

# **Untersuchungen verschiedener Fitnessmaße auf exekutive Kontrollfunktionen im Rahmen einer 6-monatigen Sportintervention**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Hohen Medizinischen Fakultät  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
Bonn

**Gereon Tacke**

Witten

2024

Angefertigt mit der Genehmigung  
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Henning Boecker
2. Gutachter: Prof. Dr. Lukas Kunz

Tag der Mündlichen Prüfung: 04.10.2024

Aus der Radiologischen Universitätsklinik

Meinen größten Unterstützerinnen gewidmet

für Mama

für Isabell



## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Die Exekutivfunktionen	10
3 Der körperliche Einfluss auf die Exekutivfunktionen	15
4 Zielsetzung:	21
5 Methoden und Experimentaldesign	23
5.1 Probandenrekrutierung	23
5.2 Ablauf der Studie	27
5.3 Leistungsdiagnostik	30
5.4 Intervention	33
5.5 Neuropsychologie	34
5.6 Test der Exekutivfunktion	37
6 Datenanalyse	42
7 Ergebnisse:	45
7.1 Körperliche Leistungsdiagnostik	45
7.1.1 Ruheherzfrequenz	45
7.1.2 Auswertung der Parameter rel.VO <sub>2</sub> max und dmax_v [km/h]	46
7.2 Composite Score	48
7.2.1 Reaktionszeiten:	48
7.2.2 Genauigkeit:	50
7.3 Korrelationsanalyse:	51
7.4 Reaktionszeit:	51
7.5 Genauigkeit:	51
8 Diskussion:	52
9 Methodische Schwächen:	56
10 Zusammenfassung	58
11 Anhang	60
12 Abbildungsverzeichnis	64
13 Tabellenverzeichnis	64
14 Literaturverzeichnis	65
15 Danksagung	74

## Abkürzungsverzeichnis

• ADHS	Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Störung
• ANOVA	Varianzanalyse
• BDNF	Brain Derived Neurotrophic Factor
• BDI	Beck Depression Inventory
• CS	Composite Score
• CON	Kongruente Bedingung des Composite Score
• dmax V	Geschwindigkeit an der Laktatschwelle
• EF	Exekutivfunktionen
• EHI	Edinburgh Handedness Inventory
• EEG	Elektroenzephalografie
• FEV <sub>0,25</sub>	Forciertes expiratorisches Volumen in 0,25 Sekunde
• FEV <sub>1</sub>	Forciertes expiratorisches Volumen in einer Sekunde
• FVC	Funktionelle Vitalkapazität
• Genauigkeit	korrekte Antworten in Prozent
• HFmax	Maximale Herzfrequenz
• HFruhe	Ruheherzfrequenz
• HIIT	High Intensity Interval Training
• INC	Inkongruente Bedingung des Composite Score
• INT	Interferenz Bedingung des Composite Score
• KG	Kontrollgruppe
• M	Mittelwert
• MINI	Mini International Neuropsychiatric Interview
• mmHg	Millimeter-Quecksilbersäule
• MRT	Magnetresonanztomografie
• MVV	Maximal freiwillige Ventilation
• NEUT	Neutrale Bedingung des Composite Score
• RT	Reaktionszeit
• SD	Standardabweichung
• SG	Sportgruppe
• SIG	Signifikant
• STAI	State Anxiety Inventory
• T <sub>0</sub> ; T <sub>2</sub> ; T <sub>4</sub> ; T <sub>6</sub>	Zeitpunkte der Datenerhebungen
• VO <sub>2</sub> max	Maximale muskuläre Sauerstoffaufnahme pro Minute
• WST	Wortschatztest

## 1 Einleitung

Tagtäglich sind wir den Reizen unserer Umwelt ausgesetzt. In unserer heutigen Zeit, in der die Zahl der Informationsmedien immer weiter zunimmt, stehen wir ständig vor der Herausforderung, für uns relevante Informationen zu erkennen, wahrzunehmen und gleichzeitig für uns unwichtige Informationen zu ignorieren.

*„Nicht alle gleichzeitigen Reizwirkungen setzen sich im Bewußtsein durch, denn dessen Leistungsfähigkeit ist begrenzt.“ (Henning, 1925)*

Jedem ist es vermutlich schon mal so ergangen, dass er sich im Alltag, z.B. im Straßenverkehr, durch die Unmenge der auf ihn einprasselnden Informationen überwältigt gefühlt hat. Vielleicht ist Ihnen noch bewusst, welche Anstrengung es gewesen ist, die ersten Kilometer selbstständig und allein mit dem Auto zu fahren. So viele Informationen mussten registriert und verarbeitet werden: Gas geben und schalten, lenken, den vorausfahrenden und den rückwärtigen Verkehr im Blick behalten. Außerdem musste man die Geschwindigkeit anpassen, den Abstand und die Spur halten. Dazu mussten all die Verkehrsschilder, die bisher für uns als Beifahrer unbedeutend waren, ab sofort unser Verhalten steuern.

Sobald man sich stark auf einen Faktor konzentrierte, wurde die Wahrnehmung und die Qualität der anderen Faktoren geschwächt. Schalten Sie vielleicht beim Einparken auch als erstes die Musik leiser oder ist es Ihnen auch schon passiert, dass Sie während einer angeregten Unterhaltung im Auto die Geschwindigkeit aus dem Auge verloren haben?

Sollten diese Erinnerungen schon verblasst sein, dann fahren Sie in eine Ihnen noch unbekannte Großstadt und lassen sich überraschen, wie viel Anstrengung das Autofahren plötzlich wieder von Ihnen verlangt, während Sie ihren täglichen Weg zur Arbeit fast mit geschlossenen Augen fahren können.

Wir gewöhnen uns an bekannte Reize und regelmäßig durchgeführte Tätigkeiten bedürfen keiner bewussten Kontrolle. Die kognitiven Funktionen, die es uns ermöglichen, uns zu fokussieren und störende Reize auszublenden, gehören zur Gruppe der Exekutivfunktionen.

Es hat sich gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit dieser Exekutivfunktionen unterschiedlich gut sein kann und dass Menschen mit geringerer Leistung in Momenten starker Ablenkung schlechter agieren und im normalen Alltag dadurch stark eingeschränkt sein können.

*“Wenn die exekutiven Funktionen beeinträchtigt sind, ist der Betroffene möglicherweise nicht mehr in der Lage, sich selbst zufriedenstellend zu versorgen, selbständig eine bezahlte oder nützliche Arbeit zu verrichten oder normale soziale Beziehungen aufrechtzuerhalten, unabhängig davon, wie gut die kognitiven Fähigkeiten erhalten sind oder wie gut die Person bei Tests von Fähigkeiten, Wissen und Fertigkeiten abschneidet. Kognitive Defizite betreffen in der Regel spezifische Funktionen oder Funktionsbereiche; Beeinträchtigungen der exekutiven Funktionen zeigen sich in der Regel global und betreffen alle Aspekte des Verhaltens.”* (Baddeley, 1986)

Diese Ergebnisse lieferten zum einen Studien mit Patienten, die Schädigungen des Frontalhirns erlitten hatten, zum anderen Studien, die Beeinträchtigungen von Exekutivfunktionen im Alter untersuchten (Duncan et al., 1997; Kimberg und Farah, 1993).

Diese Studien lassen vermuten, dass exekutive Funktionen im normalen Alterungsprozess relativ früh betroffen sind (Garden et al., 2001). So zeigten sich z. B. früh Veränderungen der Frontallappenmorphologie in der Bildgebung (Dempster, 1992; Raz et al., 1997; West, 1996) und im Vergleich zu jüngeren Vergleichsgruppen war bei den davon betroffenen Probanden die Testleistung u.a. der Türme von Hanoi schwächer (Andrés und van der Linden, 2000; Brennan et al., 1997).

Es ist allgemein bekannt, dass mit fortschreitendem Alter auch die körperliche Leistungsfähigkeit abnimmt. Das Absinken der maximalen Herzfrequenz und die reduzierte kardiorespiratorische Fitness könnten mitverantwortlich für die beschriebenen kognitiven Einschränkungen sein. In der Literatur gibt es Hinweise darauf, dass die Performanz der Exekutivfunktionen mit der körperlichen Fitness in einem direkten Zusammenhang steht (Bherer et al., 2013; Colcombe und Kramer, 2003; Ruotsalainen et al., 2020).

Vor diesem Hintergrund könnte im Einfluss von Sport auf Exekutivfunktionen ein präventiver sowie therapeutischer Nutzen vermutet werden, welcher eine Rolle im

Rahmen der Erhaltung der Selbstständigkeit im Alter spielen könnte (Colcombe et al., 2004; Kramer et al., 1999).

Bisherige Studien zum Einfluss von Sport auf Exekutivfunktionen untersuchten sehr spezielle Probandenkollektive, die entweder aus kleinen Kindern (Carson et al., 2016) und Heranwachsenden (Álvarez-Bueno et al., 2017), häufig zusätzlich mit psychologischen Auffälligkeiten (Cerrillo-Urbina et al., 2015), oder aus älteren (Colcombe und Kramer, 2003) vorerkrankten erwachsenen Probanden (Da Silva et al., 2018) bestanden. Der Einfluss körperlicher Fitness auf die Exekutivfunktionen wurde zusätzlich meist nur auf akute Effekte unmittelbar nach einer Sporteinheit untersucht und beschrieben. Eine Aussage zur Trainierbarkeit und langfristigen Effekten körperlichen Trainings auf die kognitiven Funktionen für einen nicht vorerkrankten Menschen ist unter diesen besonderen Umständen kaum möglich. Erickson et al. (2019) beschreiben eine wissenschaftliche Lücke, die vor allem durch das Fehlen von methodischen Studien im Alter von 18 bis 50 Jahren entsteht.

Deshalb untersucht diese Arbeit den Zusammenhang zwischen körperlicher Fitness und Exekutivfunktionen an gesunden jungen Erwachsenen in einem longitudinalen Studiendesign über einen Zeitraum von sechs Monaten. Durch diesen Ansatz sollen anstelle akuter Effekte von Sport auf Exekutivfunktionen langanhaltende Effekte einer sechsmonatigen Sportintervention erfasst werden, um die Lücke an wissenschaftlichen Arbeiten in diesem Bereich zu reduzieren.

In den nächsten beiden Kapiteln wird zuerst der Begriff der Exekutivfunktion erklärt. Anschließend wird ein Überblick über die Zusammenhänge zwischen körperlicher Fitness und Exekutivfunktionen präsentiert.

## 2 Die Exekutivfunktionen

Der Begriff Exekutivfunktion (in Folge EF) wurde erstmals in der Neuropsychologie von Lezak (1982) verwendet und wird meist mit Steuerungs- oder Leitungsfunktion übersetzt. EF beschreiben kognitive Funktionen, welche die Grundlage jeder Entscheidungsfindung und der Kontrolle des eigenen Verhaltens bilden. Trotz großer Anstrengung der Forschung fehlt bisher eine einheitliche Definition (Karr et al., 2018). Deshalb werden die EF häufig als ein sogenannter Regenschirmbegriff („Umbrella-term“) bezeichnet, unter dem viele verschiedene Funktionen der höheren Planungs- und Steuerungsfähigkeit subsumiert werden. Um ihre Steuerfunktionen ausüben zu können, beeinflussen EF andere kognitive Funktionen. Dadurch entsteht bei der Messung eine Aufgabenverunreinigung, die die präzise Erforschung der EF durch diese „task-impurity“ erschwert (Burgess, 1997; Phillips, 1997).

Miyake et al. (2000) gelang die Entwicklung eines Modells, dass die Forschung der EF der letzten Jahrzehnte stark geprägt hat. Baggetta und Alexander (2016) stellten in ihrem Review „Konzeptualisierung und Operationalisierung der Exekutivfunktion“ fest, dass, obwohl dieses Modell die EF nicht allumfassend erklären kann und es sich deshalb nicht vollständig durchsetzen konnte, es eines der am häufigsten verwendeten Modelle bei der Erforschung der EF ist.

Für ein besseres Verständnis der EF wird im Folgenden dieses Modell beschrieben.

Miyake et al. (2000) nutzten drei der am häufigsten erwähnten EF der Literatur (Baddeley, 1996; Logan, 1985; Rabbitt, 1997; Smith und Jonides, 1999).

### 3. „Shifting“

Fähigkeit, irrelevant gewordene Aufgaben zu beenden und sich trotz proaktiver Interferenz und negativem Priming aktiv relevanten Aufgaben zuzuwenden.

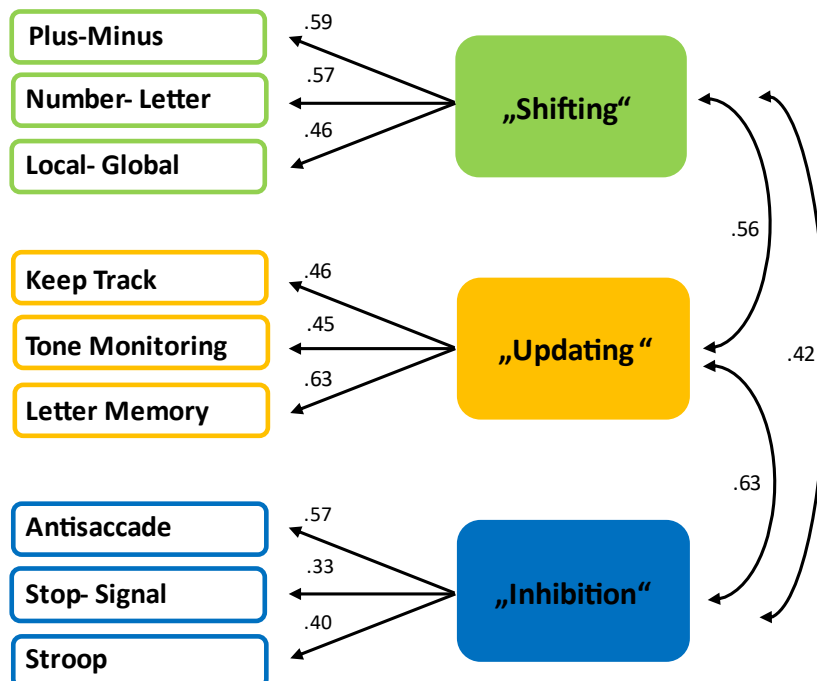
### 4. „Updating“

Fähigkeit des Überwachens und Kodierens neu eingehender Informationen, wobei diese auf Relevanz für die aktuelle Aufgabe geprüft werden. Updating-Prozesse gehen über die rein passive Speicherung und Aufrechterhaltung von Informationen im Kurzzeitspeicher hinaus, da diese Prozesse die aktive Manipulation von Informationen ermöglichen.

## 5. „Inhibition“

Fähigkeit, absichtlich und bewusst eine dominante automatische Reaktion zu unterdrücken.

Die Autoren bestimmten die EF anders als bisher üblich als latente Variable. Sie entwickelten Modelle, um die grundlegenden Strukturen und Beziehungen der EF untereinander darzustellen. Dadurch wurden a priori Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede festgelegt und anschließend mathematisch überprüft. Durch diese Modellanalysen ließen sich die EF-Komponenten als separate Funktionen charakterisieren, obwohl zwischen ihnen einige Gemeinsamkeiten bestehen. Die Korrelationskoeffizienten in Abbildung 1 geben diese Zusammenhänge wieder.



**Abb. 1:** Drei-Faktorenmodell der Zielfunktionen mit Korrelationskoeffizienten an den runden Doppelpfeilen; standardisierte Regressionskoeffizienten an gerade Pfeilen (Abbildung adaptiert aus Miyake et al., 2000).

Dieses Modell verstärkt Teuber's 25 Jahre alte Theorie der „unity and diversity“ und verdeutlicht, dass auf der Suche nach EF beide Aspekte berücksichtigt werden müssen (Teuber, 1972). Aktuellere bildgebende Studien unterstützen das Konzept der „unity and diversity“ anhand aktivierter Gehirnregionen. Die Studien zeigten eine generelle frontale sowie parietale Aktivierung bei jeder der drei Zielfunktionen, sowie eine spezifische Aktivierung frontaler und/oder posteriorer Areale bei der Funktion des updating und

shifting. Für die EF der Inhibition wurde keine spezifische Region gefunden (Collette et al., 2005; Sylvester et al., 2003).

Das Konzept der Inhibition wurde jedoch bereits in vielen Studien benutzt, um die EF zu untersuchen. Unter anderem wurden Schwächen der Inhibition bei Erkrankungen wie ADHS, Schizophrenie oder Autismus postuliert (Barkley, 1997; Ciesielski und Harris, 1997; Nestor und O'Donnell, 1998; Nigg, 2001). Darüber hinaus wurde versucht, durch Veränderungen der Inhibitionsfunktion die Entwicklung kognitiver Funktionen, sowie die mit dem Alter verbundene Abnahme, zu erklären (Diamond und Gilbert, 1989; Hasher und Zacks, 1988; McDowd et al., 1995; Ridderinkhof et al., 1997). Zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde diese Fähigkeit von Garavan et al. (1999) wie folgt beschrieben: „Die Fähigkeit, irrelevante oder störende Reize oder Impulse zu unterdrücken, ist eine grundlegende exekutive Funktion, die für normale Denkprozesse und letztlich für ein erfolgreiches Leben unerlässlich ist.“

Friedman et al. (2004) untersuchten die Funktion der Inhibition genauer und unterschieden drei Subkomponenten.

**1. präpotente Reaktionshemmung**

- die Fähigkeit, absichtlich dominante, automatische oder präpotente Reaktionen zu unterdrücken (diese Komponente wird durch den *Strooptest* erfasst).

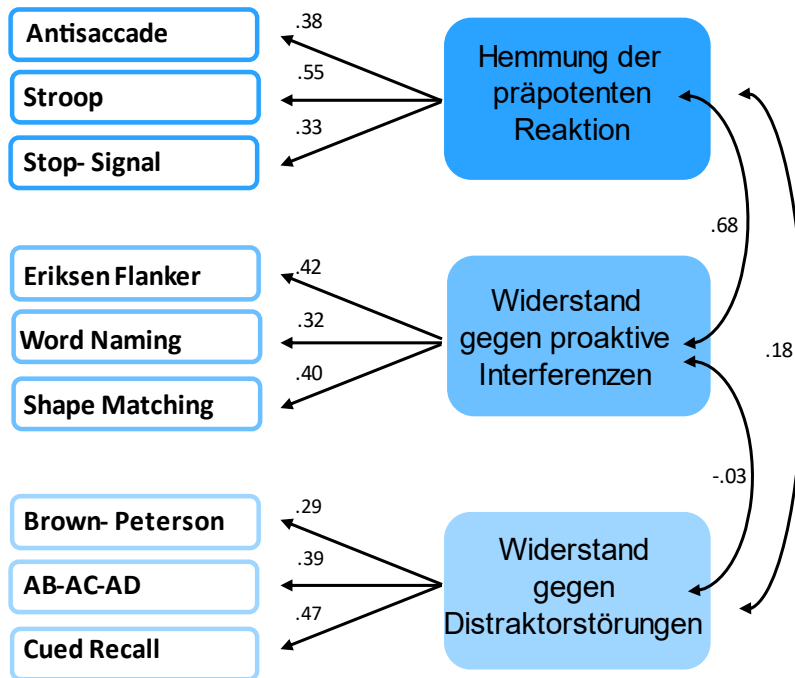
**2. Widerstand gegen Ablenkungsinformationen**

- die Fähigkeit, störenden/ablenkenden Informationen aus der äußeren Umgebung, die für die anstehende Aufgabe irrelevant sind, Widerstand zu leisten oder sie aufzulösen (diese Komponente wird durch den *Flankertest* erfasst).

**3. Widerstand gegen proaktive Interferenz (PI)**

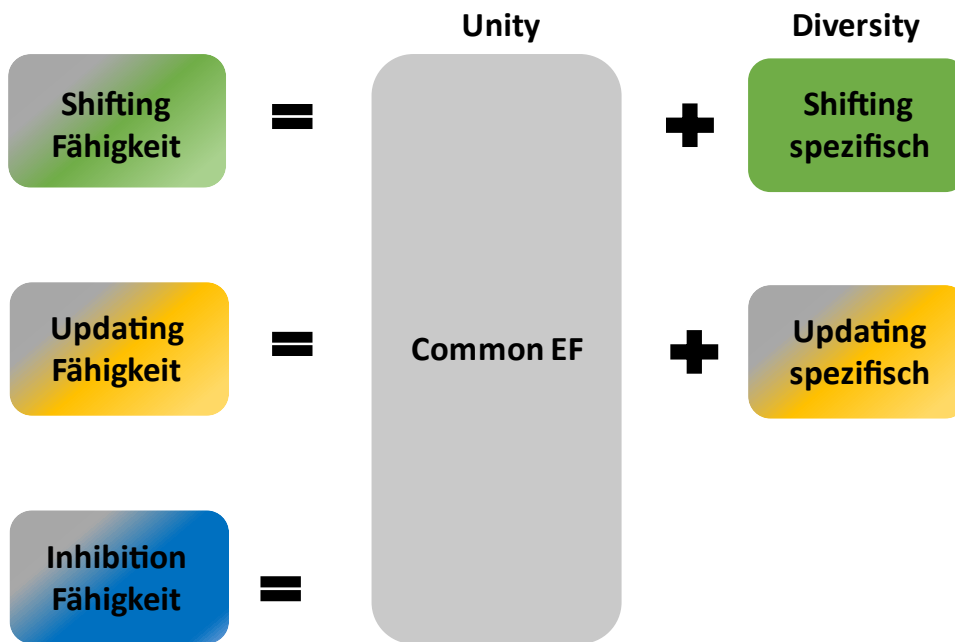
- die Fähigkeit, Gedächtniseinbrüche (memory intrusions) von Informationen zu widerstehen, die zuvor für die Testaufgabe relevant waren, inzwischen aber irrelevant geworden sind.

Die Autoren nutzten dasselbe Verfahren wie Miyake zuvor und konnten auf dem Niveau latenter Variablen zeigen, dass in einer homogen geglaubten EF Subkomponenten nur teilweise in einem guten Maß miteinander korrelierten und lieferten damit weitere Belege für die Theorie der „unity and diversity of EF“ (Abbildung 2).



**Abb. 2:** Drei-Faktorenmodell der Inhibitionsfunktionen mit Korrelationskoeffizienten an den runden Doppelpfeilen; standardisierte Regressionskoeffizienten an gerade Pfeilen (Abbildung adaptiert aus Friedman et al., 2004).

Miyake und Friedman (2012) präsentierten eine aktualisierte Version ihrer Modelle, die sie als „Unity/diversity framework“ bezeichneten (Abbildung 3). In diesem Modell werden die EF Updating, Shifting und Inhibition in Subkomponenten zerlegt, wodurch die zugrundeliegenden kognitiven Prozesse und Beziehungen sauberer abgebildet werden. Die EF können als eine Kombination dieser Komponenten angesehen werden: „CommonEF“ plus „spezifische Anteile von Updating bzw. Shifting“. Der wiederholt gescheiterte Versuch, eine spezifische Inhibitionskomponente zu finden, führte dazu, dass diese vollständig durch die allen EF gemeinen „Common EF“ repräsentiert wird.



