

Aus dem Zentralinstitut für Seelische Gesundheit
Medizinische Fakultät Mannheim
(Direktor: Prof. Dr. med. A. Meyer-Lindenberg)

Die Auswirkungen eines kombinierten motorischen und kognitiven
Trainings auf die graue Substanz und kognitive Leistungsfähigkeit des
menschlichen Gehirns

Inauguraldissertation
zur Erlangung des medizinischen Doktorgrades
der
Medizinischen Fakultät Mannheim
der Ruprecht-Karls-Universität
zu
Heidelberg

vorgelegt von
Sven Dehn

aus
Berlin
2020

Dekan: Prof. Dr. med. Sergij Goerd

Referentin: Frau Prof. Dr. rer. nat. Gabriele Ende

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ANOVA	Analysis of Variance
BA	Brodmann Areal
BDNF	Brain-Derived Neurotrophic Factor
CSF	Cerebrospinal Fluid
CVLT	California Verbal Learning Test
DARTEL	Diffeomorphic Anatomical Registration Through Exponentiated Lie Algebra
DTI	Diffusion Tensor Imaging
FWE	Family-Wise Error
MPRAGE	Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo Imaging
MRT	Magnetresonanztomografie
SPM	Statistical Parametric Mapping
TAP	Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung
TAP-M	Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung Version Mobilität
TMT	Trail Making Test
VBM	Voxelbasierte Morphometrie

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 EINLEITUNG	1
1.1 Übersicht.....	1
1.2 Stand der Forschung.....	3
1.3 Life Kinetik: motorisches und kognitives Training.....	10
1.4 Fragestellung und Hypothesen.....	12
2 MATERIAL UND METHODEN	17
2.1 Probandenkollektiv.....	17
2.2 Studiendesign.....	17
2.3 Magnetresonanztomografie.....	18
2.4 Neuropsychologische Tests.....	18
2.4.1 Flexibilität.....	19
2.4.2 Aktives Gesichtsfeld.....	20
2.4.3 Geteilte Aufmerksamkeit.....	21
2.4.4 Ablenkbarkeit.....	22
2.4.5 California Verbal Learning Test.....	23
2.4.6 Trail Making Test.....	24
2.4.7 Wortschatztest.....	24
2.5 Datenanalyse.....	24
2.5.1 Voxelbasierte Morphometrie.....	24
2.5.2 Statistisches Parametrisches Mapping.....	28
2.5.3 SPSS Statistics.....	29

3	ERGEBNISSE	31
3.1	Beschreibung der Stichprobe	31
3.1.1	Soziodemografische Merkmale	31
3.2	VBM Ergebnisse	33
3.2.1	Gruppenvergleich vor Trainingsbeginn	33
3.2.2	Zunahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe	33
3.2.3	Abnahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe	37
3.2.4	Graue Substanz in der Kontrollgruppe	41
3.3	Neuropsychologische Ergebnisse	42
3.3.1	Flexibilität	42
3.3.2	Aktives Gesichtsfeld	44
3.3.3	Geteilte Aufmerksamkeit	46
3.3.4	Ablenkbarkeit	47
3.3.5	California Verbal Learning Test	48
3.3.6	Trail Making Test	50
3.4	Varianzanalysen (ANOVA)	52
3.5	Korrelationen	52
4	DISKUSSION	53
4.1	Diskussion der Hypothesen	53
4.1.1	Zunahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe	53
4.1.2	Abnahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe	60
4.1.3	Neuropsychologische Ergebnisse	67
4.2	Einschränkungen	70
5	ZUSAMMENFASSUNG	71

6 LITERATURVERZEICHNIS	75
7 ANHANG.....	84
7.1 Verzeichnis der Abbildungen.....	84
7.2 Verzeichnis der Tabellen	86
8 LEBENSLAUF	87
9 DANKSAGUNG	88

1 EINLEITUNG

1.1 Übersicht

Körperliche Inaktivität ist ein ernstzunehmender Risikofaktor für eine Vielzahl somatischer Erkrankungen. Dazu gehören kardiovaskuläre Erkrankungen wie KHK (koronare Herzkrankheit), Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes mellitus Typ 2 sowie Brust- und Darmkrebs [1].

Damit hat körperliche Inaktivität vergleichbar gesundheitsschädigende Auswirkungen wie Rauchen oder Adipositas [1]. Das Statistische Bundesamt veröffentlichte 2013 eine Rangfolge der häufigsten Todesursachen, in der die koronare Herzkrankheit an erster Stelle steht [2].

Inaktivität ist aber auch ein hoch relevanter Risikofaktor für Erkrankungen aus dem psychiatrischen Formenkreis und steht in Zusammenhang mit Depression und Demenz. Bewegung dagegen wirkt präventiv [3].

Eine Studie aus dem Jahr 2011 beschreibt die Depression als eine der häufigsten und folgenreichsten psychischen Störungen, mit einer Prävalenz von 8,1% aller Erwachsenen in Deutschland [4]. Die Zahl der Erkrankten wird erwartungsgemäß noch weiter zunehmen und stellt das öffentliche Gesundheitswesen damit vor große Herausforderungen [5].

Auch die Demenz zählt durch die steigende Lebenserwartung und die damit wachsende Zahl älterer Menschen zu einem der größten Gesundheitsprobleme [6]. Die Prävalenz lag 2004 bei 7,2% in der deutschen Bevölkerung, mit einer absoluten Zahl von etwa 900.000 Menschen. Dabei ist zu erwarten, dass die Anzahl dementer Patienten im Jahr 2050 auf über zwei Millionen ansteigen wird [7]. In der Rangfolge der häufigsten Todesursachen 2013 in Deutschland steht die Demenz an sechster Stelle [2].

Körperliche Aktivität hingegen wird mit körperlicher [8] und geistiger [9] Gesundheit in Verbindung gebracht. Sie leistet einen effektiven Beitrag zur Primärprävention von Herz-Kreislauferkrankungen, Typ 2 Diabetes, Hypertension sowie Brust- und Darmkrebs, indem das Erkrankungsrisiko gesenkt wird. Ebenso wird das Risiko des vorzeitigen Todes signifikant reduziert [10].

Eine Studie aus dem Jahr 2003 belegt, dass körperliche Aktivität auch die Prävalenz von Depression und Angststörungen senkt [11].

2006 wurde eine prospektive Kohortenstudie mit 1740 Probanden im Alter von über 65 Jahren ausgewertet, die ergab, dass ein höherer Level an täglicher körperlicher Aktivität mit einem reduzierten Risiko für Demenz assoziiert ist [12]. Dabei muss körperliche Aktivität nicht unbedingt intensives Training bedeuten, schon allein die Teilnahme an Freizeitaktivitäten wie Musizieren oder Tanzen reichen aus, um das Erkrankungsrisiko zu reduzieren [13].

Körperliche Aktivität hat nämlich positive Auswirkungen auf die Struktur und Funktion des menschlichen Gehirns [14].

Durch die Fähigkeit des Nervensystems, sich veränderten Umweltbedingungen anzupassen, ruft körperliche Aktivität eine Veränderung der Konzentration und des Volumens von grauer und weißer Substanz hervor. Dieser Mechanismus wird als *Neuroplastizität* bezeichnet und führt zu strukturellen und funktionellen Veränderungen im menschlichen Gehirn [15].

Tierversuche zeigen außerdem eine vermehrte Ausschüttung von BDNF und erhöhte Kapazität von Lernen und Gedächtnisleistungen [14]. Somit gilt körperliche Aktivität als ein wichtiger Faktor für die Verbesserung kognitiver Leistungen [16].

Laut Diamond lassen sich die exekutiven kognitiven Funktionen des menschlichen Gehirns in drei wichtige Basisfunktionen einteilen, die die Grundlage für alle weiteren, höheren Funktionen bilden. Diese drei Basisfunktionen sind: die inhibitorische Kontrolle, das Arbeitsgedächtnis und die kognitive Flexibilität [17, 18].

Die *inhibitorische Kontrolle* lässt uns nachdenken, bevor wir handeln. Sie hält uns also davon ab, impulsiv zu handeln. Sie spielt außerdem eine Rolle für selektive Aufmerksamkeit und Konzentration, um weniger ablenkbar zu sein und fokussiert zu bleiben.

Das *Arbeitsgedächtnis* dient zur Informationsspeicherung und -verarbeitung. Verarbeitet werden beispielsweise Anweisungen, die man zu erfüllen hat. Diese werden nämlich in konkrete Planungsprozesse umgewandelt, um ein bestimmtes, dazu passendes Verhalten vorzubereiten. Aber auch die Durchführung mathematischer Rechnungen gehört zu den Aufgaben des Arbeitsgedächtnisses.

Die *kognitive Flexibilität* ermöglicht es uns, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen oder auch plötzliche, unvorhergesehene Ereignisse zu erfassen und davon zu profitieren.

Auf diesen drei Basisfunktionen bauen alle weiteren, höheren kognitiven Funktionen des Gehirns auf, wie z.B. logisches Denken, lösungsorientiertes Denken, Planen oder auch Schlussfolgern.

Vor dem Hintergrund der *Neuroplastizität*, lässt sich an dieser Stelle also zusammenfassend festhalten, dass sich körperliche Aktivität sowohl auf die anatomische Struktur als auch auf die kognitive Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns auswirkt.

Die vorliegende Studie untersucht daher die Auswirkungen eines kombinierten körperlichen und kognitiven Trainings namens Life Kinetik auf die graue Substanz und die kognitive Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns.

1.2 Stand der Forschung

In den letzten zehn Jahren rückten longitudinale Studiendesigns, die die Auswirkungen von motorischem oder kognitivem Training auf die graue Substanz des menschlichen Gehirns anhand von magnetresonanztomografischen Bildern untersuchten, immer mehr in den Mittelpunkt neurowissenschaftlichen Forschungsinteresses. Es wurden

diesbezüglich eine Reihe von Studien veröffentlicht, von denen im Folgenden einige kurz erläutert werden, um einen groben Überblick über den aktuellen Stand der Forschung auf diesem Gebiet zu bekommen (s. auch Tabellen 1-3).

Studien zum motorischen Training:

Die Art des motorischen Trainings, das in den im Folgenden genannten Studien durchgeführt wurde, reicht von Jonglieren mit Bällen über Golf- und Aerobictraining bis hin zu Ganzkörper-Gleichgewichtsübungen.

Draganski und Kollegen [19] veröffentlichten 2004 die bis dahin erste longitudinale Trainingsstudie und untersuchten 12 gesunde Probanden im durchschnittlichen Alter von 22 Jahren, die ein drei-monatiges Jongliertraining mit drei Bällen absolvierten. Eine weitere Gruppe mit 12 Probanden, die nicht am Training teilnahm, diente als Kontrollgruppe. Sie fanden bei den Probanden der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz beidseits im mittleren Temporallappen und im linken hinteren Sulcus intraparietalis.

Diese Ergebnisse von Draganski und Kollegen [19] wurden 2008 von Boyke und Kollegen um eine weitere Studie erweitert [20]. Hier wurde 44 gesunden Probanden im Alter von durchschnittlich 60 Jahren das Jonglieren mit 3 Bällen beigebracht, um die Auswirkungen dieses Trainings vor allem auf das menschliche Gehirn im fortgeschrittenen Alter zu untersuchen. Die Kontrollgruppe bestand aus 25 Probanden gleichen Alters. Auch sie fanden ähnlich zu den Ergebnissen von 2004 in der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz beidseits im mittleren Temporallappen und im linken Hippocampus sowie darüber hinaus im linken oberen Gyrus frontalis, im rechten primärmotorischen Kortex und beidseits im Nucleus accumbens.

Colcombe und Kollegen [21] teilten 2006 59 gesunde Probanden im Alter von 60-79 Jahren in zwei Gruppen auf, von denen die eine an einem Aerobictraining teilnahm und die andere ein Dehnungsprogramm absolvierte, jeweils mit einer Dauer von sechs Monaten. 20 junge Probanden bildeten eine Kontrollgruppe. Sie fanden bei den Probanden der Aerobicgruppe eine Zunahme grauer Substanz beidseits im mittleren

Gyrus frontalis, beidseits im supplementärmotorischen Kortex, im rechten unteren Gyrus frontalis und im linken oberen Gyrus temporalis.

Taubert und Kollegen [22] führten 2010 eine Studie mit einem Ganzkörper-Balancetraining durch, an dem eine Trainingsgruppe bestehend aus 14 gesunden Probanden im Alter von durchschnittlich 26 Jahren teilnahm. 14 weitere Probanden, die kein Training absolvierten, bildeten die Kontrollgruppe. Die Trainierenden mussten innerhalb von sechs Trainings, verteilt über einen Zeitraum von sechs Wochen, auf einer sich bewegenden Plattform stehen und dabei ihr Gleichgewicht halten. Es fand sich in der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im linken supplementärmotorischen Kortex, im linken oberen Gyrus frontalis und im linken mittleren Gyrus orbitofrontalis. Außerdem zeigte sich eine Abnahme grauer Substanz im rechten Putamen, im rechten unteren Gyrus orbitofrontalis, im linken unteren Gyrus occipitalis, im rechten mittleren Temporallappen und beidseits im Lobus 8 des Kleinhirns.

Erickson und Kollegen [23] teilten im gleichen Jahr 120 Probanden im Alter von 55-80 Jahren in eine Trainingsgruppe und eine Kontrollgruppe ein. Die Trainingsgruppe nahm an einem ein-jährigen Aerobictraining teil und die Kontrollgruppe absolvierte einen Dehnungskurs. Sie fanden in der Aerobicgruppe eine Zunahme grauer Substanz beidseits im Hippocampus.

Bezzola und Kollegen [24] ließen 2011 11 gesunde Probanden im durchschnittlichen Alter von ca. 50 Jahren an einem 40-stündigen Golftraining teilnehmen und verglichen deren hirmorphologische Veränderungen mit denen einer Kontrollgruppe, bestehend aus ebenfalls 11 Probanden, die nicht am Golftraining teilnahm. Sie fanden in der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im linken Sulcus centralis, im linken vorderen prämotorischen Kortex, im linken vorderen Teil des unteren Parietallappens, im linken Sulcus intraparietalis, im rechten Übergang vom Parietal- zum Okzipitallappen und im rechten unteren Teil des unteren Parietallappens.

Landi und Kollegen [25] untersuchten im gleichen Jahr den Effekt von visuell-motorischer Koordination. 12 gesunde Probanden im Alter zwischen 22 und 35 Jahren mussten mithilfe eines Joysticks ein sich bewegendes Ziel auf einem

Computerbildschirm verfolgen. Dieser Joystick sollte mit dem Daumen und dem Zeigefinger der rechten Hand bedient werden. Sie fanden in der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im linken primärmotorischen Kortex, und zwar in dem Teil, der die Bewegungen der Hand repräsentiert.

Studien zum kognitiven Training:

Die kognitiven Trainingsinterventionen, die in den im Folgenden genannten Studien durchgeführt wurden, beinhalten unter anderem intensives Auswendiglernen medizinischer Inhalte, Entziffern von Morsecodes oder auch Spiegelschriftlesen.

Draganski und Kollegen [26] untersuchten im Jahr 2006 insgesamt 38 Medizinstudenten im Alter von durchschnittlich 24 Jahren, die sich auf das erste medizinische Staatsexamen vorbereiteten und somit intensives Lernen über einen Zeitraum von ca. drei Monaten betrieben. Zwölf 22-jährige Probanden, die zu dieser Zeit nichts lernten, bildeten eine Kontrollgruppe. Dabei fand sich bei den Medizinstudenten eine Zunahme der grauen Substanz beidseits im hinteren und unteren Parietallappen sowie beidseits im hinteren Hippocampus. Außerdem zeigte sich eine Abnahme grauer Substanz beidseits im okzipitalen Parietallappen.

Ilg und Kollegen [27] führten 2008 eine Studie zum Spiegelschriftlesen durch. 20 gesunde Probanden im Alter von ca. 24 Jahren lasen über zwei Wochen täglich einen kurzen Zeitschriftenartikel in Spiegelschrift. 18 Probanden im Alter von durchschnittlich 25 Jahren dienten als Kontrollgruppe und lasen keine Spiegelschriftartikel. Sie fanden bei den Probanden der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im rechten hinteren Okzipitallappen.

Schmidt-Wilcke und Kollegen [28] ließen 2010 sechzehn ca. 30-jährige, gesunde Probanden an einem zweiwöchigen Training teilnehmen, bei dem es darum ging, verschiedene Morsecodes zu entziffern. Die Kontrollgruppe bestand aus 15 ca. 28-jährigen, gesunden Probanden und absolvierte das Training nicht. Es zeigte sich in der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im linken Gyrus fusiformis.

Woollett und Kollegen [29] untersuchten im gleichen Jahr 59 gesunde Probanden im durchschnittlichen Alter von 39 Jahren, die an einer Ausbildung zum Taxifahrer in

London teilnahmen. Sie mussten über drei bis vier Jahre hinweg den Stadtplan von London auswendig lernen, um sich im späteren Beruf in Londons ca. 25.000 Straßen gut zurechtzufinden. 31 ca. 35-jährige Probanden, die sich nicht in dieser Ausbildung befanden, dienten als Kontrollgruppe. Es zeigte sich in der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz beidseits im hinteren Hippocampus.

Kwok und Kollegen [30] führten 2011 eine Studie zum Lernen neuer Farbnamen durch. 19 Probanden nahmen an dem Training teil, in dem sie innerhalb von ca. 2 Stunden ihnen bereits bekannte Farben gezeigt bekamen. Anstatt diese jedoch mit deren eigentlichen Farbnamen zu benennen, lernten sie nun, diese mit von den Untersuchern vorgegebenen, frei erfundenen Worten zu bezeichnen. Es zeigte sich eine Zunahme grauer Substanz im linken visuellen Kortex und im rechten Kleinhirn.

Kombiniertes motorisches und kognitives Training:

2014 untersuchten Kühn und Kollegen [31] den Effekt von 2-monatigem Spielen eines Videospiele (min. 30 Minuten pro Tag). Eine Trainingsgruppe bestand aus 23 Teilnehmern im durchschnittlichen Alter von 23 Jahren und eine Kontrollgruppe bestand aus 25 Probanden im Alter von durchschnittlich 25 Jahren. Es zeigte sich in der Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im rechten Hippocampus, im rechten dorsolateralen präfrontalen Kortex und beidseits in den Loben 4 und 5 des Kleinhirns.

Tabelle 1: Übersicht der Studienergebnisse zu motorischem Training

Autor	Training	Hirnregion mit Zunahme grauer Substanz	Hirnregion mit Abnahme grauer Substanz	Modulierung
Draganski et al. 2004	Jonglieren	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlerer Temporallappen bds. (hMT/V5) • Linker Sulcus intraparietalis posterior 	Keine	Nein
Colcombe et al. 2006	Aerobic	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlerer Gyrus frontalis bds. • Rechter unterer Gyrus frontalis • Linker oberer Gyrus temporalis • Supplementärmotorischer Kortex bds. 	Keine	Ja
Boyke et al. 2008	Jonglieren	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlerer Temporallappen bds. • Linker Hippocampus • Linker oberer Gyrus frontalis • Rechter primärmotorischer Kortex • Nucleus accumbens bds. 	Keine	Nein
Taubert et al. 2010	Ganzkörper-Balance	<ul style="list-style-type: none"> • Linker supplementärmotorischer Kortex • Linker oberer Gyrus frontalis • Linker mittlere Gyrus orbitofrontalis 	<ul style="list-style-type: none"> • Rechtes Putamen • Rechter unterer Gyrus orbitofrontalis • Linker unterer Gyrus occipitalis • Rechter mittlerer Temporallappen • Kleinhirn Lobus 8 bds. 	Ja
Erickson et al. 2010	Aerobic	<ul style="list-style-type: none"> • Hippocampus bds. 	Keine	Ja
Bezzola et al. 2011	Golfspielen	<ul style="list-style-type: none"> • Linker Sulcus centralis • Linker vorderer prämotorischer Kortex • Unterer Parietallappen bds. • Linker Sulcus intraparietalis • Parieto-Okzipitaler Übergang rechts 	Keine	Nein
Landi et al. 2011	Joystick-spielen	<ul style="list-style-type: none"> • Linker prämotorischer Kortex 	Keine	Nein

Tabelle 2: Übersicht der Studienergebnisse zu kognitivem Training

Autor	Training	Hirnregion mit Zunahme grauer Substanz	Hirnregion mit Abnahme grauer Substanz	Modulierung
Draganski et al. 2006	Lernen fürs medizinische Staatsexamen	<ul style="list-style-type: none"> • Hinterer unterer Parietallappen bds. • Hinterer Hippocampus bds. 	<ul style="list-style-type: none"> • Okzipitaler Parietallappen bds. 	Nein
Ilg et al. 2008	Spiegelschriftlesen	<ul style="list-style-type: none"> • Rechter hinterer Okzipitallappen 	Keine	Nein
Schmidt-Wilcke et al. 2010	Entzifferung von Morsecodes	<ul style="list-style-type: none"> • Linker Gyrus fusiformis 	Keine	Nein
Woollett et al. 2010	Ortskunde bei Taxifahren	<ul style="list-style-type: none"> • Hinterer Hippocampus bds. 	Keine	Ja
Kwok et al. 2011	Lernen von Farbennamen	<ul style="list-style-type: none"> • Linker visueller Kortex • Rechts Kleinhirn 	Keine	Ja

Tabelle 3: Übersicht der Studienergebnisse zu kombiniertem motorischen und kognitiven Training

Autor	Training	Hirnregion mit Zunahme grauer Substanz	Hirnregion mit Abnahme grauer Substanz	Modulierung
Kühn et al. 2014	Spielen eines Videospiele	<ul style="list-style-type: none"> • Rechter Hippocampus • Rechter dorsolateraler präfrontaler Kortex • Lobi 4 und 5 des Kleinhirns bds. 	Keine	Ja

Anhand dieser beispielhaft erläuterten Studiendesigns wird deutlich, wie unterschiedlich und vielseitig Trainingsinterventionen bezüglich des Inhaltes und der Dauer sein können. Außerdem fällt bei der Art des Trainings auf, dass es bisher fast ausschließlich Studien zu entweder motorischem Training [19-25] oder kognitivem Training [26-30] gibt. Untersuchungen zu kombinierten Trainingsinterventionen mit sowohl motorischen als auch kognitiven Elementen [31] sind eher selten.

Daher wurde für die vorliegende Studie das kombinierte Trainingskonzept von Life Kinetik ausgewählt [32], das im Folgenden kurz erläutert wird.

1.3 Life Kinetik: motorisches und kognitives Training

Der Diplomsportlehrer Horst Lutz entwickelte ein multimodales Trainingskonzept mit dem Namen „Life Kinetik“ [32]. Es beinhaltet komplexe Übungen, die sowohl motorische als auch kognitive Fähigkeiten trainieren sollen. Der Trainierende wird vor die Herausforderung gestellt, eine motorische Übung zu bewältigen, währenddessen er gleichzeitig eine gedankliche Aufgabe lösen muss.

Motorische Übungen bestehen dabei zum einen aus aufeinanderfolgenden Bewegungen von Armen und Beinen (wie z.B. beim Werfen und Fangen eines Balls, beim Jonglieren mit mehreren Bällen oder auch bei Balanceübungen auf einem Bein) und zum anderen aus gezielten Bewegungen der Augenmuskulatur, indem sich bewegende Objekte beispielsweise visuell fixiert und verfolgt werden sollen.

Exemplarisch dargestellt wird dieses Konzept an der Übung mit dem Namen „Balltanz“ [33]: zwei Trainierende stehen sich mit einem Abstand von ca. 5 m gegenüber. Einer von beiden hält einen Ball in der Hand. Diesen Ball wird er seinem Gegenüber zuwerfen, unter Ansage einer bestimmten Zahl.

