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and function of the prefrontal cortex. Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control. A. M. P. Shah. New York, Cambridge University Press: 102-134.
- Engvig, A., A. M. Fjell, L. T. Westlye, T. Moberget, Ø. Sundseth, V. A. Larsen and K. B. Walhovd (2010). "Effects of memory training on cortical thickness in the elderly." NeuroImage **52**(4): 1667-1676.
- Ericsson, K. A. and W. Kintsch (1995). "Long-term working memory." Psychological Review **102**(2): 211-245.
- Eriksson, P. S., E. Perfilieva, T. Bjork-Eriksson, A.-M. Alborn, C. Nordborg, D. A. Peterson and F. H. Gage (1998). "Neurogenesis in the adult human hippocampus." Nat Med **4**(11): 1313-1317.
- Facer-Childs, E. R., B. M. Campos, B. Middleton, D. J. Skene and A. P. Bagshaw (2019). "Circadian phenotype impacts the brain's resting state functional connectivity, attentional performance and sleepiness." Sleep.
- Farage, M., T. Osborn and A. MacLean (2008). "Cognitive, sensory, and emotional changes associated with the menstrual cycle: a review." Archives of Gynecology and Obstetrics **278**(4): 299-307.
- Folkard, S. (1979). "Time of day and level of processing." Memory & Cognition **7**(4): 247-252.
- Folkard, S. (1983). Diurnal variation in human performance. Stress and fatigue in human performance rhythms. G. Hockey. Chichester, England, Wiley: 245-272.

Folkard, S., T. Åkerstedt, I. Macdonald, P. Tucker and M. B. Spencer (1999). "Beyond the Three-Process Model of Alertness: Estimating Phase, Time on Shift, and Successive Night Effects." Journal of Biological Rhythms **14**(6): 579-589.

Folkard, S., R. A. Wever and C. M. Wildgruber (1983). "Multi-oscillatory control of circadian rhythms in human performance." Nature **305**(5931): 223-226.

Gabrieli, J. D., J. B. Brewer, J. E. Desmond and G. H. Glover (1997). "Separate neural bases of two fundamental memory processes in the human medial temporal lobe." Science **276**(5310): 264-266.

Genzel, L. (2011). Studien zur schlafabhängigen Gedächtniskonsolidierung.

Glidden, L. M., L. H. Bilsky, H. H. Mar, T. P. Judd and D. A. Warner (1983). "Semantic processing can facilitate free recall in mildly retarded adolescents." Journal of Experimental Child Psychology **36**(3): 510-532.

Gross, C. G. (2000). "Neurogenesis in the adult brain: death of a dogma." Nat Rev Neurosci **1**(1): 67-73.

Guilford, J. P. (1967). The nature of human intelligence. New York [u.a.], McGraw-Hill.

Hampson, E. (1990). "Variations in sex-related cognitive abilities across the menstrual cycle." Brain and Cognition **14**(1): 26-43.

Hampson, E. and D. Kimura (1988). "Reciprocal effects of hormonal fluctuations on human motor and perceptual-spatial skills." Behavioral Neuroscience **102**(3): 456-459.

Hebb, D. O. (1949). The organization of behavior; a neuropsychological theory. New York,, Wiley.

Hegarty, M., A. E. Richardson, D. R. Montello, K. Lovelace and I. Subbiah (2002). "Development of a self-report measure of environmental spatial ability." Intelligence **30**(5): 425-447.

Hertzog, C., A. F. Kramer, R. S. Wilson and U. Lindenberger (2008). "Enrichment Effects on Adult Cognitive Development: Can the Functional Capacity of Older Adults Be Preserved and Enhanced?" Psychological Science in the Public Interest **9**(1): 1-65.

Hill, R. D., C. Allen and P. McWhorter (1991). "Stories as a mnemonic aid for older learners." Psychology and Aging **6**(3): 484-486.