**Abb 3:** Modell des „Unity/diversity framework (Abbildung adaptiert aus Miyake und Friedman, 2012).

Der postulierte Mechanismus der Inhibition scheint für EF so grundlegend zu sein, dass er nicht von anderen Komponenten abgegrenzt werden kann. Dadurch eignen sich Tests zur Messung der Inhibition im besonderen Maße, um einen allgemeinen Aspekt der EF zu untersuchen. Für zukünftige Forschungen geben Miyake et al. (2000) die Empfehlung mehrere Messungen der Zielprozesse durchzuführen und sie als kombinierte Composite Scores zu analysieren. Dadurch wird die Aussagekraft der Ergebnisse trotz vorhandener Task-impurity erhöht werden.

Dieser Ansatz wurde in der vorliegenden Doktorarbeit verfolgt. Durch die Messergebnisse der beiden Tests von Stroop und Flanker wurden die EF durch die Inhibitionsfunktion synergistisch gemessen und in einer gemeinschaftlichen Analyse als eigenständige Variable analysiert (näheres siehe Abschnitt 5).

### 3 Der körperliche Einfluss auf die Exekutivfunktionen

Innerhalb der letzten 15 Jahre sind fast 450 Übersichtsartikel auf diesem Gebiet publiziert wurden. 76 dieser Reviews untersuchten den Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und EF innerhalb einer prospektiven randomisierten kontrollierten Studie (Erickson et al., 2019). Trotz dieser beachtlichen Anzahl fällt es weiterhin schwer, eine generelle Aussage zu der Frage des körperlichen Einflusses zu treffen.

Die Wissenschaftler/innen beschäftigte neben der Fragestellung, ob ein körperlicher Einfluss auf die EF besteht, auch, durch welche Art des körperlichen Trainings eine Veränderung hervorgerufen wird. Neben verschiedenen Arten des Lauftrainings, die sich in der Dauer oder durch Formen wie z. B. HIIT oder aerobes Laufen unterscheiden, sind auch ganz andere Trainingsarten wie Krafttraining, Mannschaftssport und Yoga untersucht worden. Dadurch existieren viele nicht direkt miteinander vergleichbare Studien. Diamond und Ling (2016) wollten in einer durchgeführten Metaanalyse erfassten haben, dass bei einem Training ohne eine zerebral aktivierende Komponente, wie z. B. einfaches Laufen, keine oder nur eine geringe Verbesserung der EF entstehen. Hillman et al. (2019) gaben jedoch zu bedenken, dass relevante Studien unberücksichtigt waren und teilweise Ergebnisse nicht korrekt interpretiert wurden. Sie belegten dies durch eine umfangreiche Metaanalyse von Northey et al. (2018), in der erfassten werden konnte, dass jegliche physische Aktivität bei Männern über 50 Jahren eine Verbesserung der erfassten EF erzielte, insbesondere dann, wenn die Trainingszeit zwischen 45 und 60 Minuten lag und mit einer Trainingshäufigkeit von 5 bis 7 mal pro Woche erfolgte.

Die Suchanfrage in der Datenbank Pubmed mittels „physical exercise + executive control + interference“ erbrachte zum Zeitpunkt dieser Dissertation insgesamt 125 Treffer. Die große Mehrheit der Studien untersuchte lediglich akute Effekte einer Sportintervention auf die Exekutivfunktionen. Veröffentlichungen mit dem Schwerpunkt eines langfristigen Effekts gab es nur 20, von denen lediglich 7 Studien ein randomisiertes kontrolliertes Studiendesign nutzten (Tabelle 1). Die Altersstruktur sowie die genutzte Sportintervention der eingeschlossenen Probanden unterschieden sich deutlich zu unserer Studie. Die Erfassung der EF erfolgte in allen Studien entweder durch Flanker- oder Stroop-Tests. Eine Testkombination zur exakteren Erfassung der EF, wie von Miyake et al. (2000) vorgeschlagen, wurde von keiner dieser Studien genutzt.

**Tab. 1:** Studien zu Effekten langfristiger körperlicher Aktivität

Autor, Jahr	Titel	Trainingsform	Dauer	ProbandInnen (m/w)	Parameter	Effekt
Pensel et al., 2018	Executive control processes are associated with individual fitness outcomes following regular exercise training: blood lactate profile curves and neuroimaging findings	Laufband	6 Monate	37/0 Alter: ~: 50	Flanker	Keine sig. Gruppenunterschiede pos. Korrelation zwischen Laktatschwelle und Aktivierung frontaler Gehirnregionen
Wu et al., 2019	Exergaming Improves Executive Functions in Patients With Metabolic Syndrome: Randomized Controlled Trial	Exergaming	3 Monate	N= 22 (keine Verteilung dokumentiert) Alter: 50 - 80	Stroop	Keine sig. Gruppenunterschiede der Reaktionszeit, pos. Signifikante Zunahme der EEG Signale
Coetsee et al., 2017	The effect of three different exercise training modalities on cognitive and physical function in a healthy older population	Stretching/HIIT /Aerobic	4 Monate	21/46 Alter: 55 - 75	Stroop	Keine sig. Gruppenunterschiede
Martinez-Navarro et al., 2021	120 min/week of neuromotor multicomponent training are enough to improve executive function and functional fitness in older women	neuromotor multicomponent training program	30 Wochen	0/56 Alter: 67 - 79	Stroop	Keine sig. Gruppenunterschiede, Tendenz einer Genauigkeitszunahme der Versuchsgruppe
Chuang et al., 2015	A 3-month intervention of Dance Dance Revolution improves interference control in elderly females: a preliminary investigation	Tanzen	3 Monate	0/24 Alter: 65 - 75	Flanker	Sig. Gruppenunterschied, verkürzte Reaktionszeit
Vaughan et al., 2014	The effects of multimodal exercise on cognitive and physical functioning and brain-derived neurotrophic factor in older women: a randomised controlled trial	multimodal exercise program		0/49 Alter: 65 - 75	Stroop	Sig. Gruppenunterschied Reaktionszeit
Tarp et al., 2017	Effectiveness of a School-Based Physical Activity Intervention on Cognitive Performance in Danish Adolescents: LCoMotion—Learning, Cognition and Motion – A Cluster Randomized Controlled Trial	to provide 60 minutes of physical activity during school time daily activities of 5–10 minutes		632 Kinder Alter: 12 - 14	Flanker	sig. Reaktionszeitabnahme der Kontrollgruppe

Der Mangel an vergleichbaren Studien wird durch diese systematische Suche offensichtlich. Deshalb wurde ergänzend eine vertiefende Literaturrecherche im Schneeballprinzip durchgeführt und nach Studien mit größeren Überschneidungen gesucht. Dazu wurden jeweils die Literaturverzeichnisse verwendeter Quellen nach passender Literatur durchsucht. Studien, die in dieser Arbeit als Referenz genutzt wurden, werden in Tab. 6: Studien, die sich mit den Auswirkungen körperlicher Belastung auf Exekutivfunktionen befassendes Anhangs zusammengefasst. Es folgt eine Präsentation jener Studien, bei denen – vergleichbar unserem Ansatz – ein randomisiertes und kontrolliertes Design angewendet wurde, um die langfristigen Effekte körperlicher Leistung auf Exekutivfunktionen zu erfassen. Diese Studien unterscheiden sich durch Trainingsart, Frequenz, Dauer und Probandenkollektiv.

Guadagni et al. (2019) versuchten mit ihrer Studie den Einfluss eines sechsmonatigen Aerobic-Trainings auf die kognitiven Funktionen zu erfassen. Dazu wurden 206 gesunde, wenig aktive Erwachsene mit einem mittleren Alter von 65 Jahren in die Studie aufgenommen. Das Aerobictraining erfolgte dreimal wöchentlich durch geleitete Kurse und ein selbstständig durchgeführtes Training. Die Trainingszeit lag zwischen 20 und 40 Minuten und im Bereich von 30 - 70% der individuellen VO<sub>2</sub>Max. Die kognitiven Funktionen wurden durch einen Stroop-Test erfasst. Innerhalb der Studie wurde keine eigenständige Kontrollgruppe mitgeführt, ferner wurden die Probanden zunächst sechs Monate lang nur beobachtet. Die Daten dieser sechs passiven Monate dienten als Vergleichswerte. Die Ergebnisse zeigten, dass schon durch eine sechsmonatige Intervention im aeroben Trainingsbereich eine Verbesserung der Exekutivfunktionen erzielt werden konnte.

Liu-Ambrose et al. (2010) versuchten, den minimal benötigten Aufwand zu bestimmen, der für eine Verbesserung der kognitiven Leistung notwendig ist. Diese Arbeit unterscheidet sich von der vorherigen dadurch, dass anstelle eines aeroben Trainings ein Krafttraining durchgeführt wurde. Zusätzlich war die Trainingsfrequenz geringer als bei der erstgenannten, wurde dafür jedoch über eine längere Zeit aufrechterhalten. Insgesamt wurden die Probanden über 1 Jahr untersucht. An der Studie nahmen 155 Frauen im Alter zwischen 65 bis 75 Jahren teil. Das Krafttraining erfolgte je nach Gruppe einmal oder zweimal wöchentlich. Es dauerte insgesamt 60 Minuten und wurde stets

durch einen Trainer begleitet. Die Kontrollgruppe erhielt ebenfalls ein geleitetes Training, das aus reinen Stabilisierungsübungen und Stretching bestand. Die exekutiven Funktionen wurden auch hier durch den Stroop-Test gemessen. Die Probanden, die das Krafttraining durchführten, konnten über die Studienzeit ihre Testleistung um 10,6% bis 12,6% verbessern. Die Leistung der Kontrollgruppe sank um 0,5%. Zusätzlich konnte im Gegensatz zur Kontrollgruppe eine Verringerung des Hirnvolumens in den Trainingsgruppen von 0,32% und 0,43% erfasst werden. Das Ergebnis war in zweifacher Weise erstaunlich. Erstens konnte im Gegensatz zu der an älteren Männern durchgeführten sechsmonatigen Studie von Cassilhas et al. (2007) keine Verbesserung der kognitiven Funktionen nach einem halbjährigen Krafttraining festgestellt werden, sondern erst nach 12 Monaten. Dies führten die Autoren unter anderem auf die seltenere Trainingsfrequenz von maximal 2 vs 3 Trainingseinheiten pro Woche zurück. Zweitens wurde eine Abnahme des Hirnvolumens in den Gruppen des Krafttrainings festgestellt. In der Kontrollgruppe gab es keine Veränderung im Gesamthirnvolumen. Dieses Ergebnis überrascht, da der positive Effekt des körperlichen Trainings auf die Exekutivfunktionen unter anderem auch durch Neuroplastizität und die Zunahme von Hirnvolumen vermutet wurde und bereits festgestellt werden konnte, dass eine Abnahme des Hirnvolumens mit einer Funktionseinschränkung einhergeht (Carlson et al., 2008). Bei der Deutung des Befundes, dass trotz eines geringeren Hirnvolumens eine verbesserte Testleistung erzielt werden konnte, waren Liu-Ambrose et al. (2010) sehr vorsichtig und verwiesen auf zwei weitere Arbeiten, in denen eine klinische Verbesserung bei Alzheimerpatienten trotz Reduzierung des Hirnvolumens gezeigt wurde (Fox et al., 2005).

Die dritte Studie wurde von der Autorin Sink et al. (2015) selbst als die bisher größte und längste randomisierte, kontrollierte Studie mit dem Ziel, den Einfluss körperlicher Aktivität auf kognitive Funktionen von Senioren zu erfassen, beschrieben. Dazu wurden insgesamt 1635 Senioren im Alter zwischen 70 und 89 Jahre einbezogen. Im Gegensatz zu den beiden zuvor vorgestellten Studien wurden keine gesunden, sondern Probanden mit dem hohen Risiko einer Mobilitätseinschränkung eingebunden. Das körperliche Training erfolgte durch moderates aerobes Training mittels Walking, Kraft- und Gleichgewichtstraining. Die Probanden erhielten zwei durch Trainer geführte Trainings und sollten zusätzlich noch drei bis vier selbstständige Heimtrainings durchführen. Jede Trainingseinheit enthielt die drei genannten Trainingsformen und dauerte bis zu 50

Minuten. Die Kontrollgruppe wurde durch Informationskurse über eine gesunde Lebensführung betreut. In dieser Studie wurden die Exekutivfunktionen durch einen Composite Score erfasst, der durch die Messwerte des N-Back, Task Switching und des Flanker-Tests errechnet wurde. Es konnten innerhalb des 24-monatigen Zeitraumes keine Veränderungen zwischen den Gruppen festgestellt werden, obwohl die Trainingsgruppe ihre Fitness gering steigern konnte. Insgesamt betrachtet blieben die kognitiven Leistungen über die zwei Jahre stabil. In einer Subanalyse konnte aber festgestellt werden, dass Probanden mit einer zu Beginn schlechten körperlichen Fitness und solche älter als 80 Jahre eine signifikante Verbesserung der EF erzielen konnten. Die Autoren vermuteten, dass die Form des körperlichen Trainings durch die abnehmende Motivation im Verlauf der Studie oder die körperlichen Einschränkungen der Probanden nicht effektiv genug gewesen sein könnte. Ein weiterer Aspekt wäre, dass der Einfluss des körperlichen Trainings mit der Zeit abnähme und deshalb die positiven Effekte kürzerer Studien nach zwei Jahren nicht mehr messbar seien. Darüber hinaus bestünde die Möglichkeit, dass die Kontrollbedingung ebenfalls einen Effekt auf die EF bewirke, und es sein könne, dass Gruppenunterschiede nicht auffallen.

Innerhalb dieser drei Studien zeigt sich deutlich, dass der Effekt der körperlichen Leistung auf die Exekutivfunktionen von mehr als nur der Trainingsart oder der Trainingsdauer abhängen und ein viel subtilerer Einfluss bestehen könnte.

Umso überraschender, dass durch die jahrzehntelange Forschung dem Lebensabschnitt zwischen 18 und 50 Jahren so wenig Beachtung geschenkt wurde und dass trotz Zunahme der Forschungsbemühungen diese wissenschaftliche Lücke in der Erforschung des körperlichen Einflusses auf die Exekutivfunktionen weiterhin besteht.

In einer als „Umbrella-review“ bezeichneten Veröffentlichung von Erickson et al. (2019) ist erstmalig der Versuch unternommen worden, die wissenschaftlichen Erkenntnisse in einer Arbeit zu bündeln und so das gesamte Gebiet aus einer „Vogelperspektive“ überschauen zu können.

- Ihr oberstes Ziel war es herauszufinden, ob körperliche Fitness einen positiven Einfluss auf die Kognition des Menschen hat.

- Zweitens wollten sie wissen, wie stark die Evidenz der Literatur in den verschiedenen Lebensabschnitten ist und ob ein über das ganze Leben bestehender Einfluss existiert.
- Das dritte Ziel war herauszufinden, ob es kognitive Domänen gibt, die besonders stark durch körperliche Fitness beeinflusst werden.
- Die vierte Frage war, ob körperliche Fitness mit einem reduzierten Risiko einer kognitiven Einschränkung verbunden ist.

Population or Measure	Outcome	Grade
Children <6 yr	Insufficient evidence to determine the effects of moderate- to vigorous-intensity PA on cognition	Not assignable
Children 6–13 yr	Both acute and chronic moderate- to vigorous-intensity PA interventions improve brain structure and function, as well as cognition, and academic outcomes	Moderate
Children 14–18 yr	Limited evidence to determine the effects of moderate- to vigorous-intensity PA on cognition	Limited
Young and middle-age adults 18–50 yr	Insufficient evidence to determine the effects of moderate- to vigorous-intensity PA on cognition	Not assignable
Older adults >50 yr	Both acute and long-term moderate- to vigorous-intensity PA interventions improve brain structure and function, as well as cognition	Moderate
Adults with dementia	Evidence suggests that PA may improve cognitive function	Moderate
Risk of dementia and cognitive impairment	Greater amounts of PA reduce the risk for cognitive impairment	Strong
Other clinical disorders (i.e., ADHD, schizophrenia, MS, Parkinson's, stroke)	Evidence that moderate- to vigorous-intensity PA has beneficial effects on cognition in individuals with diseases or disorders that impair cognition	Moderate
Biomarkers of brain health	Moderate- to vigorous-intensity PA positively influences biomarkers, including MRI-based measures of function, brain volume, and white matter	Moderate
Acute bouts	Short, acute bouts of moderate- to vigorous-intensity PA transiently improves cognition during the postrecovery period	Strong
Overall	There is a consistent association between chronic MVPA and improved cognition, including performance on academic achievement tests, neuropsychological tests, and risk of dementia. Effects are demonstrated across a gradient of normal to impaired cognitive health status	Moderate

**Abb. 4:** Stärke der gefundenen Evidenz eines körperlichen Einflusses in verschiedenen Altersstufen und klinischen Populationen (Erickson et al., 2019).

Die Autoren stufen die Evidenz in vier Level ein: (1) not assignable, 2) limited, 3) moderate, 4) strong). Sie fanden generell eine moderate Evidenz dafür, dass körperliche Fitness die Kognition positiv beeinflusst. Der Einfluss wurde als "nur" moderat angegeben, da die vielen unterschiedlichen Studiendesigns, verwendeten Methoden und die uneinheitliche Verteilung der Studien über das Leben einen methodisch sauberen und stärkeren Rückschluss nicht zuließen. Sie hielten die Ergebnisse trotz allem für bemerkenswert konsistent und waren der Meinung, dass es genügend Beweise dafür gäbe, dass körperliche Fitness die kognitive Funktion des Menschen positiv beeinflusst.

Es wird deutlich hervorgehoben, dass wegen der geringen Anzahl an Studien an jungen Erwachsenen eine große Lücke innerhalb der Daten besteht und deshalb für diesen Zeitraum keine Aussage möglich ist. Da jedoch bereits bei Kindern ein Einfluss gefunden werden konnte und dieser auch noch bei älteren Erwachsenen nachweisbar ist, lässt das die Vermutung zu, dass ein positiver Einfluss über das ganze Leben besteht.

Der am häufigsten gefundene Einfluss bezog sich auf die Exekutivfunktionen. Die Autoren geben zu bedenken, dass die Gesamtheit der kognitiven Funktionen nicht einheitlich erfasst worden sind und die Studien insgesamt viel häufiger EF untersuchten als andere kognitive Domänen.

Zur Frage, ob körperliche Aktivität das Risiko einer späteren kognitiven Beeinträchtigung vermindert, ist sich die Literatur einig und findet dafür ausreichend Beweise (Erickson et al., 2019).

#### **4 Zielsetzung:**

Aus der in der Einleitung zitierten Literatur und der in der Tabelle abgebildeten Analyse der publizierten Literatur manifestiert sich eine inhomogene Datenlage, was die Effekte von Sport auf EF angeht. Dies trifft in besonderem Maße für den Altersbereich der jungen und mittelalten Erwachsenen zu, die aus diesem Grunde Gegenstand der eigenen Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation sind

Angesichts der Bedeutung der Exekutivfunktionen für ein erfolgreiches selbstständiges Leben ist die Frage vor allem nach langfristigen Verbesserungen der EF zu kurz gekommen und noch nicht abschließend wissenschaftlich untersucht worden.

Durch diese Dissertation soll ein Beitrag für ein besseres Verständnis des körperlichen Einflusses auf die Exekutivfunktionen in dieser Altersgruppe geleistet werden. Dazu erhielten die Studienteilnehmer ein individualisiertes Lauftraining über einen Zeitraum von sechs Monaten in einem kontrollierten randomisierten Studiendesign. In regelmäßigen Abständen wurden die körperliche Fitness erfasst und im Rahmen einer neuropsychologischen Testbatterie die EF gemeinschaftlich anhand von Composite Scores des Stroop- und Flanker-Tests untersucht. Die Testergebnisse wurden mit denen einer sportlich inaktiven Kontrollgruppe verglichen. Durch Varianzanalysen wurden

direkte Gruppenvergleiche und anhand von gemischten Modellen Korrelationsanalysen berechnet.

Das Ziel dieser Studie war es herauszufinden, ob durch körperliches Training langfristige kognitive Adaptionen im Sinne einer schnelleren bzw. zuverlässigeren Interferenzabwehr induziert, werden können. Fragestellungen zur statistischen Analyse werden im Methodenteil des Kapitels 5.6 aufgeführt.

## 5 Methoden und Experimentaldesign

Der folgende Methodenteil bis einschließlich Unterpunkt 5.6 enthält überwiegend allgemeine Angaben zur Konzeption und zum Aufbau der „RUNSTUD“, welche verschiedene separate und eigenständige Untersuchungen enthält, die auch in separate Publikationen und eigenständige Promotionen eingehen werden. Dieser Teil des Textes (Unterpunkte 5.1 – 5.6) wurde von allen beteiligten Doktoranden der AG Funktionelle Neurobildung (Leitung: Prof. Dr. med. Henning Boecker) gemeinsam erstellt und ist in den entsprechenden Doktorarbeiten identisch, während der in dieser Promotion behandelte spezifische experimentelle Teil der Promotionsarbeit mit dem Titel „Untersuchungen verschiedener Fitnessmaße auf exekutive Kontrollfunktionen im Rahmen einer 6-monatigen Sportintervention“ ausschließlich in dieser Promotionsschrift behandelt wird. Der allgemeine Teil (Unterpunkte 5.1 – 5.6) ist, mit Ausnahme der Angaben zur Gruppengröße in dieser Promotionsarbeit, nicht Gegenstand der Beurteilung dieser Promotionsschrift, da er von mehreren Doktoranden gemeinsam erstellt wurde. Dies erklärt sich dadurch, dass das darin enthaltene Arbeitsprogramm von allen beteiligten Doktoranden/innen in diesem Projekt maßgeblich realisiert und durch die Mitarbeiter der AG Funktionelle Neurobildung kontrolliert und überwacht wurde.

Der allgemeine Teil ist somit als solcher transparent als eine Arbeit mehrerer Beteiligter dargelegt und dementsprechend kein Plagiat. Im Vorfeld wurde diese Form der Darstellung mit dem ehemaligen Vorsitzenden der Promotionskommission der Medizinischen Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Herrn Prof. Pöttsch, abgesprochen.

### 5.1 Probandenrekrutierung

Als ProbandInnen für die Studie wurden sportlich inaktive Männer und Frauen im Alter von 18 bis 35 Jahren gesucht, die neurologisch, psychiatrisch und körperlich gesund waren und keine orthopädischen Kontraindikationen aufwiesen, die eine sportliche Betätigung untersagt hätten. Darüber hinaus durften die ProbandInnen in den vergangenen zwei Jahren keinen regelmäßigen Sport ausgeübt haben.