Die Zahl 1 fordert den Fänger auf, den Ball mit der linken Hand zu fangen und dabei das rechte Bein (gegenüberliegende Seite) nach vorn zu stellen. Die Zahl 2 bedeutet, den Ball mit der rechten Hand zu fangen und das linke Bein (gegenüberliegende Seite) nach vorn zu stellen. Die Zahl 3 bedeutet, den Ball mit der linken Hand zu fangen und das linke Bein (gleiche Seite) nach vorn zu stellen und die Zahl 4 bedeutet, den Ball

mit der rechten Hand zu fangen und dabei das rechte Bein (gleiche Seite) nach vorn zu stellen.

Dadurch muss der Trainierende also nicht nur den Ball fangen (motorische Übung), sondern gleichzeitig die Art und Weise wie er den Ball fangen soll anhand der angesagten Zahl erinnern (gedankliche Aufgabe).

Solche Übungen lassen sich an Komplexität unbegrenzt steigern, indem zum Beispiel die möglichen Kombinationen von Hand- und Bein-Bewegungen verändert oder anstatt eines kleinen Wurfballs mehrere Jonglierbälle, Fußbälle oder Tücher benutzt werden. Auch die Art der Ansagen kann erheblich variieren, wenn anstatt Zahlen verschiedene Farben, Städtenamen oder Tierarten verwendet werden [34].

Das Ziel ist es allerdings nicht, eine Übung bis zur Perfektion und vollautomatisiert durchzuführen – wie bei den meisten bisherigen Trainingsstudien –, sondern bei einer Erfolgsquote von ungefähr 60% (6 von 10 Übungen erfolgreich absolviert) den Schweregrad einer Übung weiter zu steigern oder eine komplett neue Aufgabe zu stellen. Dadurch wird das Gehirn ständig neuen und ungewohnten Bewegungs- und Denkmustern ausgesetzt [34].

Ein weiteres Beispiel zur Veranschaulichung ist die Übung „Tuchwirbel“ [33]: der Trainierende steht ungefähr hüftbreit mit beiden Beinen auf dem Boden. Mit der linken Hand hält er ein Tuch, das vor- und zurückgeschwungen wird. Mit der rechten Hand hält er einen Ball fest. Bei Ansage einer europäischen Stadt muss der Ball auf den Boden geprellt und wieder gefangen werden.

Bei Ansage aller anderen Städte der Welt muss der Ball nach oben geworfen und wieder gefangen werden. Oder alternativ: das Tuch wird mit der linken Hand über dem Kopf gekreist.

Bei Ansage einer Zahl muss der Ball mit der rechten Hand hochgeworfen und gefangen werden, während der linke Fuß einen Schritt nach vorn macht und bei Ansage einer Farbe muss der Ball mit der rechten Hand geprellt und wieder gefangen werden, während der rechte Fuß einen Schritt nach hinten macht.

1.4 Fragestellung und Hypothesen

Anhand von neuroanatomischen Querschnittsstudien ist bekannt, dass sich durch wiederholte Ausübung einer bestimmten Funktion diejenigen Hirnregionen morphologisch verändern und anpassen, die für diese bestimmte Funktion verantwortlich sind.

So berichten Bangert und Schlaug [35] über das sogenannte umgekehrte „Omega-Zeichen“, das im motorischen Kortex (genauer im Gyrus präcentralis) zu sehen ist und Hand- und Fingerbewegungen repräsentiert.

Nicht-Musiker haben dieses Zeichen auf beiden Hemisphären gleich häufig. Professionelle Pianisten jedoch haben das Omega-Zeichen signifikant häufiger und deutlicher sichtbar auf der linken Hemisphäre, wohingegen professionelle Violinisten dieses Zeichen häufiger und deutlicher auf der rechten Hemisphäre haben.

Diese Beobachtung passt zu dem Umstand, dass Pianisten hauptsächlich mit der rechten Hand spielen (die linke Hand dient eher der Begleitung) und Violinisten vornehmlich mit der linken Hand spielen, um die Saiten zu greifen (die rechte Hand führt den Bogen). Die wiederholt ausgeübte Funktion des Tastendrückens oder des Saitengreifens wird somit im kontralateralen motorischen Kortex durch höhere Konzentration von grauer Substanz repräsentiert, die als Omega-Zeichen sichtbar ist.

Aydin und Kollegen [36] zeigen, dass Mathematiker im Vergleich zu Nicht-Mathematikern signifikant höhere Konzentrationen grauer Substanz beidseits im unteren Parietallappen und im linken unteren Frontallappen aufweisen. Diese Hirnregionen sind verantwortlich für mathematisches Denken und werden daher von Mathematikern in viel höherem Maße gebraucht, weshalb sie sich durch Vergrößerung an den häufigen Gebrauch anpassen.

Maguire und Kollegen [37] berichten, dass Taxifahrer im Vergleich zu Nicht-Taxifahrern ein signifikant größeres Volumen grauer Substanz im linken und rechten Hippocampus aufweisen. Der Hippocampus ist unter anderem für Navigation verantwortlich, also passt diese morphologische Anpassung zu der an die Taxifahrer gestellten Anforderung, gut navigieren zu können.

Ausgehend von diesen Beobachtungen aus den genannten Längs- und Querschnittsstudien, werden in der Trainingsgruppe der vorliegenden Studie Zunahmen von grauer Substanz in denjenigen Hirnregionen erwartet, deren Funktion von den ausgewählten Life Kinetik-Übungen angesprochen und trainiert werden. Die Forschungshypothesen bezüglich der strukturellen Veränderungen lauteten:

- Eine *Zunahme* grauer Substanz wird im **Gyrus präcentralis** erwartet (BA 4)

Der Gyrus präcentralis entspricht der primärmotorischen Rinde. Es ist bekannt, dass diese fürs Lernen und Ausführen von Bewegung verantwortlich ist [38]. Es reicht allein die passive Bewegung von Handgelenksmuskeln durch elektrische Stimulation, um eine erhöhte Aktivität im Gyrus präcentralis nachzuweisen [39]. Grafton und Kollegen [40] zeigen auch bei der Bewegung eines Armes und beim Erlernen einer bestimmten Fingerabfolgebewegung eine erhöhte Aktivität im Gyrus präcentralis, die sich in einer Reorganisation der primärmotorischen Rinde äußert [41].

Das Life Kinetik-Training enthält viele motorischen Bewegungseinheiten, bei denen die Arme, die Handgelenksmuskulatur und die Finger in zahlreichen Übungen trainiert werden.

- Eine *Zunahme* grauer Substanz wird im **supplementärmotorischen Kortex** erwartet (BA 6)

Die Aktivität im supplementärmotorischen Kortex steigt nachweislich bei elektrischer Stimulation der Handgelenksmuskeln [39] und dieser ist bei der Planung selbst initiiertes Bewegungen beteiligt [42].

Im Life Kinetik-Training werden viele Übungen zuerst vom Trainer vorgeführt und müssen dann vom Trainierenden selbst ausgeführt und damit selbst initiiert werden. Auch an mental vorgestellten sowie real ausgeführten Handbewegungen ist der supplementärmotorische Kortex beteiligt [43]. Handbewegungen kommen in sämtlichen Life Kinetik-Übungen vor.

- Eine *Zunahme* grauer Substanz wird im **Cerebellum (Kleinhirn)** erwartet

Das Kleinhirn spielt eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Auge-Hand-Koordination [44]. Im Life Kinetik-Training ist die Auge-Hand-Koordination essenziell, da bei vielen Übungen Bälle mit der Hand geworfen und gefangen werden müssen. Das Cerebellum ist außerdem an jeglichen Bewegungen der Hand (wie z.B. der Finger) und des Fußes (wie z.B. des Knöchels oder der Zehen) beteiligt [45]. Die Hände und Füße werden bei fast allen Übungen im Life Kinetik-Training beansprucht. Des Weiteren zeigt das Kleinhirn erhöhte Aktivität in den frühen Phasen des Lernvorganges, in denen man noch viele Fehler macht und die Übung nicht beherrscht [46]. Das ist eines der wichtigsten Grundprinzipien von Life Kinetik, dass Übungen nie bis zur Perfektion trainiert werden, sondern nach kleinen Erfolgen (ca. 6 von 10 Versuchen erfolgreich absolviert) zu neuen Übungen gewechselt wird.

- Eine *Zunahme* grauer Substanz wird in den **Basalganglien** erwartet

Die Basalganglien stehen durch motorische Schleifen in Verbindung mit dem Kleinhirn und dem motorischen Kortex [47] und sind maßgeblich beim Erlernen motorischer Fähigkeiten beteiligt [48].

Vor allem zeigen sie jedoch erhöhte Aktivität bei der Planung und Ausführung neuer Bewegungen [49]. Das entspricht erneut dem Grundprinzip von Life Kinetik, dass Übungen nicht bis zur Automatisierung geübt werden, sondern häufig gewechselt und neue Übungen erlernt werden müssen.

Außerdem spielen die Basalganglien eine wichtige Rolle bei kognitiven Lernvorgängen [50]. Viele Life Kinetik-Übungen trainieren kognitive Funktionen wie Aufmerksamkeit, Gedächtnis oder Konzentration.

- Eine *Zunahme* grauer Substanz wird im **visuellen Kortex** erwartet
(BA 17, 18 und 19)

Der visuelle Kortex spielt bei der kognitiven Verarbeitung visueller Reize eine entscheidende Rolle [51] und ist wichtig für die Fixierung und visuelle Verfolgung von sich bewegenden Objekten [52].

Er ist auch an der Erkennung von Größe, Form und Lokalisation eines Objektes beteiligt [53]. Diese Funktionen sind essenziell, wenn es wie in vielen Life Kinetik-Übungen darum geht, einen Ball zu fangen, da dieser kontinuierlich visuell fixiert und verfolgt werden muss und zudem dessen Größe, Form und Lokalisation abgeschätzt werden müssen, um eine gezielte Fangbewegung auszuführen.

- Eine *Zunahme* grauer Substanz wird im **Hippocampus** erwartet (BA 27, 28 und 34-36)

Das hippocampale Volumen an grauer Substanz korreliert positiv mit körperlicher Aktivität [54] und er ist unabdingbar für die Bildung von Gedächtnis [55]. Der Grad an körperlicher Aktivität steigt unweigerlich mit jedem Life Kinetik-Training und die kognitiven Übungen fordern ein gut funktionierendes Gedächtnis. Außerdem hat sich in einigen anderen longitudinalen Trainingsstudien bereits eine Zunahme an hippocampaler grauer Substanz gezeigt [18, 21, 24, 27].

Als Auswirkungen des Life Kinetik-Trainings auf die kognitive Leistungsfähigkeit der Trainingsgruppe werden insgesamt eine Verbesserung von Konzentration und Flexibilität, eine Reduktion von Ablenkbarkeit, eine Erweiterung des Gesichtsfeldes und eine Zunahme an Merkfähigkeit erwartet. Die Forschungshypothesen bezüglich der kognitiven Veränderungen lauteten daher:

Für die Tests **Flexibilität**, **Aktives Gesichtsfeld**, **Geteilte Aufmerksamkeit** und **Ablenkbarkeit** (aus der TAP/TAP-M) werden *signifikant reduzierte* Reaktionszeiten und eine *signifikante Abnahme* von Fehlern erwartet.

Für den **California Verbal Learning Test** wird eine *signifikante Zunahme* korrekt aus dem Gedächtnis abgerufener Begriffe erwartet.

Für den **Trail Making Test** werden *signifikant abnehmende* Bearbeitungszeiten erwartet.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Probandenkollektiv

Ursprünglich erklärten sich insgesamt 23 gesunde Probanden im Alter von über 18 Jahren dazu bereit, am Life Kinetik-Training der vorliegenden Studie teilzunehmen. Alle Probanden waren rechtshändige Nichtraucher, in unterschiedlichem Fitnesszustand. Allgemeine Ausschlusskriterien waren: sämtliche Kontraindikationen gegen eine MRT-Messung, Schwierigkeiten im Umgang mit der deutschen Sprache und psychiatrische Erkrankungen. Von diesen 23 Probanden wurden jedoch 2 Probanden wegen terminlichen Schwierigkeiten (1 Proband) und wegen Krankheit (1 Proband) ausgeschlossen, sodass insgesamt 21 Datensätze vollständig ausgewertet werden konnten.

Diesen 21 Probanden wurden 17 Kontrollprobanden zugeteilt, die nicht am Life Kinetik-Training teilnahmen. Alle Probanden wurden ausführlich aufgeklärt und dokumentierten schriftlich ihr Einverständnis zur Teilnahme. Die Studie wurde von der lokalen Ethikkommission genehmigt.

2.2 Studiendesign

Zu Beginn nahmen alle Teilnehmer an einer MRT-Messung teil und wurden neuropsychologisch getestet. Daraufhin begann die Trainingsphase, in der die Trainingsgruppe das Life Kinetik-Training absolvierte (einmal pro Woche eine einstündige Trainingseinheit, Teilnahme an mindestens 11 von insgesamt 13 Trainingseinheiten). Die Kontrollgruppe nahm nicht am Training teil.

Anschließend wurden wie zu Beginn MRT-Messungen und neuropsychologische Testungen mit allen Teilnehmern durchgeführt.

2.3 Magnetresonanztomografie

Alle MRT-Aufnahmen wurden mit einem 3 Tesla Trio Scanner mit Tim Technologie der Firma Siemens akquiriert. Die MRT-Messung bestand aus einer 3D MPRAGE-Messung, einer Messung zum Resting-State und einer DTI-Messung.

Für die nachfolgende Auswertung wurde jedoch nur die 3D MPRAGE-Messung verwendet. Diese generiert MRT-Aufnahmen mit 192 Schichten und einer Schichtdicke von 1 mm. Damit ist durch entsprechende Analysemethoden eine Auswertung von Volumen und Zusammensetzung der grauen Hirnsubstanz möglich.

2.4 Neuropsychologische Tests

Für die Neuropsychologie wurden insgesamt 7 Tests durchgeführt (4 Computertests und 3 Papier-und-Bleistift-Tests).

Aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung [56] wurden die Tests zur Flexibilität und zur geteilten Aufmerksamkeit gewählt und aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung Motorik [57] die Tests zur Ablenkbarkeit und zum aktiven Gesichtsfeld.

Des Weiteren wurden der California Verbal Learning Test [58], der Trail-Making-Test [59] und der Wortschatztest [60] durchgeführt.

2.4.1 Flexibilität

Links und rechts der Bildschirmmitte werden gleichzeitig eine eckige und eine runde Form dargeboten (s. Abbildung 1). Vor dem Computer liegt rechts und links jeweils eine Taste. Wird die linke Taste gedrückt, so wird diejenige Form ausgewählt, die auf dem Bildschirm links angezeigt wird und umgekehrt.

In der ersten Runde hat der Proband die Aufgabe, diejenige Seite auszuwählen, auf der die eckige Form dargeboten wird, um in der nächsten Runde diejenige Seite auszuwählen, auf der die runde Form angezeigt wird. In der darauffolgenden Runde soll wieder die Seite der eckigen Form ausgewählt werden und danach die der runden usw. Dadurch wird vom Probanden verlangt, seine Aufmerksamkeit jede Runde erneut auf einen neuen Zielreiz (eckig – rund – eckig – rund) zu lenken.

Dieser Test misst somit, ob eine effiziente interne Kontrolle vorhanden ist, die den Aufmerksamkeitsfokus erfolgreich lenken kann. Aufmerksamkeit ist nämlich kein statischer Prozess, sondern ein flexibles Wechseln zwischen bekannten und unbekanntem Reizen. Die Steuerung hierfür übernimmt der präfrontale Kortex [56].

Stereotypes, starres und unflexibles Verhalten wird bei Patienten mit Schädigungen im präfrontalen Kortex beobachtet [56].



Abbildung 1: Bildschirmpräsentation im Test für Flexibilität

2.4.2 Aktives Gesichtsfeld

Dieser Test besteht aus zwei Aufgaben gleichzeitig: einer zentralen Aufgabe, die sich in der Bildschirmmitte abspielt, und einer peripheren Aufgabe, die sich rund um die Bildschirmmitte abspielt (s. Abbildung 2).

Zentrale Aufgabe: es werden in der Bildschirmmitte acht Symbole präsentiert, die als „10“, liegende „10“, „01“, liegende „01“, „S“, liegendes „S“, gespiegeltes „S“ bzw. liegendes gespiegeltes „S“ gedeutet werden können. Der Proband soll die vor ihm liegende Taste drücken, wenn er die Symbole „10“, liegende „10“, „01“ bzw. liegende „01“ erkennt.

Periphere Aufgabe: simultan zu diesen Symbolen leuchtet ein sich auf dem übrigen Bildschirm befindender Kreise plötzlich auf. Dies kann an jeder beliebigen Stelle passieren. Wann immer der Proband dieses Aufleuchten wahrnimmt, soll er ebenfalls die vor ihm liegende Taste betätigen.

Dieser Test misst somit die Größe des aktiven Gesichtsfeldes, was bei etwaigen Situationen im Alltag von großer Bedeutung ist (bspw. während des Autofahrens, bei dem nicht nur der Blick nach vorne auf die Fahrbahn, sondern auch die visuelle Wahrnehmung der Fußgänger am Straßenrand von elementarer Bedeutung ist) [57].

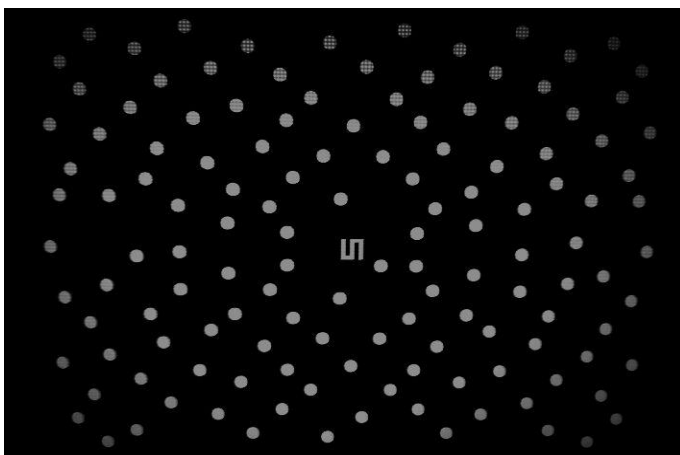


Abbildung 2: Bildschirmpräsentation im Test fürs aktive Gesichtsfeld

2.4.3 Geteilte Aufmerksamkeit

Dieser Test besteht aus einer visuellen und einer auditiven Aufgabe gleichzeitig.

Visuelle Aufgabe: in der Bildschirmmitte erscheinen vier verschiedene Symbole, die als liegendes „S“, gespiegeltes liegendes „S“, „01“ bzw. „10“ gedeutet werden können (s. Abbildung 3). Der Proband soll so schnell wie möglich auf die vor ihm liegende Taste drücken, wenn die Symbole „01“ bzw. „10“ auf dem Bildschirm erscheinen.

Auditiv Aufgabe: simultan zu den Symbolen werden hintereinander abwechselnd ein hoher bzw. ein tiefer Ton gespielt. Von Zeit zu Zeit kommen jedoch zwei hohe oder zwei tiefe Töne hintereinander. Immer dann soll der Proband so schnell wie möglich die vor ihm liegende Taste drücken.

Damit wird die Fähigkeit zur Aufteilung der Aufmerksamkeit auf simultan ablaufende Prozesse gemessen, die im Alltag besonders dann gefordert wird, wenn man mehrere Dinge gleichzeitig beachten muss [56].

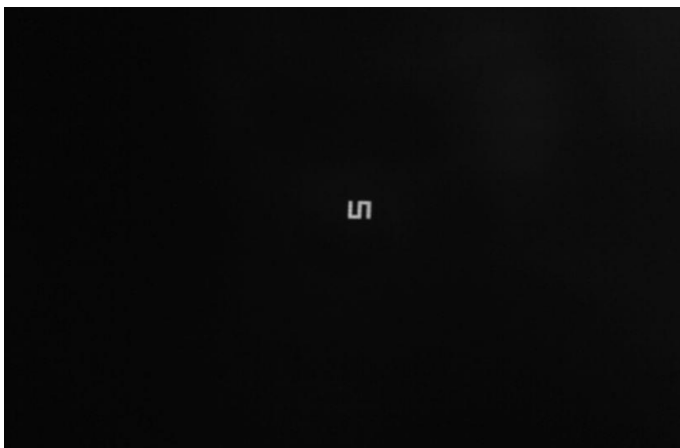


Abbildung 3: Bildschirmpräsentation im Test für geteilte Aufmerksamkeit

2.4.4 Ablenkbarkeit

In der Mitte des Bildschirms werden zügig hintereinander Smileys präsentiert, die entweder fröhlich (Mundwinkel nach oben) oder traurig (Mundwinkel nach unten) schauen (s. Abbildung 4).

Die vor dem Probanden liegende Taste soll gedrückt werden, sobald der Proband einen traurigen Smiley erkennt. Gleichzeitig werden jedoch sogenannte Ablenker gezeigt, die auf dem restlichen Bildschirm erscheinen. Das sind kleine bunte Bilder, die aufgrund ihrer Frequenz die auf den Smiley gerichtete Aufmerksamkeit stören sollen.

Werden diese nämlich mit den Augen fixiert, ist es nicht mehr möglich zu erkennen, ob der kurz zuvor gezeigte Smiley traurig oder fröhlich war. Das heißt, der Proband wird dann entweder einen traurigen Smiley verpasst haben oder trotzdem auf Verdacht die Taste drücken.

Damit wird die Fähigkeit gemessen, den Aufmerksamkeitsfokus willentlich auf einen zentralen visuellen Reiz zu richten und diesen auch unter ablenkenden Bedingungen beizubehalten. Diese Funktion findet im Frontalhirn statt [57].

Patienten mit frontalen Läsionen weisen Kontrollverlust und erhöhte Ablenkbarkeit auf [57].

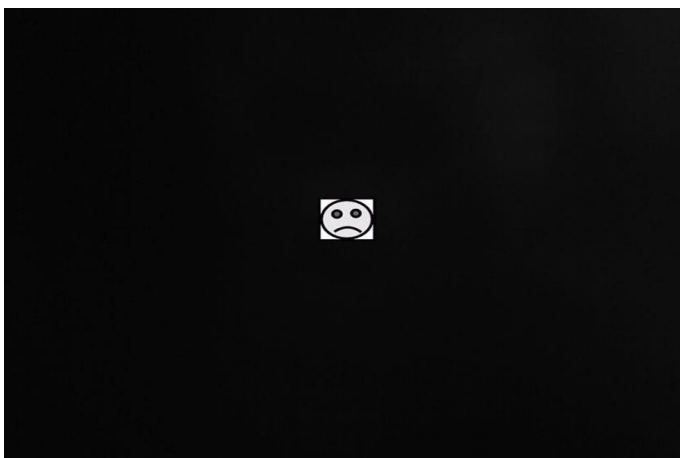


Abbildung 4: Bildschirmpräsentation im Test für Ablenkbarkeit

2.4.5 California Verbal Learning Test

Dem Probanden wird eine Liste mit 16 Begriffen vorgelesen (Liste A). Diese Begriffe lassen sich vier semantischen Kategorien zuordnen. Es werden aber nie Begriffe derselben Kategorie aufeinanderfolgend präsentiert. Während dieser Präsentation soll sich der Proband so viele Begriffe wie möglich merken und danach sofort aus dem Gedächtnis abrufen. Solch ein Lerndurchgang wird mit der Liste A fünf Mal wiederholt.

Danach wird ein Lerndurchgang mit einer neuen Liste und 16 neuen Begriffen durchgeführt (Liste B), um Interferenzeffekte zu untersuchen. Daraufhin erfolgt ein freies Abrufen der Liste A aus dem Gedächtnis ohne vorausgegangene Präsentation. Anschließend werden die semantischen Kategorien als Hilfestellung genannt, um erneut Liste A aus dem Gedächtnis abzurufen.