Hossiep, R., D. Turck and M. Hasella (2001). Bochumer Matrizentest : BOMAT - advanced-short version. Göttingen ; Bern [u.a.], Hogrefe, Verl. für Psychologie.

Hulme, C., S. Roodenrys, R. Schweickert, G. D. Brown, M. Martin and G. Stuart (1997). "Word-frequency effects on short-term memory tasks: evidence for a redintegration process in immediate serial recall." J Exp Psychol Learn Mem Cogn **23**(5): 1217-1232.

Hunt, E. (1971). "What kind of computer is man?" Cognitive Psychology **2**(1): 57-98.

Huntley, J. D., A. Hampshire, D. Bor, A. Owen and R. J. Howard (2017). "Adaptive working memory strategy training in early Alzheimer's disease: randomised controlled trial." Br J Psychiatry **210**(1): 61-66.

Huttner, H. B., O. Bergmann, M. Salehpour, A. Racz, J. Tatarishvili, E. Lindgren, T. Csonka, L. Csiba, T. Hortobagyi, G. Mehes, E. Englund, B. W. Solnestam, S. Zdunek, C. Scharenberg, L. Strom, P. Stahl, B. Sigurgeirsson, A. Dahl, S. Schwab, G. Possnert, S. Bernard, Z. Kokaia, O. Lindvall, J. Lundeberg and J. Frisen (2014). "The age and genomic integrity of neurons after cortical stroke in humans." Nat Neurosci **17**(6): 801-803.

Jacobs, C., F. Petermann and R. Weiß (2007). "Grundintelligenztest (CFT 20-R)." Diagnostica **53**(2): 109-113.

Jaeggi, S. M., M. Buschkuhl, J. Jonides and W. J. Perrig (2008). "Improving fluid intelligence with training on working memory." Proc Natl Acad Sci U S A **105**(19): 6829-6833.

Jaeggi, S. M., R. Seewer, A. C. Nirikko, D. Eckstein, G. Schroth, R. Groner and K. Gutbrod (2003). "Does excessive memory load attenuate activation in the prefrontal cortex? Load-dependent processing in single and dual tasks: functional magnetic resonance imaging study." Neuroimage **19**(2 Pt 1): 210-225.

Jäger, A. O. (1982). "Mehrmodale Klassifikation von Intelligenzleistungen. Experimentell kontrollierte Weiterentwicklung eines deskriptiven Intelligenzstrukturmodells. ." Diagnostica **28**: 195-226.

Jenkins, J. J. and W. A. Russell (1952). "Associative clustering during recall." The Journal of Abnormal and Social Psychology **47**(4): 818-821.

Johnson, R. B. (1970). "Images as mediators in free recall." Journal of Experimental Psychology **84**(3): 523-526.

Kennedy, B. L., J. J. Schwab, R. L. Morris and G. Beldia (2001). "Assessment of state and trait anxiety in subjects with anxiety and depressive disorders." Psychiatr Q **72**(3): 263-276.

Kibler, J. L. and K. A. Blick (1972). "Evaluation of experimenter-supplied and subject-originated first-letter mnemonics in a free-recall task." Psychological Reports **30**(1): 307-313.

King, B. R., K. Hoedlmoser, F. Hirschauer, N. Dolfen and G. Albouy (2017). "Sleeping on the motor engram: The multifaceted nature of sleep-related motor memory consolidation." Neurosci Biobehav Rev **80**: 1-22.

Kintsch, W. (1994). "Text comprehension, memory, and learning." American Psychologist **49**(4): 294-303.

Kleitmann, N. (1963). Sleep and wakefulness. Chicago, University of Chicago Press.

Kliegl, R., J. Smith, J. Heckhausen and P. B. Baltes (1987). "Mnemonic Training for the Acquisition of Skilled Digit Memory." Cognition and Instruction **4**(4): 203-223.