Nachfolgend findet sich eine Auflistung der angewendeten Ein- und Ausschlusskriterien für die Probandenauswahl:

**Tab. 2:** Übersicht über die Einschlusskriterien dieser Studie

<p>Einschlusskriterien:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● Gesunde Männer und Frauen im Alter von 18 bis 35 Jahren (keine psychiatrischen, neurologischen oder kardiovaskulären Erkrankungen)<ul style="list-style-type: none"><li>● Rechtshändigkeit</li><li>● Sichere Beherrschung der deutschen Sprache</li><li>● Keine Vorgeschichte im Leistungs- oder Profisport</li><li>● Keine regelmäßige sportliche Betätigung in den letzten 2 Jahren</li></ul></li></ul>
---

**Tab. 3:** Übersicht über die Ausschlusskriterien dieser Studie

<p>Ausschlusskriterien</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● Implantate aus Metall</li><li>● Klaustrophobie</li><li>● Nichtentfernbarer Schmuck sowie Tattoos (über 20cm Durchmesser, Gesamtoberfläche oder mehr als 5% der Körperoberfläche sowie im Kopf-, Hals- oder Genitalbereich, inkl. Permanentmakeup)</li><li>● Neurologische oder psychiatrische Erkrankung</li><li>● Akute kardiovaskuläre Beschwerden, Zustand nach Herzinfarkt, bestehende koronare Herzkrankheit, Herzinsuffizienz, Herzfehler, schwere Arrhythmien und Erkrankungen oder Fehlanlagen der Herzklappen</li><li>● Thrombose oder Gerinnungsstörungen</li><li>● Hypertensive Krisen in der Vorgeschichte, unbehandelte Hypertonie mit Werten von <math>\geq 160</math> mmHg systolisch oder <math>\geq 100</math> mmHg diastolisch sowie aktuelle antihypertensive Therapie</li></ul>
--

- Asthma und COPD
- Schlaganfall in der Vorgeschichte
- Häufig wiederkehrender Schwindel
- Diabetes mellitus
- Bekannte orthopädische Erkrankungen, die zu einem Ausschluss der Teilnahme an sportlicher Aktivität führen, wie beispielsweise nicht verheilte Frakturen, Arthritis, Arthrose und andere Gelenkerkrankungen insbesondere der unteren Extremitäten und der Wirbelsäule
- Akute Infektionen oder Entzündungen
- Alkohol- oder Drogenabhängigkeit, Missbrauch psychotroper Substanzen
- Keine Zustimmung zur Mitteilung von Zufallsbefunden im MRT

Alle ProbandInnen wurden eingangs einer gründlichen kardiologischen Untersuchung unterzogen, um die Sporttauglichkeit vor Beginn der Studie festzustellen. Diese beinhaltete eine Elektrokardiographie in Ruhe (Ruhe-EKG) (Schiller AT-110, Schiller, Schweiz; 12 Kanal EKG, Ableitungen nach Einthoven, Goldberger und Wilson), eine Auskultation des Herzens sowie eine kardiale Anamneseerhebung. Bei bestehenden gesundheitlichen Risikofaktoren oder Kontraindikationen für die Magnetresonanztomographie (MRT) wurden die ProbandInnen von der Studie ausgeschlossen.

Insgesamt wurden 59 Personen in die Studie eingeschlossen. Die ProbandInnen wurden in der Reihenfolge des Studieneinschlusses abwechselnd auf zwei Gruppen aufgeteilt. Schied ein/e TeilnehmerIn aus der Studie aus, so wurde der Platz von der nächsten eingeschlossenen ProbandIn aufgefüllt. Das Verhältnis wurde zugunsten der Sportler gewählt, um eventuelle Dropouts durch mangelnde Compliance zu kompensieren. 27 Teilnehmer schieden aus der Studie aufgrund von Interessenverlust oder Mangel an Zeit aus. Ein Teilnehmer wurde aufgrund einer beginnenden Depression während der laufenden Studie ausgeschlossen, ein weiterer trainierte unregelmäßig und musste deshalb ausgeschlossen werden. Ein dritter Proband beendete die Studie nach 4 Monaten und wurde deshalb in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Von dieser Gesamtgruppe der Hauptstudie reduzierte sich die Gruppengröße der vorliegenden Promotionsarbeit somit von 32 auf eine finale Gruppengröße von 29 Personen, davon 14 Männer und 15 Frauen (Alter  $M \pm SD$ :  $24,13 \pm 4,12$  Jahre). Die Kontrollgruppe umfasste 10 ProbandInnen (m: 6; w: 4), die Sportgruppe 19 ProbandInnen (m: 8; w: 11).

Zu Studienbeginn wurde eine Reihe von Fragebögen erhoben, mit dem Ziel, die Teilnehmer näher zu charakterisieren (z.B. Alter, Bildungsstand, etc.). Zusätzlich wurde ein psychologisches Profil der ProbandInnen anhand weiterer Fragebögen erstellt (Mini International Neuropsychiatric Interview (MINI, German Version 5.0) (Lecrubier et al., 1997). Anhand des MINI konnten diverse neuropsychologische Erkrankungen ausgeschlossen werden (Tabelle 4). Weiterhin wurde der State Anxiety Inventory (STAI Trait, (Spielberger, 1983), sowie der Beck Depression Inventory (BDI) (Beck et al., 1961) erhoben. Bei der Erhebung des Beck Depression Inventory wurden zwei Tests zu Beginn der Studie unvollständig ausgefüllt. Diese Tests wurden jedoch im Laufe der Studie wiederholt. Daher war eine Depression bei den ProbandInnen ausgeschlossen. Ebenso wurde ein STAI Trait bei einem Probanden wiederholt, da der erste Bogen nicht vollständig bearbeitet eingereicht wurde.

Keine/r der ProbandInnen wiesen einen auffälligen M.I.N.I. auf. Laut Edinburgh Handedness Inventory (EHI (Oldfield, 1971) waren alle eingeschlossenen ProbandInnen Rechtshänder (mean laterality quotient, Sportler:  $74,48 \pm 16,82$ , Kontrollgruppe:  $79,5 \pm 13,26$ ). Des Weiteren wurde die durchschnittliche verbale Intelligenz mittels Wortschatztest (WST) (Schmidt und Metzler, 1992) ermittelt (Sportler:  $107 \pm 9,64$ , Kontrollgruppe:  $107,3 \pm 8,81$ ).

**Tab. 4:** M.I.N.I.: Screening der zu untersuchenden Krankheiten durch den Mini International Neuropsychiatric Interview (Tuanama-Schuler 2017)

Episode einer Major Depression	aktuell
Dysthymie	aktuell
Suizidalität	aktuell
(Hypo-)Manische Episode	aktuell

Panikstörung	aktuell + Lebenszeit
Agoraphobie	aktuell
Soziale Phobie (soziale Angststörung)	aktuell
Zwangsstörung	aktuell
Posttraumatische Belastungsstörung	aktuell
Alkoholabhängigkeit/Missbrauch	aktuell
Drogenabhängigkeit/Missbrauch	aktuell
Psychotische Störungen	aktuell + Lebenszeit
Anorexia Nervosa	aktuell
Bulimia Nervosa	aktuell
Generalisierte Angststörung	aktuell
Antisoziale Persönlichkeitsstörung	aktuell

Die Studie entsprach den lokalen Richtlinien und erfüllte sämtliche geltenden Regularien der Deklaration von Helsinki. Sie wurde durch die Ethikkommission der Universität Bonn eingehend überprüft (Lfd.Nr.370/15).

## 5.2 Ablauf der Studie

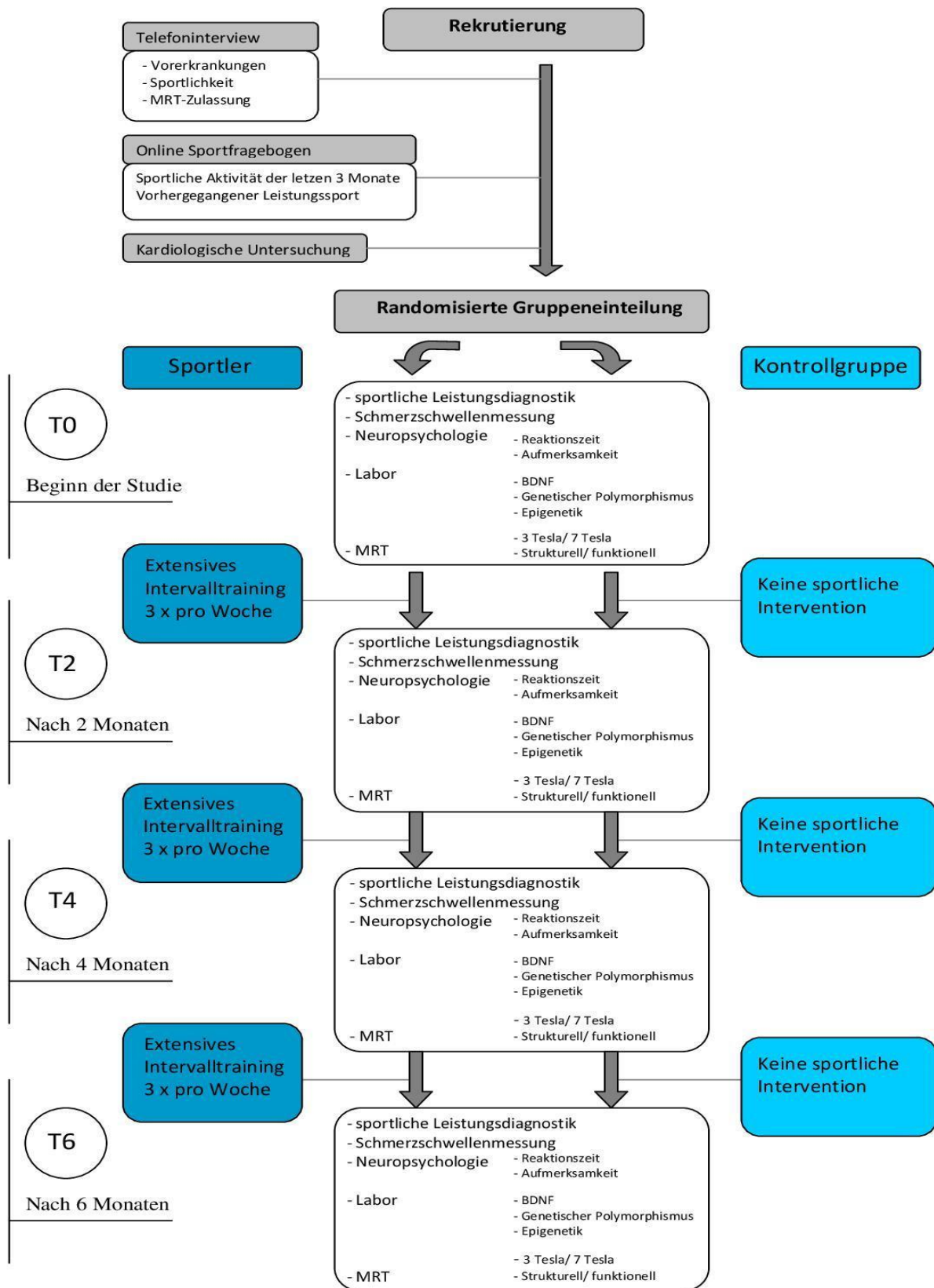
Nach Einschluss in die Studie erhielt jede/r TeilnehmerIn einen Fitnesstracker (A360, Polar, Kempele, Finnland), der im Zeitraum der Studie täglich getragen werden sollte. Insgesamt durchlief jede/r ProbandIn im 2-Monatsintervall diverse Testungen zu den Zeitpunkten Erstuntersuchung (T0), nach zwei Monaten (T2), nach vier Monaten (T4) und nach sechs Monaten (T6) (Abbildung 7)

Folgende Testungen wurden durchgeführt:

- Leistungsdiagnostik inkl. Laktatstufentest und Spiroergometrie
- Neuropsychologische Testungen (Simple Reaction Time, Choice RT, Stroop, Flanker Task, Task Switching, Visual Search, Trail Making Test A & B, Visual Face Association Task, Spatial Objects Memory Maze)

- Blutentnahmen zur Bestimmung des BDNF Polymorphismus sowie wiederholte epigenetische Untersuchungen und Bestimmungen des BDNF Levels in Ruhe
- MRT (3T und 7T) mit diversen funktionellen und strukturellen Sequenzen
- Funktionelles Task-MRT (3T) zur Emotionswahrnehmung
- Schmerzwahrnehmung und –toleranztestung anhand der Bestimmung von Wärme-, Kälte- und Hitzeschwellen und Bestimmung der Schmerztoleranz im Kältebad (sog. „cold pressor task“) jeweils vor und nach einem Training zur Untersuchung des longitudinalen und akuten Effekts der Sportintervention.

Um einen Bezug zwischen den Untersuchungen herstellen zu können, wurden alle Untersuchungen eines Zeitpunktes in einem Zeitfenster von je 2 Wochen durchgeführt.



**Abb. 5:** Schematische Darstellung des Studienablaufs

### 5.3 Leistungsdiagnostik

Um die individuelle Leistungsfähigkeit der ProbandInnen festzustellen, absolvierten diese zu Beginn der Studie sowie zu den Zeitpunkten T2, T4 und T6 eine Leistungsdiagnostik auf dem Laufband (Woodway, Weil am Rhein, Deutschland).

Neben der Aufzeichnung von Gewicht und Größe wurden Ruhepuls und Ruheblutdruck (Riva Rocci) erhoben sowie eine Messung des Hämoglobin-Wertes im Blut (DiaSpect Tm Analyser, EKF Diagnostic GmbH, Barleben, DE) und eine Körperfettbestimmung (Womersley et al., 1976) durchgeführt. Die Messung des Körperfetts mithilfe einer Harpenden Körperfetzange wurde an sieben Körperstellen durchgeführt: Bizeps, Trizeps, infrascapulär, suprailiacal, paraumbilical, Oberschenkelvorderseite und Wade. Hierfür wurde der Mittelwert aus drei Messungen pro Messpunkt berechnet.

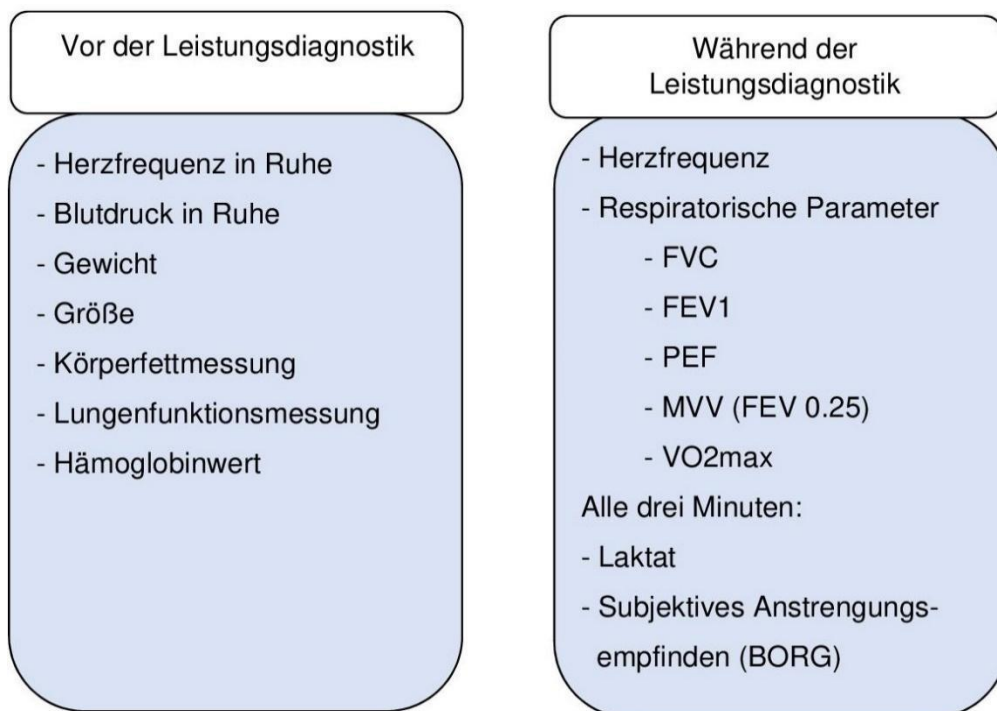
Für die Messung der Herzfrequenz während der Diagnostik wurde ein Brustgurt (Polar, Kempele, Finnland) verwendet. Die Atmung wurde über eine Hans-Rudolph-Gesichtsmaske und eines Spirometers (Cortex, Metalyser 3B, Deutschland) gemessen. Protokolliert wurden die Parameter durch die Software Metastudio (Cortex, Deutschland).

Unmittelbar vor Beginn der Leistungsdiagnostik wurde die Lungenfunktion im Stehen auf dem Laufband durchgeführt.

Bestimmt wurden die funktionelle Vitalkapazität (FVC), das forcierte expiratorische Volumen in einer Sekunde (FEV1), Peak Expiratory Flow Rate (PEF) und die Maximale freiwillige Ventilation (MVV). Innerhalb dieser Studie wurde der Wert für MVV indirekt aus dem ausgeatmeten Volumen innerhalb der ersten 0,25 Sekunden (FEV0.25) berechnet. Die MVV ist in der Regel etwa 25% höher als die bei maximaler Ausübung beobachtete Belüftung (Eston und Reilly, 2003).

Der Laktat-Stufentest begann mit einer kurzen Ruhephase von 2 Minuten. Anschließend wurde die anfängliche Laufgeschwindigkeit von 6 km/h und eine Steigung von 1% eingestellt (Jones und Doust, 1996). Jede Stufe dauerte jeweils drei Minuten. 30 Sekunden vor Beendigung der Stufe wurde die subjektive Beanspruchung mittels BORG-Skala (Borg, 1982) abgefragt. Nach jeder Stufe folgte eine 30-sekündige Pause, in der den ProbandInnen aus einem Finger der rechten Hand 20µl Kapillarblut entnommen wurde, das nach Ende der Intervention sofort auf die Vollblut-Laktat-Konzentration

(Biosen C-Line, EKF Diagnostic GmbH, Barleben, DE) analysiert wurde (EKF Diagnostic GmbH, Barleben, Deutschland). Zum Start der nächsten Stufe wurde die Geschwindigkeit um 1 km/h erhöht. Dieses Schema wurde bis zum Erreichen der völligen Erschöpfung der ProbandInnen wiederholt. Die völlige Erschöpfung wurde angenommen, wenn der/die ProbandIn entweder während einer Stufe den Test abbrach oder am Ende einer Stufe auf der BORG-Skala mit dem Wert 20 die maximale Erschöpfung angab.



**Abb. 6:** Werteerhebung Leistungsdiagnostik

Durch eine Qualitätskontrolle wurde überprüft, ob bei allen ProbandInnen eine Ausbelastung erreicht wurde. Die Kriterien stammen aus "Methods for Measurement of Physical Fitness and Training Recommendations in Studies on Humans" (Hollmann et al., 2012). Innerhalb dieser Arbeit wurde der alleinigen Betrachtung des VO2max-Wertes eine nur eingeschränkte Aussagekraft über die Ausbelastung nachgewiesen. Deshalb wurden erweiterte Bedingungen ergänzt, um eine einheitliche Ausbelastung definieren zu können. Dazu zählen:

- Erreichen einer Herzfrequenz von 190 Schlägen pro Minute bzw. 220 Schläge pro Minute minus das Lebensalter der ProbandInnen
- Erreichen eines Respiratorischen Quotienten von ungefähr 30 - 35
- Abbruch des Anstiegs des Sauerstoffpulses durch ein abruptes Abflachen bei einer konstanten Leistung
- Laktat-Konzentration im arteriellen Blut von 8 - 10 mmol

Die Laktat- und die anaerobe Schwelle der ProbandInnen wurden durch den "first rise" festgelegt. Dabei entsprach die anaerobe Schwelle der Laktatkonzentration, bei der es zu einem sprunghaften Anstieg von 1 mmol gekommen ist.

In Verbindung mit der interpolierten Geschwindigkeit bzw. Herzfrequenz ließen sich genauere Veränderungen ermitteln, jenseits der rein subjektiven Verbesserung durch z.B. eine höhere Endgeschwindigkeit oder eine spätere Abbruchstufe in der Leistungsdiagnostik.

Als respiratorischer Parameter wurde der  $VO_{2max}$  ( $VO_{2peak}$ ) ermittelt.  $VO_{2max}$  ist definiert als die höchst mögliche Sauerstoffmenge, welche unter maximaler körperlicher Belastung aufgenommen werden kann (Maier et al., 2016; Meyer und Kermann, 1999). Diesem Wert wird in der Sportphysiologie ein hoher Stellenwert zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit im Ausdauersport beigemessen, weswegen er auch in dieser Arbeit zur Messung des sportlichen Profits herangezogen wurde. Da jedoch vermutet wird, dass der  $VO_{2max}$ -Wert durch genetische Faktoren beeinflusst wird, welche sich weniger ausgeprägt durch sportliche Betätigung modifizieren lassen, wurde eine weitere Kenngröße ergänzend herangezogen (Maier et al., 2016). Die im Rahmen des Laktatstufentests gemessene anaerobe Schwelle beschreibt den Moment der maximalen Auslastung des Körpers, in welchem sich die Produktion und Elimination von Laktat noch die Waage halten. In diesem Zusammenhang wird auch vom Laktat-Steady-State gesprochen, bevor es zu einem sprunghaften Anstieg kommt. Die anaerobe Schwelle entspricht somit der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der maximalen Belastung [km/h] und wird in dieser Arbeit als  $d_{max\_v}$  [km/h] bezeichnet. Sie ermöglicht eine Messung der maximal möglichen Leistung speziell auch unter dem Einfluss regelmäßiger sportlicher

Intervention (Cléinin, 2019). Im Rahmen dieser Arbeit wurden VO<sub>2</sub>max und dmax\_v als Bezugsgröße zur Analyse der Neuropsychologischen Testergebnisse genutzt.