Ein sich anschließendes Intervall von 20 Minuten wird für nonverbale Tests genutzt (in dieser Studie wurden die oben beschriebenen Tests der Testbatterie für Aufmerksamkeitsprüfung am Computer bearbeitet), um danach den langfristigen freien Abruf der Liste A zu testen sowie den langfristigen Abruf mithilfe der semantischen Kategorien. Zum Schluss erfolgt eine Ja/Nein-Wiedererkennung, bei der Begriffe sowohl aus Liste A und B als auch unabhängig davon vorgelesen werden und der Proband das Erkennen der Begriffe aus Liste A mit „ja“ bestätigen soll.

Für die zweite Testung nach dem Life-Kinetik-Training wurden andere Listen mit anderen Begriffen und anderen semantischen Kategorien verwendet, um Erinnerungseffekte an die erste Testung zu vermeiden.

Dieser Test misst die Fähigkeit, sich kurzfristig unbekannte Begriffe korrekt einprägen und korrekt wiedergeben zu können [58].

Im Rahmen dieser Studie interessieren vor allem die Anzahl richtig abgerufener Begriffe des Lerndurchgangs eins (DG1) und fünf (DG5) der Liste A sowie des freien Abrufs der Liste A direkt nach Präsentation der Liste B (verzögerte freie Wiedergabe, VFW1) und des freien langfristigen Abrufs der Liste A nach 20 min (VFW2).

2.4.6 Trail Making Test

Der Trail Making Test ist ein Papier-und-Bleistifttest, bei dem Zahlen und Buchstaben jeweils im Wechsel in aufsteigender Reihenfolge durch eine konstante Linie miteinander verbunden werden sollen. Die Zeit, die dafür benötigt wird, wird mit einer Stoppuhr gemessen.

Dieser Screening-Test dient der Überprüfung von verschiedenen Aufmerksamkeitskomponenten und kognitiver Verarbeitungsgeschwindigkeit [59].

2.4.7 Wortschatztest

Der Wortschatztest wurde durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Probanden normal intelligent sind und es keine groben IQ-Schwankungen innerhalb der Stichprobe gibt.

Er besteht aus 40 Zeilen, in denen jeweils das sprachlich korrekte Wort (Zielwort) gegenüber der 5 sprachlich falschen Wörter (Distraktoren) durch Unterstreichen abgegrenzt werden soll [60].

2.5 Datenanalyse

2.5.1 Voxelbasierte Morphometrie

Für die Analyse der anatomischen Daten der vorliegenden Studie wurde die Methode der VBM ausgewählt und mit der Auswertesoftware SPM12 durchgeführt (<https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm12/>). Mit dieser Methode können lokale Unterschiede in Konzentration und Volumen der hirneigenen grauen Substanz zwischen verschiedenen magnetresonanztomografischen Bildern berechnet werden.

Diese MRT-Bilder können verschieden gewichtet sein. Je nach Auswahl der jeweiligen Messfrequenz, entstehen T1- oder T2-gewichtete Bilder. Diese unterscheiden sich in der Art der sogenannten Relaxationszeit. Diese bezeichnet die Zeit, die die Atomkerne brauchen, um aus der Lage im Magnetfeld in ihre eigentliche Gleichgewichtslage zurückzukehren. Die Relaxationszeit bildet damit die Grundlage der Bilderzeugung [61].

Die longitudinale Relaxationszeit wird als T1-Zeit und die transversale Relaxationszeit wird als T2-Zeit bezeichnet. T1-Bilder zeichnen sich durch einen hohen Kontrast zwischen grauer und weißer Substanz aus und sind daher besonders gut für die VBM geeignet. Fett und die weiße Substanz werden mit hoher und CSF (Liquor) mit niedriger Intensität dargestellt.

Die VBM gliedert sich in 3 Schritte: Segmentierung, Normalisierung (mit oder ohne Modulierung) und Glättung [61].

Die **Segmentierung** erfolgt mithilfe des sogenannten *Gaussian Mixture Modells*. Dabei wird ein Histogramm erstellt, das die unterschiedlichen Helligkeiten (Intensitäten) des MRT-Bildes darstellt. Pro Bild gibt es (vereinfacht) 4 verschiedene Intensitäten.

Die geringste Intensität hat der Hintergrund des Bildes, dann folgt der CSF, danach die graue Substanz und die höchste Intensität besitzt die weiße Substanz. Die Häufigkeit der jeweiligen Bildintensitäten bildet ein Histogramm. Die Häufigkeitsverteilungen im Histogramm werden anschließend in 4 Gauß-Kurven eingepasst. Jede Kurve hat ihren eigenen Maximalwert. Diejenigen Bildintensitäten, die einem Maximalwert entsprechen, repräsentieren mit der höchsten Wahrscheinlichkeit dasjenige Gewebe, für das dieser Maximalwert steht.

Entspricht also bspw. eine Bildintensität dem Maximalwert der grauen Substanz, dann repräsentiert diese mit höchster Wahrscheinlichkeit auch wirklich graue Substanz. Ist die Bildintensität jedoch kleiner oder größer als der Maximalwert für graue Substanz, so ist es viel wahrscheinlicher, dass es sich um CSF (Intensität ist geringer) oder um weiße Substanz (Intensität ist höher) handelt [61].

Es werden also alle akquirierten MRT-Bilder bei diesem Schritt in 3 verschiedene Gewebetypen unterteilt: graue Substanz, weiße Substanz und CSF.

Zusätzlich werden alle abgebildeten Gehirne in Bildpunkte (sogenannte *Voxel*) unterteilt. Ein Voxel ist das dreidimensionale Äquivalent eines Pixels und hat in den vorliegenden MR-Daten die Größe von 1x1x1 mm. Dadurch entsteht eine Karte, die

Voxel für Voxel die Wahrscheinlichkeiten für den Anteil an grauer Substanz, weißer Substanz und CSF zeigt.

Diese Wahrscheinlichkeiten und deren Veränderung über die Trainingsphase mit Life Kinetik hinweg können nun mithilfe statistischer Tests über mehrere Gehirne voxelweise analysiert werden, da durch die sich anschließende Normalisierung jedes Voxel dieselbe anatomische Struktur in den verschiedenen Gehirnen darstellt [61].

Für die Auswertung der vorliegenden Studie wurden ausschließlich die Veränderungen der grauen Substanz analysiert und in den Ergebnissen dargestellt.

Die **Normalisierung** ist ein Verfahren zur Anpassung der akquirierten MRT-Bilder an ein Koordinatensystem mit definierten stereotaktischen Koordinaten (Talairach und Tournoux 1988). Der Koordinatenursprung (Nullpunkt) ist dabei die *Comissura anterior* (CA), von der aus eine gedachte Linie zur *Comissura posterior* (CP) gezogen wird. Anhand dieser Linie erfolgt die Ausrichtung der Bilder im Koordinatensystem (Koregistrierung). So können alle Strukturen des Gehirns in Millimeterschritten mit standardisierten Koordinaten versehen werden [61].

Individuelle Gehirne haben jedoch individuelle anatomische Variationen. Um mehrere Gehirne miteinander vergleichen zu können, muss jedes einzelne Gehirn an ein Referenzgehirn (Template) angepasst werden. Das ist der eigentliche Schritt der linearen Normalisierung. Die individuellen Gehirne werden durch Verschiebung, Rotation, Stauchung und Streckung an ein Standard-Gehirn-Template angeglichen [61].

Dieses Template wurde zunächst aus allen Gehirnen der vorliegenden Stichprobe mittels DARTEL generiert [62] und anschließend an das von SPM12 zur Verfügung gestellte Standardgehirn (ICBM space template/MNI template) angepasst.

Diese Anpassung ist nötig, um später für die Ergebnisdarstellung einen Atlas zur Bestimmung der Hirnregionen verwenden zu können (https://www.nitrc.org/projects/wfu_pickatlas/).

Pro Voxel lassen sich zwei verschiedene morphometrische Parameter bestimmen. Die *Konzentration* und das *Volumen* der grauen Substanz. Ein Beispiel soll den Unterschied dieser beiden Parameter verdeutlichen:

Bei der Normalisierung werden individuelle Gehirne an ein Template (gemittelttes Gehirn) angepasst. Angenommen, der Temporallappen eines individuellen Gehirns wäre nur halb so groß wie der des Templates. Durch die Normalisierung würde dieser Temporallappen verdoppelt werden, um an das Template angepasst zu werden. Er bestünde nach der Normalisierung aus doppelt so vielen Voxeln im Vergleich zu seiner Ursprungsgröße.

Das bedeutet, dass durch diesen Schritt die Information über sein ursprüngliches Volumen verloren geht. Es ist in diesem Fall nur noch die Information über die Konzentration von grauer Substanz enthalten, d.h. über die Wahrscheinlichkeit von grauer Substanz innerhalb der Voxel, verglichen mit anderen Gewebetypen in dieser Region. Über das Volumen lässt sich keine Aussage mehr treffen [61].

Soll die Information über das Volumen der jeweiligen Region jedoch beibehalten werden, so ist der Schritt der **Modulierung** notwendig. Der nach der Normalisierung doppelt so große Temporallappen würde durch diesen Schritt im fertigen MRT-Bild mit nur halb so starker Intensität dargestellt werden.

Somit wäre die Information über das ursprüngliche Volumen erhalten geblieben, nämlich, dass der Temporallappen vor der Normalisierung nur halb so groß war [61]. Daher spricht man bei der Konzentration von *unmodulierten* Daten und bei Volumen von *modulierten* Daten.

Im letzten Schritt der VBM werden die segmentierten, normalisierten und ggf. modulierten MRT-Bilder einer **Glättung** mit einem Gauß-Filter der Halbwertsbreite von 8x8x8 mm unterzogen. Dadurch werden durch die Normalisierung möglicherweise entstandene Bildverzerrungen minimiert. Außerdem wird die Validität der statistischen Analyse erhöht, weil die Wahrscheinlichkeiten für einen bestimmten Gewebetyp, die nach der Segmentierung sehr dicht bei 0 oder 1 liegen, durch die Glättung besser normalverteilt werden [63].

2.5.2 Statistisches Parametrisches Mapping

Die VBM wurde mithilfe der SPM12 Software durchgeführt (SPM12; Wellcome Department of Cognitive Neurology).

Die parametrische Statistik nutzt erhobene Daten einer Stichprobe, um mögliche Aussagen über eine unbekannte Grundgesamtheit herzuleiten. Dabei wird von einer Normalverteilung der Variablen in dieser Grundgesamtheit ausgegangen. Wichtige Parameter sind der Mittelwert, die Varianz und die Standardabweichung, um die jeweiligen Hypothesen zu überprüfen.

Die Analyse der vorliegenden Daten erfolgte unter Anwendung des allgemeinen linearen Modells. Diese Analyse erfolgt für jedes Voxel einzeln, um Zusammenhänge auf lokaler Ebene zu untersuchen. Als Kovariaten wurden das Alter, das Geschlecht und das Gesamthirnvolumen der Probanden miteinbezogen, um mögliche Einflüsse dieser Variablen zu kontrollieren. Zur Vermeidung von Randeffekten wurden nur solche Voxel mit einem Wert von $>0,1$ in die Analyse einbezogen, d.h. ihr Anteil an grauer Substanz ist größer als 10%.

Benachbarte Voxel, deren Kennwerte der statistischen Analyse einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, werden zu sogenannten Clustern zusammengefasst. In den Ergebnissen werden diejenigen Cluster berichtet, die folgenden Kriterien entsprechen: (a) alle Voxel sind bei einem Grenzwert von $p=0.001$ (unkorrigiert) signifikant und (b) das Cluster ist gleichzeitig bei einem Grenzwert von $p=0.05$ (korrigiert für multiples Testen (FWE)) signifikant.

Es erfolgten insgesamt 4 statistische Analysen der MRT-Daten mit SPM12. Zum einen wurde für die Trainings- und Kontrollgruppe jeweils eine Analyse durchgeführt, um Veränderungen der grauen Substanz zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zu detektieren und zum anderen wurde ein Gruppenvergleich zwischen Trainings- und Kontrollgruppe vor Trainingsbeginn durchgeführt, um eventuell schon vor Trainingsintervention bestehende anatomische Unterschiede festzustellen und nicht fälschlicherweise als Ergebnis zu interpretieren.

Außerdem wurden Varianzanalysen (ANOVA) berechnet, um die Interaktion von Training und Zeitpunkt zu analysieren und so in der Trainingsgruppe mögliche signifikante Unterschiede auf die Trainingsintervention zurückführen zu können.

2.5.3 SPSS Statistics

Die neuropsychologischen Daten wurden im Rahmen der SPSS Statistics Software (Version Nummer 23) mit Hilfe von t-Tests für abhängige Stichproben (gepaarte t-Tests) ausgewertet, um Veränderungen zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt festzustellen.

Auch hier wurden Varianzanalysen (ANOVA) berechnet, um mögliche signifikante Unterschiede durch die ausgewählte Trainingsintervention erklären zu können. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt, was einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $< 5\%$ entspricht.

3 ERGEBNISSE

3.1 Beschreibung der Stichprobe

3.1.1 Soziodemografische Merkmale

Die Stichprobe setzte sich aus insgesamt 38 gesunden Probanden zusammen (s. Tabelle 4). Davon waren 21 Probanden im Alter von durchschnittlich 47,75 Jahren der Trainingsgruppe zugeordnet (12 weiblich, 9 männlich).

Jeder dieser Probanden nahm über einen Zeitraum von 13 Wochen an mindestens 11 von 13 Life Kinetik-Trainingseinheiten teil. Die Life Kinetik-Trainings fanden einmal wöchentlich mit einer Trainingsdauer von einer Stunde statt.

Außerdem wurde jeder dieser Probanden bis auf einen auch neuropsychologisch getestet (einer Probandin waren die Tests der TAP/TAP-M und der CVLT so gut bekannt, dass ihre Daten nicht in die Auswertung einfließen).

Die Kontrollgruppe setzte sich aus 17 Probanden zusammen, von denen 11 sowohl an einer MRT-Messung als auch an einer neuropsychologischen Testung teilnahmen und 6 ausschließlich neuropsychologisch getestet wurden.

Aufgrund der Ergebnisse der Trainingsgruppe im Wortschatztest (Spannweite 92 - 129, Mittelwert 111), musste kein Proband wegen zu niedrigem IQ ausgeschlossen werden. Weitere Angaben zu Altersverteilung und Hirnvolumina der Trainings- und Kontrollgruppe finden sich in den Tabellen 5 und 6.

Tabelle 4: Verteilung der Teilnehmer auf die Trainings- bzw. Kontrollgruppe und Darstellung der Teilnahme an MRT-Messung und/oder neuropsychologischen Testverfahren

Teilnehmer n = 38			
Trainingsgruppe n = 21		Kontrollgruppe n = 17	
MRT und Neuropsychologie n = 20	Nur MRT n = 1	MRT und Neuropsychologie n = 11	Nur Neuropsychologie n = 6

Tabelle 5: Alter und Hirnvolumina der Trainingsgruppe

		Messzeitpunkt 1		Messzeitpunkt 2	
		Mittelwert	Std	Mittelwert	Std
Alter (in Jahren)	männlich	45	13		
	weiblich	50	2		
Gesamthirnvolumen (in ml)	männlich	1555	123	1543	126
	weiblich	1454	125	1460	121
Graue Substanz (in ml)	männlich	672	68	676	68
	weiblich	660	70	656	71
Weiße Substanz (in ml)	männlich	447	51	444	51
	weiblich	432	44	432	42
Liquor (in ml)	männlich	436	86	423	86
	weiblich	362	60	372	53
GM/TIV *	männlich	0,43	0,04	0,44	0,04
	weiblich	0,45	0,03	0,45	0,03

*GM/TIV = Anteil grauer Substanz am Gesamthirnvolumen

Tabelle 6: Alter und Hirnvolumina der Kontrollgruppe

		Messzeitpunkt 1		Messzeitpunkt 2	
		Mittelwert	Std	Mittelwert	Std
Alter (in Jahren)	männlich	54	3		
	weiblich	46	7		
Gesamthirnvolumen (in ml)	männlich	1497	90	1497	94
	weiblich	1498	82	1496	86
Graue Substanz (in ml)	männlich	701	58	700	67
	weiblich	674	69	671	73
Weiße Substanz (in ml)	männlich	429	13	428	9
	weiblich	448	41	447	42
Liquor (in ml)	männlich	367	56	379	42
	weiblich	379	72	372	75
GM/TIV *	männlich	0,47	0,02	0,47	0,03
	weiblich	0,45	0,04	0,45	0,04

*GM/TIV = Anteil grauer Substanz am Gesamthirnvolumen

3.2 VBM Ergebnisse

3.2.1 Gruppenvergleich vor Trainingsbeginn

Der Vergleich von Konzentration und Volumen der grauen Substanz zwischen Trainingsgruppe und Kontrollgruppe zeigt vor Trainingsbeginn keine signifikanten Unterschiede.

Das bedeutet, dass die Teilnehmer keine relevanten interindividuellen hirmorphologischen Unterschiede vor Trainingsbeginn zeigten, sondern in sämtlichen Hirnregionen ähnliche Konzentrationen und Volumina von grauer Substanz aufwiesen.

3.2.2 Zunahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe

Konzentrationszunahme

Der Vergleich der Konzentration grauer Substanz zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigt in der Trainingsgruppe signifikante Zunahmen in folgenden spezifischen Hirnregionen:

Gyrus temporalis inferior links, Gyrus occipitalis superior links, Gyrus occipitalis inferior rechts und im linken Putamen (s. Abbildungen 5-8 und Tabelle 7).

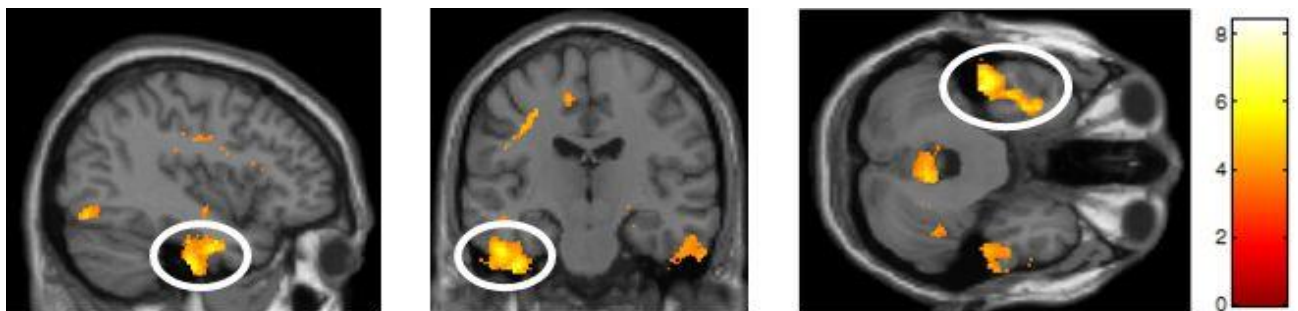


Abbildung 5: Gyrus temporalis inferior links



Abbildung 6: Gyrus occipitalis superior links

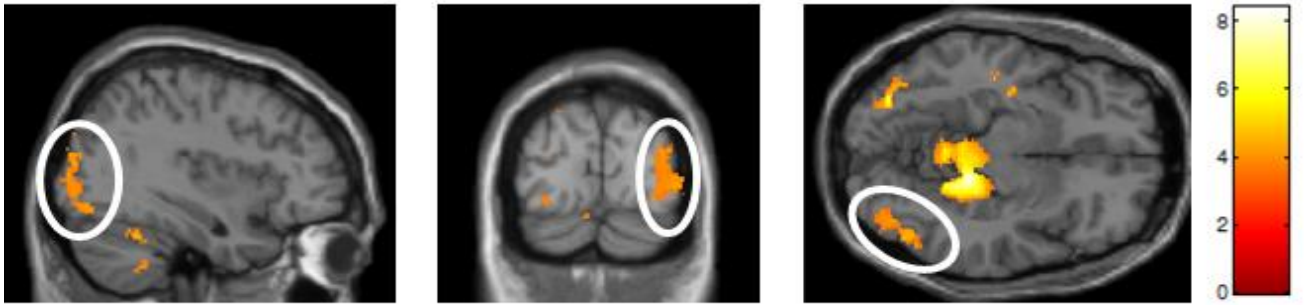


Abbildung 7: Gyrus occipitalis inferior rechts

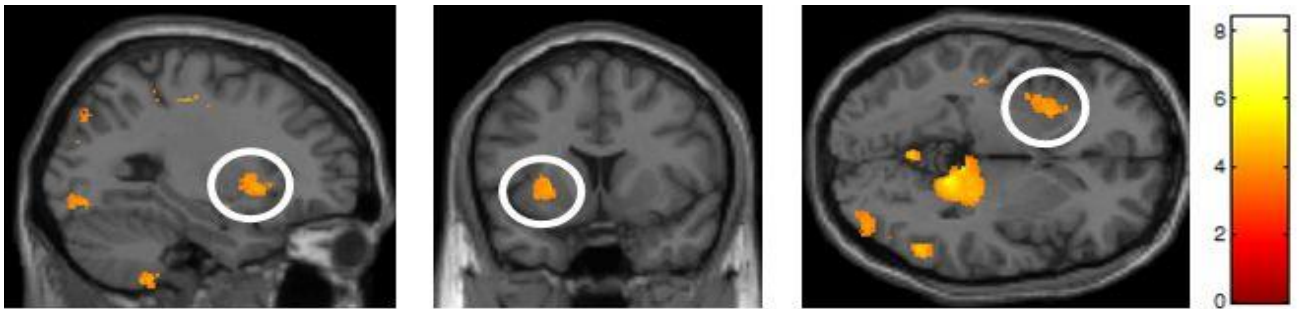


Abbildung 8: Putamen links

Volumenzunahme

Der Vergleich des Volumens grauer Substanz zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigte in der Trainingsgruppe signifikante Zunahmen in folgenden spezifischen Hirnregionen:

Gyrus temporalis inferior links, Cerebellum Lobus 4 und 5 rechts (das Cluster erstreckt sich bis in die linken Lobi 4 und 5) und im Cerebellum Lobus 8 rechts (das Cluster erstreckt sich bis in den linken Lobus 8) (s. Abbildungen 9-11 und Tabelle 7).



Abbildung 9: Gyrus temporalis inferior links

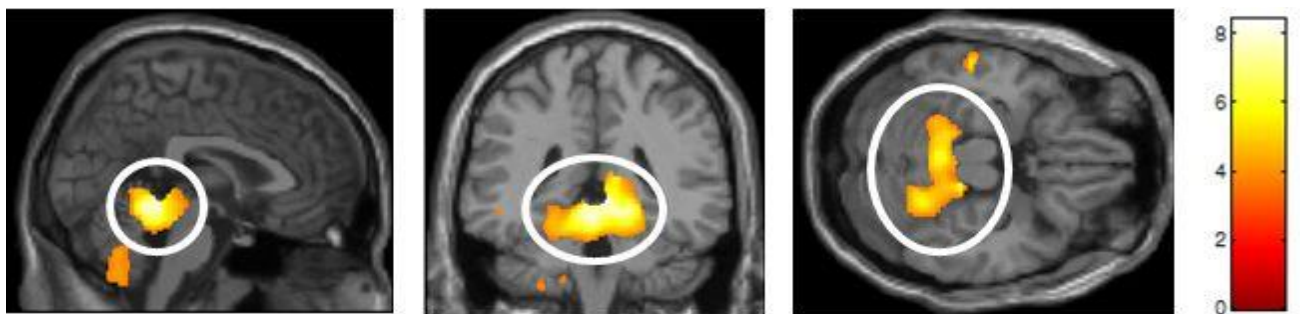


Abbildung 10: Cerebellum Lobus 4 und 5 rechts (mit Ausdehnung nach links)



Abbildung 11: Cerebellum Lobus 8 rechts (mit Ausdehnung nach links)

Tabelle 7: Signifikante Konzentrationszunahme (1-4) und Volumenzunahme (5-7) der grauen Substanz

Anatomische Region	Hemisphäre	Brodmann Areal	MNI Koordinaten			p-Wert*	p-Wert**	Z-Wert	T-Wert	Clustergöße
			x	y	z					
1. Gyrus temporalis inferior	L	20	-44	-22	-35	<0,001	0,09	4,92	7,00	1895
2. Gyrus occipitalis superior	L	19	-22	-79	40	<0,001	0,69	4,26	5,54	648
3. Gyrus occipitalis inferior	R	19	48	-67	-14	<0,001	0,91	4,04	5,11	1364
4. Putamen	L	-	-36	-10	-9	<0,001	0,72	4,24	5,49	616
5. Gyrus temporalis inferior	L	20	-85	-25	-20	<0,001	0,18	4,39	5,79	1974
6. Cerebellum Lobus 4 und 5	R	-	20	-46	-9	<0,001	0,003	5,43	8,38	8624
7. Cerebellum Lobus 8	R	-	10	-60	-54	<0,001	0,63	3,92	4,89	2155

*(cluster-level FWE korr.) **(peak-level FWE korr.)

