

Aus der Medizinischen Fakultät zu Köln

Durchgeführt im:

Aus dem Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin, Abteilung Molekulare und zelluläre Sportmedizin der Deutschen Sporthochschule Köln

Geschäftsführender Leiter: Universitätsprofessor Dr. med. Wilhelm Bloch

**Die Regeneration kognitiver Ermüdung durch akute
aerobe Belastung / Aerobic exercise to recover from
mental exhaustion – a randomized controlled trial**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von

Pascal de Waal

aus Bergisch-Gladbach

promoviert am 01.06.2026

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln

Druckjahr: 2026

Dekan:	Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter:	Universitätsprofessor Dr. med. W. Bloch
2. Gutachterin:	Universitätsprofessorin Dr. rer. nat. T. M. Korotkova

Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von Herr Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Bloch und Herr Prof. Dr. Dr. Philipp Zimmer erhalten.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin / eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten der Universität zu Köln gelesen und sie bei der Durchführung der Dissertation beachtet habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Erklärung zum eigenen Anteil an der vorliegenden Dissertation:

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes am Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin der Deutschen Sporthochschule Köln erhoben. Folgende Personen waren an der Datenerhebung beteiligt:

1. Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Bloch
2. Prof. Dr. Dr. Philipp Zimmer
3. Dr. Max Oberste-Frielinghaus
4. Marius Seibert
5. Dr. Niklas Joisten
6. Dr. Florian Javelle
7. David Walzik

Die in dieser Arbeit angegebenen Auswertungen sind nach entsprechender Anleitung durch Herrn Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Bloch und Herrn Prof. Dr. Dr. Philipp Zimmer von Herrn Dr. Max Oberste-Frielinghaus und mir (in geteilter Erstautorenschaft) selbst durchgeführt worden. Die vorliegende Dissertationsschrift wurde vollständig von mir selbst unter der Anleitung von Herrn Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Bloch angefertigt.

Zu der Anfertigung des Manuskripts „Acute aerobic exercise to recover from mental exhaustion – a randomized controlled trial“, veröffentlicht am 11.09.2021 im Journal „Physiology & Behavior“ (s.u.) hat neben meiner Person Herr Dr. Max Oberste-Frielinghaus zu gleichen Teilen beigetragen.

Köln, den 21.07.2026

Unterschrift: _____

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Bloch und Prof. Dr. Dr. Philipp Zimmer für ihre fachliche Betreuung, ihre wertvolle Unterstützung und ihre hilfreichen Anregungen während der gesamten Entstehung dieser Dissertation. Ihre Expertise und ihr Engagement haben mich stets geleitet.

Ebenso danke ich Dr. Max Oberste-Frielinghaus, Herrn Marius Seibert und Dr. Niklas Joisten, Dr. Florian Javelle und Herrn David Walzik, die maßgeblich an der Datenerhebung und Durchführung der Studie mitbeteiligt waren. Ihre Mitwirkung und ihre Unterstützung bei der Umsetzung der Studie waren von unschätzbarem Wert.

Ein großer Dank gilt meiner Partnerin Patrizia Pontasch, die mich mit Geduld, Verständnis und ihrer Unterstützung durch die Herausforderungen der Dissertation begleitet hat. Meinen Eltern, Johanna und Alfred de Waal, danke ich von Herzen für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr Vertrauen in mich, das mir stets Kraft gegeben hat.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Thomas Petersdorff und Dr. med. Julia Altengarten danken. Ihre sorgfältige Durchsicht und wertvollen Anmerkungen haben entscheidend dazu beigetragen, die Qualität dieser Arbeit zu verbessern.

Allen weiteren, insbesondere sämtlichen Probandinnen und Probanden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle ebenfalls meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1. ZUSAMMENFASSUNG	7
2. EINLEITUNG	9
2.1. Wissenschaftlicher Hintergrund	11
2.1.1. Kognition	11
2.1.2. Exekutivfunktionen	12
2.1.3. Kognitive Funktionen und subjektives Wohlbefinden	16
2.1.4. Kognitive Ermüdung	17
2.1.5. Neuroanatomische Grundlagen	17
2.1.6. Einfluss sportlicher Aktivität auf kognitive Exekutivfunktionen	21
2.1.7. Einfluss sportlicher Reize auf das subjektive Wohlbefinden und die intrinsische Motivation	24
2.1.8. Vorliegende Studienlage	25
2.2. Fragestellung und Ziel der Arbeit	27
3. MATERIAL UND METHODEN	29
3.1. Publikation	29
4. ERGEBNISSE	39
5. DISKUSSION	39
5.1. Empirische Analyse der Ergebnisse in Bezug auf die angegebene Zielsetzung	39
5.2. Limitationen	45
6. LITERATURVERZEICHNIS	55
7. ANHANG	68
7.1. Abbildungsverzeichnis	68
7.2. Publierte Ergebnisse	68