Knoth, R., I. Singec, M. Ditter, G. Pantazis, P. Capetian, R. P. Meyer, V. Horvat, B. Volk and G. Kempermann (2010). "Murine features of neurogenesis in the human hippocampus across the lifespan from 0 to 100 years." PLoS One **5**(1): e8809.

Kondo, Y., M. Suzuki, S. Mugikura, N. Abe, S. Takahashi, T. Iijima and T. Fujii (2005). "Changes in brain activation associated with use of a memory strategy: a functional MRI study." NeuroImage **24**(4): 1154-1163.

Kondo, Y., M. Suzuki, S. Mugikura, N. Abe, S. Takahashi, T. Iijima and T. Fujii (2005). "Changes in brain activation associated with use of a memory strategy: a functional MRI study." Neuroimage **24**(4): 1154-1163.

Kosslyn, S. M., C. Seger, J. R. Pani and L. A. Hillger (1990). "When is imagery used in everyday life? A diary study." Journal of Mental Imagery **14**(3-4): 131-152.

Krinsky, R. and S. G. Krinsky (1996). "Pegword Mnemonic Instruction: Retrieval Times and Long-Term Memory Performance among Fifth-Grade Children." Contemporary Educational Psychology **21**(2): 193-207.

Krishnan, H. C. and L. C. Lyons (2015). "Synchrony and desynchrony in circadian clocks: impacts on learning and memory." Learn Mem **22**(9): 426-437.

Lauterbur, P. C. (1973). "Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance." Nature **242**(5394): 190-191.

Laux, L., Ed. (1981). Das State-Trait-Angstinventar : STAI ; theoretische Grundlagen und Handanweisung. Weinheim, Beltz Test.

Lehrl, S. (1999). Manual zum MWT-B, Spitta-Verlag.

Lépine, R., P. Parrouillet and V. Camos (2005). "What makes working memory spans so predictive of high-level cognition?" Psychonomic Bulletin & Review **12**(1): 165-170.

Lewin, C., G. Wolgers and A. Herlitz (2001). "Sex differences favoring women in verbal but not in visuospatial episodic memory." Neuropsychology **15**(2): 165-173.

Locke, H. and T. Braver (2008). "Motivational influences on cognitive control: Behavior, brain activation, and individual differences." Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience **8**(1): 99-112.

Lövdén, M., L. Bäckman, U. Lindenberger, S. Schaefer and F. Schmiedek (2010). "A theoretical framework for the study of adult cognitive plasticity." Psychological Bulletin **136**(4): 659-676.

Maguire, E. A., D. G. Gadian, I. S. Johnsrude, C. D. Good, J. Ashburner, R. S. J. Frackowiak and C. D. Frith (2000). "Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers." Proceedings of the National Academy of Sciences **97**(8): 4398-4403.

Maguire, E. A., E. R. Valentine, J. M. Wilding and N. Kapur (2003). "Routes to remembering: the brains behind superior memory." Nat Neurosci **6**(1): 90-95.