3.2.3 Abnahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe

Konzentrationsabnahme

Der Vergleich der Konzentration grauer Substanz zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigt in der Trainingsgruppe neben den signifikanten Zunahmen auch signifikante Abnahmen in folgenden spezifischen Hirnregionen:

Gyrus temporalis inferior rechts, Gyrus präcentralis links (das Cluster erstreckt sich bis in den Gyrus präcentralis rechts), medialer Gyrus frontalis superior links, Gyrus frontalis medius rechts, Gyrus lingualis rechts, Thalamus links (Nucleus ventralis lateralis) und im Cerebellum Crus 2 rechts (s. Abbildungen 12-18 und Tabelle 8).

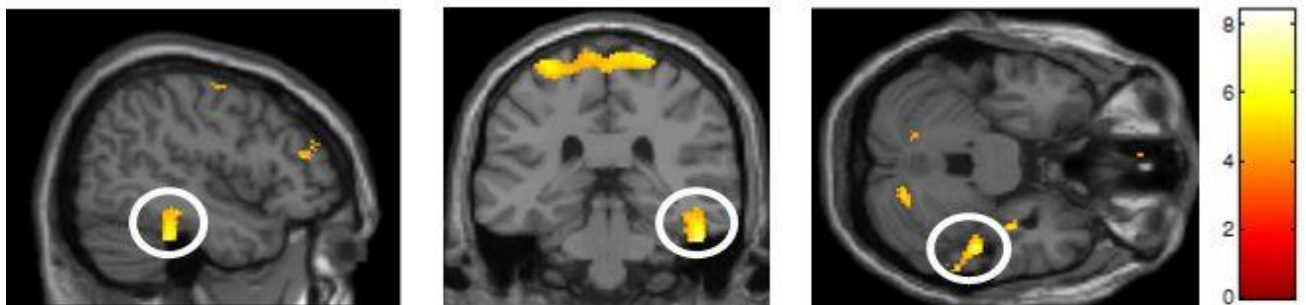


Abbildung 12: Gyrus temporalis inferior rechts

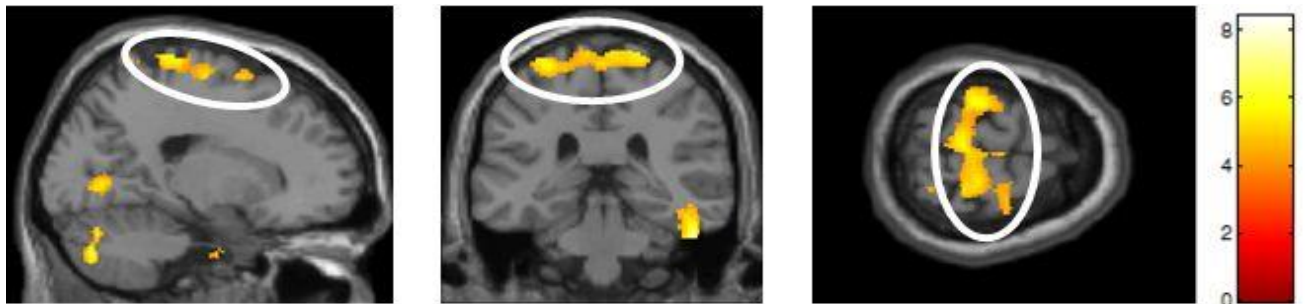


Abbildung 13: Gyrus präcentralis links (mit Ausdehnung nach rechts)



Abbildung 14: Gyrus frontalis superior (medial) links

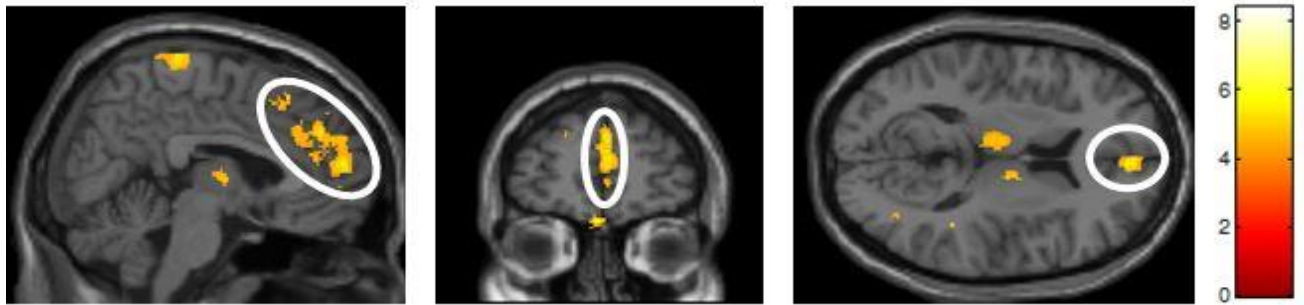


Abbildung 15: Gyrus frontalis medius rechts

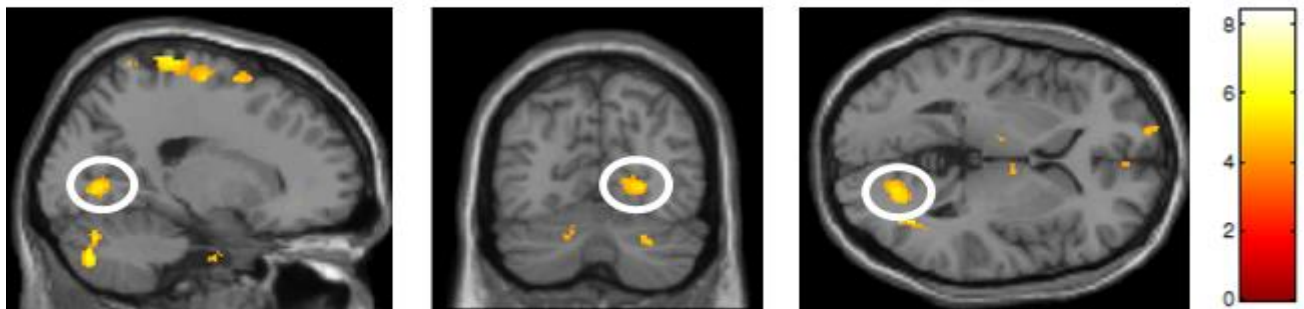


Abbildung 16: Gyrus lingualis rechts

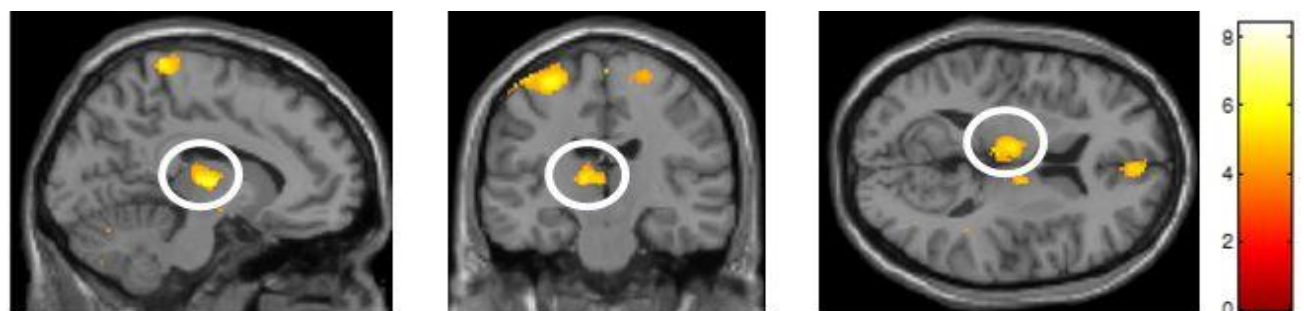


Abbildung 17: Thalamus links

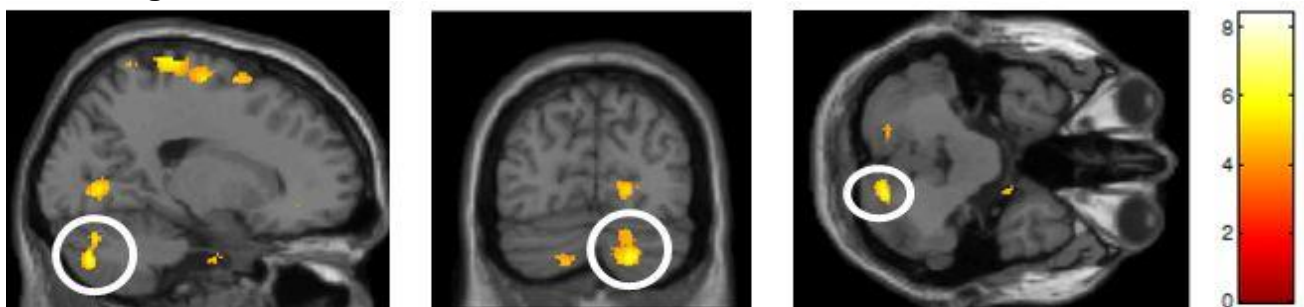


Abbildung 18: Cerebellum Crus 2 rechts

Volumenabnahme

Der Vergleich des Volumens grauer Substanz zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigt in der Trainingsgruppe neben den signifikanten Zunahmen auch signifikante Abnahmen in folgenden spezifischen Hirnregionen:

Gyrus temporalis inferior rechts, Gyrus präcentralis links und rechts, Gyrus supraorbitalis links (das Cluster erstreckt sich bis in den Gyrus supraorbitalis rechts) und im Thalamus links (Nucleus ventralis lateralis) (s. Abb. 19-22 und Tabelle 8).

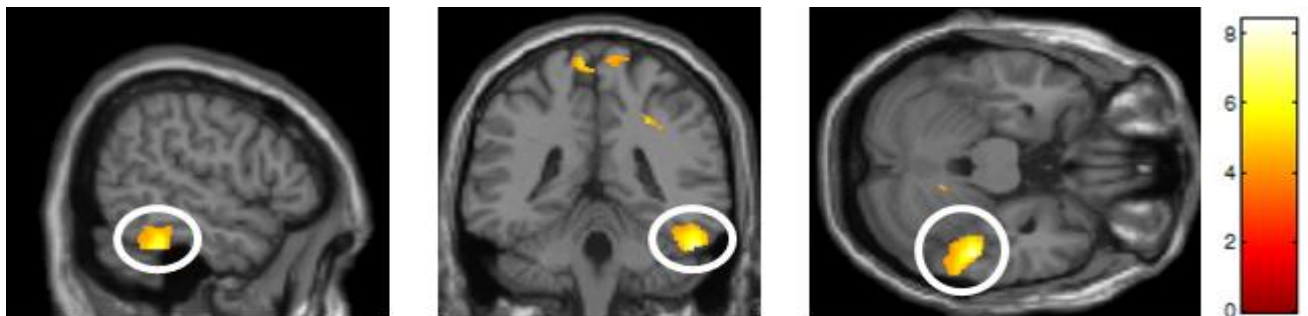


Abbildung 19: Gyrus temporalis inferior rechts

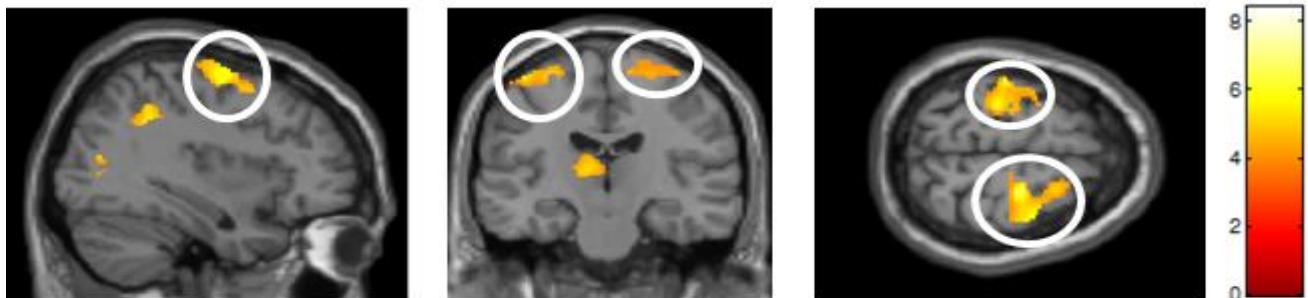


Abbildung 20: Gyrus präcentralis links und rechts

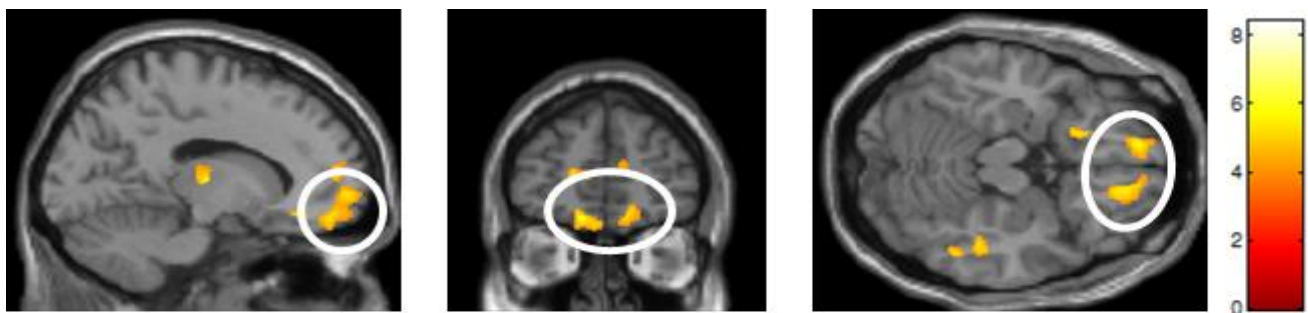


Abbildung 21: Gyrus supraorbitalis links (mit Ausdehnung nach rechts)

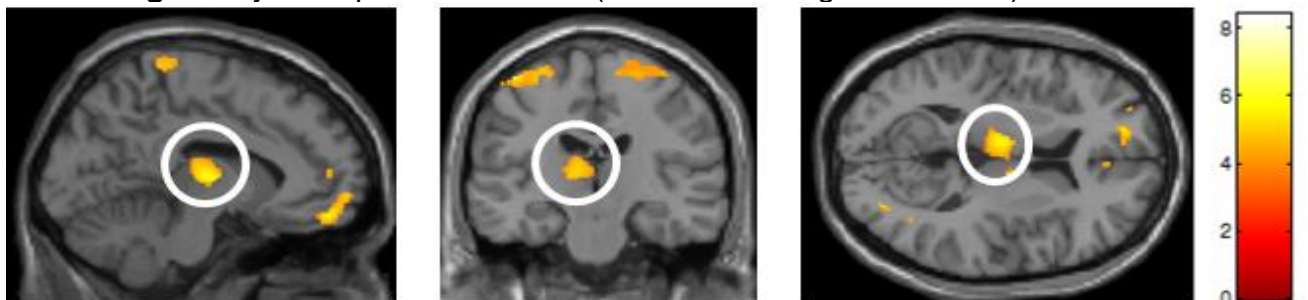


Abbildung 22: Thalamus links

Tabelle 8: Signifikante Konzentrationsabnahme (1-7) und Volumenabnahme (8-12) der grauen Substanz

Anatomische Region	Hemisphäre	Brodmann Areal	MNI Koordinaten			p-Wert*	p-Wert**	Z-Wert	T-Wert	Clustergröße
			x	y	z					
1. Gyrus temporalis inferior	R	20	52	-37	-32	<0,001	0,05	5,07	7,37	536
2. Gyrus präcentralis	L	4	37	3	54	<0,001	0,39	4,50	6,04	5673
3. Gyrus frontalis superior	L	8	2	21	49	<0,001	0,47	4,44	5,89	2785
4. Gyrus frontalis medius	R	46	52	44	19	0,044	0,83	4,10	5,21	227
5. Gyrus lingualis	R	19	22	-70	-0	0,004	0,95	3,97	4,97	359
6. Thalamus	L	-	-12	-15	4	<0,001	0,50	4,41	5,83	973
7. Cerebellum Crus 2	R	-	20	-70	-41	0,002	0,72	4,23	5,48	419
8. Gyrus temporalis inferior	R	20	51	-36	-30	0,001	0,011	5,13	7,53	1320
9. Gyrus präcentralis	L	4	-42	-22	67	0,002	0,35	4,18	5,37	1283
10. Gyrus präcentralis	R	4	22	-15	64	<0,001	0,016	5,03	7,28	3042
11. Gyrus supraorbitalis	L	11	15	38	-14	<0,001	0,07	4,65	6,36	1568
12. Thalamus	L	-	-12	-15	4	0,017	0,33	4,19	5,40	798

*(cluster-level FWE korr.) ** (peak-level FWE korr.)

3.2.4 Graue Substanz in der Kontrollgruppe

Der Vergleich von Konzentration und Volumen grauer Substanz zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigt in der Kontrollgruppe keine signifikanten Unterschiede.

3.3 Neuropsychologische Ergebnisse

Vor der Präsentation der neuropsychologischen Ergebnisse, muss auf folgenden Sachverhalt hingewiesen werden: sowohl die Teilnehmer der Trainingsgruppe als auch die Teilnehmer der Kontrollgruppe zeigen beim zweiten Messzeitpunkt bessere Leistungen als beim ersten Messzeitpunkt. Dieses Ergebnis ist dem Lerneffekt zuzuschreiben. Alle Teilnehmer sind mit den Tests nach dem ersten Messzeitpunkt vertraut und profitieren davon im Testdurchgang beim zweiten Messzeitpunkt, was die Leistungen deutlich positiv beeinflusst.

Um allein die Wirkung des Trainings auf die Leistungsfähigkeit untersuchen zu können, bedient man sich in der Statistik einer ANOVA mit Messwiederholung.

Zeigt die ANOVA eine signifikante Interaktion von Gruppe x Zeit, dann kann von verbesserten Leistungen ausgegangen werden, die durch eine wirksame Trainingsintervention und weniger durch den begleitenden Lerneffekt bedingt sind.

Dies war jedoch bei keiner der untersuchten Leistungen der Fall. Wenn sich die Leistungen der Trainingsgruppe verbesserten, so verbesserten sich fast immer auch die Leistungen der Kontrollgruppe.

Im Folgenden sollen jedoch exemplarisch ein paar Beispiele präsentiert werden, die allein in der Trainingsgruppe signifikante Verbesserungen der Leistungen zeigten.

3.3.1 Flexibilität

Der Test der Flexibilität misst das Ausmaß einer effizienten internen Kontrolle, die den Aufmerksamkeitsprozess lenkt. Es müssen pro Runde jeweils eckige oder runde Formen im Wechsel erkannt werden.

Der Vergleich der Reaktionszeiten im Flexibilitätstest zeigt in der Trainingsgruppe zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt eine signifikante Abnahme von Mittelwert, Median und Standardabweichung der gesamten Reaktionszeit.

Der Mittelwert der Reaktionszeit nahm im Mittel von 848,96 ms (Messzeitpunkt 1) auf 768,87 ms (Messzeitpunkt 2) signifikant ab, bei einem p-Wert von 0,017 (s. Abbildung 23 und Tabelle 9).

Die Probanden konnten sich beim 2. Messzeitpunkt also deutlich schneller für eine Seite der eckigen oder runden Figur entscheiden.

Der Median der Reaktionszeit nahm von 810,35 ms (Messzeitpunkt 1) auf 739,76 ms (Messzeitpunkt 2) signifikant ab, bei einem p-Wert von 0,030 (s. Abbildung 23 und Tabelle 9).

Auch dieser Wert zeigt eine deutlich schnellere Entscheidungsfindung beim 2. Messzeitpunkt.

Die Standardabweichung der Reaktionszeit nahm von 216,17 ms (Messzeitpunkt 1) auf 163,79 ms (Messzeitpunkt 2) signifikant ab, bei einem p-Wert von $<0,001$ (s. Abbildung 23 und Tabelle 9).

Das bedeutet, dass die Varianz der Reaktionszeiten deutlich abnahm und die Reaktionszeit konstanter wurde.

In der Kontrollgruppe zeigen sich keine signifikanten Veränderungen.

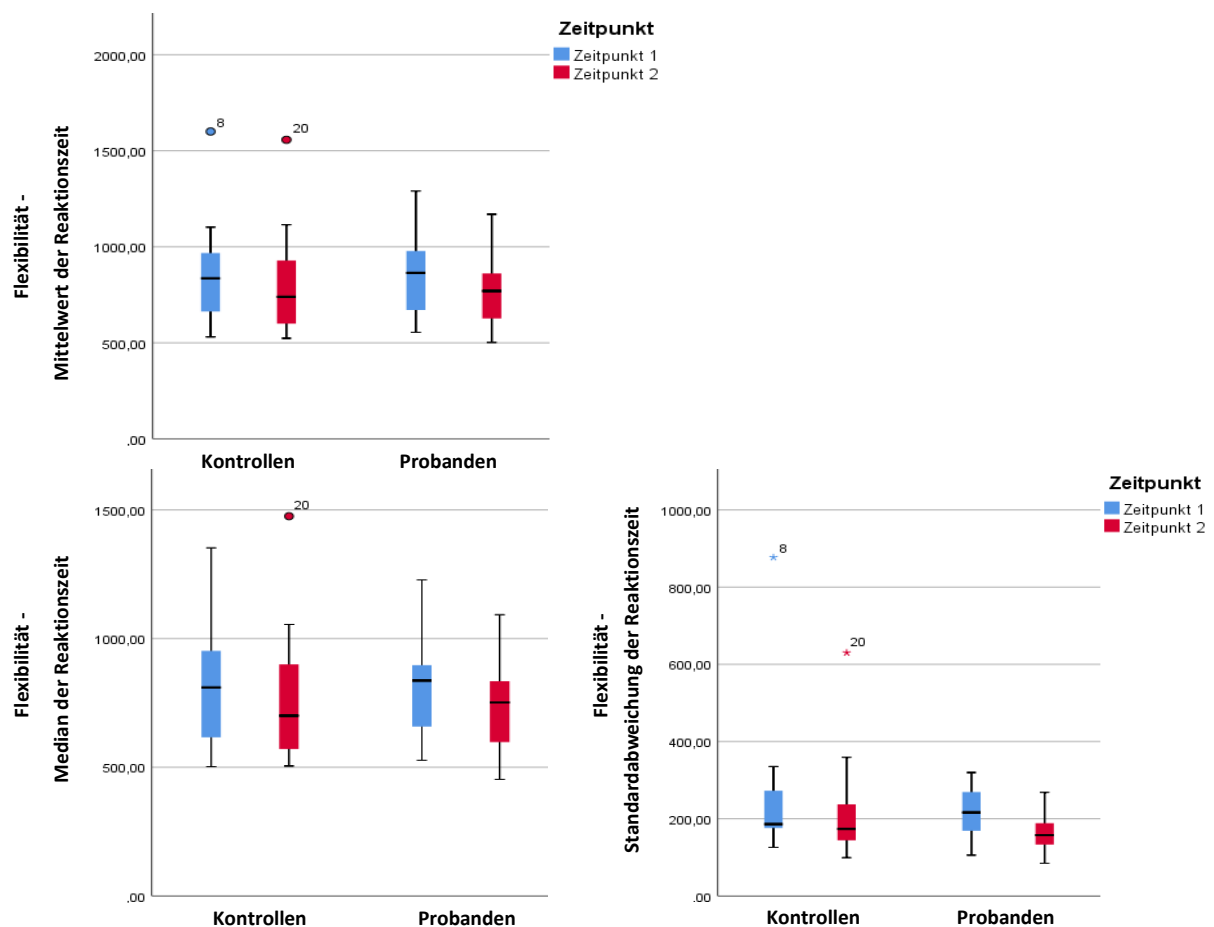


Abbildung 23: Mittelwert, Median und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms

3.3.2 Aktives Gesichtsfeld

Der Test des aktiven Gesichtsfeldes misst die Größe des Gesichtsfeldes, indem zentral liegende Figuren erkannt und gleichzeitig auf peripher aufleuchtende Kreise reagiert werden muss.