#### 5.4 Intervention

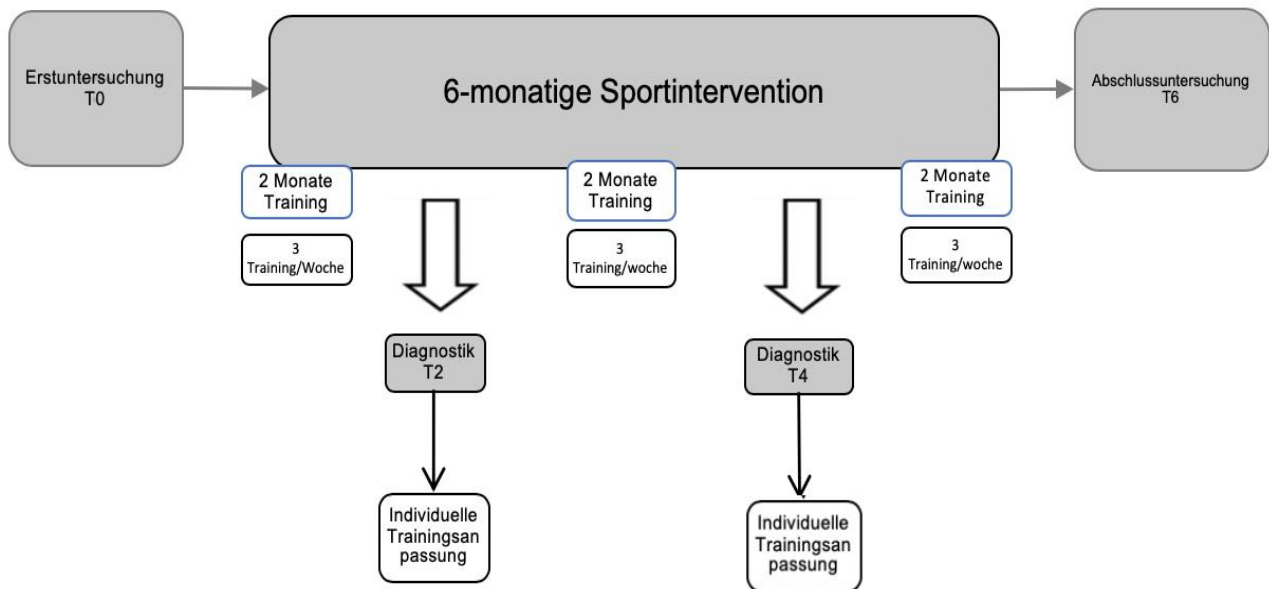
Die sechsmonatige Sportintervention umfasste 3 individualisierte Trainingseinheiten pro Woche. Im ersten Monat der Studie wurden alle Trainings auf einem Laufband unter Aufsicht durchgeführt.

Ab dem zweiten Monat stand es den ProbandInnen frei, ein Training pro Woche in eigener Verantwortung zu absolvieren, aber weiterhin nach Studienprotokoll auch außerhalb des Labors („Hometraining“). Das Training mit einer Dauer von 25 bis 45 Minuten wurde in einem flachen Gelände durchgeführt.

Insgesamt absolvierten die ProbandInnen ca.  $64 \pm 9,23$  Trainingseinheiten.

Ab dem dritten Monat durften insgesamt zwei Trainings pro Woche als „Hometraining“ durchgeführt werden.

ProbandInnen, die der Kontrollgruppe zugeteilt wurden, wurden dazu angehalten, ihr alltägliches Verhalten nicht zu verändern. Alltagsaktivitäten, die schon vor der Studie betrieben wurden, z. B. Arbeitsweg mit dem Fahrrad, Spaziergänge etc., durften weiterhin wahrgenommen werden.



**Abb. 7:** Trainingsablauf der Studie

Das Ausdauertraining der Interventionsgruppe war als umfangreiches Intervalltraining mit drei- bis fünfminütigen Intervallen bei 75-80% der maximalen Herzfrequenz (HFmax) und drei- bis fünfminütiger aktiver Erholung mit sechs bis acht Wiederholungen konzipiert. Um ein gleichmäßiges Fortschreiten der körperlichen Anpassungen zu gewährleisten, wurde die Trainingsintensität gemäß den Ergebnissen der einzelnen Leistungstests (2 und 4 Monate nach Behandlungsbeginn) individuell angepasst.

Die ProbandInnen der Kontrollgruppe wurden angewiesen, ihren gewohnten Lebensstil beizubehalten, jede Art von Sport zu unterlassen und ihre normalen Ernährungs- und Bewegungspraktiken während der gesamten Studie fortzusetzen.

## 5.5 Neuropsychologie

Diese Arbeit befasst sich schwerpunktmäßig mit dem Flanker und Stroop Task. Dieser wurde ebenfalls zu den Zeitpunkten T0, T2, T4 und T6 erhoben und war eingebettet in eine Batterie von neuropsychologischen Tests. Die Reihenfolge der Tests war zu allen Zeitpunkten gleich und wie folgt:

**Tab 5:** Aufzählung neuropsychologische Testbatterie

<b>Name des Tests</b>	<b>Datenerhebung</b>
Simple Reaction Time	Aufmerksamkeit
Choice Reaction Time	Aufmerksamkeit
Stroop	Exekutivfunktion
Flanker Task	Verarbeitungs-, Aufmerksamkeits- & Kontrollprozesse
10 min Pause	
Task Switching	Exekutivfunktion
Visual Search	Visuelle Aufmerksamkeit
Trail Making Test A & B	Exekutivfunktion
10 min Pause	
Visual Face Association Task	Assoziatives Gedächtnis

Vorgabe war, dass alle ProbandInnen ausgeruht zur Testung erscheinen und 24h vorher keinen Alkohol oder Schmerzmittel einnahmen bzw. 72h vorher keine psychotropen Substanzen (z.B. Cannabis) konsumieren durften. Außerdem wurden die ProbandInnen instruiert, dass keine physisch oder psychisch anstrengenden Aktivitäten unmittelbar vor der Testung erfolgen durften. Dieses wurde mithilfe eines angefertigten Vorabfragebogens überprüft (Abbildung 8).

Alle neuropsychologischen Testungen fanden in einem ruhigen, gut beleuchteten Raum am Computer statt, wobei ständig ein Betreuer anwesend war.

Darüber hinaus wurde auf die richtige Positionierung der ProbandInnen geachtet, d. h. auf eine aufrechte Körperhaltung und einen Abstand von 40 cm zum Bildschirm (Abbildung 9).

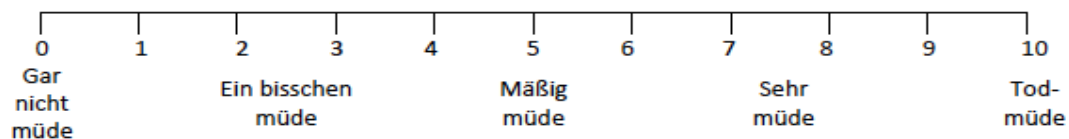
Studie: \_\_\_\_\_ Probanden-ID: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_

### Vorabfragen MRT/Neuropsychologie/Pain-Untersuchung

Bitte nehmen Sie sich vor der Untersuchung einen Moment Zeit, folgende Fragen zu beantworten:

Aktuelle Uhrzeit bei Ausfüllen des Bogens: \_\_\_\_ : \_\_\_\_ Uhr

- Haben Sie in den letzten 24 h Kaffee/Schwarztee getrunken?  ja  nein  
*Falls Ja:* Wie lange ist das letzte Mal her? \_\_\_\_\_ Stunden
- Leiden Sie aktuell unter Schmerzen (z.B. Kopfschmerzen)?  ja  nein  
*Falls Ja:* Wie stark?  leicht  mäßig  stark
- Haben Sie in den letzten 24 h schmerzstillende Medikamente eingenommen?  ja  nein  
*Falls Ja:* Wie lange ist die letzte Einnahme her? \_\_\_\_\_ Stunden  
*Falls Ja:* Was haben Sie eingenommen? Welche Dosis? \_\_\_\_\_
- Haben Sie aktuell Fieber?  ja  nein
- Rauchen Sie aktuell?  ja  nein  
*Falls Ja:* Wie viele Zigaretten pro Tag? \_\_\_\_\_ Zigaretten  
*Falls Ja:* Wie lange ist die letzte Zigarette her? \_\_\_\_\_ Stunden
- Haben Sie in den vergangenen 24h Alkohol konsumiert?  ja  nein  
*Falls Ja:* Wie lange ist das her? \_\_\_\_\_ Stunden  
*Falls Ja:* Welche Menge? \_\_\_\_\_
- Haben Sie in den vergangenen 72 h andere Rauschmittel konsumiert?  ja  nein  
*Falls ja:* Was? \_\_\_\_\_  
*Falls ja:* Wie lange ist der letzte Konsum her? \_\_\_\_\_ Stunden
- Wie viele Stunden haben Sie letzte Nacht geschlafen? \_\_\_\_\_ Stunden
- Wie gut haben Sie geschlafen?  Gut  Mäßig  schlecht
- Von 0-10: Wie müde fühlen Sie sich jetzt gerade?



Vielen Dank!

**Abb. 8:** Vorabfragebogen zur Überprüfung der ProbandInnen vor den neuropsychologischen Testungen.



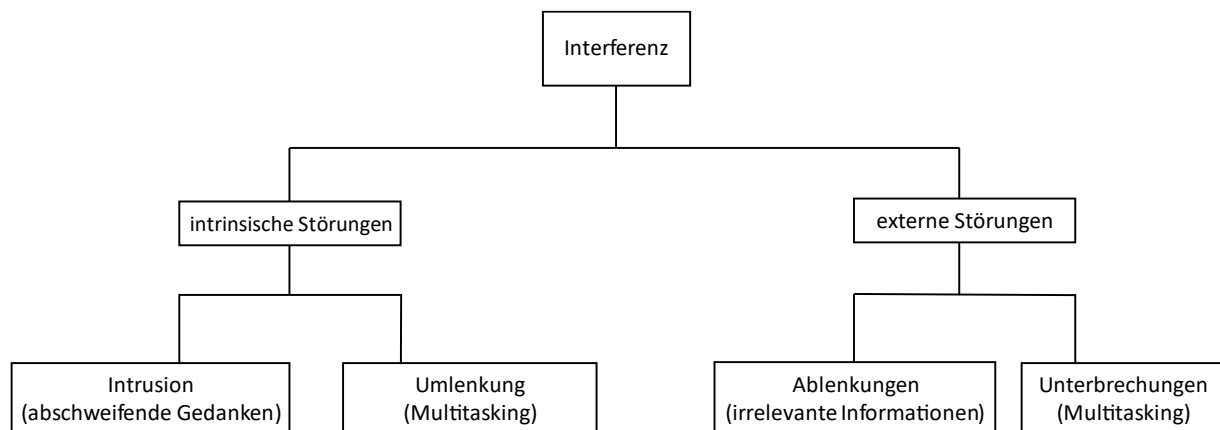
**Abb. 9:** Beispielhafte Darstellung eines Probanden bei der Testung

## 5.6 Test der Exekutivfunktion

In dieser Studie wurden repräsentativ zwei Tests verwendet, die häufig zur Messung der EF genutzt werden. Die Bearbeitung des Flanker- und des Stroop-Experiments erlaubt die Messung der Störreizunterdrückung sowie die Fähigkeit, unwichtige von wichtigen Informationen zu unterscheiden, kurz Interferenz.

Es gibt bisher keine allgemeingültige Definition des Interferenzeffektes (Cohen et al., 1990; MacLeod, 1991). Er wird aber meist als Teilaspekt der EF Inhibition verstanden, obgleich dieser über die Inhibition hinaus auch auf weitere EF wirkt (Donnelly et al., 2016). Die Interferenz kann nur durch die Beeinflussung anderer kognitiver Funktionen erfasst werden und bestimmt z. B. wie schnell und wie genau Aufgaben bearbeitet werden können.

Clapp und Gazzaley (2012) unterteilten die Interferenz zwischen Ablenkungen aus externen oder aus internen Informationsquellen. Zusätzlich erfolgt eine Unterscheidung durch die Bewertung der Ablenkung und der Entscheidung, ob diese ignoriert werden kann oder ob ihr weitere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. So unterschieden sie z. B. zwischen dem Ausblenden von störenden Hintergrundgeräuschen bei der Arbeit in einem Café und einem bewusst geführten Gespräch mit dem Beifahrer während des Autofahrens (Abbildung 10).



**Abb. 10:** Konzeptionelles Interferenz-Modell (Abbildung adaptiert aus Clapp und Gazzaley, 2012).

### Flanker-Aufgabe

Die Eriksen-Flanker-Aufgabe wird vielfach in der Wissenschaft eingesetzt, um die individuelle Fähigkeit zu bestimmen, mit Interferenzen umzugehen, die durch nicht aufgabenrelevante externe Informationen entstehen. Die Aufgabe verlangt von den ProbandInnen, auf einen immer an derselben Position angebotenen Reiz eine Auswahl zu treffen. In der von uns genutzten Version der Flanker-Aufgabe bestand dieser Reiz aus einem nach links (<) oder rechts (>) gerichteten Pfeil. Die geforderte Aufgabe war, die Pfeilrichtung durch einen Tastendruck auf einer Computertastatur anzugeben. Die ProbandInnen sollten so schnell und so genau wie möglich reagieren. Außer diesem zentralen Zielreiz (target) wurden in einigen Durchgängen zusätzliche Reize (flanker) horizontal auf beiden Seiten des Zielreizes angezeigt. Entweder zeigten sie in dieselbe Richtung wie der Zielreiz (kongruente Bedingung >> > >>) oder in die entgegengesetzte Richtung (inkongruente Bedingung << > <<).

Eriksen und Eriksen (1974) fanden heraus, dass die Reaktionszeit der ProbandInnen durch die Flanker beeinflusst wurden. Am schnellsten erfolgte die Antwort in der kongruenten Testbedingung und am langsamsten in der inkongruenten Testbedingung. (kongruent>neutral>inkongruent).

Sie schlussfolgerten, dass die Flanker die Reaktion auf das Target störten, weil sie unbewusst verarbeitet wurden. Sie vermuteten eine in gewissem Maße stattfindende Unterdrückung der impulsiven Antwort für eine mögliche Überprüfung und Korrektur. Für diesen Effekt hat sich der Terminus Flanker-Interferenz etabliert, wie erstmals von Eriksen und Eriksen vorgeschlagen.

## Stroop-Aufgabe

Stroop's Experiment geht auf die Beobachtung Cattell's zurück, dass ProbandInnen zur Benennung von Farben mehr Zeit benötigen als für das Vorlesen von Farbwörtern (Cattell, 1886). Innerhalb der Stroop-Aufgabe bestanden drei unterschiedliche Testbedingungen. Die erste neutrale Bedingung bestand darin, dass die Worte „rot“, „blau“, „grün“, „gelb“, „orange“ und „lila“ in schwarzen Buchstaben angezeigt wurden. Die ProbandInnen mussten den Inhalt des Wortes auf farblich markierten Tasten einer Computertastatur angeben. In der zweiten und dritten Bedingung waren die Wörter farblich geschrieben. Ziel war es, die verwendete Schriftfarbe anzugeben. Während der kongruenten Bedingung entsprach die Schriftfarbe der Bedeutung des geschriebenen Wortes (z. B. **ROT**). In der inkongruenten Bedingung stimmte die Schriftfarbe nicht mit der Wortbedeutung überein (z. B. **GRÜN**).

Stroop erkannte in seinem Experiment, dass alle ProbandInnen signifikant mehr Zeit bei der inkongruenten Bedingung benötigten. Er vermutete eine Interferenz, die dadurch auftritt, dass die Bearbeitung eines Reizmerkmals die Verarbeitung eines anderen Merkmales des gleichen Reizes beeinflusst (Stroop, 1935). „Die Stroop-Interferenz wird als eine Verarbeitungspanne postuliert, die auftritt, wenn das Gehirn versucht, zwei parallele Vorgänge gleichzeitig zu verarbeiten, und nicht entscheiden kann, welche wichtig ist“ (Hintzman et al., 1972).

Beide Tests wurden im Rahmen der neuropsychologischen Testbatterie durch die ProbandInnen nacheinander bearbeitet (Tabelle 5). Jedem Test war eine Erklärung mit 24 Probedurchläufen vorgeschaltet. Während der Flanker-Aufgabe wurden insgesamt 240 Trials bearbeitet. Die unterschiedlichen Bedingungen waren randomisiert angeordnet. In der Stroop-Aufgabe wurden je Bedingung auch 240 Trails bearbeitet, aber hierbei nacheinander. Lediglich in der dritten inkongruenten Bedingung waren unter den 240 Trails ungefähr 10% kongruente Trials.

Eine Matlab Routine unterschied bei Eingabe der ProbandInnen zwischen „gültigen“ und „ungültigen“ Trials. Als „ungültig“ wurden jene Durchläufe gewertet, bei denen eine nicht korrekte Entscheidung getroffen wurde, z. B. falsche Pfeilrichtung in der Flanker-Aufgabe

oder eine nicht korrekte Farbauswahl in der Stroop-Aufgabe, sowie bei Unterschreitung einer Reaktionszeit von 100 ms oder Überschreitung der Bearbeitungsdauer von  $2,35+SD$  des Medians (Pflueger und Gschwandtner, 2003). Als „gültig“ zählten nur Durchläufe, bei denen die Auswahl korrekt getroffen wurde und die Bearbeitungsdauer innerhalb des Zeitfensters lag. Als „falsch“ wurden Trials bewertet, wenn innerhalb des Zeitfensters eine nicht korrekte Entscheidung getroffen wurde.

Der statistischen Analyse liegt eine Composite Score Bildung zugrunde.

Ein Composite Score ist eine Summe aus zwei oder mehr Variablen, die konzeptionell oder statistisch eng miteinander verbunden sind (Ley, 1972). Sie bieten vor allem Vorteile durch eine bessere Reliabilität, weniger benötigten statistischen Vergleichen (bsp. geringeres falsch positives Risiko) (Brooks et al., 2011; Iverson und Brooks, 2011) und einer besseren Aussagekraft bei kleiner Probandenanzahl (Crane et al., 2012; Staffaroni et al., 2020). Composite Scores können in der Erkennung von Veränderungen aussagekräftiger sein als ihre einzelnen Bestandteile (Crane et al., 2008; Gibbons et al., 2012) und haben sich vor allem in Studien über die kognitive Alterung als nützlich erwiesen, um Veränderungen im Laufe der Zeit zu untersuchen (Mungas et al., 2010). Sie zeigten sich als sensible Indikatoren einer frühen kognitiven Veränderungen von an Alzheimer erkrankten Probanden (Mortamais et al., 2017). Darüber hinaus wurden Composite Scores auch in klinischen Studien für Menschen mit ADHS (Biederman et al., 2006), mit psychiatrischen (McIntyre et al., 2014) und mit medizinischen Problemen verwendet (Rostamian et al., 2015).

Die Berechnung des Composite Scores wurde anhand der Mittelwerte aller gültigen Antworten der beiden Tests von Flanker und Stroop durchgeführt und jeweils ein gemeinsamer Mittelwert aus der Reaktionszeit und der Antwortgenauigkeit gebildet. Um die individuellen Veränderungen innerhalb der Studie zu berücksichtigen, wurden die Unterschiede auf den Studienbeginn bezogen und als Delta berechnet ( $f(x) = \text{Composite Score Messpunkt} - \text{Composite Score Studienbeginn}$ ). Für eine genauere Erfassung des Interferenzeffektes, der sich durch verlängerte Reaktionszeiten und häufigere Fehler darstellt, erfolgte die Berechnung der Differenz zwischen der inkongruenten und der kongruenten Testbedingung. Die Stärke des Interferenzeffektes wird durch erhöhte Werte widerspiegelt. Nachfolgend wird diese Testbedingung „Interferenz“ genannt. Insgesamt

wurden deshalb neben neutral, kongruent und inkongruent insgesamt vier Testbedingungen überprüft.

Die Auswertung wurde in enger Kooperation mit dem Institut für Medizinische Biometrie, Informatik und Epidemiologie der Universität Bonn durchgeführt.

Die erhobenen Daten wurden auf folgende Hypothesen überprüft.

- Es existiert ein Unterschied in den Ergebnissen von Reaktionszeit und Antwortgenauigkeit über die vier Messzeitpunkte hinweg.
- Eine sechsmonatige Trainingsintervention beeinflusst Exekutivfunktionen positiv durch verbesserte Reaktionszeiten und Antwortgenauigkeit.
- Es besteht eine Korrelation zwischen den Fitnessparametern wie  $\text{relVO}_2\text{max}$  und  $\text{dmax}_v$  und den Ergebnissen von Reaktionszeit, Antwortgenauigkeit und des Interferenzeffektes.
- Es besteht eine Korrelation zwischen den Fitnessparametern und den individuellen Veränderungen der Reaktionszeit und Antwortgenauigkeit.

## 6 Datenanalyse

Die erste Verarbeitung der Daten erfolgte mittels Matlab (Version 2018 1.2; The MathWorks Inc.; Natick, Massachusetts, USA). Die Analyse aller Daten wurde mittels SPSS Statistics (Version 26; IBM; Armonk, New York, USA) durchgeführt. Für sämtliche Tests wurde ein Signifikanzniveau von  $p = 0,05$  zugrunde gelegt. Da es sich bei der übergeordneten RUNSTUD-Studie um eine Bildgebungsstudie handelt, erfolgte a priori keine Poweranalyse (Friston et al., 1999).

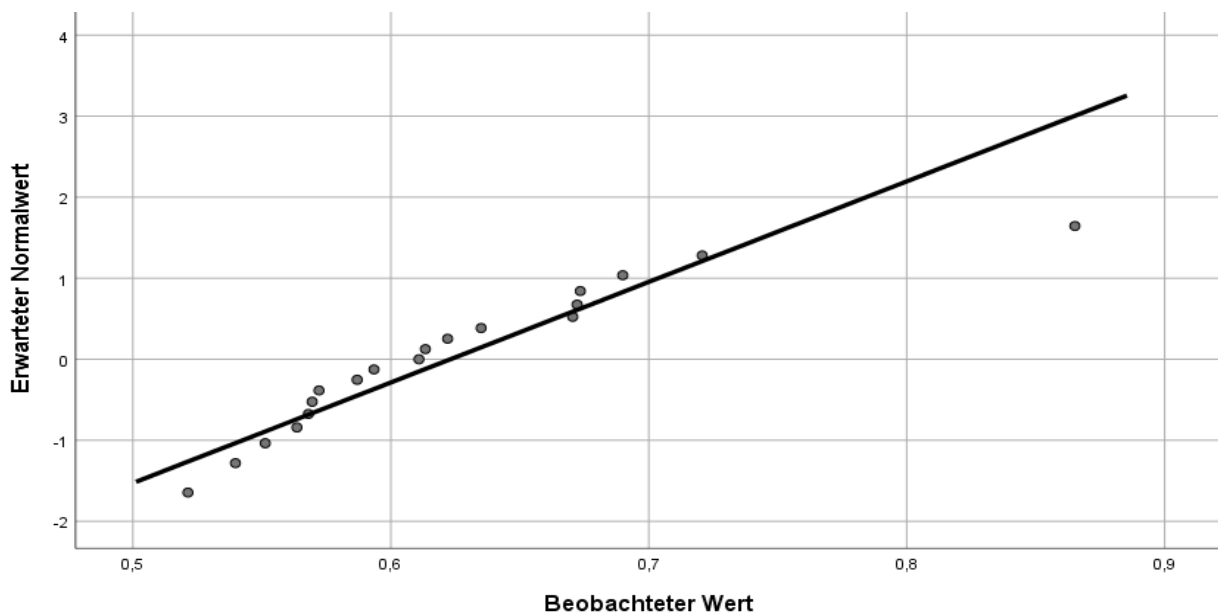
Sämtliche Daten wurden auf Vollständigkeit überprüft. Insgesamt mussten fünf Datensätze aufgrund eines technischen Defektes des Laufbands von der weiteren Analyse der Fitnessparameter teilweise ausgeschlossen werden. Durch die fehlenden Fitnessstests reduzierte sich die Probandenanzahl zu den betroffenen Zeitpunkten auf 17 in der Interventionsgruppe sowie 7 ProbandInnen in der Kontrollgruppe.