- Maki, P. M., J. B. Rich and R. Shayna Rosenbaum (2002). "Implicit memory varies across the menstrual cycle: estrogen effects in young women." Neuropsychologia **40**(5): 518-529.
- Malenka, R. C. and M. F. Bear (2004). "LTP and LTD: An Embarrassment of Riches." Neuron **44**(1): 5-21.
- Manenti, R., M. Tettamanti, M. Cotelli, C. Miniussi and S. F. Cappa (2010). "The neural bases of word encoding and retrieval: A fMRI-guided transcranial magnetic stimulation study." Brain Topogr **22**(4): 318-332.
- Marks, D. F. (1973). "Visual imagery differences in the recall of pictures." British Journal of Psychology **64**(1): 17.
- Massen, C. and B. Vaterrodt-Plünnecke (2006). "The role of proactive interference in mnemonic techniques." Memory **14**(2): 189-196.
- McDaniel, M. A. and G. O. Einstein (1986). "Bizarre imagery as an effective memory aid: The importance of distinctiveness." Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition **12**(1): 54-65.
- Mckinlay, W. W. (1992). "Achieving generalization of memory training." Brain Injury **6**(2): 107-108.
- McNamara, D. and J. Scott (2001). "Working memory capacity and strategy use." Memory & Cognition **29**(1): 10-17.
- McNamara, D. S. and W. Kintsch (1996). "Learning from texts: Effects of prior knowledge and text coherence." Discourse Processes **22**(3): 247-288.
- Miles, C., R. Green, G. Sanders and M. Hines (1998). "Estrogen and Memory in a Transsexual Population." Hormones and Behavior **34**(2): 199-208.
- Miller, G. A. (1956). "The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information." Psychological Review **63**(2): 81-97.
- Miyake, A., & Shah, P. (1999). Models of working memory. Mechanisms of active maintenance and executive control. New York, Cambridge University Press.
- Monk, T. H. and J. Carrier (1998). "A Parallelism between Human Body Temperature and Performance Independent of the Endogenous Circadian Pacemaker." Journal of Biological Rhythms **13**(2): 113-122.
- Monk, T. H., E. D. Weitzman, J. E. Fookson, M. L. Moline, R. E. Kronauer and P. H. Gander (1983). "Task variables determine which biological clock controls circadian rhythms in human performance." Nature **304**(5926): 543-545.
- Mordecai, K. L., L. H. Rubin and P. M. Maki (2008). "Effects of menstrual cycle phase and oral contraceptive use on verbal memory." Hormones and Behavior **54**(2): 286-293.

- Neely, A. S. and L. Bäckman (1993). "Long-Term Maintenance of Gains From Memory Training in Older Adults: Two 3½Year Follow-up Studies." Journal of Gerontology **48**(5): P233-P237.
- Nelson, D. L. and C. S. Archer (1972). "The first letter mnemonic." Journal of Educational Psychology **63**(5): 482-486.
- Nyberg, L., P. Marklund, J. Persson, R. Cabeza, C. Forkstam, K. M. Petersson and M. Ingvar (2003). "Common prefrontal activations during working memory, episodic memory, and semantic memory." Neuropsychologia **41**(3): 371-377.
- Odeblad, E. and G. Lindstrom (1955). "Some Preliminary Observations on the Proton Magnetic Resonance in Biologic Samples." Acta Radiologica [Old Series] **43**(6): 469-476.
- Ogawa, S., R. S. Menon, D. W. Tank, S. G. Kim, H. Merkle, J. M. Ellermann and K. Ugurbil (1993). "Functional brain mapping by blood oxygenation level-dependent contrast magnetic resonance imaging. A comparison of signal characteristics with a biophysical model." Biophysical Journal **64**(3): 803-812.
- Oldfield, R. C. (1971). "The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory." Neuropsychologia **9**(1): 97-113.
- Oswald, W. D. and E. Roth (1987). Der Zahlen-Verbindungs-Test : ZVT ; ein sprachfreier Intelligenz-Test zur Messung der "kognitiven Leistungsgeschwindigkeit" ; Handanweisung. Göttingen [u.a.], Hogrefe.
- Postma, A., J. Winkel, A. Tuiten and J. van Honk (1999). "Sex differences and menstrual cycle effects in human spatial memory." Psychoneuroendocrinology **24**(2): 175-192.
- Pressley, M., M. A. McDaniel, J. E. Turnure, E. Wood and M. Ahmad (1987). "Generation and precision of elaboration: Effects on intentional and incidental learning." Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition **13**(2): 291-300.
- Rakic, P. (1985). "Limits of neurogenesis in primates." Science **227**(4690): 1054-1056.
- Richardson, J. T. E. (1995). "The efficacy of imagery mnemonics in memory remediation." Neuropsychologia **33**(11): 1345-1357.
- Robinson, L. J., L. H. Stevens, C. J. Threapleton, J. Vainiute, R. H. McAllister-Williams and P. Gallagher (2012). "Effects of intrinsic and extrinsic motivation on attention and memory." Acta Psychol (Amst) **141**(2): 243-249.
- Roediger, H. L. (1980). "The effectiveness of four mnemonics in ordering recall." Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory **6**(5): 558-567.
- Roediger Iii, H. L. and K. B. McDermott (1995). "Creating false memories: Remembering words not presented in lists." Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory & Cognition **21**(4): 803.
- Rogers, T. B., N. A. Kuiper and W. S. Kirker (1977). "Self-reference and the encoding of personal information." Journal of Personality and Social Psychology **35**(9): 677-688.