Der Vergleich der Reaktionszeiten im Test fürs aktive Gesichtsfeld zeigt in der Trainingsgruppe zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt eine signifikante Abnahme der mittleren Reaktionszeit und der Standardabweichung der individuellen Reaktionszeit im gesamten linken Gesichtsfeld sowie speziell im linken unteren Gesichtsfeld.

Der Mittelwert der Reaktionszeit im gesamten linken Gesichtsfeld nahm im Mittel von 512,36 ms (Messzeitpunkt 1) auf 472,88 ms (Messzeitpunkt 2) signifikant ab, bei einem p-Wert von 0,023 (s. Abbildung 24 und Tabelle 9).

Der Mittelwert der Reaktionszeit im linken unteren Gesichtsfeld nahm im Mittel von 511,72 ms (Messzeitpunkt 1) auf 470,24 ms (Messzeitpunkt 2) signifikant ab, bei einem p-Wert von 0,027 (s. Abbildung 25 und Tabelle 9).

Diese beiden erniedrigten Mittelwerte zeigen, dass die Probanden der Trainingsgruppe im gesamten linken und speziell im linken unteren Gesichtsfeld deutlich weniger Zeit brauchten, die aufleuchtenden Kreise beim 2. Messzeitpunkt zu erkennen.

Die Standardabweichung der individuellen Reaktionszeit im gesamten linken Gesichtsfeld nahm von 164,32 ms (Messzeitpunkt 1) auf 122,69 ms (Messzeitpunkt 2) signifikant ab, bei einem p-Wert von 0,036 (s. Abbildung 24 und Tabelle 9).

Die Standardabweichung der individuellen Reaktionszeit im linken unteren Gesichtsfeld nahm von 162,16 ms (Messzeitpunkt 1) auf 114,8 ms (Messzeitpunkt 2) signifikant ab, bei einem p-Wert von 0,041 (s. Abbildung 25 und Tabelle 9).

Das bedeutet, dass die Reaktionszeit zum Messzeitpunkt 2 weniger Varianz zeigte, also konstanter wurde.

In der Kontrollgruppe zeigen sich keine signifikanten Veränderungen.

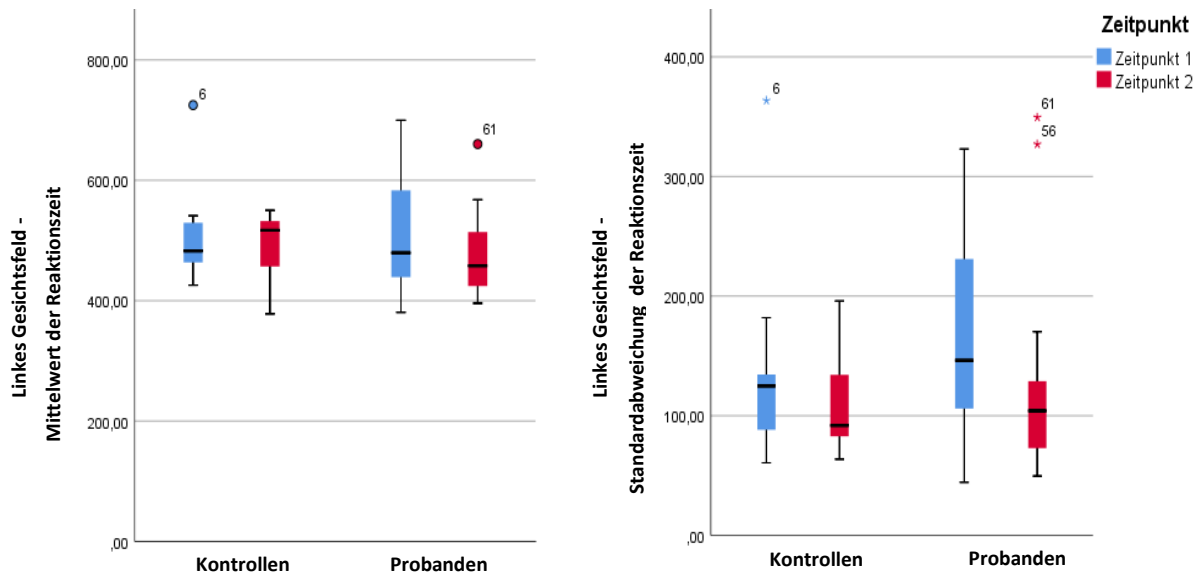


Abbildung 24: Gesamtes linkes Gesichtsfeld: Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms

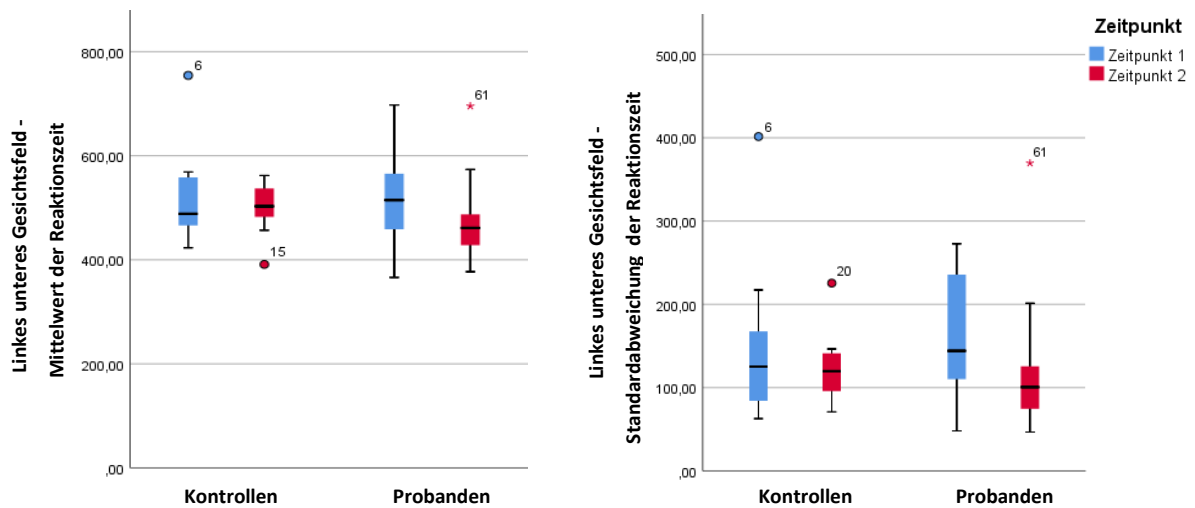


Abbildung 25: Linkes unteres Gesichtsfeld: Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms

3.3.3 Geteilte Aufmerksamkeit

Beim Test der geteilten Aufmerksamkeit wird die Fähigkeit der Aufteilung der eigenen Aufmerksamkeit auf simultan ablaufende Prozesse beurteilt. Es müssen zentral abgebildete Figuren visuell und gleichzeitig abgespielte Töne auditiv erkannt werden.

Die Auswertung dieses Tests stützt sich auf die Anzahl der gemachten Fehler. Als Fehler wird das Drücken der Taste zum falschen Zeitpunkt gewertet, also wenn sich die Töne nicht wiederholen oder in der Mitte des Bildschirms ein anderer als der Hinweisreiz gezeigt wird.

Der Vergleich der Fehleranzahl zwischen Messzeitpunkt 1 und Messzeitpunkt 2 zeigt in der Trainingsgruppe eine signifikante Zunahme der Fehler von 2 (Messzeitpunkt 1) auf 8,55 (Messzeitpunkt 2), bei einem p-Wert von 0,003 (s. Abbildung 26 und Tabelle 9).

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass diese Fehler auditive Ausreißer sind, deren Anzahl von 0,5 auf 0,85 signifikant anstieg, bei einem p-Wert von 0,015 (s. Tabelle 9).

Das bedeutet, dass die Trainingsgruppe beim 2. Messzeitpunkt signifikant häufiger die Taste betätigte, wenn sich die Töne nicht wiederholten.

In der Kontrollgruppe zeigen sich keine signifikanten Veränderungen.

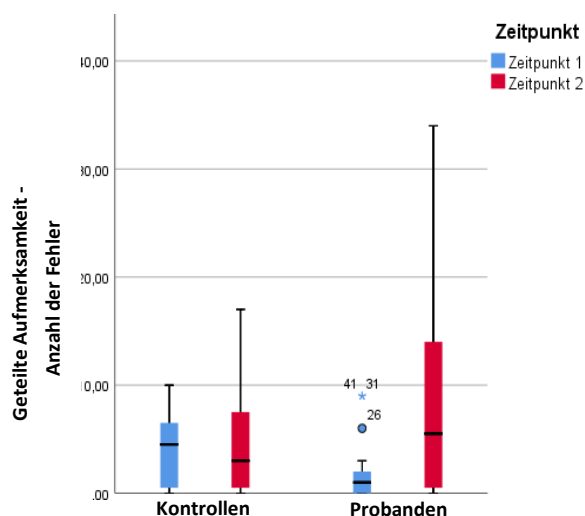


Abbildung 26: Anzahl der gesamten Fehler

3.3.4 Ablenkbarkeit

Der Test der Ablenkbarkeit misst die Fähigkeit, den Aufmerksamkeitsfokus willentlich auf einen bestimmten Reiz zu fokussieren, ohne sich durch Distraktoren ablenken zu lassen. Es müssen zentral erscheinende, traurige Smileys erkannt werden, ohne den Blick von peripher aufleuchtenden Symbolen ablenken zu lassen.

Der Vergleich von Reaktionszeiten im Test für Ablenkbarkeit zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigt in der Trainingsgruppe keinerlei signifikante Ergebnisse in eine bestimmte Richtung.

Daher wird der Verlauf von Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeit nur zur Veranschaulichung dargestellt.

Der Mittelwert der Reaktionszeit bleibt im Mittel relativ konstant mit 455,82 ms zum Messzeitpunkt 1 und 455,99 ms zum Messzeitpunkt 2, bei einem p-Wert von 0,978 (s. Abbildung 27 und Tabelle 9).

Der Mittelwert der Standardabweichung der Reaktionszeit nimmt von 59,12 ms (Messzeitpunkt 1) auf 52,51 ms (Messzeitpunkt 2) zwar ab, aber bei einem nicht signifikanten p-Wert von 0,072 (s. Abbildung 27 und Tabelle 9).

In der Kontrollgruppe zeigen sich ebenfalls keine signifikanten Veränderungen.

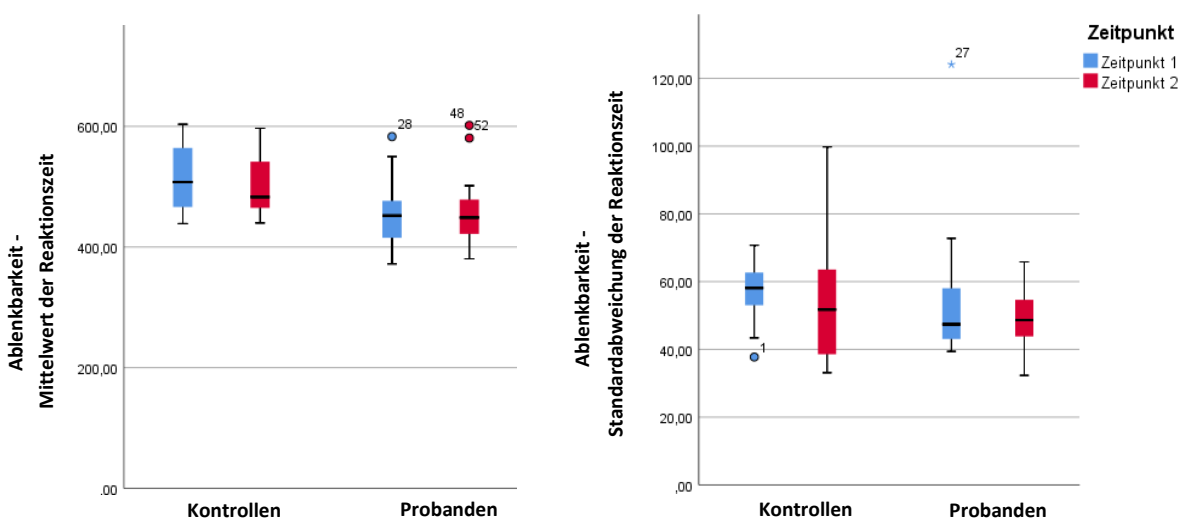


Abbildung 27: Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms

3.3.5 California Verbal Learning Test

Der CVLT misst die Funktion des Kurzzeitgedächtnisses. Es müssen sich unbekannte Begriffe kurzzeitig gemerkt und korrekt wiedergegeben werden.

Der Vergleich korrekt wiedergegebener Begriffe zwischen Messzeitpunkt 1 und Messzeitpunkt 2 zeigt in der Trainingsgruppe ein sehr heterogenes Bild. Es gibt einige Probanden, die beim zweiten Messzeitpunkt mehr Begriffe korrekt wiedergeben konnten, aber auch viele andere Probanden, die weniger Begriffe erinnerten. Somit gibt es kein signifikantes Testergebnis in eine bestimmte Richtung.

Mit Blick auf die Mittelwerte zeigt sich sowohl für die Durchgänge 1 und 5 als auch für die verzögerte freie Wiedergabe 2 ein Trend nach unten, d.h. beim zweiten Messzeitpunkt wurden weniger Begriffe wiedergegeben (s. Abbildungen 28 und 29 und Tabelle 9).

Der Mittelwert der verzögerten freien Wiedergabe 1 zeigt jedoch einen Trend nach oben, d.h. beim zweiten Messzeitpunkt konnten mehr Begriffe erinnert werden (s. Abbildung 29 und Tabelle 9).

In der Kontrollgruppe zeigen sich ebenfalls keine signifikanten Veränderungen.

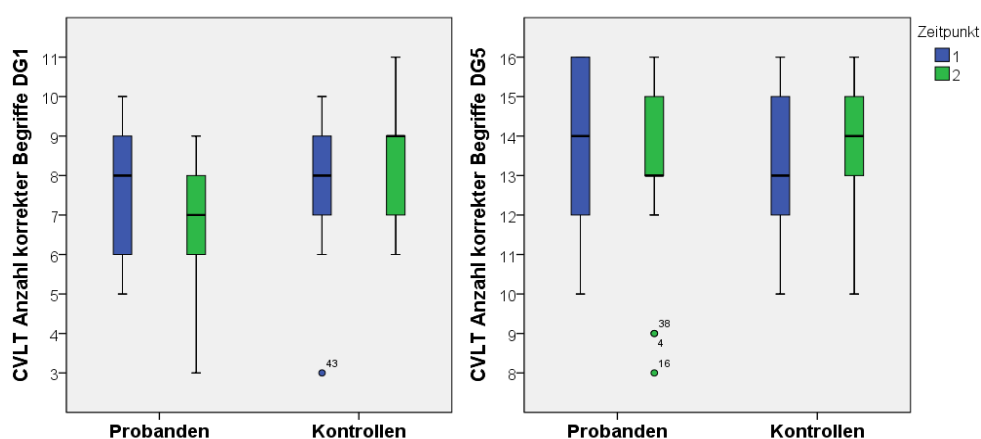


Abbildung 28: Anzahl korrekter Begriffe im Durchgang 1&5

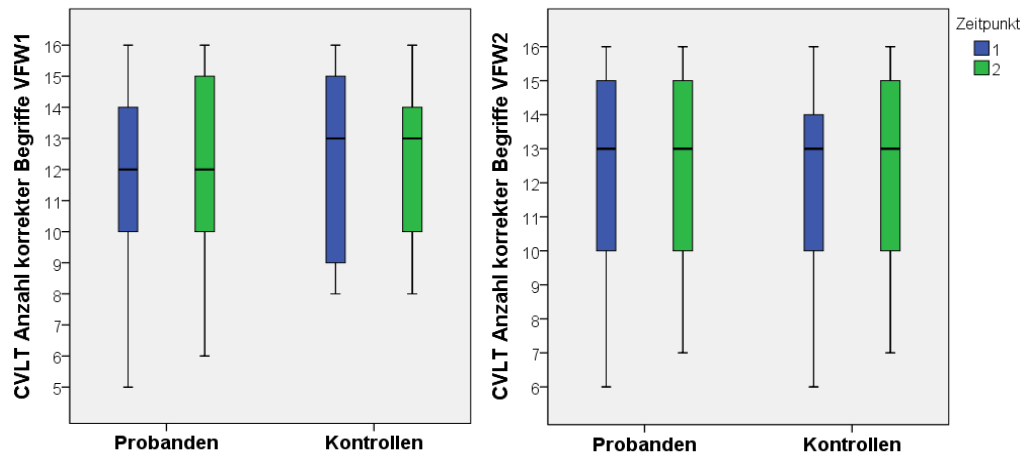


Abbildung 29: Anzahl korrekter Begriffe in der verzögerten freien Wiedergabe 1&2

3.3.6 Trail Making Test

Der TMT misst Aufmerksamkeit und kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit. Es müssen Zahlen und Buchstaben in aufsteigender Reihenfolge miteinander durch eine konstante Linie verbunden werden. Bei der Auswertung dieses Tests wird die benötigte Bearbeitungszeit von Messpunkt 1 und Messpunkt 2 miteinander verglichen.

Die Trainingsgruppe zeigt diesbezüglich ein heterogenes Bild, sodass es auch hier kein signifikantes Testergebnis in eine bestimmte Richtung gibt. Die Mittelwerte zeigen jedoch einen Trend zu kürzeren Bearbeitungszeiten, d.h. die Probanden waren beim Messzeitpunkt 2 größtenteils schneller (s. Abbildung 30 und Tabelle 9).

In der Kontrollgruppe zeigen sich ebenfalls keine signifikanten Veränderungen.

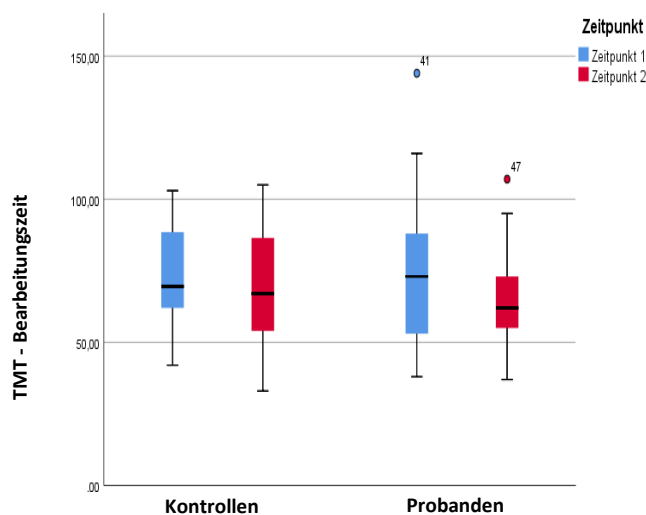


Abbildung 30: Bearbeitungszeit in s

Tabelle 9: Übersicht der Ergebnisse der Neuropsychologie

	Trainingsgruppe						Kontrollgruppe						ANOVA	
	Messzeitpunkt 1			Messzeitpunkt 2			Messzeitpunkt 1			Messzeitpunkt 2			Zeit x Gruppe	
	Mittelwert	Std	p-Wert	Mittelwert	Std	p-Wert	Mittelwert	Std	p-Wert	Mittelwert	Std	F-Wert	p-Wert	
Flexibilität (Mittelwert der Reaktionszeit in ms)	848,96	198,42	0,017*	768,87	183,14	0,017*	873,52	284,19	0,022	296,47	0,884			
Flexibilität (Median der Reaktionszeit in ms)	810,35	184,24	0,03*	739,76	177,47	0,03*	825,00	239,41	0,027	280,55	0,87			
Flexibilität (Std der Reaktionszeit in ms)	216,17	64,06	<0,001*	163,79	47,93	<0,001*	263,93	33,35	0,05	33,35	0,82			
Linkes Gesichtsfeld (Mittelwert der Reaktionszeit in ms)	512,36	87,13	0,023*	472,88	67,11	0,023*	503,77	78,37	0,57	57,07	0,45			
Linkes Gesichtsfeld (Std der Reaktionszeit in ms)	164,32	81,4	0,036*	122,69	79,65	0,036*	134,45	21,71-	0,23	22,67	0,63			
Linkes unteres Gesichtsfeld (Mittelwert der Reaktionszeit in ms)	511,72	81,11	0,027*	470,24	70,25	0,027*	516,82	88,73	0,46	48,99	0,50			
Linkes unteres Gesichtsfeld (Std der Reaktionszeit in ms)	162,16	76,31	0,041*	114,8	72,33	0,041*	146,38	21,36	0,39	22,31	0,53			
Geteilte Aufmerksamkeit (Anzahl der Fehler)	2,00	2,77	0,003*	8,55	9,99	0,003*	4,08	3,50	3,34	5,16	0,07			
Geteilte Aufmerksamkeit (Anzahl der auditiven Ausreißer)	0,50	0,61	0,015*	0,85	0,36	0,015*	0,583	0,15	0,83	0,15	0,37			
Ablenkbarkeit (Mittelwert der Reaktionszeit in ms)	455,82	54,66	0,978	455,99	57,73	0,978	514,64	56,88	0,18	52,27	0,67			
Ablenkbarkeit (Std der Reaktionszeit in ms)	59,12	17,85	0,072	52,51	8,02	0,072	60,68	9,88	1,28	15,57	0,26			
CVLT (Anzahl korrekter Begriffe in DG1)	7,26	1,60	0,197	6,79	1,51	0,197	8,17	2,44	3,76	2,26	0,063			
CVLT (Anzahl korrekter Begriffe in DG 5)	13,55	2,12	0,294	13,00	2,30	0,294	13,38	2,10	2,68	1,88	0,11			
CVLT (Anzahl korrekter Begriffe in VFW 1)	11,67	3,04	0,772	11,83	3,22	0,772	12,31	3,07	0,47	2,43	0,83			
CVLT (Anzahl korrekter Begriffe in VFW 2)	11,93	2,97	0,801	11,75	3,47	0,801	12,10	3,33	0,82	3,13	0,78			
TMT (Bearbeitungszeit in s)	75,53	28,40	0,225	64,42	19,25	0,225	74,52	24,90	1,14	20,20	0,29			

*signifikante Änderungen, Std = Standardabweichung, DG1 = Durchgang 1, DG5 = Durchgang 5, VFW1 = Verzögerte freie Wiedergabe 1, VFW2 = Verzögerte freie Wiedergabe 2

3.4 Varianzanalysen (ANOVA)

Es wurden in den Ergebnissen der VBM keine signifikanten Interaktionen in der Trainingsgruppe gefunden.