Die Daten der neuropsychologischen Testungen waren nicht betroffen, so dass ein Datensatz mit 19 ProbandInnen der Interventionsgruppe und 10 ProbandInnen der Kontrollgruppe genutzt werden konnte.

Im Rahmen der deskriptiven Analyse wurden die Daten mittels Boxplot und studentischer Residuen auf Ausreißer untersucht. Auffällig waren zwei Datenpunkte des Stroop-Tests. Zwei verschiedene Probanden zeigten zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten in der inkongruenten Testbedingung eine deutlich erhöhte Fehlerhäufigkeit. Die Ursache konnte im Nachgang nicht geklärt werden, beruhte aber am ehesten auf einem systematischen Fehler, z. B. durch einen fehlplatzierten Finger auf dem Eingabegerät. Die weiteren Daten der ProbandInnen waren nicht betroffen und konnten in der Analyse berücksichtigt werden. Der dadurch gebildete Mittelwert erfolgte in diesen Fällen zu 100% aus den Messergebnissen des Flanker-Tests, wodurch eine Gewichtung zugunsten des Flanker-Tests entstehen könnte. Deshalb erfolgte zur Kontrolle der Gruppenvergleich sowohl unter Ausschluss als unter Berücksichtigung dieser „gewichteten Daten“. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch die Composite Score Bildung die fehlenden Werte des Stroop-Test kompensiert wurden, sodass die Probandenanzahl nicht weiter reduziert werden musste.

Die Überprüfung der Composite Scores auf Normalverteilung durch den Shapiro-Wilk-Normalitätstest ( $p > 0,05$ ) zeigte, dass die Daten sowohl normal- als auch nicht normalverteilt waren. Die ANOVA zeigt sich gegenüber einer Verletzung der Normalverteilung robust (Blanca et al., 2017; Glass et al., 1972; Harwell et al., 1992; Lix et al., 1996). Unter Berücksichtigung der kleinen ProbandInnenanzahl wurde eine ergänzende Analyse mittels QQ-Diagrammen durchgeführt und anschließend die Voraussetzung der Normalverteilung angenommen (Abbildung 11). Eine Überprüfung der Daten auf Sphärizität erfolgte mittels Mauchly-Test, die Varianzgleichheit wurde durch den Levene-Test untersucht. Falls erforderlich wurden die Daten nach der Methode von Huynh-Feldt korrigiert.

Die Berechnung der Neuropsychologischen Testergebnisse konnte dadurch zu Gunsten einer einheitlichen Systematik durch dasselbe Verfahren erfolgen. Innerhalb der 2-Way Mixed ANOVA wurde die ProbandInnengruppe (SG, KG) als Zwischensubjektfaktor und die Messpunkte (T0, T2, T4, T6) als Innersubjektfaktor geführt.



**Abb. 11:** QQ-Plot zur Reaktionszeit in der neutralen Testbedingung der Sportgruppe zu T0 zum Test auf Normalverteilung.  $N=19$ ,  $p = 0,051$ , Signifikanz des Shapiro-Wilk-Test  $p > 0,05$ .

Die Analyse der Fitnessparameter (maximale Sauerstoffaufnahme  $relVO_{2max}$  [ml/min/kg] & Laufgeschwindigkeit an der Laktatschwelle  $dmax_v$  [km/h]) zeigte im

Shapiro-Wilk-Normalitätstest keine Normalverteilung. Deshalb wurde für diese Analyse eine nicht-parametrische Berechnung genutzt. Der Gruppenvergleich erfolgte mittels Mann-Whitney-U-Test (Mann und Whitney, 1947). Die Untersuchung auf signifikante Veränderungen innerhalb der Gruppe über die Zeit wurde mittels Friedman-Test durchgeführt. Bei signifikanten Veränderungen erfolgte zusätzlich eine Post-hoc-Analyse mittels Dunn-Bonferroni-Test und eine Berechnung der Effektstärke mit Cohen´s  $r = | Z / \sqrt{n} |$  (Cohen, 1992).

Die Korrelationsanalyse der Fitnessparameter  $relVO_2max$  und  $dmax_v$  erfolgte zunächst separat durch lineare Regressionen. Abschließend wurden die Fitnessparameter sowie die Messzeitpunkte gleichzeitig in einem gemischten Modell als unabhängige Variable berücksichtigt und zur Berechnung der abhängigen Variablen, den Composite Scores der jeweiligen Testbedingung, genutzt. Bei signifikanten Ergebnissen der Korrelations-Analyse wurde jeweils die Effektstärke nach Cohen berechnet.

## 7 Ergebnisse:

### 7.1 Körperliche Leistungsdiagnostik

Die zugrundeliegenden Grunddaten zu Herzfrequenz, relVO<sub>2</sub>max, dmax\_v sind für alle Dissertationen, die Teil der RUNSTUD Studie sind, identisch. Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt in zwei Abschnitten.

Zunächst erfolgt die Vorstellung der physiologischen Daten und der Nachweis einer erfolgreichen Sportintervention. Der zweite Abschnitt befasst sich mit der Auswertung der Composite Scores und der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen körperlicher Fitness und den Exekutivfunktionen.

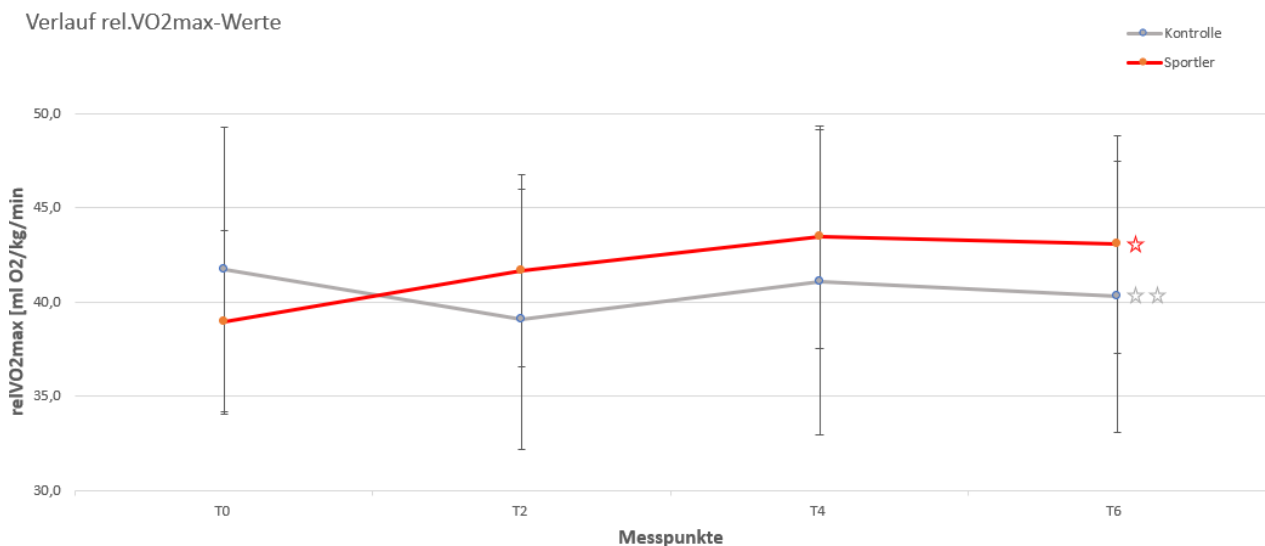
#### 7.1.1 Ruheherzfrequenz

Zu Studienbeginn unterschieden sich die Ruheherzfrequenzen der Kontrollgruppe mit 75,60 (SD 10,19) min<sup>-1</sup> und der Sportgruppe mit 79,95 (SD 13,84) min<sup>-1</sup> nicht signifikant voneinander (Mann-Whitney-U-Test:  $U = 110,000$ ;  $p = 0,512$ ). Nach 4-monatiger Studiendauer zeigte sich ein signifikanter Gruppenunterschied durch eine Reduktion der Ruheherzfrequenz innerhalb der Sportgruppe auf 70,7/min (SD 10,3) und einen geringen Anstieg in der Kontrollgruppe auf 80,8/min (SD 9,2) (Mann-Whitney-U-Test:  $U = 43,000$ ;  $p = 0,037$ ;  $r = 0,397$ ). Zu allen 4 Messpunkten im Verlauf der Studie zeigte sich weder innerhalb der Kontrollgruppe (Friedman Test:  $\chi^2(3) = 2,136$ ;  $p = 0,545$ ;  $n = 7$ ) noch innerhalb der Sportgruppe (Friedman Test:  $\chi^2(3) = 5,565$ ;  $p = 0,135$ ;  $n = 19$ ) eine signifikante Veränderung.

### 7.1.2 Auswertung der Parameter rel.VO<sub>2</sub>max und dmax\_v [km/h]

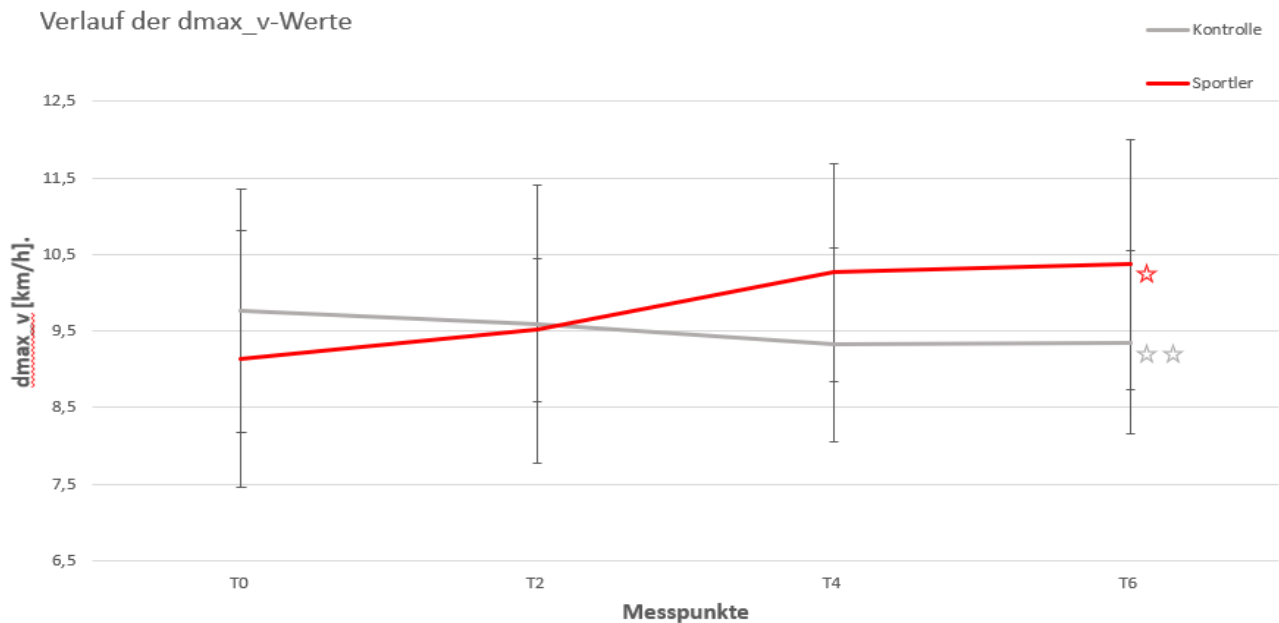
Bei Studienbeginn bestand kein statistisch signifikanter Gruppenunterschied zwischen den erhobenen Fitnessparametern. In der der Kontrollgruppe waren die Parameter über den Studienverlauf annähernd konstant.

Die Sportgruppe erlangte durch das regelmäßige Lauftraining eine signifikante Steigerung der Fitness. Die rel.VO<sub>2</sub>max-Werte stiegen von 38,94 ± 4,86 [ml O<sub>2</sub>/kg/min] zu T4 auf maximal 42,98 ± 5,74 [ml O<sub>2</sub>/kg/min], durchschnittlich um 4,005 (SD 2,718) [ml O<sub>2</sub>/kg/min] (Friedman-Test:  $\chi^2(3) = 29,389$ ;  $p < 0,001$ ;  $n = 17$ ). Eine signifikante Steigerung konnte zu jedem der Messpunkte nachgewiesen werden (Dunn-Bonferroni: T2  $p < 0,001$ , T4  $p < 0,001$ , T6  $p < 0,001$ ).



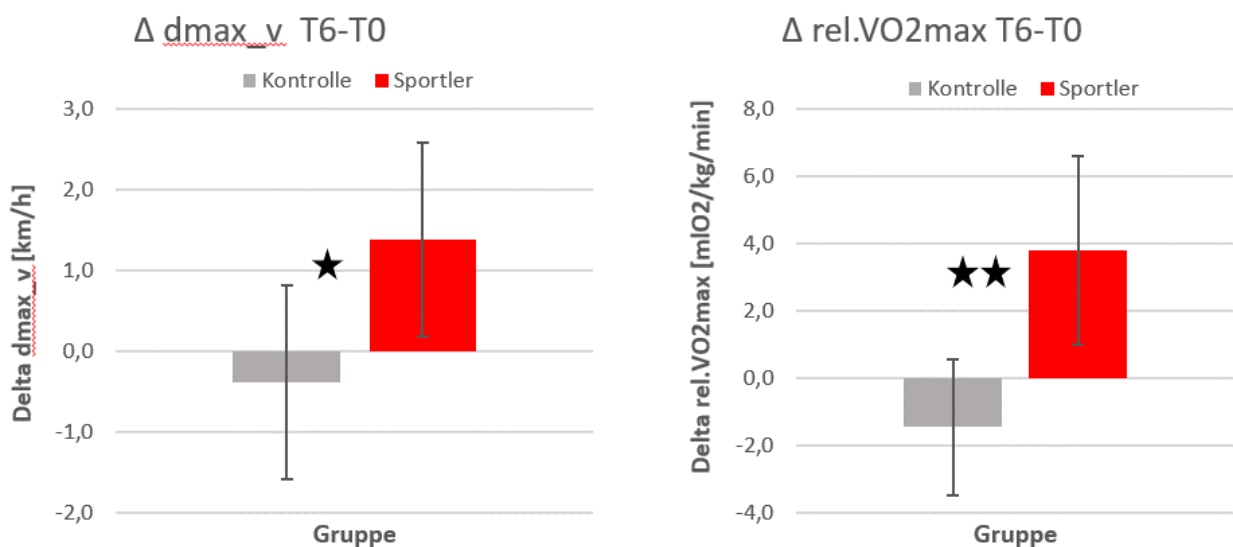
**Abb. 12:** Entwicklung des relVO<sub>2</sub>max im zeitlichen Verlauf. Signifikanter Friedman-Test in der Sportgruppe:  $N = 17$ ,  $*p < 0,001$ ; Kontrollgruppe  $N = 7$ ,  $**p = 0,116$ .

Die Laufgeschwindigkeit an der Laktatschwelle (dmax\_v) konnte von 9,015 ± 1,75 [km/h] auf 10,37 ± 1,67 [km/h] zu T6 um durchschnittlich 1,355 (SD 1,196) [km/h] gesteigert werden (Friedman-Test:  $\chi^2(3) = 25,295$ ;  $p < 0,001$ ;  $n = 17$ ). Signifikante Steigerungen der dmax\_v bestanden nur in der zweiten Studienhälfte nach 4 und 6 Monaten: (Dunn-Bonferroni; T4  $p < 0,001$ , T6  $p < 0,001$ ).



**Abb. 13:** Entwicklung des dmax\_v im zeitlichen Verlauf. Signifikanter Friedman-Test in der Sportgruppe: N = 17, \*p < 0,001; Kontrollgruppe N = 7, \*\*p = 0,457.

Der Vergleich der Differenz der Fitnessparameter in beiden Gruppen von Beginn zu Ende der Studie zeigt für rel.VO<sub>2</sub>max (Mann-Whitney-U Test: U = 164,500; p < 0,001; r = 0,768) und dmax\_v (Mann-Whitney-U Test: U = 176,000; p < 0,001; r = 0,690) jeweils einen signifikanten Unterschied mit einem starken Effekt, wodurch ein klarer Zusammenhang zwischen der Verbesserung der körperlichen Fitness und Gruppenzugehörigkeit belegt werden konnte.

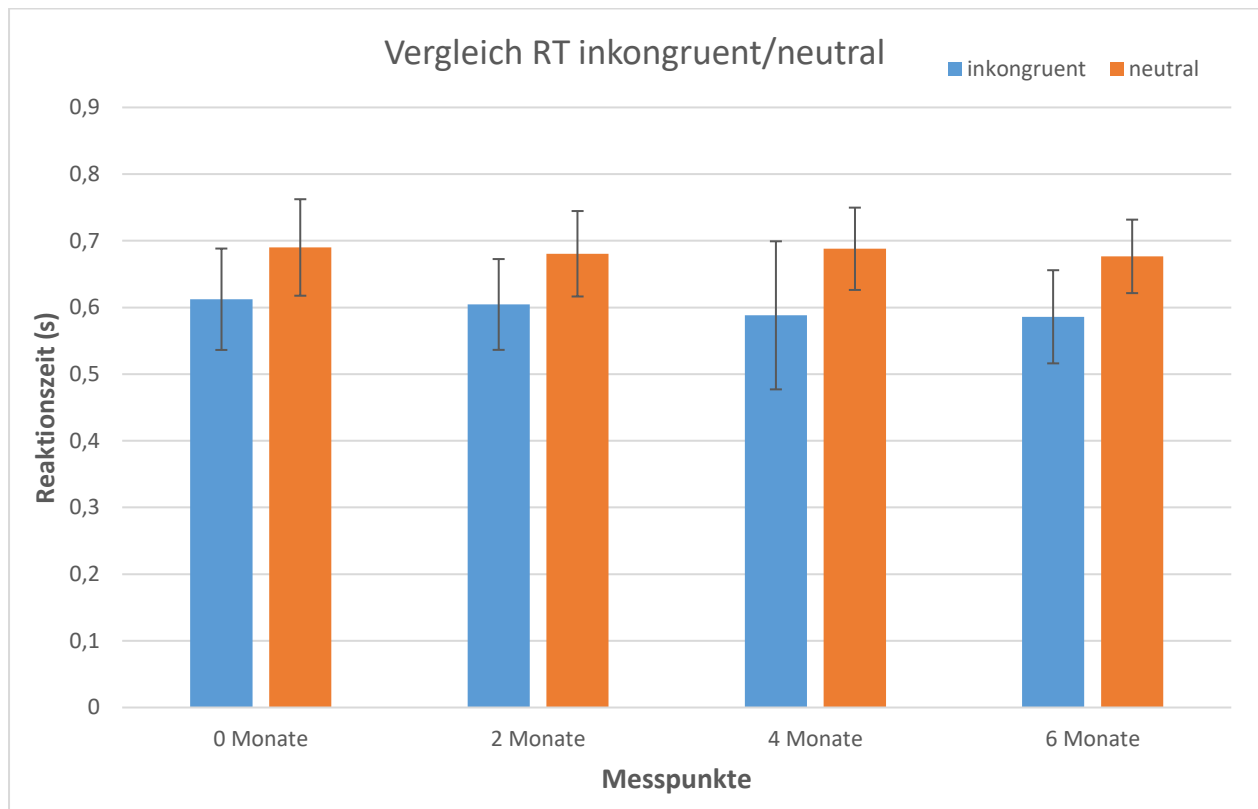


**Abb. 14:** Sportphysiologische Entwicklung zwischen den Zeitpunkten T0 und T6. Signifikanter Gruppenvergleich mittels Mann-Whitney-U N = 24, \*dmax\_v = p < 0,001; \*\* rel.VO<sub>2</sub>max = p < 0,001.

## 7.2 Composite Score

### 7.2.1 Reaktionszeiten:

Wie angenommen zeigte sich der Interferenzeffekt durch eine verzögerte Antwort bei der inkongruenten Testbedingung im Vergleich zur neutralen Testbedingung (0,695s  $\pm$  0,079 vs. 0,615s  $\pm$  0,074). Über den Studienverlauf entwickelten sich die Reaktionszeiten in den verschiedenen Gruppen sehr ähnlich.



**Abb. 15:** Mittlere Reaktionszeit mit SD der neutralen und inkongruenten Testbedingung im Verlauf der Studie, N = 29.

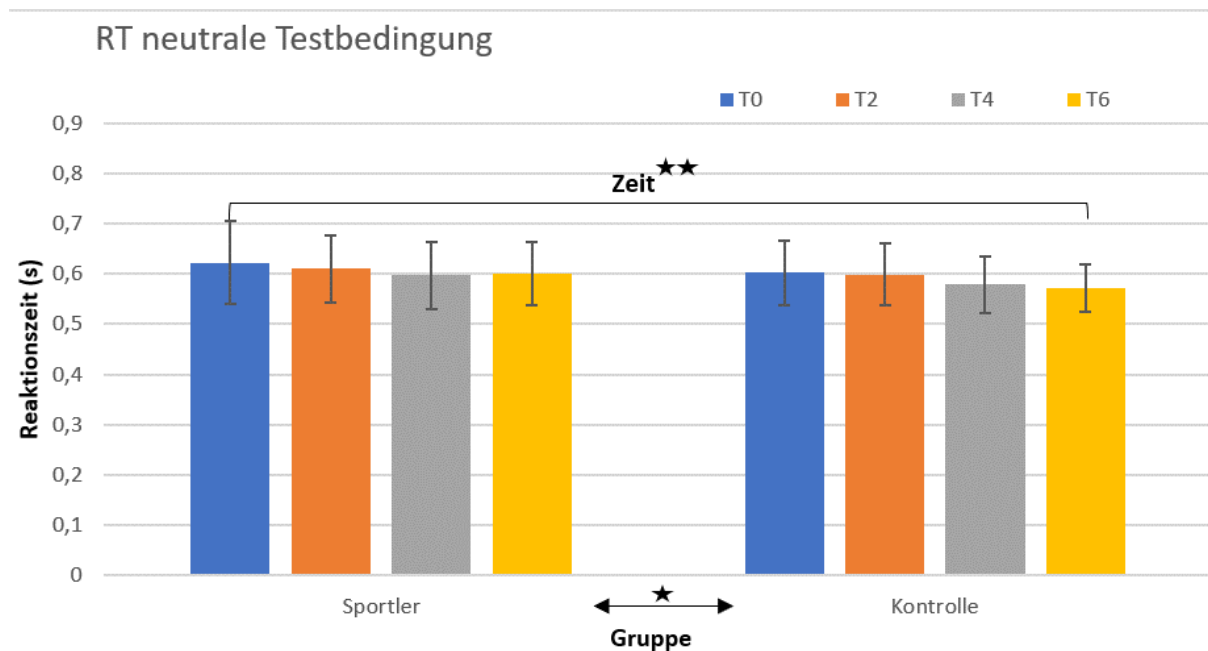
Die Berechnungen der 2-Way Mixed ANOVA fand für alle 4 Testbedingungen keinen statistisch signifikanten Einfluss der Sportintervention auf die Exekutivfunktionen [neutral ( $p=0,489$ ), kongruent ( $p=0,837$ ), inkongruent ( $p=0,967$ ), Interferenz  $p=0,849$ ]. Die Untersuchung nach Haupteffekten konnte in der neutralen ( $p = 0,001$ ) und kongruenten ( $p = 0,031$ ) Testbedingung einen signifikanten Haupteffekt der Zeit nachweisen, der auf abnehmende Reaktionszeiten im Studienverlauf hindeutet. Für die Testbedingungen der inkongruenten Version sowie des berechneten Interferenzeffektes bestand dieser

Zeiteffekt nicht. Die Untersuchung nach einem Haupteffekt der Gruppenzugehörigkeit zeigte für keine der Testbedingungen einen signifikanten Unterschied.