- Rosselli, M. and A. Ardila (2003). "The impact of culture and education on non-verbal neuropsychological measurements: A critical review." Brain and Cognition **52**(3): 326-333.
- Sala, G. and F. Gobet (2019). "Cognitive Training Does Not Enhance General Cognition." Trends Cogn Sci **23**(1): 9-20.
- Scheiermann, C., Y. Kunisaki and P. S. Frenette (2013). "Circadian control of the immune system." Nat Rev Immunol **13**(3): 190-198.
- Schmitt, M., M. Beckmann, D. Dusi, J. Maes, A. Schiller and K. Schonauer (2003). "Messgüte des vereinfachten Beck-Depressions-Inventars (BDI-V)." Diagnostica **49**(4): 147-156.
- Schmitt, M. and J. Maes (2000). "Vorschlag zur Vereinfachung des Beck-Depressions-Inventars (BDI)." Diagnostica **46**(1): 38-46.
- Scholz, J., M. C. Klein, T. E. Behrens and H. Johansen-Berg (2009). "Training induces changes in white-matter architecture." Nat Neurosci **12**(11): 1370-1371.
- Sejnowski, T. J. and A. Destexhe (2000). "Why do we sleep?1." Brain Research **886**(1-2): 208-223.
- Shirer, W. R., S. Ryali, E. Rykhlevskaia, V. Menon and M. D. Greicius (2012). "Decoding subject-driven cognitive states with whole-brain connectivity patterns." Cereb Cortex **22**(1): 158-165.
- Singer, W. (2001). Neuronale Grundlagen von Lernprozessen. Lehrbuch der Physiologie. R. Klinke, Silbernagl, S.: 750-754.
- Slamecka, N. J. and P. Graf (1978). "The generation effect: Delineation of a phenomenon." Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory **4**(6): 592-604.
- Smith, E. E., E. J. Shoben and L. J. Rips (1974). "Structure and process in semantic memory: A featural model for semantic decisions." Psychological Review **81**(3): 214-241.
- Sorrells, S. F., M. F. Paredes, A. Cebrian-Silla, K. Sandoval, D. Qi, K. W. Kelley, D. James, S. Mayer, J. Chang, K. I. Auguste, E. F. Chang, A. J. Gutierrez, A. R. Kriegstein, G. W. Mathern, M. C. Oldham, E. J. Huang, J. M. Garcia-Verdugo, Z. Yang and A. Alvarez-Buylla (2018). "Human hippocampal neurogenesis drops sharply in children to undetectable levels in adults." Nature **555**: 377.
- Spalding, Kirsty L., O. Bergmann, K. Alkass, S. Bernard, M. Salehpour, Hagen B. Huttner, E. Boström, I. Westerlund, C. Vial, Bruce A. Buchholz, G. Possnert, Deborah C. Mash, H. Druid and J. Frisén (2013). "Dynamics of Hippocampal Neurogenesis in Adult Humans." Cell **153**(6): 1219-1227.
- Sperling, G. (1960). "The information available in brief visual presentations." Psychological Monographs: General and Applied **74**(11): 1-29.

Spielberger, C. D., Ed. (1972). Anxiety : current trends in theory and research. New York [u.a.], Academic Press.

Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., Lushene, R., Vagg, P. R., & Jacobs, G. A. (1983). Manual for the State-Trait Anxiety Inventory. Palo Alto, CA, Consulting Psychologists Press, Inc.