Abkürzungsverzeichnis

Hb	=	Hämoglobin
Oxy-Hb	=	Oxyhämoglobin
Desoxy-Hb	=	Desoxyhämoglobin
BDNF	=	Brain-derived Neurotrophic Factor
VEGF	=	Vascular-endothelial Growth Factor
IGF-1	=	Insuline-like Growth Factor 1
ZNS	=	Zentrales Nervensystem
mRNA	=	messenger Ribonucleic Acid
TMT	=	Trailmaking Test
<i>r</i>	=	Retest-Reliabilität
<i>p</i>	=	statistische Wahrscheinlichkeit
<i>d</i>	=	Effektstärke nach Cohen
V'O ₂ max	=	Maximale Sauerstoffaufnahme
EEG	=	Elektroenzephalographie
fMRT	=	funktionellen Magnetresonanztomographie

1. Zusammenfassung

Langanhaltende Perioden intensiver kognitiver Arbeit führen zu einem Zustand mentaler Erschöpfung. Weit verbreitete Erholungsstrategien (z.B. Fernsehschauen) sind wenig effektiv, daher scheint moderates aerobes Training ein erfolgversprechender Ansatz zu sein, diese Effektivität zu steigern - dies lässt sich durch die akuten und chronischen, durch aerobe Übungen induzierten Vorteile für das zentrale Nervensystem erklären. Ziel des vorliegenden Projekts war es, die Frage zu beantworten, ob einmaliges moderates aerobes Training in höherem Maße an der Erholung kognitiver Fähigkeiten nach mentaler Erschöpfung im Vergleich zu einer aktiven Kontrolle (30-min. Dehnprogramm des Unterkörpers) und einer passiven Kontrolle (Ansehen einer bekannten Sitcom) beitragen kann.

Die vorliegende Studie untersuchte das Potenzial einer einzelnen moderaten aeroben Trainingseinheit (65-75 Prozent der individuellen maximalen Sauerstoffaufnahme jedes Probanden), um sich von einer experimentell induzierten mentalen Erschöpfung zu erholen. Die Studie wurde als eine randomisierte kontrollierte Studie an gesunden Erwachsenen (N=99) durchgeführt. Alle Teilnehmer absolvierten eine sechzigminütige kognitive Testbatterie, die mentale Erschöpfung induzieren sollte. Anschließend wurde eine randomisierte Gruppeneinteilung durchgeführt (s.o.). Die kognitive Flexibilität, die subjektive Stimmung, Müdigkeit, Rastlosigkeit/Unruhe, subjektive kognitive Kapazität und die Motivation wurden vor und nach der Behandlung ermittelt.

Die empirischen Ergebnisse zeigten, dass moderates aerobes Training zu einer besseren Erholung der kognitiven Flexibilität (mittlere Differenz dividiert durch die gepoolte Standardabweichung, Cohens $d = 0,737$), der subjektiven Stimmung ($d =$

0,405), der Müdigkeit ($d = 0,480$), der selbst wahrgenommenen kognitiven Kapazität ($d = 0,214$) und Motivation ($d = 0,524$) im Vergleich zur aktiven Kontrollbehandlung führte, mit Ausnahme der subjektiven Rastlosigkeit/Unruhe. Moderates aerobes Training war auch effektiver als das passive Anschauen einer Sitcom ($d = 0,102 - 0,286$) - mit Ausnahme von Müdigkeit ($d = 0,015$) und Rastlosigkeit/Unruhe ($d = - 0,473$).

Es lässt sich abschließend summieren, dass die vorliegende Studie darauf hindeutet, dass bereits eine einzelne moderate Einheit einer aeroben Aktivität die Regeneration der kognitiven Flexibilität und des subjektiven Wohlbefindens unterstützt. Dies gilt nicht nur gegenüber einer aktiven Kontrollintervention, sondern auch gegenüber einer weit verbreiteten, jedoch passiven, Freizeitbeschäftigung: nämlich dem Fernsehschauen.

2. Einleitung

In den vergangenen Jahren rückte das Thema kognitiver Ermüdung und ihrer Folgen zunehmend in den wissenschaftlichen Fokus. In gleichem Maß stieg die Anzahl der Publikationen, deren Ziel darin lag, zu erforschen, wie sich der Status kognitiver Ermüdung positiv beeinflussen lässt - jedoch ist hier weiterhin eine konsequente und alltagstaugliche Lösung zur Implementierung kognitionsfördernder Aktivitäten in unser tägliches Leben zu analysieren.