Auch in den Ergebnissen der neuropsychologischen Testungen wurden keine signifikanten Interaktionen in der Trainingsgruppe gefunden, da die signifikanten Ergebnisse der Neuropsychologie in der Trainingsgruppe durch den eingangs erwähnten Lerneffekt bedingt sind.

3.5 Korrelationen

Es wurden innerhalb der Trainingsgruppe keine Korrelationen zwischen VBM-Ergebnissen und Ergebnissen der neuropsychologischen Tests gefunden.

4 DISKUSSION

Die vorliegende Arbeit untersucht die Auswirkungen eines kombinierten körperlichen und kognitiven Trainings namens Life Kinetik auf die graue Substanz und die kognitive Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns.

Die VBM-Analyse zeigt sowohl Zunahmen als auch Abnahmen von Konzentration und Volumen grauer Substanz. Zunahmen grauer Substanz finden sich im Temporallappen, im Parietallappen, in den Basalganglien und im Kleinhirn. Abnahmen grauer Substanz finden sich im Temporallappen, im Frontallappen, in den Basalganglien und ebenfalls im Kleinhirn.

Die neuropsychologischen Ergebnisse zeigen ein heterogenes Bild. Es finden sich sowohl in der Trainingsgruppe als auch in der Kontrollgruppe Verbesserungen der Leistungen, was in beiden Fällen auf den Lerneffekt zurückzuführen ist.

Exemplarisch sollen jedoch diejenigen Testergebnisse diskutiert werden, die allein in der Trainingsgruppe signifikante Verbesserungen der Leistungen zeigen: es zeigen sich sowohl signifikant kürzere Reaktionszeiten im Test für Flexibilität und für das aktive Gesichtsfeld als auch eine signifikante Zunahme der Fehler im Test für geteilte Aufmerksamkeit. Im Test für Ablenkbarkeit, im CVLT sowie im TMT zeigen sich keinerlei signifikante Unterschiede.

4.1 Diskussion der Hypothesen

4.1.1 Zunahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe

- Es zeigt sich eine Zunahme des Volumens und der Konzentration grauer Substanz im linken **Gyrus temporalis inferior**

Dieses Ergebnis entspricht nicht den eingangs formulierten Hypothesen (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Der Gyrus temporalis inferior gehört zum BA 20 und ist an Prozessen von Sprachverständnis und Sprachproduktion beteiligt [64]. Er leistet auch einen Beitrag zu selektiven Aufmerksamkeitsprozessen wie z.B. der

selektiven Verarbeitung von Sprache [65]. In funktionellen MRT-Studien zeigt der Gyrus temporalis inferior erhöhte Aktivität bei der neuronalen Verarbeitung von Metaphern [66].

Nach Betrachtung der Funktionen passt eine Veränderung innerhalb dieser Region gut zu den Anforderungen, die die Life Kinetik-Übungen an die Probanden stellen. Da bei vielen Übungen mit Ansagen (Sprachreizen) gearbeitet wird, auf welche die Probanden mit ganz bestimmten Bewegungsabfolgen reagieren müssen, werden Sprachverständnis und selektive Aufmerksamkeit geschult.

Außerdem erfolgen die Ansagen in Form von Metaphern, da nicht explizit angesagt wird, welche Bewegungsabfolgen auszuführen sind, sondern diese in Form von Zahlen, Farben, europäischen Städtenamen oder auch Baumarten erfolgen und die Probanden deren Bedeutung selbst entschlüsseln müssen.

In keiner anderen der zum Vergleich herangezogenen longitudinalen Trainingsstudien (s. 1.2 Stand der Forschung) wurde bisher eine Zunahme der grauen Substanz im Gyrus temporalis inferior gefunden. Nach einem Jongliertraining wurde eine Zunahme vornehmlich im Gyrus temporalis medius berichtet [19, 20].

- Es zeigt sich eine Zunahme der Konzentration grauer Substanz im linken **Gyrus occipitalis superior** und im rechten **Gyrus occipitalis inferior**

Dieses Ergebnis entspricht der Hypothese einer Zunahme grauer Substanz im visuellen Kortex (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Beide Gyri gehören zum BA 19 und damit zum visuellen Kortex, der – wie bereits in den Hypothesen erwähnt – zur kognitiven Verarbeitung visueller Reize dient [51] und wichtig ist für die visuelle Fixierung sich bewegender Objekte [52]. Des Weiteren ist er an der Erkennung von Größe, Form und Lokalisation eines Objektes beteiligt [53]. Speziell das BA 19 der rechten Hemisphäre zeigt erhöhte Aktivität beim stereoskopischen Sehen [67].

Dieses Ergebnis passt wie erwartet gut zum Life Kinetik-Training, da visuelle Funktionen unweigerlich durch fast alle Übungen angesprochen werden (wie z.B. beim Werfen, Fangen oder Jonglieren von einzelnen oder mehreren Bällen).

Eine Zunahme grauer Substanz im visuellen Kortex finden sowohl Ilg und Kollegen beim Spiegelschriftlesen [27] als auch Kwok und Kollegen beim Lernen neuer Farbnamen [30].

- Es zeigt sich eine Zunahme des Volumens grauer Substanz im rechten **Cerebellum (Kleinhirn, Lobi 4, 5 und 8)**

Dieses Ergebnis entspricht der Hypothese einer Zunahme grauer Substanz im Cerebellum (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Studien mit Probanden mit Kleinhirnläsionen zeigen, dass das Cerebellum beim Lernen neuer Bewegungen maßgeblich beteiligt ist [68, 69]. Dabei ist eine seiner wichtigsten Funktionen die Korrektur von fehlerhaften Bewegungen, um den Bewegungsablauf zu optimieren [70, 71], indem es die Informationen aus sensorischen Afferenzen und motorischen Efferenzen miteinander vergleicht und somit immer über den aktuellen Zustand des motorischen Systems informiert ist (internes Feedbacksystem) [44, 71]. Es spielt dabei auch eine große Rolle beim Greifen von Objekten aus der Umgebung [72], indem es die Muskelaktivität reguliert und damit die Greifstärke kontrolliert.

Die anterioren Lobi 4 und 5 zeigen bei ipsilateralen Fußbewegungen eine Aktivierung [73] und Lobus 5 wird auch bei ipsilateralen Handbewegungen aktiviert, die sekundär ebenso im posterioren Lobus 8 repräsentiert werden. Damit sind bei motorischen Prozessen sowohl anteriore Lappen (Lobus 4 und 5) als auch posteriore Lappen (Lobus 8) beteiligt, wohingegen Funktionen des Arbeitsgedächtnisses ausschließlich in den hinteren Lappen lokalisiert sind (Lobus 8) [74].

Neben den zahlreichen motorischen Funktionen ist das Kleinhirn nämlich auch an einer Reihe von kognitiven Funktionen wie z.B. Sprachverarbeitung, Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeitsprozessen beteiligt [75].

Das Ergebnis der vorliegenden Studie passt wie vermutet gut zum Life Kinetik-Training, da es dabei vor allem darum geht, neue Bewegungsabläufe zu erlernen und es nicht Ziel ist, Übungen vollautomatisiert auszuführen. Außerdem spielen Greifvorgänge eine wichtige Rolle, wenn Bälle geworfen oder gefangen werden müssen. Jegliche Art von Hand- oder Fußbewegungen sind in fast allen Life Kinetik-

Übungen vorhanden. Kognitive Übungen sind ebenso fester Bestandteil des Life Kinetik-Trainings, da sie in zahlreichen motorischen Übungen integriert sind.

Kwok und Kollegen finden ebenfalls eine Zunahme grauer Substanz im rechten Cerebellum beim Lernen neuer Farbennamen [30] und Kühn und Kollegen finden eine Zunahme grauer Substanz bilateral in den cerebellären Loben 4, 5 und 6 beim Spielen eines Videospieles [31]. Taubert und Kollegen finden jedoch eine beidseitige Abnahme grauer Substanz im Lobus 8 des Cerebellums nach einem Ganzkörper-Balancetraining [22].

- Es zeigt sich eine Zunahme der Konzentration grauer Substanz im linken **Putamen**

Dieses Ergebnis entspricht der Hypothese einer Zunahme grauer Substanz in den Basalganglien (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Das Putamen gehört zu den Basalganglien und ist eine subkortikale Struktur, weshalb es keinem BA zugeordnet wird. Wie in den Hypothesen bereits erwähnt, steht es durch motorische Schleifen in Verbindung mit dem Kleinhirn und dem motorischen Kortex und hat damit sowohl motorische als auch kognitive Funktionen [47].

Im Bereich der Motorik ist es am Lernen durch Belohnung beteiligt [76] und daher vor allem in frühen Lernstadien aktiv, wenn schnell Fortschritte gemacht werden. In späteren Lernstadien, wenn weniger Fortschritte gemacht werden und die Übung mehr oder weniger beherrscht wird, nimmt seine Aktivität ab [48, 77, 78].

Es spielt auch eine Rolle bei der Planung von Bewegung [79, 80], die notwendigerweise der definitiven Ausführung vorgeschaltet ist und leistet ebenso einen wichtigen Beitrag zur Konsolidierung der gelernten Bewegungssequenz im Schlaf [81]. Des Weiteren ist das Putamen funktionell auch an der Automatisierung von Bewegung beteiligt [82]. Im Bereich der Kognition ist es unter anderem beteiligt an Aufmerksamkeitsprozessen, Entscheidungsfindung und Zeitgefühl [83].

Dieses Ergebnis passt daher ebenfalls gut zum Life Kinetik-Training, da es motorische und kognitive Übungen miteinander kombiniert und damit die eben beschriebenen

Funktionen des Putamens anspricht. Davon ausgenommen ist jedoch dessen Funktion der Automatisierung von Bewegung, da gerade diese im Life Kinetik-Training vermieden werden soll.

Bisher wurde in keiner anderen der zum Vergleich herangezogenen longitudinalen Trainingsstudien (s. 1.2 Stand der Forschung) eine Zunahme grauer Substanz im Putamen beschrieben. Im Gegenteil, Taubert und Kollegen finden eine Abnahme grauer Substanz im rechten Putamen nach einem Ganzkörper-Balancetraining [22].

Hänggi und Kollegen beschreiben in einer Querschnittsstudie mit Balletttänzerinnen, dass diese im Vergleich zu Nichttänzerinnen ein signifikant kleineres Volumen von grauer Substanz im Putamen aufweisen [84].

Auch Granert und Kollegen berichten bei professionellen Pianisten von einem signifikant kleineren Volumen von grauer Substanz im Putamen [85]. Dieses Ergebnis begründen sie mit dem hohen Grad an Professionalität.

Da das Life Kinetik Training jedoch wie bereits erläutert explizit keine Perfektion (also Professionalität) zum Ziel hat, sondern auf Abwechslungsreichtum und ständiges Neuerlernen aufbaut, ist dieses Ergebnis daher nicht im Widerspruch zu einem signifikant höheren Putamenvolumen der vorliegenden Studie.

- Es zeigt sich keine Zunahme von grauer Substanz im **supplementärmotorischen Kortex**

Dieses Ergebnis entspricht nicht der Hypothese einer Zunahme grauer Substanz im supplementärmotorischen Kortex. Der supplementärmotorische Kortex ist an der Planung von Bewegung beteiligt, insbesondere bei ein- und beidseitigen Handbewegungen [86], indem die Aktivität des kortikalen Motorik-Netzwerkes gefördert oder gehemmt wird. Diese Region ist außerdem sowohl bei der mentalen Vorstellung von Bewegung als auch bei dessen Beobachtung aktiv [87]. In späteren Lernstadien, wenn Bewegungen koordinierter und flüssiger werden, zeigt der supplementärmotorische Kortex ebenfalls eine erhöhte Aktivierung [88].

Das könnte theoretisch auch genau der Grund sein, warum keine Zunahme der grauen Substanz in diesem Gebiet nachzuweisen ist. Die Life Kinetik-Übungen werden möglicherweise nicht lange genug trainiert, um eine derartige Veränderung im supplementärmotorischen Kortex hervorzurufen, wenn laut funktionellen MRT-Studien eine seiner Funktionen erst in späteren Lernstadien relevant wird.

Andererseits gehört die Phase der Bewegungsplanung unweigerlich zu jeder Bewegung dazu, jedoch offensichtlich noch nicht ausreichend, um in unserem Training eine Veränderung im Volumen oder in der Konzentration der grauen Substanz zu bewirken.

Colcombe und Kollegen [21] sowie Taubert und Kollegen [22] zeigen eine signifikante Zunahme der grauen Substanz im supplementärmotorischen Kortex durch Aerobictraining und Ganzkörper-Balancetraining.

- Es zeigt sich keine Zunahme grauer Substanz im **Hippocampus**

Dieses Ergebnis entspricht nicht der Hypothese einer Zunahme von grauer Substanz im Hippocampus. Der Hippocampus, wie bereits in den Hypothesen erwähnt, ist eine der wichtigsten Hirnregionen zur Bildung von Gedächtnis [55]. Außerdem zeigen eine Reihe von Studien einen Zusammenhang zwischen erhöhter körperlicher Aktivität und höherem hippocampalen Volumen [19, 20, 23, 26, 29, 31, 54].

Nichtsdestotrotz gibt es auch einige Studien, die nach Trainingsintervention ebenfalls keine Zunahme der grauen Substanz im Hippocampus vorfinden [21, 22, 24, 25, 27, 28, 30].

Colcombe und Kollegen [21] führten ebenso wie Erickson und Kollegen [23] ein Aerobicprogramm mit ihrer Trainingsgruppe durch, berichten in ihren Ergebnissen aber nicht von einer Zunahme der grauen Substanz im Hippocampus.

Erickson und Kollegen [23] dagegen finden aber sehr wohl signifikante Zunahmen des Hippocampusvolumens in der Trainingsgruppe. Das bedeutet, dass es in der einen Studie eine Zunahme von grauer Substanz im Hippocampus gibt und in der anderen

nicht, obwohl es sich bei beiden Studien um die gleiche Art von Training handelt. Somit liegen für den Hippocampus insgesamt inkonsistente Ergebnisse vor.

Woollett und Kollegen [29] führen an, dass hippocampale Neuroplastizität stark von genetischer Prädisposition abhängt. Daher kann es theoretisch der Fall sein, dass die Probanden der Trainingsgruppe der vorliegenden Studie zufällig alle lediglich keine ausreichende genetische Prädisposition für hippocampale Plastizität aufweisen und es deshalb keine Zunahme grauer Substanz im Hippocampus gibt. Diese Annahme bleibt aber theoretischer Natur.

Es muss jedenfalls beachtet werden, dass das Life Kinetik-Training nur schwer mit anderen Trainings vergleichbar ist. Ein Grund der ausbleibenden Zunahme des Hippocampusvolumens könnte auch darin liegen, dass die Life Kinetik-Übungen zu schnell gewechselt werden, nämlich schon nach 60%-iger Erfolgsquote (6 von 10 Versuchen erfolgreich), bevor möglicherweise ausreichend korrelierende Veränderungen im Hippocampus erzielt werden können.

Außerdem könnte es auch sein, dass 11 Trainingseinheiten mit je ca. einer Stunde zu knapp bemessen waren, als dass Veränderungen im Hippocampus morphologisch sichtbar werden. Auffallend ist nämlich, dass Studien mit kurzer Interventionsdauer ebenfalls über keine hippocampale Volumenzunahme berichten.

Zwei Stunden Trainingsdauer bei Kwok und Kollegen, 7 Tage Trainingsdauer bei Landi und Kollegen und 6 Trainingseinheiten bei Taubert und Kollegen (jeweils ohne signifikante Zunahme von grauer Substanz im Hippocampus) [22, 25, 30] stehen der Dauer von 60 Tagen mit jeweils min. 30 Minuten bei Kühn und Kollegen, einem ganzen Jahr bei Erickson und Kollegen und drei bis vier Jahren bei Woollett und Kollegen gegenüber (jeweils mit signifikanter Zunahme von grauer Substanz im Hippocampus) [23, 29, 31].

4.1.2 Abnahme von grauer Substanz in der Trainingsgruppe

Das Ergebnis der zahlreichen Abnahmen grauer Substanz in verschiedenen Hirnregionen wurde eingangs nicht vermutet. Hinweise dazu aus anderen Studien sind selten, was die Diskussion solcher Ergebnisse erschwert. Dennoch gibt es Ansätze, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Draganski und Kollegen [26] fanden bei sich auf das erste Staatsexamen vorbereitenden Medizinstudenten eine signifikante Abnahme grauer Substanz im okzipitalen Parietallappen. Sie weisen darauf hin, dass es keine Hypothese für lernbedingte Abnahmen grauer Substanz gäbe, sondern ihr Ergebnis darauf zurückzuführen sei, dass sich im gleichen Bereich kongruente weiße Substanz vergrößere und die graue Substanz daher zurückdränge.

Taubert und Kollegen [22] berichten über Abnahmen grauer Substanz im rechten Putamen, im rechten Gyrus orbitofrontalis inferior, im linken Gyrus occipitalis inferior, im rechten Gyrus temporalis medialis sowie beidseits im Lobus 8 des Kleinhirns. Sie diskutieren diese Ergebnisse nicht.

Granert und Kollegen [85] berichten wie bereits geschildert von signifikant kleinerem Volumen grauer Substanz im Putamen bei professionellen Pianisten und führen das auf deren Professionalität zurück, d.h. auf eine größere Effizienz.

Hänggi und Kollegen [84] finden ebenfalls signifikant kleineres Volumen grauer Substanz im Putamen bei Balletttänzerinnen und diskutieren die Möglichkeit, dass eine bestimmte Art von Training eine Zunahme von grauer Substanz bewirken könne und eine andere Art von Training eben nicht, sondern sich in einer Abnahme grauer Substanz äußern könne.

Außerdem könnten weitere Faktoren dieses Geschehen beeinflussen, wie z.B. die Trainingsdauer, die verschiedenen Trainingsstadien der Probanden (umgekehrt U-förmige Beziehung von Aktivierung zwischen Anfängern/Experten und Probanden mit mittlerer Expertise) oder auch die individuellen biologischen Einflüsse [84].

Gryga und Kollegen berichten ebenfalls über Abnahmen grauer Substanz, und zwar deshalb, weil sie innerhalb ihrer Trainingsgruppe keinerlei signifikante Änderung von grauer Substanz bei einem Vergleich der MRT-Daten nach einer Kneif- und Handkraft-Aufgabe finden [89].

Es gibt in ihren Ergebnissen nämlich Probanden mit Zunahmen sowie Probanden mit Abnahmen grauer Substanz, was sich im Endeffekt ausgleichend auswirke und daher keine signifikanten Testergebnisse vorliegen. Dabei betonen sie, dass sich Training natürlicherweise in Form von Veränderungen in *beide* Richtungen äußere, d.h. sowohl in Form von Zu- als auch in Form von Abnahmen grauer Substanz.

Lövdén und Kollegen [90] verweisen auf die mikrostrukturellen Veränderungen, die den makroskopischen Veränderungen in Form von Zu- oder Abnahmen grauer Substanz zugrunde liegen. Anhand mehrfacher histologischer Untersuchungen an Tiermodellen wurde bereits bewiesen, dass körperliche Aktivität und körperliches Training auf zellulärer Ebene mit Zunahmen von Nervenzellkörpern, Dendriten, Kapillaren und vor allem Synapsen einhergeht [91-94].

Dies bedeute laut Lövdén und Kollegen [90] jedoch nicht zwingend, dass aus einer Zunahme der Synapsenanzahl auch eine Zunahme an Volumen grauer Substanz resultieren müsse. Andersherum dürfe man jedoch auch nicht schlussfolgern, dass für eine trainingsinduzierte Volumenzunahme grauer Substanz immer auch eine gesteigerte Synapsenanzahl ursächlich sei.

Deshalb sei es nämlich genauso möglich, dass sich zwar makroskopisch eine Volumenabnahme an grauer Substanz zeige, sich aber dennoch mehr Synapsen gebildet haben können [90].

Folglich werden die vorliegenden Ergebnisse der abnehmenden grauen Substanz den Ergebnissen der zunehmenden grauen Substanz als gleichberechtigt angesehen. Sie werden ebenso als Lernfortschritt interpretiert und dementsprechend diskutiert.

- Es zeigt sich eine Abnahme des Volumens und der Konzentration grauer Substanz im rechten **Gyrus temporalis inferior**

Dieses Ergebnis wurde in dieser Region eingangs nicht vermutet (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Der Gyrus temporalis inferior gehört zum BA 20 und übernimmt spezifische Funktionen unter deren Berücksichtigung dieses Ergebnis jedoch gut zum Life Kinetik-Training passt (s. Erläuterung unter 4.1.1 Zunahme grauer Substanz in der Trainingsgruppe). Zusätzlich ist jedoch festzuhalten, dass speziell der Gyrus temporalis inferior der rechten Hemisphäre an Prozessen des Arbeitsgedächtnissen beteiligt ist [95].

Keine weitere der zum Vergleich herangezogenen longitudinalen Trainingsstudien (s. 1.2 Stand der Forschung) findet eine Abnahme der grauen Substanz im rechten unteren Temporallappen, aber Taubert und Kollegen [22] finden eine Abnahme grauer Substanz im rechten mittleren Temporallappen nach einem Aerobictraining.

- Es zeigt sich eine Abnahme des Volumens grauer Substanz beidseits im **Gyrus präcentralis** sowie eine Abnahme der Konzentration grauer Substanz im linken **Gyrus präcentralis**

Dieses Ergebnis entspricht in Bezug auf die Hirnregion zwar den Hypothesen, bezüglich der Richtung der Veränderung jedoch nicht (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Der Gyrus präcentralis gehört zum primärmotorischen Kortex und damit zum BA 4. Er ist maßgeblich an der Ausführung von Bewegung beteiligt, da er sowohl bei willkürlichen, aktiven Bewegungen als auch bei passiven Bewegungen eine wichtige Rolle spielt [39, 96]. Er ist dabei gleichzeitig auch für die Kontrolle von aktuell ausgeführter Bewegung zuständig, da er über sensorische Afferenzen stets über die Stellung der Extremitäten informiert ist [97].

Des Weiteren ist der primärmotorische Kortex an der Bewusstwerdung von Bewegung beteiligt, da Patienten mit Läsionen in dieser Region interessanterweise ihre motorische Beeinträchtigung leugnen und behaupten, sie können ihre gelähmten Extremitäten bewegen [98].

Dieses Ergebnis passt daher wie erwartet gut zum Life Kinetik-Training, da das Training motorischer Fähigkeiten zentraler Bestandteil ist.

Boyke und Kollegen [20] finden in ihrer Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im rechten primärmotorischen Kortex nach einem Jongliertraining und Landi und Kollegen [25] finden eine Zunahme grauer Substanz im linken primärmotorischen Kortex nach einem Koordinationstraining mithilfe eines Joysticks.

- Es zeigt sich eine Abnahme des Volumens und der Konzentration grauer Substanz im linken *Nucleus ventralis lateralis* des **Thalamus**

Dieses Ergebnis wurde eingangs nicht vermutet (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Der Thalamus ist eine subkortikale Struktur und wird daher keinem BA zugeordnet. Seine Funktion kommt der einer Relaisstation sehr nahe, da jegliche Art von eingehender Information erst im Thalamus umgeschaltet werden muss, bevor sie den zerebralen Kortex erreicht und damit ins Bewusstsein dringt [99]. Somit steht er unter anderem in funktioneller Verbindung mit dem primärmotorischen Kortex [100], den Basalganglien [47], dem Kleinhirn [71] sowie dem visuellen Kortex [101] und ist dadurch ebenso an der Planung, Ausführung und Kontrolle von Bewegung beteiligt.