Squire, L. R., L. Genzel, J. T. Wixted and R. G. Morris (2015). "Memory Consolidation." Cold Spring Harbor Perspectives in Biology **7**(8).

Squire, L. R. and E. R. Kandel (2009). Memory: From Mind to Molecules, Roberts & Company.

Stalder, D. R. (2005). "Learning and Motivational Benefits of Acronym Use in Introductory Psychology." Teaching of Psychology **32**(4): 222-228.

Stern, C. E., S. Corkin, R. G. Gonzalez, A. R. Guimaraes, J. R. Baker, P. J. Jennings, C. A. Carr, R. M. Sugiura, V. Vedantham and B. R. Rosen (1996). "The hippocampal formation participates in novel picture encoding: evidence from functional magnetic resonance imaging." Proc Natl Acad Sci U S A **93**(16): 8660-8665.

Takahashi, M., H. Shimizu, S. Saito and H. Tomoyori (2006). "One percent ability and ninety-nine percent perspiration: A study of a Japanese memorist." Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition **32**(5): 1195-1200.

Thulborn, K. R., J. C. Waterton, P. M. Matthews and G. K. Radda (1982). "Oxygenation dependence of the transverse relaxation time of water protons in whole blood at high field." Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects **714**(2): 265-270.

Thurstone, L. L. (1938). Primary Mental Abilities. Chigago, University of Chicago Press.

Tremblay, P. F., M. P. Goldberg and R. C. Gardner (1995). "Trait and state motivation and the acquisition of Hebrew vocabulary." Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement **27**(3): 356-370.

Tulving, E. (1962). "Subjective organization in free recall of 'unrelated' words." Psychological Review **69**(4): 344-354.

Tulving, E. (1983). Elements of Episodic Memory. Oxford, Oxford University Press.

Tulving, E. (1985). "How many memory systems are there?" American Psychologist **40**(4): 385-398.

Turley-Ames, K. J. and M. M. Whitfield (2003). "Strategy training and working memory task performance." Journal of Memory and Language **49**(4): 446-468.

Turrigiano, G. G. and S. B. Nelson (2004). "Homeostatic plasticity in the developing nervous system." Nat Rev Neurosci **5**(2): 97-107.

Veit, D. T., T. E. Scruggs and M. A. Mastropieri (1986). "Extended mnemonic instruction with learning disabled students." Journal of Educational Psychology **78**(4): 300-308.

- Verhaeghen, P. and A. Marcoen (1996). "On the mechanisms of plasticity in young and older adults after instruction in the method of loci: Evidence for an amplification model." Psychology and Aging **11**(1): 164-178.
- Verhaeghen, P., A. Marcoen and L. Goossens (1992). "Improving memory performance in the aged through mnemonic training: A meta-analytic study." Psychology and Aging **7**(2): 242-251.
- Waite, C. J., K. A. Blick and C. E. Boltwood (1971). "Prior usage of the first-letter technique." Psychological Reports **29**(2): 630-630.
- Walker, M. P. and R. Stickgold (2006). "Sleep, memory, and plasticity." Annu Rev Psychol **57**: 139-166.
- Wang, A. Y. and M. H. Thomas (2000). "Looking for Long-Term Mnemonic Effects on Serial Recall: The Legacy of Simonides." The American Journal of Psychology **113**(3): 331-340.
- Wechsler, D. (1955). Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale. Oxford, England, Psychological Corporation.
- Weisig, S. (2017). Neurokognitive Effekte von Arbeitsgedächtnistraining Dissertation, LMU Munich, LMU München.
- Weiss, E. M., G. Kemmler, E. A. Deisenhammer, W. W. Fleischhacker and M. Delazer (2003). "Sex differences in cognitive functions." Personality and Individual Differences **35**(4): 863-875.
- Weiß, R. H. (1978). Grundintelligenztest Skala 2 : CFT 20. Braunschweig, Westermann.
- Wilkinson, R. T. and D. Houghton (1982). "Field test of arousal: a portable reaction timer with data storage." Hum Factors **24**(4): 487-493.
- Wollen, K. A., A. Weber and D. H. Lowry (1972). "Bizarreness versus interaction of mental images as determinants of learning." Cognitive Psychology **3**(3): 518-523.
- Wood, L. E., Pratt, James D. (1987). "Pegword Mnemonic as an aid to memory in the elderly: a comparison of four age groups." Educational Gerontology **13**(4): 325-339
- Woollett, K., H. J. Spiers and E. A. Maguire (2009). "Talent in the taxi: a model system for exploring expertise." Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences **364**(1522): 1407-1416.
- Worthen, J. B., Hunt, R.R. (2008). Mnemonics: Underlying Processes and Practical Applications. Cognitive psychology of memory. H. L. Roediger III. Oxford, UK, Elsevier.
- Worthen, J. B. and P. H. Marshall (1996). "Intralist and Extralist Sources of Distinctiveness and the Bizarreness Effect: The Importance of Contrast." The American Journal of Psychology **109**(2): 239-263.
- Yates, F. A. (1966). The Art of Memory, University of Chicago Press.