Zahlreiche Publikationen bieten Erklärungsmodelle für die beobachtete Verschlechterung der menschlichen Kognition. Es konnte gezeigt werden, dass im Rahmen steigender kognitiver Ermüdung die Fehlerquote im alltäglichen Berufsleben steigt [1]. Somit lässt sich ableiten, dass dies im Rahmen verschiedener gesundheitsrelevanter Berufsfelder, z.B. bei Ärztinnen und Ärzten [2-3], im Rahmen des öffentlichen Personenverkehrs wie beispielsweise dem Flugverkehr und der damit einhergehenden Flugsicherung [4-5] oder im Zugverkehr [6] gesundheitsschädliche, wenn nicht sogar lebensbedrohliche Konsequenzen haben kann.

Auf Basis dieser Erkenntnisse lässt sich, wie durch aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen ebenfalls empirisch belegt werden konnte, zusammenfassen, dass die individuelle Entscheidungsfähigkeit enorm unter kognitiver Ermüdung und der damit einhergehenden Beeinträchtigungen leidet [7-9]. Eine Vielzahl von Studien berichtet in diesem Zusammenhang von positiven Effekten im Rahmen einer kurzfristigen neuroanatomischen Anpassung im Sinne einer gesteigerten zerebralen Durchblutung, der Verbesserung neurokognitiver Exekutivfunktionen und des subjektiven Wohlbefindens.

Im folgenden Abschnitt der vorliegenden Arbeit soll definiert werden, was Kognition und kognitive Ermüdung bedeutet, welche kognitiven Defizite hiermit einhergehen und welche positiven Effekte sportlichen Reizen grundlegend zugeschrieben werden können. Anhand des aktuellen Forschungsstands wird eruiert, welche zentralen Vorteile mit einer sportlichen Belastungssituation verknüpft sind und welche Vorteile durch eine einmalige akute aerobe Belastung erwartet werden können.

Vor diesem Hintergrund wurde die vorliegende Studie durchgeführt, um die unmittelbaren Effekte einer kurzen, aeroben Trainingseinheit auf die kognitive Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Die Entscheidung für eine kurzzeitige aerobe Aktivität basierte auf der Überlegung, dass kurze Bewegungseinheiten nicht nur leicht in den Alltag integrierbar sind, sondern auch ohne großen zeitlichen Aufwand spürbare Verbesserungen der mentalen Leistung bewirken könnten. Besonders in einer modernen, oft zeitlich abgestimmten Lebensweise könnten solche Interventionen von hoher praktischer Relevanz sein. Das Ziel der Studie bestand dementsprechend darin, zu untersuchen, ob eine einmalige moderate aerobe Einheit, unmittelbare positive Effekte auf die kognitive Flexibilität, Konzentration und mentale Wachsamkeit haben kann. Dafür wurden die Probanden unmittelbar vor und nach der Trainingsintervention umfassenden kognitiven Tests unterzogen. Diese Tests sollten Veränderungen in Bereichen wie Reaktionszeit, Problemlösungsfähigkeit und Konzentrationsspanne erfassen. Die angewandte Methodik erlaubte es, eine direkte Vergleichbarkeit der kognitiven Leistungswerte vor und nach der Intervention zu gewährleisten. Ein weiterer zentraler Aspekt dieser Studie war es, einen Ansatz zu untersuchen, der auch für Personen mit eingeschränkter zeitlicher Verfügbarkeit umsetzbar ist. Die Studie zielte darauf ab, zu zeigen, dass entsprechende Bewegungseinheiten, die im Alltag leicht

durchzuführen sind, nicht nur das allgemeine Wohlbefinden steigern, sondern auch einen direkten Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit haben können. Diese Erkenntnisse könnten potenziell dazu beitragen, Bewegungsprogramme für Berufstätige und Studierende zu optimieren und die mentale Leistungsfähigkeit im Alltag zu verbessern.

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit auf die Verwendung gendergerechter Sprache verzichtet. Sämtliche Bezeichnungen gelten jedoch für Personen aller Geschlechter gleichermaßen.

2.1. Wissenschaftlicher Hintergrund

2.1.1. Kognition

Kognition umfasst sämtliche mentale Prozesse, die es Menschen ermöglichen, Informationen aufzunehmen, zu interpretieren, zu speichern und damit für unser Denken und Handeln nutzbar zu machen. Dazu gehören beispielsweise Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Gedächtnis, Sprache, Problemlösefähigkeiten und Bewusstseinsverarbeitung [10-11]. Während frühe Theorien kognitiver Prozesse häufig klar zwischen bewussten und unbewussten Vorgängen unterschieden, gehen neuere Ansätze zunehmend davon aus, dass Kognition in verschiedenen Ebenen auftritt und von biologischen wie kontextuellen Faktoren beeinflusst wird [10].