Der Vergleich anhand der Differenz der Reaktionszeit zwischen den Messpunkten und dem Studienbeginn [ $F(x) = T_x - T_0$ ] zeigte keine signifikante Wechselwirkung. Erneut zeigte sich für die neutrale ( $p = 0,02$ ) Testbedingung ein Haupteffekt der Zeit. Für die kongruente Testbedingung konnte bei nicht erreichtem Signifikanzniveau ( $p = 0,09$ ) nur eine Tendenz bemerkt werden. Die Berechnungen zu einem Haupteffekt der Gruppe konnten keine signifikanten Ergebnisse ermitteln.

Eine vollständige Ergebnisübersicht findet sich in den Tabellen im Anhang (Abschnitt 10).

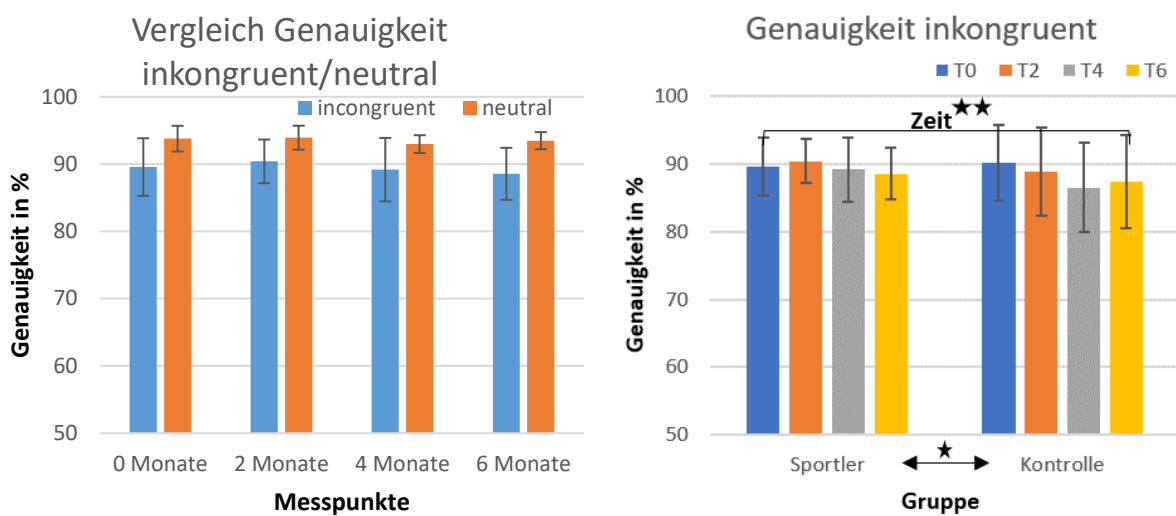
Aus Gründen der Übersichtlichkeit folgt die graphische Visualisierung exemplarisch für die Reaktionszeit der neutralen Bedingung. Wie in der Abbildung 16 zu sehen ist, fiel die Reaktionszeit schon rein optisch in beiden Gruppen über den Zeitraum der Studie leicht ab.



**Abb. 16:** Entwicklung der Reaktionszeit der neutralen Testbedingung im zeitlichen Verlauf. Berechnungen der 2-Way Mixed ANOVA  $N = 29$  zeigten keinen signifikanten Interaktionseffekt zwischen den Gruppen  $*p = 0,489$ , jedoch einen signifikanten Hauptfaktor der Zeit  $**p = 0,002$ .

### 7.2.2 Genauigkeit:

Der Interferenzeffekt zeigte sich durch eine geringere Antwortgenauigkeit in der inkongruenten Testbedingung. Besonders deutlich wird dies im Vergleich zur neutralen Testbedingung (94,035%  $\pm$  2,353 vs 89,731%  $\pm$  4,648). Die Sportgruppe konnte die mittlere Antwortgenauigkeit über den Studienverlauf annähernd aufrechterhalten, wogegen sie in der Kontrollgruppe abzunehmen schien. Dies zeigte sich am deutlichsten in der inkongruenten Testbedingung (SG: 89,554%  $\pm$  1,116  $\rightarrow$  88,552%  $\pm$  1,182 vs, KG: 90,085%  $\pm$  1,578  $\rightarrow$  87,349%  $\pm$  1,671).



**Abb. 17:** links: Mittlere Antwortgenauigkeit mit SD der neutralen und inkongruenten Testbedingung im Verlauf der Studie, N = 29. rechts: Entwicklung der Antwortgenauigkeit der inkongruenten Testbedingung im zeitlichen Verlauf. Berechnungen der 2-Way Mixed ANOVA N = 29 zeigten keinen signifikanten Interaktionseffekt zwischen den Gruppen \* $p = 0,242$ , jedoch einen signifikanten Hauptfaktor der Zeit \*\* $p = 0,015$ .

Es konnte durch die Berechnungen der 2-Way Mixed ANOVA für keine der 4 Testbedingungen eine signifikante Wechselwirkung anhand der Gruppenzugehörigkeit gefunden werden [neutral ( $p = 0,126$ ), kongruent ( $p = 0,943$ ), inkongruent ( $p = 0,242$ ), Interferenz  $p = 0,361$ ]. Wie schon bei den Berechnungen der Reaktionszeiten zeigten sich Zeiteffekte in der neutralen Testbedingung ( $p = 0,027$ ) und zusätzlich in der inkongruenten Testbedingung ( $p = 0,015$ ). Ein Haupteffekt der Gruppenzugehörigkeit bestand für keine der Testbedingungen. Die Berechnungen anhand der Differenzen eines Messpunktes und des Studienbeginns [ $F(x) = T_x - T_0$ ] zeigten einen Zeiteffekt für die inkongruente Testbedingung ( $p < 0,031$ ).

### 7.3 Korrelationsanalyse:

Die Analyse der Korrelation zwischen den Fitnessfaktoren und der Composite Scores wurde zunächst durch separate lineare Regressionen berechnet und abschließend anhand eines mixed models durchgeführt. Zusammenfassend konnte keine robuste Korrelation gefunden werden. Es folgt eine kurze Aufzählung signifikanter Befunde, eine vollständige Übersicht aller Ergebnisse kann den Tabellen im Anhang entnommen werden.

### 7.4 Reaktionszeit:

Die Reaktionszeit und die Fitnessparameter rel.VO<sub>2</sub>max bzw. dmax\_v zeigten zu keinem Zeitpunkt und für keine der Testbedingungen eine signifikante Korrelation. Auch durch die Vergleiche der Differenz zum Studienstart konnten keine signifikanten Ergebnisse gefunden werden. Die Berechnung des gemischten Modells erfasste einen Einfluss der Zeit auf die neutrale Testbedingung ( $p < 0,001$ ) und bei nicht erreichtem Signifikanzniveau darüber hinaus auch einen Trend in der kongruenten Testbedingung ( $p = 0,052$ ). Durch den Vergleich der Differenz zum Studienstart zeigte sich der Einfluss der Zeit signifikant in der neutralen Bedingung ( $p = 0,009$ ), während ein Trend der kongruenten Testbedingung fehlte. Dies unterstützt die Ergebnisse der Varianzanalyse und zeigt, dass der Zeiteffekt nicht nur Gruppenunabhängig, sondern ergänzend ohne Einfluss der beiden Fitnessparameter besteht.

### 7.5 Genauigkeit:

Durch die linearen Regressionen konnten vereinzelt signifikante inverse Korrelationen zwischen der Antwortgenauigkeit und den Fitnessparametern rel.VO<sub>2</sub>max und dmax\_v erfasst werden (Siehe Tab. 10: Korrelations-, Determinationskoeffizient & p-Werte der **linearen Regression** des CS der **Genauigkeit**). Die Ergebnisse zeigten sich im zeitlichen Verlauf als unbeständig und die abschließende Berechnung des gemischten Modells fand keine signifikante Wechselwirkung, weshalb diese Ergebnisse am ehesten im Sinne eines Zufallsfundes gedeutet wurden. Analog zur Berechnung der Reaktionszeit konnte ein Zeiteffekt für drei Testbedingungen (neutral  $p = 0,027$ , kongruent  $p = 0,014$ , inkongruent  $p = 0,045$ ) und für die Differenz zwischen T6 und T0 in der neutralen Testbedingung ( $p = 0,024$ ) festgestellt werden. Für die anderen Testbedingungen zeigte sich ein nur knapp verpasstes Signifikanzniveau.

## 8 Diskussion:

Im Rahmen dieser Dissertation wurde der Einfluss eines sechsmonatigen Lauftrainings auf die Exekutivfunktionen in einer Kohorte nicht sportlicher junger Erwachsener überprüft. Wir erfassten die Leistungssteigerung der Fitness durch die maximale Sauerstoffaufnahme (VO<sub>2</sub>max) als etablierten Wert der maximalen Leistung und zusätzlich von d<sub>max\_v</sub>, um bei Bildung einer Plateauphase der VO<sub>2</sub>max-Werte die Leistungszunahme erfassen zu können (Clénin, 2019; Maier T. et al., 2016). Wir erreichten während der Fitnesschecks eine nahezu vollständige Ausbelastung der ProbandInnen. Ein signifikanter Gruppenunterschied belegt die Annahme, dass die hier genutzte Form des Lauftrainings zu einer nachweislichen Steigerung der Fitness führt.

Mittels wiederholten neuropsychologischen Screenings konnte eine Verfälschung der Ergebnisse, hervorgerufen durch eine psychische Erkrankung, wie z. B. eine Depression, anhand des BDI-Fragebogens (Beck et al., 1961) ausgeschlossen werden (Wagner, 2016; Zuckerman et al., 2018).

Die Grundlage der Auswertung war ein Composite Score, der aus den Reaktionszeiten und der Antwortgenauigkeit des Flanker- sowie Stroop-Tasks errechnet wurde.

Wie erwartet, zeigten die ProbandInnen in den inkongruenten Testbedingungen eine schlechtere Performanz als in der neutralen oder kongruenten Testversion. Dies spiegelte sich ebenfalls im errechneten Composite Score „Interferenz“ wider, der in dieser Arbeit als Surrogat Parameter der Exekutivfunktionen diente (Diamond und Ling, 2016; MacLeod, 1991). Dieser Befund wurde zu allen Messpunkten in beiden Studiengruppen der Studie erfasst und unterstützt die Vorstellung einer gemeinsamen latenten Variable dieser beiden EF-Tests. Obwohl Untersuchungen bereits signifikante Unterschiede der Reaktionszeit und Antwortgenauigkeit nach einer sechs Monate langen Sportintervention nachweisen konnten (Cassilhas et al., 2007; Guadagni et al., 2020), bestanden diese nicht zwischen der Interventions- und Kontrollgruppe dieser Studie. Es ließ sich somit in diesem Kollektiv kein Hinweis darauf finden, dass körperliche Fitness die Exekutivfunktionen beeinflusst.

Die statistische Auswertung zeigte hingegen signifikante Ergebnisse, die sich nicht auf die Sportintervention zurückführen ließen. Der Effekt der verkürzten Reaktionszeit

bestand gruppenunabhängig im zeitlichen Verlauf der Studie. Die Auswertung der Antwortgenauigkeit zeichnet ein ähnliches Bild.

Der genannte Effekt bestand in der neutralen und kongruenten Testbedingung, dessen Bearbeitung keine umfangreiche exekutive Kontrolle benötigt. Deshalb kann in diesem Rahmen am ehesten von einem Lerneffekt ausgegangen werden, der sich durch die wiederholte Bearbeitung der Aufgabe ergeben hat.

Innerhalb der Korrelationsanalysen konnten punktuell signifikante Zusammenhänge erfasst werden. Diese Korrelation zwischen den Fitnessparametern rel. VO<sub>2</sub>max und dmax\_v und der Antwortgenauigkeit hätte vermuten lassen können, dass ein Effekt körperlicher Leistungssteigerung existiert. Dieser wäre im Falle eines gerichteten Einflusses jedoch zum Studienende deutlicher nachweisbar gewesen. Ergänzend würde er sich in den individuellen Veränderungen der sportlichen Leistung widerspiegeln. Korrelationen bestanden jedoch vor allem zu Beginn der Studie, sodass es sich bei fehlenden gruppenspezifischen Veränderungen am ehesten um Zufallsbefunde handelt, wodurch eine Aussage über einen gerichteten Zusammenhang nicht getroffen werden kann. Zusätzlich wies die Korrelation auf einen negativen Einfluss der körperlichen Fitness auf die Antwortgenauigkeit hin. Daraus würde sich die Hypothese formulieren lassen, dass ein höheres Fitnessniveau eine schlechtere exekutive Kontrolle erzielt.

Dies steht nicht nur im Widerspruch zu der allgemeinen Annahme, dass durch Fitnesssteigerung positive Auswirkungen auf den Körper und Geist erzielt werden, sondern auch gegen den Hauptteil der publizierten Ergebnisse in Bezug auf kognitive Effekte. Soweit in der Literaturrecherche gefunden, wurde einzig in einer von Etnier et al. (2006) publizierten Metaanalyse ein negativer Zusammenhang zwischen der aeroben Fitness und der kognitiven Funktion beschrieben. Diese negative Korrelation bestand in der Population von Kindern, jungen Erwachsenen und bei älteren Erwachsenen. Dieses Ergebnis wurde von den Autoren vor allem durch methodische Schwächen der Metaanalysen erklärt und damit, dass ein solcher Vergleich keine Aussage zur Ursache und Wirkung zulässt. Die Autoren führten fort, dass gut designte Studien bessere Aussagen zum gerichteten Einfluss treffen könnten, als es durch Metaanalysen möglich sei (Lau et al., 1998). Schließlich präsentierten sie im Jahr 2020 in einer weiteren Metaanalyse sogar ein gegenteiliges Ergebnis und berechneten einen signifikant

positiven Einfluss von Fitness auf die Exekutivfunktion für ältere Erwachsene (Chen et al., 2020). Dieser insgesamt viel häufiger publizierte positive Effekt körperlicher Fitness auf EF konnte durch unsere Daten jedoch nicht belegt werden (Hillman et al., 2006).

Diese Studie wurde randomisiert, kontrolliert und prospektiv durchgeführt. Dadurch konnte die Richtung zwischen körperlicher Fitness und EF untersucht und der Einfluss möglicher konfundierender Variablen reduziert werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf längerfristigen Effekten, die durch eine zeitliche Entkopplung von Trainingseinheiten und Messpunkten erzielt wurde.

Studien, die Langzeiteffekte durch eine regelmäßige Sportintervention untersuchen, sind aktuell nur in geringer Anzahl vorhanden. Die Daten längerer Beobachtungszeiträume stammen häufig aus retrospektiven Studien, in denen ein jahrelanges unterschiedliches Aktivitätsniveau zwischen den Befragten bestanden haben kann, sodass ein Effekt durch eine längere sportliche Lebensweise nicht erfasst wurde. Der gewählte sechsmonatige Zeitraum dieser Studie könnte deshalb insbesondere für diese Altersgruppe nicht lang genug gewesen sein. Dies könnte unter anderem an der in der Einleitung beschriebenen Abnahme der exekutiven Funktionen im höheren Lebensalter liegen, oder dass bei dieser jungen Probandengruppe im Alter von 18-35 Jahren mit gerade abgeschlossener Hirnentwicklung eine Verbesserung der EF im Sinne eines Ceiling-Effekts nicht möglich ist (Fortes et al., 2018; Konijnenberg et al., 2018).

Die gewählte Form der Intervention durch ein personalisiertes hochintensives Lauftraining unterscheidet sich von anderen Studien. Innerhalb der Studien mit Probanden höheren Alters konnte eine derartige Belastung nicht genutzt werden, so dass stattdessen dem Alter angepasste Formen wie z. B. moderates Gehen gewählt wurden. Bei Studien mit jüngeren Probanden wurden anstelle eines Lauftrainings aktivierende Formen des Spiels gewählt. Die Erfassung der körperlichen Leistung erfolgte darüber hinaus teils auch nur durch nicht objektivierbare Methoden wie Fragebögen anstelle standardisierter Methoden wie die hier gewählte Spiroergometrie (Salas-Gomez et al., 2020).

Für zukünftige Studien bei jungen Erwachsenen wäre es daher sinnvoll, den Schwerpunkt auf größere Kohorten und längere Beobachtungszeiträume zu legen. Die gewählte Interventionsmaßnahme und die Messung der körperlichen Fitness sollten standardisiert

erfolgen, um bessere Vergleiche verschiedener Studien untereinander zu ermöglichen. Der Testauswahl kommt eine weitere entscheidende Bedeutung zu. Anstelle einzelner Tests zur Erfassung der Kognition ließen sich auf dem Niveau latenter Variablen Veränderungen der Kognition zuverlässiger untersuchen (Kramer, 2021).

Zusammenfassend verdeutlicht dies, wie vielschichtig der Einfluss von körperlicher Fitness auf die Exekutivfunktionen ist und dass weitere geeignete Studien benötigt werden, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Die Daten dieser Studie geben keinen Anhalt dafür, dass ein gerichteter Zusammenhang zwischen der körperlichen Fitness und den Exekutivfunktion bei jungen Erwachsenen im Alter zwischen 18-35 Jahren besteht.

## 9 Methodische Schwächen:

Trotz der langen Studienlaufzeit konnte nur eine vergleichsweise kleine ProbandInnenanzahl von 29 rekrutiert werden, deren Datensätze partiell von der Analyse ausgeschlossen werden mussten. Die Motivation der ProbandInnen zur Teilnahme an der Studie war stark mit dem Wunsch eines regelmäßigen Trainings verbunden, so dass die der Kontrollgruppe zugeordneten ProbandInnen teils sofort die Teilnahme an der Studie beendeten oder während des Studienverlaufs abbrachen. In der finalen Analyse der Daten bestand bereits zu Beginn der Studie keine homogene Verteilung und eine unterschiedliche Anzahl an ProbandInnen in den Gruppen.

Durch das Bewusstsein der Gruppenzugehörigkeit besteht das Risiko eines Placeboeffektes. Zusätzlich konnte die Compliance der Kontrollgruppe für das Einhalten der gewohnten unsportlichen Lebensweise über die Dauer der sechsmonatigen Studie lediglich auf Vertrauensbasis erfolgen.

Trotz sorgfältiger Schulung unserer ProbandInnen ist ein unkontrollierter und nicht erfasster Einfluss der Trainingsintensität durch die selbstständigen Trainingseinheiten außerhalb unseres Instituts nicht auszuschließen. Durch eine körperliche Schonung wäre eine Verzögerung des Trainingsfortschritts denkbar. Die zur Bestimmung der Leistungszunahme genutzten VO<sub>2</sub>max-Werte sind in einem besonderen Maße von dem Engagement der ProbandInnen während der Leistungsüberprüfung abhängig, da die aussagekräftigsten Werte an der absoluten Grenze der sportlichen Leistungsfähigkeit entstehen. Und dies ist nur bei vollständiger Ausbelastung möglich ist (Meyer und Kindermann, 1999).

Wie die Daten längerer epidemiologischer Studien zeigen, könnte der Zeitraum eines sechsmonatigen Trainings nicht ausreichend lang gewesen sein, um eine erfassbare Änderung zwischen der körperlichen Fitness und Änderungen der Exekutivfunktionen zu erzielen (Beason-Held et al., 2007; Rovio et al., 2005). Signifikante Gruppenunterschiede könnten z. B. durch eine längere Aufrechterhaltung der kognitiven Funktionen bei körperlichen Training im Kontrast zur schnelleren Abnahme bei inaktiver Lebensweise auftreten (Liu-Ambrose et al., 2008; Liu-Ambrose et al., 2010; Muscari et al., 2010).

Durch erhöhte Fehlerhäufigkeiten innerhalb der inkongruenten Bedingung der Stroop-Aufgabe bestand in der Berechnung des Composite Scores zu zwei Zeitpunkten eine Gewichtung zugunsten des Flanker-Tests. Eine Korrektur dieser Ergebnisse war nicht möglich. Die Analyse der Fitnessverbesserung war durch einen Laufbanddefekt bei insgesamt fünf Messungen nicht möglich.

## 10 Zusammenfassung

Als Exekutivfunktionen (EF) wird eine Gruppe kognitiver Prozesse beschrieben, die eine Art Kontrollfunktionen übernehmen. Durch diese Kontrolle wird zB. eine Aufgabenfokussierung ermöglicht, wodurch ablenkende Reize ausgeblendet werden können. EF ermöglichen uns darüber hinaus das gleichzeitige Ausführen verschiedener Aufgaben, sowie die Anpassung an veränderte Bedingungen durch die Entwicklung und Verfolgung geeigneter Lösungsstrategien. Es wurde festgestellt, dass durch cerebrale Pathologien und den normalen Alterungsprozess die Leistung der EF abnehmen kann und dadurch die Fähigkeit, ein erfolgreiches und selbstständiges Leben zu führen, eingeschränkt wird. In der Literatur wird ein positiver Einfluss körperlicher Fitness auf die EF postuliert. Die Ergebnisse stammen zu einem großen Teil aus Studien an Kindern oder alten Erwachsenen, zwei Gruppen, in denen die kognitiven Prozesse Veränderungen unterliegen. Ein grundsätzlicher Zusammenhang kann deshalb nur vermutet und das Potential, welches sich in einer Prävention kognitiver Funktionen verbirgt, unpräzise geschätzt werden.