Der Nucleus ventralis lateralis gehört zum ventralen Thalamusgebiet und damit zur motorischen Region des Thalamus, die unter anderem eine Zielstruktur für die Therapie motorischer Bewegungsstörungen darstellt [102].

Daher passt eine trainingsinduzierte Veränderung der grauen Substanz im ventralen Thalamus gut zu den übrigen Ergebnissen, da dieser wie bereits erläutert funktionell mit dem primärmotorischen Kortex, dem Putamen, dem Kleinhirn und dem visuellen Kortex verbunden ist und diese Regionen in der vorliegenden Studie ebenfalls eine trainingsinduzierte Veränderung aufweisen.

Keine weitere der zum Vergleich herangezogenen longitudinalen Trainingsstudien (s. 1.2 Stand der Forschung) findet eine Abnahme der grauen Substanz im Thalamus.

- Es zeigt sich eine Abnahme der Konzentration grauer Substanz im linken medialen **Gyrus frontalis superior**

Dieses Ergebnis entspricht nicht den Hypothesen (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Der Gyrus frontalis superior gehört zum BA 8 und ist an motorischen und kognitiven Vorgängen beteiligt. Im Bereich der Motorik zeigt er eine erhöhte Aktivität vor allem bei Bewegungen der Zehen [103].

Im Bereich der Kognition ist er an Prozessen des Arbeits- [104], Kurzzeit- [105] und Langzeitgedächtnisses [106] beteiligt sowie an dem Verständnis von inhaltlicher Bedeutung eines Wortes [107]. Außerdem spielt er eine Rolle beim Wechsel von einer kognitiven Aufgabe zur nächsten [108].

Nach Betrachtung der Funktionen passt eine Veränderung innerhalb dieser Region gut zum Life Kinetik-Training, da es wie bereits erwähnt sowohl motorische als auch kognitive Fähigkeiten trainiert und gerade der Wechsel von einer kognitiven Aufgabe zur nächsten in relativ hoher Frequenz erfolgt, indem Übungen nämlich nicht bis zur Automatisierung geübt, sondern nach kleinen Erfolgen rasch abgewechselt werden.

Die Teilnahme an Prozessen der Wortverarbeitung scheint auch gut zu dem sprachlichen Aspekt des Life Kinetik-Trainings zu passen, der sich vor allem in Form von Ansagen äußert, deren Bedeutung die Teilnehmer zur korrekten Bewegungsausführung verstehen müssen.

Boyke und Kollegen [20] sowie Taubert und Kollegen [22] finden in ihrer Trainingsgruppe jeweils eine Zunahme grauer Substanz im linken Gyrus frontalis superior nach einem Jongliertraining und nach einem Ganzkörper-Balancetraining.

- Es zeigt sich eine Abnahme der Konzentration grauer Substanz im rechten **Gyrus frontalis medius**

Dieses Ergebnis entspricht nicht den Hypothesen (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Der Gyrus frontalis medius gehört zum BA 46 und ist für die exekutive Kontrolle von Bewegung verantwortlich [109]. Er ist auch an Prozessen des Arbeits- und Langzeitgedächtnisses beteiligt [110] und spielt eine Rolle bei deduktiver

Schlussfolgerung [111]. Außerdem ist er wie der zuvor beschriebene Gyrus frontalis superior funktionell mitverantwortlich für den Wechsel von einer kognitiven Aufgabe zur nächsten [108].

Nach Betrachtung der Funktionen passt eine Veränderung innerhalb dieser Region gut zum Life Kinetik-Training, da auch der Gyrus frontalis medius motorische sowie kognitive Funktionen erfüllt. Besonders die Funktion der deduktiven Schlussfolgerung scheint gut zur sprachlichen Komponente des Trainings zu passen, da die Probanden wie bereits erläutert von allgemeinen mündlichen Ansagen auf spezifische Bewegungsabläufe schließen müssen.

Colcombe und Kollegen [21] finden in ihrer Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz beidseits im Gyrus frontalis medius nach einem Aerobictraining.

- Es zeigt sich eine Abnahme des Volumens grauer Substanz im linken **Gyrus supraorbitalis**

Dieses Ergebnis entspricht nicht den Hypothesen (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Der Gyrus supraorbitalis gehört zum orbitofrontalen Kortex und damit zum BA 11. Er ist an neuronalen Prozessen beteiligt, die dem allgemeinen Sozialverhalten [112] und dem Vorgang der sozialen Kooperation [113] zugrunde liegen und zeigt erhöhte Aktivität bei der Assoziation eines Gesichts mit einem Namen [114].

Nach Betrachtung der Funktionen passt eine Veränderung innerhalb dieser Region gut zum Life Kinetik-Training, da sowohl in größeren Gruppen als auch partnerweise trainiert wird und dadurch eine hohe soziale Interaktion stattfindet.

Außerdem besteht eine der ersten Aufgaben darin, die Namen der anderen Teilnehmer durch eine Ballspielübung kennenzulernen. Dazu stellen sich alle Teilnehmer im Kreis auf und werfen sich gegenseitig 3 verschiedenfarbige Bälle zu (gelb, blau, rot).

Wirft man den gelben Ball, so muss man den Namen desjenigen Teilnehmers nennen, dem man den Ball aktuell zuspielt. Wirft man den blauen Ball, so muss man den

Namen desjenigen Teilnehmers nennen, der einem den Ball zuvor zuspielte und wirft man den roten Ball, so muss man den Namen desjenigen Teilnehmers nennen, dem der Ball nach erfolgreichem Fangen des Gegenübers zugeworfen werden soll.

D.h. wenn man den eigenen Namen hört, bekommt man entweder direkt einen Ball zugespielt (gelb), wird man beim nächsten Wurf einen Ball zugespielt bekommen (rot) oder hat man eben einen Ball geworfen (blau).

Daran wird deutlich, wie komplex diese Übung ist und wie wichtig daher die Fähigkeit zur Assoziation eines Gesichts mit einem Namen im Life Kinetik-Training ist.

Interessanterweise finden Takeuchi und Kollegen [115] ein signifikant kleineres Volumen grauer Substanz im orbitofrontalen Kortex bei Probanden, die durch Ausfüllen eines Fragebogens als besonders alltagskompetent eingeschätzt werden. Daraus folgern sie einen Zusammenhang zwischen besserer Alltagskompetenz und geringerem Volumen von grauer Substanz im orbitofrontalen Kortex (BA 11).

Unter Alltagskompetenz wird dabei unter anderem die Unterdrückung von sozial nicht erwünschtem Verhalten oder auch das Treffen der richtigen Entscheidung in einer komplexen Situation verstanden.

Taubert und Kollegen [22] finden in ihrer Trainingsgruppe eine Zunahme grauer Substanz im linken medialen orbitofrontalen Kortex und ebenfalls eine Abnahme grauer Substanz im rechten inferioren orbitofrontalen Kortex nach einem Ganzkörper-Balancetraining.

- Es zeigt sich eine Abnahme der Konzentration grauer Substanz im rechten *Crus 2* im **Cerebellum**

Damit entspricht dieses Ergebnis zwar in Bezug auf die Hirnregion den Hypothesen, aber bezüglich der Richtung der Änderung von grauer Substanz entspricht es ihnen nicht (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen). Es gibt Hinweise darauf, dass das *Crus 2* funktionell mit dem präfrontalen Kortex verbunden ist und eine Rolle bei Prozessen des Arbeitsgedächtnisses spielt [74].

Daher kann dieses Ergebnis als zum Life Kinetik-Training passend interpretiert werden, da sowohl das *Crus 2* als auch die präfrontalen Regionen Gyrus frontalis

superior, Gyrus frontalis medius und Gyrus supraorbitalis in den vorliegenden Ergebnissen eine Veränderung der grauen Substanz in die gleiche Richtung aufweisen.

- Es zeigt sich eine Abnahme der Konzentration grauer Substanz im rechten **Gyrus lingualis**

Dieses Ergebnis entspricht in Bezug auf die Hirnregion den Hypothesen, da der Gyrus lingualis funktionell dem visuellen Kortex zugeordnet wird und im visuellen Kortex eine Veränderung vermutet wurde. Bezüglich der Richtung der Änderung entspricht dieses Ergebnis jedoch nicht den Hypothesen, da eine Zunahme im visuellen Kortex vermutet wurde (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen).

Der Gyrus lingualis gehört als funktioneller Bestandteil des visuellen Kortex' zum BA 19. Die Diskussion der Funktion des BA 19 und damit die Interpretation dieses Ergebnisses finden sich unter 4.1.1 Zunahme grauer Substanz in der Trainingsgruppe.

4.1.3 Neuropsychologische Ergebnisse

Für die Tests **Flexibilität** und **aktives Gesichtsfeld** zeigen sich wie erwartet signifikant reduzierte Mittelwerte und Mediane der Reaktionszeiten, was als schnellere Entscheidungsfindung interpretiert werden kann. Signifikant geringere Standardabweichungen der Reaktionszeiten sprechen für konstantere Reaktionszeiten mit weniger Variabilität.

Damit wurden die Hypothesen für diese beiden Tests zwar formal bestätigt (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen), allerdings ist dieses Ergebnis lediglich auf den bereits erwähnten Lerneffekt zurückzuführen.

Im Test für **geteilte Aufmerksamkeit** gibt es beim 2. Messzeitpunkt signifikant mehr Fehler innerhalb der Trainingsgruppe. Diese sind auditiv falsch positiver Natur. Damit kann die Hypothese einer signifikant abnehmenden Fehleranzahl nicht bestätigt werden (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen).

Man kann vermuten, dass die höhere Fehleranzahl einer Art von Übermotivation geschuldet ist. Definitiv plausibel kann dieses Ergebnis jedoch nicht erklärt werden.

Im Test für **Ablenkbarkeit** gibt es keinerlei signifikante Verbesserungen. Auch hier können die Hypothesen nicht bestätigt werden (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen).

Im **California Verbal Learning Test** gibt es ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse, da einige Probanden beim 2. Messzeitpunkt mehr Begriffe wiedergeben konnten und andere weniger als zuvor. Daher entspricht auch dieses Ergebnis nicht den Hypothesen (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen).

Im **Trail Making Test** zeigt sich zwar ein Trend zu geringerer Bearbeitungszeit, aber nicht auf einem signifikanten Niveau. Also wurden die Hypothesen auch bei diesem Test nicht bestätigt (s. 1.4 Fragestellungen und Hypothesen).

Laut Diamond und Kollegen [116] spielen sowohl die Dauer als auch die Intensität des Trainings eine sehr wichtige Rolle im Hinblick darauf, ob sich neuropsychologische Funktionen verbessern oder nicht. Je länger ein Training dauere (Anzahl der Wochen) und je intensiver es sei (Anzahl der Trainingseinheiten pro Woche), desto höher sei die individuelle Verbesserung der kognitiven Funktionen. Außerdem gäbe es die Möglichkeit, dass sich verbesserte kognitive Funktionen erst später zeigen könnten und nicht schon direkt nach dem Training.

Das bedeutet, dass die ausbleibende Verbesserung der Trainingsgruppe der vorliegenden Studie in den durchgeführten neuropsychologischen Tests darauf zurückgeführt werden könnte, dass die Dauer sowie Intensität des Life Kinetik-Trainings zu niedrig waren oder der zweite Messzeitpunkt zu früh angesetzt wurde und man daher gar keine signifikante Verbesserung erwarten kann.

Außerdem muss beachtet werden, dass es sich bei der vorliegenden Trainingsgruppe um gesunde Probanden handelt und dies der Grund für einen ausbleibenden signifikanten Effekt sein könnte. Es könnte sich gewissermaßen ein Deckeneffekt ergeben haben. Alle Trainingsteilnehmer zeigten eine durchschnittliche bis gute

Leistungsfähigkeit, signifikante Steigerungen sind möglicherweise nur bei kognitiv eingeschränkten Personen zu erwarten.

Es wurden außerdem keine Korrelationen zwischen VBM-Ergebnissen und neuropsychologischen Testergebnissen gefunden.

Laut Lövdén und Kollegen [90] muss eine Korrelation der Ergebnisse auch nicht zwingend vorhanden sein, da es einige Studien gibt, die keinen Zusammenhang zwischen Volumenänderungen grauer Substanz und Verhaltensänderungen nachweisen können.

Somit lässt sich schlussendlich zusammenfassen, dass nur ein Teil der Hypothesen der vorliegenden Studie bestätigt werden konnte.

Eine Studie von Thomas und Kollegen [117] zeigt ein ähnliches Resultat: sie führten eine Trainingsintervention durch, bei der 12 gesunde Probanden (mittleres Alter 32,5 Jahre) einen sich auf einem Bildschirm bewegenden Punkt mithilfe eines Joysticks verfolgen mussten (Kontrollaufgabe).

Nach 2 Wochen wurde das Training mit einer gespiegelten Links-Rechts-Achse des Joysticks fortgeführt, um einen neuen Trainingsreiz zu setzen (Spiegelbildaufgabe). Vor und nach der Kontrollaufgabe sowie nach der Spiegelbildaufgabe wurden sowohl strukturelle als auch funktionelle MRT-Aufnahmen akquiriert. Außerdem wurde vor und nach beiden Aufgaben der Abstand zwischen Joystickcursor und sich bewegenden Punkt gemessen.

Die Ergebnisse zeigen einerseits zwar wie erwartet funktionelle Änderungen in spezifischen Hirnregionen, jedoch überraschenderweise und völlig unerwartet keinerlei signifikante Konzentrationsänderungen der grauen Substanz. Außerdem nimmt der Abstand zwischen Joystickcursor und sich bewegenden Punkt nur nach der Spiegelbildaufgabe signifikant ab und nicht nach der Kontrollaufgabe.

Dieses Beispiel soll verdeutlichen, dass Hypothesen nicht immer bestätigt werden und dies dennoch zu neuen, wichtigen Erkenntnissen führt.

Denn nichtsdestotrotz können die Ergebnisse der vorliegenden Studie als wegweisend hinsichtlich eines positiven Zusammenhangs zwischen körperlicher Aktivität und strukturellen sowie kognitiven Veränderungen im menschlichen Gehirn interpretiert werden.

Eines der wichtigsten Ziele der Neurowissenschaft ist schließlich die Übersetzung von Erkenntnissen neurowissenschaftlicher Forschung in klinische Therapiemöglichkeiten, um möglichst vielen Patientengruppen neue Therapiealternativen anbieten zu können [118].

4.2 Einschränkungen

Mögliche Einschränkungen der vorliegenden Studie liegen zum einen in der geringen Probandenanzahl der Trainingsgruppe ($n=21$) und zum anderen in zu geringer Trainingsdauer sowie Trainingsintensität (eine einstündige Trainingseinheit pro Woche über einen Zeitraum von insgesamt 13 Wochen).

Dies entspricht zwar dem von Life-Kinetik empfohlenen Trainingsumfang, dieser könnte jedoch für Probanden-Kontroll-Studien intensiviert werden, um signifikante Veränderungen zu zeigen.

Außerdem absolvierte die Kontrollgruppe kein spezifisches Trainingsprogramm (wie z.B. ein Dehnungsprogramm), sondern war rein passiv. Veränderungen innerhalb der Trainingsgruppe können nämlich laut Thomas und Kollegen [119] nur dann als für das jeweilige Training spezifisch interpretiert werden, wenn sowohl die Trainings- als auch die Kontrollgruppe eine Aufgabe bekämen.

Es müssten also beide Gruppen aktiv sein. Ansonsten könnten die Effekte in der Trainingsgruppe auch als Effekt irgendeines Trainings interpretiert werden und seien nicht eindeutig spezifisch für das ausgewählte Training, dessen Effekte untersucht werden sollen.

Zudem wurde zu Beginn der Studie nur eine MRT-Aufnahme der Probanden akquiriert und nicht zwei, um diese miteinander zu vergleichen und mögliche Messartefakte zu erkennen.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Verschiedene Studien zeigen, dass körperliche Inaktivität einen nicht zu unterschätzenden Risikofaktor für die physische und psychische Gesundheit des Menschen darstellt. Die gesundheitsschädigenden Auswirkungen sind mit denen vergleichbar, die durch Rauchen oder Adipositas verursacht werden.

Körperliche Aktivität hingegen wirkt sich nicht nur positiv, sondern sogar schützend auf die Gesundheit aus. Studienergebnisse belegen, dass körperliche Aktivität das Erkrankungsrisiko von kardiovaskulären Erkrankungen, Stoffwechselerkrankungen, arterieller Hypertension, Brust- und Darmkrebs, Depression, Angststörungen und Demenz signifikant senkt. Auch das Risiko eines vorzeitigen Todes wird dadurch signifikant reduziert.

Des Weiteren wurden neuroplastische Veränderungen von grauer und weißer Substanz des Gehirns sowie verbesserte kognitive Leistungsfähigkeit als Folge körperlicher Aktivität beobachtet.

Die vorliegende Studie untersucht die Auswirkungen eines kombinierten körperlichen und kognitiven Trainings namens Life Kinetik auf die graue Substanz und die kognitive Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns.

Dieses Trainingskonzept ist besonders, da es körperliche und kognitive Übungen ineinander integriert und schon bei frühen Erfolgen die Komplexität der Übungen erhöht, um einer Automatisierung vorzubeugen. Die ständige Veränderung und Neuheit der Bewegungsabläufe ist ein Hauptmerkmal des Trainings.

Eine Trainingsgruppe bestehend aus 21 Probanden absolvierte min. 11 von insgesamt 13 Life Kinetik-Trainingsstunden und eine Kontrollgruppe mit 17 Probanden diente als Vergleich. Es wurden mit beiden Gruppen vor Beginn und nach Teilnahme am Life Kinetik-Training MRT-Aufnahmen sowie neuropsychologische Tests durchgeführt.

Eingangs formulierte Hypothesen ließen in der Trainingsgruppe eine Zunahme von grauer Substanz im primärmotorischen Kortex, im supplementärmotorischen Kortex,

im Kleinhirn, in den Basalganglien, im visuellen Kortex und im Hippocampus vermuten. Außerdem wurde eine Verbesserung der kognitiven Leistungen in neuropsychologischen Tests erwartet.

Die morphologischen Ergebnisse der Trainingsgruppe sind sehr heterogen. Es zeigen sich auf der einen Seite Zunahmen grauer Substanz wie vermutet im Kleinhirn, in den Basalganglien und im visuellen Kortex sowie in Arealen, die eingangs zwar nicht vermutet wurden, aber die nach Studium derer Funktionen als passend interpretiert werden können. Auf der anderen Seite zeigen sich jedoch auch viele Abnahmen grauer Substanz.

Allerdings zeichnet sich in der neurowissenschaftlichen Forschung immer deutlicher ein Trend dahingehend ab, dass Lernvorgänge und Training nicht nur Zunahmen, sondern sehr wohl auch Abnahmen von grauer Substanz nach sich ziehen und gerade die Veränderung in beide Richtungen Ausdruck individuellen Fortschritts ist.

Daher werden die vorliegenden Abnahmen grauer Substanz den Zunahmen als gleichwertig interpretiert. Auch innerhalb der Abnahmen zeigen sich Hirnregionen, die eingangs zwar nicht vermutet, aber die nach Studium derer Funktionen als zum Life Kinetik-Training passend interpretiert werden können.

Die neuropsychologischen Ergebnisse der Trainingsgruppe sind ebenfalls sehr heterogen. Es zeigt sich in den Tests Flexibilität und aktives Gesichtsfeld zwar eine signifikante Reduktion der Reaktionszeiten, jedoch ist das lediglich Ausdruck des Lerneffekts.

Im Test geteilte Aufmerksamkeit zeigt sich eine signifikante Zunahme der Fehler. Alle übrigen Tests zeigen keinerlei signifikante Ergebnisse. Das könnte jedoch mit der zu gering gewählten Dauer sowie Intensität des Life Kinetik-Trainings zusammenhängen oder auch mit dem Umstand, dass es sich bei der Trainingsgruppe um vollkommen gesunde Probanden handelt und man daher auch keine signifikante Verbesserung der neuropsychologischen Funktionen erwarten dürfte.

Somit ließ sich nur ein Teil der Hypothesen bestätigen. Allerdings ist die Probandenzahl der Trainingsgruppe auch eher gering (n=21) und das Life Kinetik-Training wurde mit relativ geringer Intensität einmal wöchentlich durchgeführt.

Das bedeutet, dass eine Follow-Up-Studie mit einer höheren Probandenanzahl und einer höheren Frequenz an Trainingsstunden durchgeführt werden sollte, um die Auswirkungen von Life Kinetik auf die graue Substanz und kognitive Leistungsfähigkeit nochmals genauer nachzuvollziehen.

Gegebenenfalls könnte man auch mit depressiven oder dementen Patienten arbeiten, um den Effekt auf klinisch auffällige Patientengruppen zu untersuchen und einen möglichen Nutzen daraus abzuleiten.

6 LITERATURVERZEICHNIS

1. Lee, I.M., et al., *Effect of physical inactivity on major non-communicable diseases worldwide: an analysis of burden of disease and life expectancy*. Lancet, 2012. **380**(9838): p. 219-29.
2. Statistisches Bundesamt. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland*. 2013 abgerufen am 24.11.2015; Available from: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Gesundheit/Todesursachen/Todesursachen2120400117004.pdf?__blob=publicationFile.
3. McEwen, B.S. and P.J. Gianaros, *Stress- and allostasis-induced brain plasticity*. Annu Rev Med, 2011. **62**: p. 431-45.
4. Busch, M.A., et al., *Prävalenz von depressiver Symptomatik und diagnostizierter Depression bei Erwachsenen in Deutschland*. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 2013. **56**(5-6): p. 733-739.
5. Wittchen, H.U. and D. Pittrow, *Prevalence, recognition and management of depression in primary care in Germany: the Depression 2000 study*. Hum Psychopharmacol, 2002. **17 Suppl 1**: p. S1-11.
6. Bickel, H., *Demenzsyndrom und Alzheimer Krankheit: Eine Schätzung des Krankenbestandes und der jährlichen Neuerkrankungen in Deutschland*. Gesundheitswesen, 2000. **62**(04): p. 211-218.
7. Weyerer, S. and M. Schäufele, *Die Versorgung dementer Patienten in Deutschland aus epidemiologischer Sicht*. Zeitschrift für Gerontopsychologie & -psychiatrie, 2004. **17**(1): p. 41-50.
8. Nelson, M.E., et al., *Physical activity and public health in older adults: recommendation from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association*. Med Sci Sports Exerc, 2007. **39**(8): p. 1435-45.
9. Paluska, S.A. and T.L. Schwenk, *Physical activity and mental health: current concepts*. Sports Med, 2000. **29**(3): p. 167-80.
10. Warburton, D.E., C.W. Nicol, and S.S. Bredin, *Health benefits of physical activity: the evidence*. Cmaj, 2006. **174**(6): p. 801-9.
11. Goodwin, R.D., *Association between physical activity and mental disorders among adults in the United States*. Prev Med, 2003. **36**(6): p. 698-703.
12. Larson, E.B., et al., *Exercise is associated with reduced risk for incident dementia among persons 65 years of age and older*. Ann Intern Med, 2006. **144**(2): p. 73-81.