Yesavage, J. A., T. L. Rose and G. H. Bower (1983). "Interactive Imagery and Affective Judgments Improve Face-name Learning in the Elderly." Journal of Gerontology **38**(2): 197-203.

Zafar, R., A. Malik, N. Kamel and S. Dass (2015). Importance of realignment parameters in fMRI data analysis.

Zelinski, E. M. (2009). "Far transfer in cognitive training of older adults." Restorative Neurology & Neuroscience **27**(5): 455-471.

Zhang, W. and D. J. Linden (2003). "The other side of the engram: experience-driven changes in neuronal intrinsic excitability." Nat Rev Neurosci **4**(11): 885-900.

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. Axel Steiger, der mir die Forschung und Verfassung meiner Dissertation in seiner Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Psychiatrie München möglich gemacht hat und mir jederzeit hilfreich zur Seite stand.

Ein ebenso großes Dankeschön geht an Herrn Dr. Martin Dresler, der bei der Planung und Durchführung der Studie sowie der Auswertung der Ergebnisse stets hilfreich zur Seite stand und einen großen Anteil am Gelingen der Arbeit hatte.

Mein Dank geht auch an Herrn Dr. Boris Konrad, der mir und den Probanden die Welt der Mnemotechniken eröffnet und uns in die Nutzung der Loci-Methode eingeführt hat.

Auch bei meiner Mitdotorandin Fr. Dr. Sarah Weisig möchte ich mich herzlich für die gemeinsame Forschungs- und stets gute Zusammenarbeit bedanken.

An dieser Stelle ergeht auch ein herzliches Dankeschön an alle Teilnehmer der Studie. Ohne die vielen freiwilligen Probanden, die sich die Zeit für die zahlreichen Untersuchungen und das Mnemo-Training genommen haben, wäre das Projekt trotz der Hilfe aller oben genannten Personen zum Scheitern verurteilt gewesen.

Nicht zuletzt möchte ich mich natürlich auch bei meinen Eltern und meiner Familie bedanken, die mir die Möglichkeit geschenkt haben, Studium und Forschung in aller Freiheit durchzuführen, mich zu gegebener Zeit jedoch auch zu erinnern wussten, dass die Arbeit noch nicht endgültig getan war.

In diesen nicht immer ganz einfachen Situationen schaffte es Vanessa Geisenberger, mir wieder ein Lächeln ins Gesicht zu zaubern.

## **Eidesstattliche Versicherung**

Schuster, Philipp

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel

*„Mnemotechniken: Neuronale Hintergründe und Auswirkungen auf das kognitive Leistungsvermögen“*

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Gablingen, 17.10.2020

Philipp Schuster