Mit dieser Arbeit wurde der Einfluss eines 6-monatigen Lauftrainings auf die EF untersucht. Dafür wurden insgesamt 29 sportlich inaktive junge Erwachsene einer gesunden Altersgruppe von 18 – 35 Jahren auf zwei Gruppen aufgeteilt (Kontrolle N = 10; Sport N = 19). Die Sportgruppe absolvierte 3x wöchentlich ein individualisiertes Lauftraining. Die Kontrollgruppe hielt ihren inaktiven Lebensstil unverändert bei. Die ProbandInnen wurden alle 2 Monate auf körperliche und kognitive Parameter untersucht. Die Ergebnisse belegen einen positiven Effekt des Lauftrainings durch gestiegene Fitnessparameter ( $relVO_{2max}$ ,  $dmax_v$ ) in der Sportgruppe. Die EF wurden durch einen Composite Score erfasst, der sich aus der Reaktionszeit bzw. Antwortgenauigkeit von Stroop- und Flanker-Test zusammensetzte. Die Leistung der EF spiegelte sich insbesondere durch den Unterschied zwischen inkongruenter und neutraler Testbedingung wider, der als Parameter der bestehenden Interferenz genutzt wurde.

Es konnte kein Einfluss der körperlichen Fitness auf die EF festgestellt werden. Es wurden Veränderungen der EF über die Studiendauer von 6 Monaten erfasst, diese unterlagen jedoch am ehesten einem Lerneffekt, der durch die mehrmalige Testbearbeitung hervorgerufen wurde. Dadurch lässt sich der in der Literatur

beschriebene positive Effekt körperlicher Fitness auf die EF in dem von uns untersuchten ProbandInnenkollektiv aus gesunden, jungen unспортlichen Erwachsenen nicht übertragen.

## 11 Anhang

**Tab. 6:** Studien, die sich mit den Auswirkungen körperlicher Belastung auf Exekutivfunktionen befassen

Autor, Jahr	Titel	Trainingsform	Dauer	ProbandInnen	Parameter	Effekte	
Akut	Schott et al., 2016	Effekte einer akuten Ausdauerbelastung auf die Inhibitionsfähigkeit bei Jugendlichen	PACER-Test		N = 73 m und w Altersdurchschnitt: 14 Jahre	Flanker Test	Effekt durch Sport: Nachweisbar (positiv)  schnelle Reaktionszeit und geringe Fehleranzahl
	Jaeger et al., 2015	Cognitive and physiological effects of an acute physical activity intervention in elementary school children	20 min aerobic activities including running and jumping		N = 104 m und w  Altersdurchschnitt: 8 Jahre	Ua. Flanker Test	Effekt durch Sport: Nachweisbar (positiv)  schnellere Reaktionszeit
Chronisch	Guadagni et al., 2019	Aerobic exercise improves cognition and cerebrovascular regulation in older adults	Überwachte Aerobicübungen 3d/wk + 1 unüberwachte Einheit Bei bis zu 70% des VO2max 6 Monate lang	6 Monate	n = 206 m und w wenig aktive mittelalte und alte Erwachsene Altersdurchschnitt: 66 Jahre	Ua. Stroop Test Cerebrovaskuläre Regulation Cardiorespiratorische Fitness (VO2max)	Effekt durch Sport: Nachweisbar (positiv)  schnellere Reaktionszeit
	Ambrose et al., 2015	Resistance Training and Executive Functions	Resistance Training 1x/2x/Week 1 Jahr lang	12 Monate	N = 155 w Altersdurchschnitt: 75 Jahre	Ua. Stroop Test	Effekt durch Sport: Nachweisbar (positiv)  schnelle Reaktionszeit
	Hillman et al., 2006	Physical Activity and Cognitive Function in a Cross - Section of Younger and Older Community - Dwelling Individuals	Sweat Index Zusammenhang durch Followup in mehrjährigen Studiendesign	Querschnittsanalyse	N = 241 m und w Altersdurchschnitt: Junge Kohorte 26 Jahre Alte Kohorte 50 Jahre	Ua. Flanker Test	Effekt durch Sport: Nachweisbar (positiv)  schnellere Reaktionszeit, geringere Fehleranzahl
	Sink et al., 2015	Effect of a 24 Month Physical Activity Intervention vs. Health Education on Cognitive Outcomes in Sedentary Older Adults	Moderate körperliche Aktivität (z.B. Walking, Resistance Training, Flexibilitäts Übungen)	24 Monate	N = 1635 m und w Altersdurchschnitt: 80 Jahre	Ua. Flanker Test	Effekt durch Sport: eingeschränkt Nachweisbar (positiv)  schnellere Reaktionszeit

**Tab. 7:** Übersicht der 2-Wege Varianzanalyse des CS von Reaktionszeit/Antwortgenauigkeit

	Messpunkte			Delta T6-T0		
	Interaktion	Zeit	Gruppen	Interaktion	Zeit	Gruppen
Compositescore						
Reaktionszeiten						
Neutral	0,489	<b>0,001</b>	0,429	0,37	<b>0,02</b>	0,844
kongruent	0,837	<b>0,031</b>	0,863	0,797	0,09	0,711
inkongruent	0,967	0,602	0,214	0,944	0,663	0,568
interferrenz	0,849	0,192	0,332	0,894	0,13	0,624
Antwortgenauigkeit						
Neutral	0,126	<b>0,027</b>	0,813	0,124	0,187	0,238
kongruent	0,943	0,108	0,707	0,877	0,313	0,728
inkongruent	0,242	<b>0,015</b>	0,5	0,584	<b>0,031</b>	0,109
interferrenz	0,361	0,159	0,262	0,704	0,145	0,127

**Tab. 8:** Korrelations-, Determinationskoeffizient & p-Werte der **linearen Regression** der CS der **Reaktionszeit**

Testzeitpunkt Reaktionszeit	T0		T2		T4		T6		Delta T6-T0	
Composite Score Reaktionszeit	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v
Neutral	R: 0,183 R <sup>2</sup> :0,33 P: 0,393	R: 0,288 R <sup>2</sup> : 0,083 P: 0,182	R: 0,187 R <sup>2</sup> : 0,035 P: 0,381	R: 0,199 R <sup>2</sup> : 0,04 P: 0,352	R: 0,108 R <sup>2</sup> : 0,012 P: 0,617	R: 0,07 R <sup>2</sup> : 0,005 P: 0,746	R: 0,042 R <sup>2</sup> : 0,002 P: 0,844	R: 0,241 R <sup>2</sup> : 0,058 P: 0,257	R: 0,210 R <sup>2</sup> : 0,44 P:0,324	R: 0,161 R <sup>2</sup> : 0,026 P: 0,463
Kongruent	R: 0,254 R <sup>2</sup> : 0,064 P: 0,232	R: 0,365 R <sup>2</sup> : 0,133 P: 0,087	R: 0,204 R <sup>2</sup> : 0,042 P: 0,339	R: 0,284 R <sup>2</sup> : 0,081 P: 0,178	R: 0,019 R <sup>2</sup> : 0,00 P: 0,929	R: 0,048 R <sup>2</sup> : 0,002 P: 0,823	R: 0,149 R <sup>2</sup> : 0,022 P: 0,488	R: 0,313 R <sup>2</sup> : 0,098 P: 0,137	R: 0,152 R <sup>2</sup> : 0,023 P: 0,479	R: 0,133 R <sup>2</sup> : 0,018 P: 0,546
Inkongruent	R: 0,272 R <sup>2</sup> : 0,74 P: 0,199	R: 0,402 R <sup>2</sup> : 0,162 P: 0,057	R: 0,283 R <sup>2</sup> : 0,80 P: 0,180	R: 0,282 R <sup>2</sup> : 0,079 P: 0,182	R: 0,026 R <sup>2</sup> :0,001 P: 0,905	R: 0,100 R <sup>2</sup> : 0,01 P:0,642	R: 0,023 R <sup>2</sup> : 0,001 P: 0,917	R: 0,072 R <sup>2</sup> : 0,005 P: 0,738	R: 0,127 R <sup>2</sup> : 0,016 P:0,555	R: 0,088 R <sup>2</sup> : 0,008 P: 0,690
Interferenz	R: 0,139 R <sup>2</sup> : 0,019 P: 0,516	R: 0,228 R <sup>2</sup> : 0,052 P: 0,295	R: 0,189 R <sup>2</sup> : 0,36 P: 0,376	R: 0,084 R <sup>2</sup> : 0,007 P: 0,698	R: 0,051 R <sup>2</sup> : 0,003 P: 0,814	R: 0,107 R <sup>2</sup> : 0,11 P: 0,62	R: 0,153 R <sup>2</sup> : 0,023 P: 0,475	R: 0,284 R <sup>2</sup> : 0,081 P: 0,178	R: 0,108 R <sup>2</sup> : 0,012 P: 0,615	R: 0,039 R <sup>2</sup> : 0,001 P:0,861

**Tab. 9:** p-Werte des **Gemischten Modells** der Composite Scores der **Reaktionszeit**

Unabhängige Variable Abhängige Variable	relVo2max	dmax_v	Messpunkte
Composite Score Reaktionszeit			
Neutral	0,849	0,603	<b>0,000</b>
Kongruent	0,807	0,718	0,052
Inkongruent	0,958	0,727	0,493
Interferenz	0,830	0,428	0,626
Delta T6-T0			
Neutral	0,453	0,418	<b>0,009</b>
Kongruent	0,821	0,598	0,110
Inkongruent	0,508	0,661	0,527
Interferenz	0,704	0,159	0,844

**Tab. 10:** Korrelations-, Determinationskoeffizient & p-Werte der **linearen Regression** des CS der **Genauigkeit**

Testzeitpunkt Genauigkeit	T0		T2		T4		T6		Delta T6-T0	
	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v	relVO2max	dmax_v
Neutral	R: 0,154 R <sup>2</sup> : 0,024 P: 0,907	R: 0,152 R <sup>2</sup> : 0,023 P: 0,511	R: 0,06 R <sup>2</sup> : 0,004 P: 0,791	R: 0,003 R <sup>2</sup> : 0,00 P: 0,991	R: 0,413 R <sup>2</sup> : 0,171 P: 0,056	R: 0,382 R <sup>2</sup> : 0,146 P: 0,080	R: 0,205 R <sup>2</sup> : 0,042 P: 0,361	R: 0,003 R <sup>2</sup> : 0,00 P: 0,988	R: 0,349 R <sup>2</sup> : 0,122 P: 0,112	R: 0,417 R <sup>2</sup> : 0,174 P: 0,06
Kongruent	R: 0,165 R <sup>2</sup> : 0,027 P: 0,464	R: 0,221 R <sup>2</sup> : 0,049 P: 0,335	R: 0,038 R <sup>2</sup> : 0,001 P: 0,867	R: 0,098 R <sup>2</sup> : 0,01 P: 0,666	R: 0,08 R <sup>2</sup> : 0,006 P: 0,725	R: 0,184 R <sup>2</sup> : 0,034 P: 0,411	R: 0,032 R <sup>2</sup> : 0,001 P: 0,886	R: 0,004 R <sup>2</sup> : 0,00 P: 0,986	R: 0,221 R <sup>2</sup> : 0,049 P: 0,323	R: 0,526 R <sup>2</sup> : 0,276 P: <b>0,014</b>
Inkongruent	R: 0,523 R <sup>2</sup> : 0,273 P: <b>0,013</b>	R: 0,506 R <sup>2</sup> : 0,256 P: <b>0,019</b>	R: 0,392 R <sup>2</sup> : 0,154 P: 0,071	R: 0,426 R <sup>2</sup> : 0,182 P: <b>0,048</b>	R: 0,061 R <sup>2</sup> : 0,004 P: 0,787	R: 0,177 R <sup>2</sup> : 0,031 P: 0,430	R: 0,144 R <sup>2</sup> : 0,021 P: 0,521	R: 0,078 R <sup>2</sup> : 0,006 P: 0,73	R: 0,250 R <sup>2</sup> : 0,062 P: 0,263	R: 0,344 R <sup>2</sup> : 0,118 P: 0,127
Interferenz	R: 0,564 R <sup>2</sup> : 0,318 P: <b>0,006</b>	R: 0,507 R <sup>2</sup> : 0,257 P: <b>0,019</b>	R: 0,451 R <sup>2</sup> : 0,203 P: <b>0,035</b>	R: 0,573 R <sup>2</sup> : 0,328 P: <b>0,005</b>	R: 0,126 R <sup>2</sup> : 0,016 P: 0,576	R: 0,128 R <sup>2</sup> : 0,017 P: 0,569	R: 0,204 R <sup>2</sup> : 0,042 P: 0,362	R: 0,103 R <sup>2</sup> : 0,011 P: 0,648	R: 0,198 R <sup>2</sup> : 0,039 P: 0,378	R: 0,188 R <sup>2</sup> : 0,035 P: 0,414

**Tab. 11:** p-Werte des **Gemischten Modell** der CS der **Genauigkeit**

Unabhängige Variable Abhängige Variable	relVo2max	Dmax_v	Messpunkte
Composite Score Genauigkeit			
Neutral	0,568	0,381	<b>0,027</b>
Kongruent	0,890	0,564	<b>0,014</b>
Inkongruent	0,971	0,613	<b>0,045</b>
Interferenz	0,439	0,433	0,430
<b>Delta T6-T0</b>			
Neutral	0,680	0,094	<b>0,024</b>
Kongruent	0,949	0,476	0,055
Inkongruent	0,768	0,895	0,053
Interferenz	0,791	0,868	0,285

## 12 Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Drei-Faktorenmodell der Zielfunktionen .....	11
<b>Abb. 2:</b> Drei-Faktorenmodell der Inhibitionsfunktionen .....	13
<b>Abb. 3:</b> Modell des „Unity/diversity framework“ .....	14
<b>Abb. 4:</b> Evidenz eines körperlichen Einflusses in verschiedenen Altersstufen & klinischen Populationen	20
<b>Abb. 5:</b> Schematische Darstellung des Studienablaufs .....	29
<b>Abb. 6:</b> Werteerhebung Leistungsdiagnostik.....	31
<b>Abb. 7:</b> Trainingsablauf der Studie .....	34
<b>Abb. 8:</b> Vorabfragebogen zur Überprüfung vor den neuropsychologischen Testungen.....	36
<b>Abb. 9:</b> Beispielhafte Darstellung eines Probanden bei der Testung.....	37
<b>Abb. 10:</b> Konzeptionelles Interferenz-Modell .....	38
<b>Abb. 11:</b> QQ-Plot zur Reaktionszeit in der neutralen Testbedingung .....	43
<b>Abb. 12:</b> Entwicklung des $relVO_{2max}$ im zeitlichen Verlauf .....	46
<b>Abb. 13:</b> Entwicklung des $d_{max\_v}$ im zeitlichen Verlauf .....	47
<b>Abb. 14:</b> Sportphysiologische Entwicklung zwischen den Zeitpunkten T0 und T6 .....	47
<b>Abb. 15:</b> Mittlere Reaktionszeit mit SD der neutralen und inkongruenten Testbedingung .....	48
<b>Abb. 16:</b> Entwicklung der Reaktionszeit der neutralen Testbedingung im zeitlichen Verlauf.....	49
<b>Abb. 17:</b> Mittlere Antwortgenauigkeit mit SD der neutralen und inkongruenten Testbedingung & Entwicklung der Antwortgenauigkeit der inkongruenten Testbedingung.....	50

## 13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Studien zu Effekten langfristiger körperlicher Aktivität .....	16
Tabelle 2: Übersicht über die Einschlusskriterien dieser Studie .....	24
Tabelle 3: Übersicht über die Ausschlusskriterien dieser Studie .....	24
Tabelle 4: M.I.N.I.: Screening der zu untersuchenden Krankheiten durch den Mini International Neuropsychiatric Interview (Tuanama-Schuler 2017).....	26
Tabelle 5 :Aufzählung neuropsychologische Testbatterie .....	35
Tabelle 6: Studien, die sich mit den Auswirkungen körperlicher Belastung auf Exekutivfunktionen befassen.....	60
Tabelle 7: Übersicht der 2-Wege Varianzanalyse des CS von Reaktionszeit/Antwortgenauigkeit .....	61
Tabelle 8: Korrelations-, Determinationskoeffizient & p-Werte der linearen Regression der CS der Reaktionszeit .....	62
Tabelle 9: p-Werte des Gemischten Modells der Composite Scores der Reaktionszeit .....	62
Tabelle 10: Korrelations-, Determinationskoeffizient & p-Werte der linearen Regression des CS der Genauigkeit .....	63
Tabelle 11: p-Werte des Gemischten Modells der CS der Genauigkeit.....	63

## 14 Literaturverzeichnis

- Andrés P, Van der Linden M. Age-related differences in supervisory attentional system functions. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sc.* 2000; 55: 373-380
- Álvarez-Bueno C, Pesce C, Caverro-Redondo I, Sánchez-López M, Martínez-Hortelano JA, Martínez-Vizcaíno V. The Effect of Physical Activity Interventions on Children's Cognition and Metacognition: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 2017; 56: 729-738
- Baddeley AD. The fractionation of working memory. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1996; 93: 13468-13472
- Baddeley AD. *Working memory.* Oxford: Oxford University Press, 1986
- Baggetta P, Alexander PA. Conceptualization and Operationalization of Executive Function. *Mind, Brain, and Education* 2016; 10: 10–33.
- Barkley RA. Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: constructing a unifying theory of ADHD. *Psychol Bull* 1997; 121: 65-94
- Beason-Held LL, Moghekar A, Zonderman AB, Kraut MA, Resnick SM. Longitudinal changes in cerebral blood flow in the older hypertensive brain. *Stroke* 2007; 38: 1766–1773
- Beck AT, Ward CH, Mendelson M, Mock J, Erbaugh J. An inventory for measuring depression. *Arch Gen Psychiatry* 1961; 4: 561-571
- Bherer L, Erickson KI, Liu-Ambrose T. A review of the effects of physical activity and exercise on cognitive and brain functions in older adults. *J Aging Res* 2013; 2013: 657508
- Biederman J, Mick E, Surman C, Doyle R, Hammerness P, Harpold T, Dunkel S, Dougherty M, Aleardi M, Spencer T. A randomized, placebo-controlled trial of OROS methylphenidate in adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biol Psychiatry* 2006; 59: 829-835
- Blanca MJ, Alarcón R, Arnau J, Bono R, Bendayan R. Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema* 2017; 29: 552–557
- Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 1982; 14: 377–381.
- Box GP, Draper NR. *Empirical model-building and response surfaces.* New York: John Wiley & Sons, 1987
- Brennan M, Welsh MC, Fisher CB. Aging and executive function skills: an examination of a community-dwelling older adult population. *Percept Mot Skills* 1997; 84: 1187–1197
- Brooks BL, Sherman EMS, Iverson GL, Slick DJ, Strauss E. Psychometric Foundations for the Interpretation of Neuropsychological Test Results. In: Schoenberg MR, Scott JG, Hrsg. *The Little Black Book of Neuropsychology.* Boston, MA: Springer US, 2011: 893–922
- Bunge SA, Ochsner KN, Desmond JE, Glover GH, Gabrieli JD. Prefrontal regions involved in keeping information in and out of mind. *Brain* 2001; 124: 2074–2086
- Burgess PW. Theory and methodology in executive function research. In: Rabbitt P, Hrsg. *Methodology of frontal and executive function.* Hove: Psychology Press, 1997
- Carlson NE, Moore MM, Dame A, Howieson D, Silbert LC, Quinn JF, Kaye JA. Trajectories of brain loss in aging and the development of cognitive impairment. *Neurology* 2008; 70: 828–833

- Carson V, Hunter S, Kuzik N, Wiebe SA, Spence JC, Friedman A, Tremblay MS, Slater L, Hinkley T. Systematic review of physical activity and cognitive development in early childhood. *J Sci Med Sport* 2016; 19: 573–578
- Cassilhas RC, Viana VAR, Grassmann V, Santos RT, Santos RF, Tufik S, Mello MT. The impact of resistance exercise on the cognitive function of the elderly. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 1401–1407
- Cattell JM. The Time it Takes to See and Name Objects. *Mind* 1886; 11: 63–65
- Cerrillo-Urbina AJ, García-Hermoso A, Sánchez-López M, Pardo-Guijarro MJ, Santos Gómez JL, Martínez-Vizcaíno V. The effects of physical exercise in children with attention deficit hyperactivity disorder: a systematic review and meta-analysis of randomized control trials. *Child Care Health Dev* 2015; 41: 779–788
- Chen FT, Etnier JL, Chan KH, Chiu P-K, Hung T-M, Chang Y-K. Effects of Exercise Training Interventions on Executive Function in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2020; 50: 1451–1467
- Cicerone K, Levin H, Malec J, Stuss D, Whyte J. Cognitive rehabilitation interventions for executive function: moving from bench to bedside in patients with traumatic brain injury. *J Cogn Neurosci* 2006; 18: 1212–1222
- Ciesielski KT, Harris RJ. Factors related to performance failure on executive tasks in autism. *Child Neuropsychology* 1997; 3: 1–12
- Clapp WC, Gazzaley A. Distinct mechanisms for the impact of distraction and interruption on working memory in aging. *Neurobiol Aging* 2012; 33: 134–148
- Cléin G. Leistungsdiagnostik im Ausdauersport - anaerobe Schwelle, VO<sub>2</sub>max, aerobe Kapazität - wohin geht die Reise? *Swiss Sports & Exercise* 2019; 67: 6–14
- Cohen JD, Dunbar K, McClelland JL. On the control of automatic processes: a parallel distributed processing account of the Stroop effect. *Psychol Rev* 1990; 97: 332–361
- Cohen J. Statistical Power Analysis. *Curr Dir Psychol Sci* 1992; 1: 98–101
- Colcombe S, Kramer AF. Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. *Psychol Sci* 2003; 14: 125–130
- Colcombe SJ, Kramer AF, Erickson KI, Scalf P, McAuley E, Cohen NJ, Webb A, Jerome GJ, Marquez DX, Elavsky S. Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2004; 101: 3316–3321
- Collette F, Hogge M, Salmon E, van der Linden M. Exploration of the neural substrates of executive functioning by functional neuroimaging. *Neuroscience* 2006; 139: 209–221
- Collette F, van der Linden M, Laureys S, Delfiore G, Degueldre C, Luxen A, Salmon E. Exploring the unity and diversity of the neural substrates of executive functioning. *Hum Brain Mapp* 2005; 25: 409–423
- Cramon DY von, Schubotz R. Exekutivfunktion und ihre Störungen. In: Wallesch C-W, Ackermann H, Hrsg. *Neurologie*. München: Elsevier Urban & Fischer, 2005
- Crane PK, Carle A, Gibbons LE, Insel P, Mackin RS, Gross A, Jones RN, Mukherjee S, Curtis SM, Harvey D, Weiner M, Mungas D. Development and assessment of a composite score for memory in the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI). *Brain Imaging Behav* 2012; 6: 502–516

Crane PK, Narasimhalu K, Gibbons LE, Pedraza O, Mehta KM, Tang Y, Manly JJ, Reed BR, Mungas DM. Composite scores for executive function items: demographic heterogeneity and relationships with quantitative magnetic resonance imaging. *J Int Neuropsychol Soc* 2008; 14: 746–759