13. Verghese, J., et al., *Leisure activities and the risk of dementia in the elderly*. N Engl J Med, 2003. **348**(25): p. 2508-16.
14. Dishman, R.K., et al., *Neurobiology of exercise*. Obesity (Silver Spring), 2006. **14**(3): p. 345-56.
15. Jancke, L., *The plastic human brain*. Restor Neurol Neurosci, 2009. **27**(5): p. 521-38.
16. Cotman, C.W. and N.C. Berchtold, *Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity*. Trends Neurosci, 2002. **25**(6): p. 295-301.
17. Diamond, A., *Effects of Physical Exercise on Executive Functions: Going beyond Simply Moving to Moving with Thought*. Annals of sports medicine and research, 2015. **2**(1): p. 1011.
18. Diamond, A., *Effects of physical exercise on executive functions: going beyond simply moving to moving with thought*. Ann Sports Med Res, 2015. **2**(1): p. 1011.
19. Draganski, B., et al., *Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training*. Nature, 2004. **427**(6972): p. 311-2.
20. Boyke, J., et al., *Training-induced brain structure changes in the elderly*. J Neurosci, 2008. **28**(28): p. 7031-5.
21. Colcombe, S.J., et al., *Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans*. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 2006. **61**(11): p. 1166-70.
22. Taubert, M., et al., *Dynamic properties of human brain structure: learning-related changes in cortical areas and associated fiber connections*. J Neurosci, 2010. **30**(35): p. 11670-7.
23. Erickson, K.I., et al., *Exercise training increases size of hippocampus and improves memory*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2011. **108**(7): p. 3017-22.
24. Bezzola, L., et al., *Training-induced neural plasticity in golf novices*. J Neurosci, 2011. **31**(35): p. 12444-8.
25. Landi, S.M., F. Baguear, and V. Della-Maggiore, *One week of motor adaptation induces structural changes in primary motor cortex that predict long-term memory one year later*. J Neurosci, 2011. **31**(33): p. 11808-13.
26. Draganski, B., et al., *Temporal and spatial dynamics of brain structure changes during extensive learning*. J Neurosci, 2006. **26**(23): p. 6314-7.
27. Ilg, R., et al., *Gray matter increase induced by practice correlates with task-specific activation: a combined functional and morphometric magnetic resonance imaging study*. J Neurosci, 2008. **28**(16): p. 4210-5.

28. Schmidt-Wilcke, T., et al., *Distinct patterns of functional and structural neuroplasticity associated with learning Morse code*. Neuroimage, 2010. **51**(3): p. 1234-41.
29. Woollett, K. and E.A. Maguire, *Acquiring "the Knowledge" of London's layout drives structural brain changes*. Curr Biol, 2011. **21**(24): p. 2109-14.
30. Kwok, V., et al., *Learning new color names produces rapid increase in gray matter in the intact adult human cortex*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2011. **108**(16): p. 6686-8.
31. Kuhn, S., et al., *Playing Super Mario induces structural brain plasticity: gray matter changes resulting from training with a commercial video game*. Mol Psychiatry, 2014. **19**(2): p. 265-71.
32. *Life Kinetik*. [cited 2017; Available from: <http://www.lifekinetik.de/>].
33. Lutz, H., *Life Kinetik - Gehirntreinig durch Bewegung*. 2012.
34. Demirakca, T., et al., *The Exercising Brain: Changes in Functional Connectivity Induced by an Integrated Multimodal Cognitive and Whole-Body Coordination Training*. Neural Plasticity.
35. Bangert, M. and G. Schlaug, *Specialization of the specialized in features of external human brain morphology*. Eur J Neurosci, 2006. **24**(6): p. 1832-4.
36. Aydin, K., et al., *Increased gray matter density in the parietal cortex of mathematicians: a voxel-based morphometry study*. AJNR Am J Neuroradiol, 2007. **28**(10): p. 1859-64.
37. Maguire, E.A., et al., *Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2000. **97**(8): p. 4398-403.
38. Karni, A., et al., *Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning*. Nature, 1995. **377**(6545): p. 155-8.
39. Blickenstorfer, A., et al., *Cortical and subcortical correlates of functional electrical stimulation of wrist extensor and flexor muscles revealed by fMRI*. Hum Brain Mapp, 2009. **30**(3): p. 963-75.
40. Grafton, S.T., J. Salidis, and D.B. Willingham, *Motor learning of compatible and incompatible visuomotor maps*. J Cogn Neurosci, 2001. **13**(2): p. 217-31.
41. Ungerleider, L.G., J. Doyon, and A. Karni, *Imaging brain plasticity during motor skill learning*. Neurobiol Learn Mem, 2002. **78**(3): p. 553-64.
42. Cunnington, R., et al., *The preparation and execution of self-initiated and externally-triggered movement: a study of event-related fMRI*. Neuroimage, 2002. **15**(2): p. 373-85.

43. Lotze, M., et al., *Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study*. J Cogn Neurosci, 1999. **11**(5): p. 491-501.
44. Miall, R.C., G.Z. Reckess, and H. Imamizu, *The cerebellum coordinates eye and hand tracking movements*. Nat Neurosci, 2001. **4**(6): p. 638-44.
45. Kapreli, E., et al., *Lateralization of brain activity during lower limb joints movement. An fMRI study*. Neuroimage, 2006. **32**(4): p. 1709-21.
46. Halsband, U. and R.K. Lange, *Motor learning in man: a review of functional and clinical studies*. J Physiol Paris, 2006. **99**(4-6): p. 414-24.
47. Middleton, F.A. and P.L. Strick, *Basal ganglia and cerebellar loops: motor and cognitive circuits*. Brain Res Brain Res Rev, 2000. **31**(2-3): p. 236-50.
48. Lehericy, S., et al., *Distinct basal ganglia territories are engaged in early and advanced motor sequence learning*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2005. **102**(35): p. 12566-71.
49. Monchi, O., et al., *Functional role of the basal ganglia in the planning and execution of actions*. Ann Neurol, 2006. **59**(2): p. 257-64.
50. Middleton, F.A. and P.L. Strick, *Basal ganglia output and cognition: evidence from anatomical, behavioral, and clinical studies*. Brain Cogn, 2000. **42**(2): p. 183-200.
51. Ferrandez, A.M., et al., *Basal ganglia and supplementary motor area subtend duration perception: an fMRI study*. Neuroimage, 2003. **19**(4): p. 1532-44.
52. Cheng, K., et al., *Human cortical regions activated by wide-field visual motion: an H2(15)O PET study*. J Neurophysiol, 1995. **74**(1): p. 413-27.
53. James, T.W., et al., *Ventral occipital lesions impair object recognition but not object-directed grasping: an fMRI study*. Brain, 2003. **126**(Pt 11): p. 2463-75.
54. Demirakca, T., et al., *Does body shaping influence brain shape? Habitual physical activity is linked to brain morphology independent of age*. World J Biol Psychiatry, 2014. **15**(5): p. 387-96.
55. Eichenbaum, H., *Hippocampus: cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory*. Neuron, 2004. **44**(1): p. 109-20.
56. Fimm, V., *Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP) Version 2.3, 1. Teil*. Psychologische Testsysteme. Vol. 1. Auflage. 2012: Vera Fimm.
57. Peter Zimmermann, B.F., *Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung Version Mobilität (TAP-M)*. Psychologische Testsysteme. Vol. 1. Auflage. 2012: Vera Fimm.

58. H. Niemann, W.S.e.a., *California Verbal Learning Test CVLT*. Vol. 1 Auflage. 2008: Pearson Assessment&Information GmbH FFM.
59. *Trail Making Test*. [cited 2017; Available from: <https://portal.hogrefe.com/dorsch/trail-making-test-tmt/>].
60. *Wortschatztest*. [cited 2017; Available from: <http://www.testzentrale.de/programm/wortschatztest.html?catId=17>].
61. Gaser, C., *Funktionelle Bildgebung in Psychiatrie und Psychotherapie*. Vol. 1. 2004: Henrik Walter.
62. Ashburner, J., *A fast diffeomorphic image registration algorithm*. *Neuroimage*, 2007. **38**(1): p. 95-113.
63. Ashburner, J. and K.J. Friston, *Voxel-based morphometry--the methods*. *Neuroimage*, 2000. **11**(6 Pt 1): p. 805-21.
64. Papathanassiou, D., et al., *A common language network for comprehension and production: a contribution to the definition of language epicenters with PET*. *Neuroimage*, 2000. **11**(4): p. 347-57.
65. Vorobyev, V.A., et al., *Linguistic processing in visual and modality-nonspecific brain areas: PET recordings during selective attention*. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2004. **20**(2): p. 309-22.
66. Rapp, A.M., et al., *Neural correlates of metaphor processing*. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2004. **20**(3): p. 395-402.
67. Fortin, A., et al., *Cortical areas mediating stereopsis in the human brain: a PET study*. *Neuroreport*, 2002. **13**(6): p. 895-8.
68. Burciu, R.G., et al., *Structural correlates of motor adaptation deficits in patients with acute focal lesions of the cerebellum*. *Exp Brain Res*, 2014. **232**(9): p. 2847-57.
69. Smith, M.A. and R. Shadmehr, *Intact ability to learn internal models of arm dynamics in Huntington's disease but not cerebellar degeneration*. *J Neurophysiol*, 2005. **93**(5): p. 2809-21.
70. Hardwick, R.M., et al., *A quantitative meta-analysis and review of motor learning in the human brain*. *Neuroimage*, 2013. **67**: p. 283-97.
71. Penhune, V.B. and J. Doyon, *Cerebellum and M1 interaction during early learning of timed motor sequences*. *Neuroimage*, 2005. **26**(3): p. 801-12.
72. Manto, M., et al., *Consensus paper: roles of the cerebellum in motor control--the diversity of ideas on cerebellar involvement in movement*. *Cerebellum*, 2012. **11**(2): p. 457-87.

73. Ciccarelli, O., et al., *Identifying brain regions for integrative sensorimotor processing with ankle movements*. Exp Brain Res, 2005. **166**(1): p. 31-42.
74. Stoodley, C.J. and J.D. Schmahmann, *Functional topography in the human cerebellum: a meta-analysis of neuroimaging studies*. Neuroimage, 2009. **44**(2): p. 489-501.
75. Stoodley, C.J., *The cerebellum and cognition: evidence from functional imaging studies*. Cerebellum, 2012. **11**(2): p. 352-65.
76. Doya, K., *Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control*. Curr Opin Neurobiol, 2000. **10**(6): p. 732-9.
77. Shadmehr, R. and H.H. Holcomb, *Inhibitory control of competing motor memories*. Exp Brain Res, 1999. **126**(2): p. 235-51.
78. Shadmehr, R. and H.H. Holcomb, *Neural correlates of motor memory consolidation*. Science, 1997. **277**(5327): p. 821-5.
79. Elsinger, C.L., D.L. Harrington, and S.M. Rao, *From preparation to online control: reappraisal of neural circuitry mediating internally generated and externally guided actions*. Neuroimage, 2006. **31**(3): p. 1177-87.
80. Gerardin, E., et al., *Distinct striatal regions support movement selection, preparation and execution*. Neuroreport, 2004. **15**(15): p. 2327-31.
81. Doyon, J., et al., *Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning*. Behav Brain Res, 2009. **199**(1): p. 61-75.
82. Wu, T., K. Kansaku, and M. Hallett, *How self-initiated memorized movements become automatic: a functional MRI study*. J Neurophysiol, 2004. **91**(4): p. 1690-8.
83. Rektor, I., et al., *Cognitive- and movement-related potentials recorded in the human basal ganglia*. Mov Disord, 2005. **20**(5): p. 562-8.
84. Hanggi, J., et al., *Structural neuroplasticity in the sensorimotor network of professional female ballet dancers*. Hum Brain Mapp, 2010. **31**(8): p. 1196-206.
85. Granert, O., et al., *Sensorimotor skills and focal dystonia are linked to putaminal grey-matter volume in pianists*. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 2011. **82**(11): p. 1225-31.
86. Grefkes, C., et al., *Dynamic intra- and interhemispheric interactions during unilateral and bilateral hand movements assessed with fMRI and DCM*. Neuroimage, 2008. **41**(4): p. 1382-94.
87. Munzert, J., et al., *Neural activation in cognitive motor processes: comparing motor imagery and observation of gymnastic movements*. Exp Brain Res, 2008. **188**(3): p. 437-44.

88. van Mier, H.I., J.S. Perlmutter, and S.E. Petersen, *Functional changes in brain activity during acquisition and practice of movement sequences*. Motor Control, 2004. **8**(4): p. 500-20.
89. Gryga, M., et al., *Bidirectional gray matter changes after complex motor skill learning*. Front Syst Neurosci, 2012. **6**: p. 37.
90. Lovden, M., et al., *Structural brain plasticity in adult learning and development*. Neurosci Biobehav Rev, 2013. **37**(9 Pt B): p. 2296-310.
91. Swain, R.A., et al., *Prolonged exercise induces angiogenesis and increases cerebral blood volume in primary motor cortex of the rat*. Neuroscience, 2003. **117**(4): p. 1037-46.
92. Bailey, C.H., E.R. Kandel, and K. Si, *The persistence of long-term memory: a molecular approach to self-sustaining changes in learning-induced synaptic growth*. Neuron, 2004. **44**(1): p. 49-57.
93. Pereira, A.C., et al., *An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2007. **104**(13): p. 5638-43.
94. Trachtenberg, J.T., et al., *Long-term in vivo imaging of experience-dependent synaptic plasticity in adult cortex*. Nature, 2002. **420**(6917): p. 788-94.
95. Yoo, S.S., G. Paralkar, and L.P. Panych, *Neural substrates associated with the concurrent performance of dual working memory tasks*. Int J Neurosci, 2004. **114**(6): p. 613-31.
96. Chen, R., L.G. Cohen, and M. Hallett, *Role of the ipsilateral motor cortex in voluntary movement*. Can J Neurol Sci, 1997. **24**(4): p. 284-91.
97. Naito, E., *Sensing limb movements in the motor cortex: how humans sense limb movement*. Neuroscientist, 2004. **10**(1): p. 73-82.
98. Berti, A., et al., *Shared cortical anatomy for motor awareness and motor control*. Science, 2005. **309**(5733): p. 488-91.
99. Sherman, S.M. and R.W. Guillery, *The role of the thalamus in the flow of information to the cortex*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2002. **357**(1428): p. 1695-708.
100. Gross, J., et al., *The neural basis of intermittent motor control in humans*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2002. **99**(4): p. 2299-302.
101. Guillery, R.W. and S.M. Sherman, *Thalamic relay functions and their role in corticocortical communication: generalizations from the visual system*. Neuron, 2002. **33**(2): p. 163-75.
102. Ilinsky, I.A. and K. Kultas-Ilinsky, *Motor thalamic circuits in primates with emphasis on the area targeted in treatment of movement disorders*. Mov Disord, 2002. **17 Suppl 3**: p. S9-14.

103. Lee, M.Y., et al., *Differences of the frontal activation patterns by finger and toe movements: a functional MRI study*. Neurosci Lett, 2013. **533**: p. 7-10.
104. Rama, P., et al., *Working memory of identification of emotional vocal expressions: an fMRI study*. Neuroimage, 2001. **13**(6 Pt 1): p. 1090-101.
105. Babiloni, C., et al., *Human cortical responses during one-bit delayed-response tasks: an fMRI study*. Brain Res Bull, 2005. **65**(5): p. 383-90.
106. Bunzeck, N., H. Schutze, and E. Duzel, *Category-specific organization of prefrontal response-facilitation during priming*. Neuropsychologia, 2006. **44**(10): p. 1765-76.
107. Crozier, S., et al., *Distinct prefrontal activations in processing sequence at the sentence and script level: an fMRI study*. Neuropsychologia, 1999. **37**(13): p. 1469-76.
108. Sohn, M.H., et al., *The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2000. **97**(24): p. 13448-53.
109. Kubler, A., V. Dixon, and H. Garavan, *Automaticity and reestablishment of executive control-an fMRI study*. J Cogn Neurosci, 2006. **18**(8): p. 1331-42.
110. Ranganath, C., M.K. Johnson, and M. D'Esposito, *Prefrontal activity associated with working memory and episodic long-term memory*. Neuropsychologia, 2003. **41**(3): p. 378-89.
111. Goel, V., et al., *Neuroanatomical correlates of human reasoning*. J Cogn Neurosci, 1998. **10**(3): p. 293-302.
112. Beer, J.S., et al., *The regulatory function of self-conscious emotion: insights from patients with orbitofrontal damage*. J Pers Soc Psychol, 2003. **85**(4): p. 594-604.
113. Rilling, J., et al., *A neural basis for social cooperation*. Neuron, 2002. **35**(2): p. 395-405.
114. Herholz, K., et al., *Learning face-name associations and the effect of age and performance: a PET activation study*. Neuropsychologia, 2001. **39**(6): p. 643-50.
115. Takeuchi, H., et al., *Brain structures associated with executive functions during everyday events in a non-clinical sample*. Brain Struct Funct, 2013. **218**(4): p. 1017-32.
116. Diamond, A. and D.S. Ling, *Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not*. Dev Cogn Neurosci, 2015.

117. Thomas, A.G., et al., *Functional but not structural changes associated with learning: an exploration of longitudinal voxel-based morphometry (VBM)*. Neuroimage, 2009. **48**(1): p. 117-25.
118. Cramer, S.C., et al., *Harnessing neuroplasticity for clinical applications*. Brain, 2011. **134**(Pt 6): p. 1591-609.
119. Thomas, C. and C.I. Baker, *Teaching an adult brain new tricks: a critical review of evidence for training-dependent structural plasticity in humans*. Neuroimage, 2013. **73**: p. 225-36.

7 ANHANG

7.1 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Bildschirmpräsentation im Test für Flexibilität	19
Abbildung 2: Bildschirmpräsentation im Test fürs aktive Gesichtsfeld	20
Abbildung 3: Bildschirmpräsentation im Test für geteilte Aufmerksamkeit.....	21
Abbildung 4: Bildschirmpräsentation im Test für Ablenkbarkeit	22
Abbildung 5: Gyrus temporalis inferior links.....	33
Abbildung 6: Gyrus occipitalis superior links.....	33
Abbildung 7: Gyrus occipitalis inferior rechts	34
Abbildung 8: Putamen links	34
Abbildung 9: Gyrus temporalis inferior links.....	35
Abbildung 10: Cerebellum Lobus 4 und 5 rechts (mit Ausdehnung nach links)	35
Abbildung 11: Cerebellum Lobus 8 rechts (mit Ausdehnung nach links)	35
Abbildung 12: Gyrus temporalis inferior rechts	37
Abbildung 13: Gyrus präcentralis links (mit Ausdehnung nach rechts)	37
Abbildung 14: Gyrus frontalis superior (medial) links.....	37
Abbildung 15: Gyrus frontalis medius rechts.....	38
Abbildung 16: Gyrus lingualis rechts.....	38
Abbildung 17: Thalamus links	38
Abbildung 18: Cerebellum Crus 2 rechts	38
Abbildung 19: Gyrus temporalis inferior rechts	39
Abbildung 20: Gyrus präcentralis links und rechts.....	39
Abbildung 21: Gyrus supraorbitalis links (mit Ausdehnung nach rechts.....	39
Abbildung 22: Thalamus links	39

Abbildung 23: Mittelwert, Median und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms	43
Abbildung 24: Gesamtes linkes Gesichtsfeld: Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms	45
Abbildung 25: Linkes unteres Gesichtsfeld: Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms	45
Abbildung 26: Anzahl der gesamten Fehler	46
Abbildung 27: Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeit in ms	47
Abbildung 28: Anzahl korrekter Begriffe im Durchgang 1&5	48
Abbildung 29: Anzahl korrekter Begriffe in der verzögerten freien Wiedergabe 1&2	49
Abbildung 30: Bearbeitungszeit in s.....	50

7.2 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der Studienergebnisse zu motorischem Training	8
Tabelle 2: Übersicht der Studienergebnisse zu kognitivem Training.....	9
Tabelle 3: Übersicht der Studienergebnisse zu kombiniertem motorischen und kognitiven Training	9
Tabelle 4: Verteilung der Teilnehmer auf die Trainings- bzw. Kontrollgruppe und Darstellung der Teilnahme an MRT-Messung und/oder neuropsychologischen Testverfahren	31
Tabelle 5: Alter und Hirnvolumina der Trainingsgruppe	32
Tabelle 6: Alter und Hirnvolumina der Kontrollgruppe.....	32
Tabelle 7: Signifikante Konzentrationszunahme (1-4) und Volumenzunahme (5-7) der grauen Substanz	36
Tabelle 8: Signifikante Konzentrationsabnahme (1-7) und Volumenabnahme (8-12) der grauen Substanz	40
Tabelle 9: Übersicht der Ergebnisse der Neuropsychologie	51

8 LEBENS LAUF

Personalien

Name	Sven Dehn
Adresse	Voxstraße 1 10785 Berlin
Geburtsdatum	06.08.1988
E-Mail-Adresse	sven.dehn@web.de
Telefonnummer	0152 36 79 30 60
Geburtsort	Berlin
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig

Schulischer Werdegang

2007 - 2009	Walter-Gropius-Schule
23.06.2009	Abitur

Universitärer Werdegang

2011 - 2016	Studiengang Humanmedizin Universität Heidelberg Med. Fak. Mannheim
2016 - 2017	Praktisches Jahr Charité Berlin
Dezember 2017	2. Staatsexamen Charité Berlin

9 DANKSAGUNG

Als erstes möchte ich mich herzlich bei Gabriele Ende und Traute Demirakca für die Überlassung des Themas dieser Arbeit und die damit einhergehende, hervorragende Betreuung bedanken.

Ich wurde 2013 in der Arbeitsgruppe Neuroimaging sehr freundlich und wohlwollend aufgenommen. Als absoluter Anfänger im Bereich Forschung, durfte ich alle möglichen Fragen stellen, die mir jederzeit kompetent beantwortet wurden. Ich fühlte mich in jeder Situation wertschätzend behandelt.

Es wurde auf anfängliche, persönliche Schwierigkeiten sensibel eingegangen und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Die Durchführung der neuropsychologischen Tests und der MRT-Aufnahmen war zu beiden Zeitpunkten sehr angenehm und unterhaltsam.

Alle nötigen Schritte im Umgang mit der IT wurden mir Stück für Stück erklärt, sodass ich schnell selbstständig arbeiten konnte. Es herrschte weder Zeit- noch Leistungsdruck. Ich konnte ungestört an einem eigenen Arbeitsplatz in meiner eigenen Geschwindigkeit arbeiten.

Gabi und Traute hatten für mich stets ein offenes Ohr, wenn ich auf Probleme stieß, die ich allein nicht lösen konnte. Ich hätte mir gerade für den statistischen Teil der Arbeit wirklich keine bessere Unterstützung wünschen können!

Selbst nach meinem Uniwechsel von Mannheim nach Berlin, waren beide für mich jederzeit erreichbar. Nach der (mehrmaligen!!) Durchsicht der geschriebenen Arbeit erhielt ich konstruktives Feedback und wertvolle Anmerkungen.

Ich bin euch beiden für diese einmalige Chance, die ihr mir gegeben habt, unendlich dankbar!

Als zweites möchte ich mich bei Vita Cardinale bedanken. Vita und ich lernten uns in der Arbeitsgruppe Neuroimaging kennen und arbeiteten zusammen an der Auswertung der Life Kinetik Daten.

Vita wurde für mich schnell eine persönliche Bezugsperson, da wir beide mit ähnlichen Problemen zu kämpfen hatten. Ich erinnere mich an wunderschöne Mittagspausen am ZI und im nahegelegenen back shop :)

Auch außerhalb der Arbeitsgruppe verbrachten Vita und ich viiiel Zeit zusammen. Wir wurden im Laufe der Zeit enge Freunde. Es gab fast keinen Freitagabend, den wir nicht zusammen bei Burger King saßen, um die Woche angenehm ausklingen zu lassen.

Auch der Wechsel nach Berlin stand unserer Freundschaft nicht im Weg. Wir sehen uns zwar nicht mehr so häufig wie damals in Mannheim, aber dafür halten wir den Kontakt per Telefon und WhatsApp aufrecht. Außerdem haben wir uns schon zwei Mal in Berlin gesehen, das nächste Mal bin dann wohl ich an der Reihe nach Mannheim zu kommen.

Ich danke dir liebe Vita von Herzen einfach für alles...!