Da Silva FC, Da Iop RR, Oliveira LC de, Boll AM, Alvarenga JGS de, Gutierrez Filho PJB, Melo LMAB de, Xavier AJ, Da Silva R. Effects of physical exercise programs on cognitive function in Parkinson's disease patients: A systematic review of randomized controlled trials of the last 10 years. *PLoS One* 2018; 13: e0193113

Dempster FN. The rise and fall of the inhibitory mechanism: Toward a unified theory of cognitive development and aging. *Dev Rev* 1992; 12: 45-75

Dempster FN. Resistance to Interference: Developmental Changes in a Basic Processing Mechanism. In: Howe ML, Pasnak R, Hrsg. *Emerging Themes in Cognitive Development*. New York: Springer New York, 1993: 3–27

Diamond A, Gilbert J. Development as progressive inhibitory control of action: retrieval of a contiguous object. *Cogn Dev* 1989; 4: 223–249

Diamond A, Ling DS. Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Dev Cogn Neurosci* 2016; 18: 34–48

Donnelly JE, Hillman CH, Castelli D, Etnier JL, Lee S, Tomporowski P, Lambourne K, Szabo-Reed AN. Physical Activity, Fitness, Cognitive Function, and Academic Achievement in Children: A Systematic Review. *Med Sci Sports Exerc* 2016; 48: 1197–1222

Düker H. *Über unterschwelliges Wollen. Experimentelle Beiträge zur Theorie der Handlung*. Göttingen: Hogrefe, 1983

Duncan J, Johnson R, Swale M, Freer C. Frontal Lobe Deficits after Head Injury: Unity and Diversity of Function. *Cogn Neuropsychol* 1997; 14: 713–741

Erickson KI, Hillman C, Stillman CM, Ballard RM, Bloodgood B, Conroy DE, Macko R, Marquez DX, Petruzzello SJ, Powell KE. Physical Activity, Cognition, and Brain Outcomes: A Review of the 2018 Physical Activity Guidelines. *Med Sci Sports Exerc* 2019; 51: 1242–1251

Eriksen BA, Eriksen CW. Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Percept Psychophys* 1974; 16: 143–149

Eslinger PJ. *Conceptualizing, describing, and measuring components of executive function: A summary*. Baltimore: Paul H Brookes Publishing Co, 1996

Eston R, Reilly, T. *Kinanthropometry and exercise physiology laboratory manual*. London: Routledge, 2003

Etnier JL, Nowell PM, Landers DM, Sibley BA. A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Res Rev* 2006; 52: 119–130

Fontana L. Interventions to promote cardiometabolic health and slow cardiovascular ageing. *Nat Rev Cardiol* 2018; 15: 566–577

Fortes LS, Costa MC, Ferreira MEC, Nascimento-Júnior JRA, Fiorese L, Lima-Júnior, Dalton RAA, Cyrino ES. Frequency of resistance training does not affect inhibitory control or improve strength in well-trained young adults. *PLoS One* 2018; 13: e0206784

Fournier-Vicente S, Larigauderie P, Gaonac'h D. More dissociations and interactions within central executive functioning: a comprehensive latent-variable analysis. *Acta Psychol (Amst)* 2008; 129: 32–48

Fox NC, Black RS, Gilman S, Rossor MN, Griffith SG, Jenkins L, Koller M. Effects of Abeta immunization (AN1792) on MRI measures of cerebral volume in Alzheimer disease. *Neurology* 2005; 64: 1563–1572

Freud S. The Origin and Development of Psychoanalysis. *Am J Psychol* 1910; 21: 181-218

Friedman NP, Miyake A. The relations among inhibition and interference control functions: a latent-variable analysis. *J Exp Psychol Gen* 2004; 133: 101–135

Friedman NP, Miyake A, Young SE, DeFries JC, Corley RP, Hewitt JK. Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *J Exp Psychol Gen* 2008; 137: 201–225

Friedman NP, Miyake A. Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex* 2017; 86: 186–204

Friston KJ, Holmes AP, Worsley KJ. How many subjects constitute a study? *Neuroimage* 1999; 10: 1-5

Garavan H, Ross TJ, Stein EA. Right hemispheric dominance of inhibitory control: an event-related functional MRI study. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1999; 96: 8301–8306

Garden SE, Phillips LH, MacPherson SE. Midlife aging, open-ended planning, and laboratory measures of executive function. *Neuropsychology* 2001; 15: 472–482

Gazzaley A, D'Esposito M. Unifying prefrontal cortex function: Executive control, neural networks, and top-down modulation. In: Miller BL, Cummings JL, Hrsg. *The human frontal lobes: Functions and disorders*. New York: The Guilford Press, 2007: 187–206

Gibbons LE, Carle AC, Mackin RS, Harvey D, Mukherjee S, Insel P, Curtis SM, Mungas D, Crane PK. A composite score for executive functioning, validated in Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI) participants with baseline mild cognitive impairment. *Brain Imaging Behav* 2012; 6: 517–527

Glass GV, Peckham PD, Sanders JR. Consequences of Failure to Meet Assumptions Underlying the Fixed Effects Analyses of Variance and Covariance. *Rev Educ Res* 1972; 42: 237–288

Gray-Burrows K, Taylor N, O'Connor D, Sutherland E, Stoet G, Conner M. A systematic review and meta-analysis of the executive function-health behaviour relationship. *Health Psychol Behav Med* 2019; 7: 253–268

Greeff JW de, Bosker RJ, Oosterlaan J, Visscher C, Hartman E. Effects of physical activity on executive functions, attention and academic performance in preadolescent children: a meta-analysis. *J Sci Med Sport* 2018; 21: 501–507

Guadagni V, Drogos LL, Tyndall AV, Davenport MH, Anderson TJ, Eskes GA, Longman RS, Hill MD, Hogan DB, Poulin MJ. Aerobic exercise improves cognition and cerebrovascular regulation in older adults. *Neurology* 2020; 94: e2245-e2257

Harnishfeger KK. The development of cognitive inhibition. In: Dempster FN, Brainerd CJ, Hrsg. *Interference and inhibition in cognition*. San Diego: Academic Press, 1995: 175–204

Harwell MR, Rubinstein EN, Hayes WS, Olds CC. Summarizing Monte Carlo Results in Methodological Research: The One- and Two-Factor Fixed Effects ANOVA Cases. *Journal of Educational Statistics* 1992; 17: 315–339

Hasher L, Zacks RT. Working Memory, Comprehension, and Aging: A Review and a New View. In: Bower GH, Hrsg. *The psychology of learning and motivation* San Diego: Academic Press, 1988: 193–225

Henning H. Die Untersuchung der Aufmerksamkeit. In: Abderhalden E, Hrsg. *Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden*. Berlin: Urban & Schwarzenberg, 1925

Hillman CH, McAuley E, Erickson KI, Liu-Ambrose T, Kramer AF. On mindful and mindless physical activity and executive function: A response to Diamond and Ling (2016). *Dev Cogn Neurosci* 2019; 37: 100529

Hasher L, Zacks RT. Working Memory, Comprehension, and Aging: A Review and a New View. In: Gordon HB, Hrsg. *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. San Diego: Academic Press, 1988: 193–225.

Hintzman DL, Carre FA, Eskridge VL, Owens AM, Shaff SS, Sparks ME. "Stroop" effect: input or output phenomenon? *J Exp Psychol* 1972; 95: 458–45

Hollmann W, Knigge H, Knicker A, Strüder HK. Methods for Measurement of Physical Fitness and Training Recommendations in Studies on Humans. In: Boecker H, Hillman CH, Scheef L, Strüder HK, Hrsg. *Functional Neuroimaging in Exercise and Sport Sciences*. New York: Springer New York, 2012: 79–107

Huizinga M, Dolan CV, van der Molen MW. Age-related change in executive function: developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia* 2006; 44: 2017–2036

Iverson GL, Brooks BL. Improving Accuracy for Identifying Cognitive Impairment. In: Schoenberg MR, Scott JG, Hrsg. *The Little Black Book of Neuropsychology*. Boston: Springer US, 2011: 923–950

Jones AM, Doust JH. A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *J Sports Sci* 1996; 14: 321–327

Kimberg DY, Farah MJ. A unified account of cognitive impairments following frontal lobe damage: The role of working memory in complex, organized behavior. *J Exp Psychol Gen* 1993; 122: 411–428

Kline RB. *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*. New York: The Guilford Press ,1998

Konijnenberg C, Fredriksen PM. The effects of a school-based physical activity intervention programme on children's executive control: The Health Oriented Pedagogical Project (HOPP). *Scand J Public Health* 2018; 46: 82–91

Kramer AF, Hahn S, Cohen NJ, Banich MT, McAuley E, Harrison CR, Chason J, Vakil E, Bardell L, Boileau RA, Colcombe A. Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature* 1999; 400: 418–419

Kramer AF. How to Better Study the Associations Between Physical Activity, Exercise, and Cognitive and Brain Health. *JAMA Netw Open* 2021; 4: e215153

Lau J, Ioannidis JPA, Schmid CH. Summing up evidence: one answer is not always enough. *Lancet* 1998; 351: 123–127

Lecrubier Y, Sheehan DV, Weiller E, Amorim P, Bonora I, Sheehan KH, Janavs J, Dunbar GC. The Mini International Neuropsychiatric Interview (MINI). A short diagnostic structured interview: reliability and validity according to the CIDI. *Eur. psychiatr.* 1997; 12: 224–231

- Lehto JE, Juujärvi P, Kooistra L, Pulkkinen L. Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *Br J Dev Psychol* 2003; 21: 59–80
- Ley P. Quantitative aspects of psychological assessment. New York: Barnes & Noble, 1972
- Lezak MD. The Problem of Assessing Executive Functions. *Int J Psychol* 1982; 17: 281–297
- Liu-Ambrose T, Donaldson MG, Ahamed Y, Graf P, Cook WL, Close J, Lord SR, Khan KM. Otago home-based strength and balance retraining improves executive functioning in older fallers: a randomized controlled trial. *J Am Geriatr Soc* 2008; 56: 1821–1830
- Liu-Ambrose T, Nagamatsu LS, Graf P, Beattie BL, Ashe MC, Handy TC. Resistance training and executive functions: a 12-month randomized controlled trial. *Arch Intern Med* 2010; 170: 170–178
- Lix LM, Keselman JC, Keselman HJ. Consequences of Assumption Violations Revisited: A Quantitative Review of Alternatives to the One-Way Analysis of Variance "F" Test. *Rev Educ Res* 1996; 66: 579–619
- Logan GD. Executive control of thought and action. *Acta psychologica* 1985; 60: 193–210
- Logan GD. Executive processing. *Psychol Res* 2000; 63: 211
- MacLeod CM. Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychol Bull* 1991; 109: 163–203
- Maier T, Gross M, Trösch S, Steiner T, Müller B, Bourban P, Schärer C, Hübner K, Wehrin J, Tschopp M, Wilhelm M, Clenin GE, Züst P, Seidel R. *Manual Leistungsdiagnostik*: Magglingen: BASPO, 2016
- Mann HB, Whitney DR. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Ann Math Statist* 1947; 18: 50–60
- McDowd JM, Oseas-Kreger DM, Filion DL. Inhibitory processes in cognition and aging. In: Dempster FN, Brainerd CJ, Hrsg. *Interference and inhibition in cognition*. San Diego: Academic Press, 1995: 363–400
- McIntyre RS, Lophaven S, Olsen CK. A randomized, double-blind, placebo-controlled study of vortioxetine on cognitive function in depressed adults. *Int J Neuropsychopharmacol* 2014; 17: 1557–1567
- Meyer T, Kindermann W. Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO<sub>2</sub>max). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 1999, 50: 285–286
- Miyake A, Friedman NP, Emerson MJ, Witzki AH, Howerter A, Wager TD. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cogn Psychol* 2000; 41: 49–100
- Miyake A, Friedman NP. The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Curr Dir Psychol Sci* 2012; 21: 8–14
- Miyake A, Shah P. *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge: Cam Univ Press, 2003
- Morris RD. Relationships and distinctions among the concepts of attention memory, and executive function. In: Lyon GR, Krasnegor NA, Hrsg. *Attention, memory, and executive function*. Baltimore: P.H. Brookes, 2005: 11–16
- Mortamais M, Ash JA, Harrison J, Kaye J, Kramer J, Randolph C, Pose C, Albala B, Ropacki M, Ritchie CW, Ritchie K. Detecting cognitive changes in preclinical Alzheimer's disease: A review of its feasibility. *Alzheimers Dement* 2017; 13: 468–492

- Müller SV. Exekutivfunktionen und Sprache. *Sprache Stimme Gehör* 2017; 41: 179–183
- Müller SV. *Störungen der Exekutivfunktionen*. Göttingen: Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG, 2013
- Mungas D, Beckett L, Harvey D, Farias ST, Reed B, Carmichael O, Olichney J, Miller J, DeCarli C. Heterogeneity of cognitive trajectories in diverse older persons. *Psychol Aging* 2010; 25: 606–619
- Muscari A, Giannoni C, Pierpaoli L, Berzigotti A, Maietta P, Foschi E, Ravaioli C, Poggiopollini G, Bianchi G, Magalotti D, Tentoni C, Zoli M. Chronic endurance exercise training prevents aging-related cognitive decline in healthy older adults: a randomized controlled trial. *Int J Geriatr Psychiatry* 2010; 25: 1055–1064
- Neale MC, Cardon LR. *Methodology for Genetic Studies of Twins and Families*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010
- Nestor PG, O'Donnell BF. The mind adrift: Attentional dysregulation in schizophrenia. In: Parasuraman R, Hrsg. *The attentive brain*. Cambridge: The MIT Press, 1998: 527–546
- Nigg JT. On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychol Bull* 2000; 126: 220–246
- Nigg JT. Is ADHD a disinhibitory disorder? *Psychol Bull* 2001; 127: 571–598
- Norman DA, Shallice T. Attention to Action. In: Davidson RJ, Schwartz GE, Shapiro D, Hrsg. *Consciousness and self-regulation*. New York: Springer Science+Business Media, 1986: 1–18
- Northey JM, Cherbuin N, Pumpa KL, Smees DJ, Rattray B. Exercise interventions for cognitive function in adults older than 50: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med* 2018; 52: 154–160
- Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971; 9: 97–113
- O'Reilly RC, Braver TS, Cohen JD. A Biologically Based Computational Model of Working Memory. In: Miyake A, Shah P, Hrsg. *Models of working memory. Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003: 375–411
- Pflueger MO, Gschwandtner U. Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP) Version 1.7. *Zeitschrift für Klinische Psychologie und Psychotherapie* 2003; 32: 155–157
- Phillips LH. Do “frontal tests” measure executive function? Issues of assessment and evidence from fluency tests. In: Rabbitt P, Hrsg. *Methodology of frontal and executive function*. Hove: Psychology Press, 1997: 191–213
- Rabbitt P. *Methodology of frontal and executive function*. Hove: Psychology Press, 1997
- Raz N, Gunning FM, Head D, Dupuis JH, McQuain J, Briggs SD, Loken WJ, Thornton AE, Acker JD. Selective aging of the human cerebral cortex observed in vivo: differential vulnerability of the prefrontal gray matter. *Cereb Cortex* 1997; 7: 268–282
- Ridderinkhof KR, van der Molen MW, Band GP, Bashore TR. Sources of interference from irrelevant information: a developmental study. *J Exp Child Psychol* 1997; 65: 315–341
- Rostamian S, van Buchem MA, Westendorp RGJ, Jukema JW, Mooijaart SP, Sabayan B, Craen AJM de. Executive function, but not memory, associates with incident coronary heart disease and stroke. *Neurology* 2015; 85: 783–789

Rovio S, Kåreholt I, Helkala E-L, Viitanen M, Winblad B, Tuomilehto J, Soininen H, Nissinen A, Kivipelto M. Leisure-time physical activity at midlife and the risk of dementia and Alzheimer's disease. *Lancet Neurol* 2005; 4: 705–711

Ruotsalainen I, Gorbach T, Perkola J, Renvall V, Syväoja HJ, Tammelin TH, Karvanen J, Parviainen T. Physical activity, aerobic fitness, and brain white matter: Their role for executive functions in adolescence. *Dev Cogn Neurosci* 2020; 42: 100765

Salas-Gomez D, Fernandez-Gorgojo M, Pozueta A, Diaz-Ceballos I, Lamarain M, Perez C, Kazimierczak M, Sanchez-Juan P. Physical Activity Is Associated With Better Executive Function in University Students. *Front Hum Neurosci* 2020; 14: 11

Schmidt K-H, Metzler P. *Wortschatztest*. Göttingen: Beltz Test, 1992

Shallice T. *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993

Sink KM, Espeland MA, Castro CM, Church T, Cohen R, Dodson JA, Guralnik J, Hendrie HC, Jennings J, Katula J, Lopez OL, McDermott MM, Pahor M, Reid KF, Rushing J, Verghese J, Rapp S, Williamson JD. Effect of a 24-Month Physical Activity Intervention vs Health Education on Cognitive Outcomes in Sedentary Older Adults: The LIFE Randomized Trial. *JAMA* 2015; 314: 781–790

Smith EE, Jonides J. Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science* 1999; 283: 1657–1661

Spielberger CD, Gorusch RL. *Manual for the state-trait anxiety inventory (form Y)*. ("Self-Evaluation-Questionnaire"). Palo Alto: Consulting Psychologists Press, 1983

Staffaroni AM, Bajorek L, Casaletto KB, Cobigo Y, Goh S-YM, Wolf A, Heuer HW, Elahi FM, Ljubenkov PA, Dever R, Kornak J, Appleby B, Bove J, Bordelon Y, Brannelly P, Brushaber D, Caso C, Coppola G, Dheel C, Dickerson BC, Dickinson S, Dominguez S, Domoto-Reilly K, Faber K, Ferrall J, Fields JA, Fishman A, Fong J, Foroud T, Forsberg LK, Gavrilova R, Gearhart D, Ghazanfari B, Ghoshal N, Goldman J, Graff-Radford J, Graff-Radford N, Grant I, Grossman M, Haley D, Hsiung G-Y, Huey ED, Irwin DJ, Jones DT, Jones L, Kantarci K, Karydas A, Kaufer DI, Kerwin DR, Knopman DS, Kraft R, Kremers WK, Kukull WA, Litvan I, Lucente D, Lungu C, Mackenzie IR, Maldonado M, Manoochchri M, McGinnis SM, McKinley E, Mendez MF, Miller BL, Multani N, Onyike C, Padmanabhan J, Pantelyat A, Pearlman R, Petrucelli L, Potter M, Rademakers R, Ramos EM, Rankin KP, Rascovsky K, Roberson ED, Rogalski E, Sengdy P, Shaw LM, Syrjanen J, Tartaglia MC, Tatton N, Taylor J, Toga A, Trojanowski JQ, Weintraub S, Wang P, Wong B, Wszolek Z, Boxer AL, Boeve BF, Kramer JH, Rosen HJ. Assessment of executive function declines in presymptomatic and mildly symptomatic familial frontotemporal dementia: NIH-EXAMINER as a potential clinical trial endpoint. *Alzheimers Dement* 2020; 16: 11–21

Stroop JR. Studies of interference in serial verbal reactions. *J Exp Psychol* 1935; 18: 643–662

Stuss DT, Alexander MP. Is there a dysexecutive syndrome? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2007; 362: 901–915

Sylvester C-YC, Wager TD, Lacey SC, Hernandez L, Nichols TE, Smith EE, Jonides J. Switching attention and resolving interference: fMRI measures of executive functions. *Neuropsychologia* 2003; 41: 357–370

Teuber HL. Unity and diversity of frontal lobe functions. *Acta Neurobiol Exp (Wars)* 1972; 32: 615–656

Tuanama-Schuler H. *Burnouterleben bei stationär behandelten depressiven Patienten und Wirksamkeit stationärer kognitiv-behavioraler Therapie bei Patienten mit Burnouterleben*. München: Ludwig-Maximilians-Universität München, 2017

- Uhl F, Podreka I, Deecke L. Anterior frontal cortex and the effect of proactive interference in word pair learning —results of brain-spect. *Neuropsychologia* 1994; 32: 241-247
- van der Sluis S, Jong PF de, van der Leij A. Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading, and arithmetic. *Intelligence* 2007; 35: 427–449
- Wagner S. Kognitive Defizite bleiben bestehen. *InFo Neurologie* 2016; 18: 12
- West RL. An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychol Bull* 1996; 120: 272–292
- Womersley J, Durnin JV, Boddy K, Mahaffy M. Influence of muscular development, obesity, and age on the fat-free mass of adults. *J Appl Physiol* 1976; 41: 223–229
- Zacks RT, Hasher L. Directed ignoring: Inhibitory regulation of working memory. In: Dagenbach D, Carr TH, Hrsg. *Inhibitory processes in attention, memory, and language*. San Diego: Academic Press, 1994: 241–264
- Zuckerman H, Pan Z, Park C, Brietzke E, Musial N, Shariq AS, Iacobucci M, Yim SJ, Lui LMW, Rong C, McIntyre RS. Recognition and Treatment of Cognitive Dysfunction in Major Depressive Disorder. *Front Psychiatry* 2018; 9: 655

## 15 Danksagung

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Henning Boecker bedanken. Sein Mut, dieses Projekt durch eine Arbeitsgruppe umsetzen zu lassen, welche aus Vollzeitstudenten bestand, gab mir erst die Möglichkeit, an einer so umfangreichen Studie mitwirken zu können. Ferner verdanke ich seiner Geduld die Fertigstellung dieser Promotion, da sich ein rasches Vorankommen im aktiven Arbeitsleben schwieriger gestaltete als zunächst vermutet.

Weiterer Dank gebührt der gesamten Arbeitsgruppe AG Boecker. Über all die Jahre hinweg führten wir einen respektvollen Umgang und erreichten eine großartige Teamarbeit. Hervorzuheben ist die Betreuung durch Dr. med. Dipl. Phys. Lukas Scheef und Dr. rer. nat. Angelika Maurer. Sie leisteten während der ersten Schritte in der wissenschaftlichen Welt eine erstklassige technische sowie methodische Unterstützung.

Ich danke Marie Puth für ihre Zeit, das verständliche Erklären sowie ihre Supervision der statistischen Berechnungen.

Neben dem professionellen Dank an meine Kollegen gebührt mein persönlicher Dank den Probanden für ihr Engagement und Interesse an der wissenschaftlichen Erforschung, sowie meiner Mutter, der ich diese Arbeit von ganzem Herzen widmen möchte. Ohne die Gewissheit ihrer unermüdlichen Unterstützung während meiner gesamten beruflichen Ausbildung wäre dieses wahnsinnige Abenteuer nicht möglich gewesen. Zu guter Letzt danke ich meiner Freundin, die mir stets dabei half das Ziel nicht aus dem Auge zu verlieren und neue Motivation zu finden um dieses zu erreichen.