Gerade im medizinischen und klinischen Kontext spielt die Erforschung kognitiver Fähigkeiten eine zentrale Rolle, um sowohl normale als auch pathologische Funktionsweisen des Gehirns zu verstehen und bei Bedarf gezielt therapeutische oder rehabilitative Schritte einzuleiten, um die mentale Gesundheit des Individuums zu

erhalten. Hierbei zeigt sich, dass Kognition nicht als singuläre Funktion betrachtet werden kann, sondern ein dynamisches Zusammenspiel mehrerer Domänen darstellt, die jeweils unterschiedliche, jedoch stark miteinander vernetzte Teilprozesse umfassen [12].

Innerhalb dieses breiten Bereichs nehmen die sogenannten Exekutivfunktionen eine übergeordnete Steuer- und Kontrollfunktion ein. Sie ermöglichen unter anderem die zielgerichtete Planung, Überwachung und Anpassung komplexer Handlungen [13]. Im folgenden Abschnitt werden die zentralen Komponenten der Exekutivfunktionen vorgestellt, mit besonderem Augenmerk auf die, in dieser Arbeit analysierte, kognitive Flexibilität, die eine Schlüsselrolle für adaptives Verhalten und die erfolgreiche Bewältigung wechselnder Anforderungen an Körper und Geist spielt [14].

2.1.2. Exekutivfunktionen

Entsprechend lassen sich trotz unterschiedlicher Definitionen in der Literatur einige Kernaspekte identifizieren, die in den meisten Veröffentlichungen zu den Exekutivfunktionen gezählt werden [12, 14]. Diese lassen u.a. sich folgendermaßen zusammenfassen: Kognitive Flexibilität, Inhibition, Arbeitsgedächtnis, Planung und Organisation von Handlungen sowie das Monitoring des Ergebnisses dieser Handlung.

Im medizinischen Kontext ist das Zusammenspiel dieser Funktionsbereiche für die Beurteilung alltagsrelevanter Fähigkeiten von Patientinnen und Patienten entscheidend. Störungen in einem oder mehreren dieser Teilbereiche können zu

erheblichen Beeinträchtigungen in der Selbstständigkeit und Lebensqualität führen [11].

Kognitive Flexibilität entspricht einer Fähigkeit, ohne nennenswerte Verzögerung zwischen verschiedenen mentalen Aufgaben, Perspektiven oder Strategien zu wechseln. Sie ist damit ein zentrales Element adaptiven Handelns, insbesondere in Situationen, die eine rasche Anpassung an neue Herausforderungen verlangen – wie Menschen sie im alltäglichen Leben erleben [15]. Hohl und Dolcos [15] beschreiben zudem, dass nicht nur die mentale Leistungsfähigkeit, und damit einhergehend beruflicher und akademischer Erfolg, essentiell an kognitive Flexibilität gekoppelt ist. Ebenfalls deutet die Analyse der Autoren darauf hin, dass durch ein hohes Maß an kognitiver Flexibilität die Resilienz gegen Stress gefördert wird und somit Lebensqualität und Achtsamkeit gesteigert werden können. Im Kontrast hierzu wird ebenfalls dargelegt, dass ein Mangel an kognitiver Flexibilität mit einem erhöhten Risiko einhergeht, Depressionen oder Angststörungen zu entwickeln. Aus klinischer Sicht konnte hinzufügend gezeigt werden, dass Defizite der kognitiven Flexibilität besonders auffällig bei neurologischen Störungen mit frontalen Läsionen [16] oder bei psychiatrischen Erkrankungen wie Autismus-Spektrum-Störungen und Schizophrenie sein können [17]. Die Patienten verharren mitunter auf einer einmal eingeschlagenen Denkspur und finden es schwierig, sich umzuorientieren [16]. Dies kann beispielsweise Alltag erheblich erschweren, da verschiedenste Situationen (z. B. unerwartete Terminänderungen) kaum noch effektiv bewältigt werden können.

Zusammenfassend zeigt sich kognitive Flexibilität somit als einer der zentralen Prädiktoren für die Anpassungsfähigkeit an wechselnde Lebensbedingungen. Sie befähigt Menschen, festgefahrene Denk- und Handlungsmuster zu durchbrechen und

neue Ansätze zu wählen, wenn etablierte Routinen nicht mehr zielführend sind und Strategiewechsel, Perspektivenübernahme oder kontextabhängiges Handeln notwendig sind.

Kognitive Inhibition beschreibt die Fähigkeit, automatische Handlungen, impulsive Reaktionen oder Reize zu unterdrücken [18]. Sie dient dazu, fokussiert zu bleiben und sich nicht von ungewollten Stimuli ablenken zu lassen sowie spontan emotionale Reaktionen zu unterbinden, die unser Handeln beeinflussen könnten [19]. In Alltagsbeispielen zeigt sich Inhibition etwa, wenn Menschen in einer lauten Umgebung weiter konzentriert lesen, adäquat und gezielt auf äußere emotionale Stimuli reagieren oder zum Beispiel beim Autofahren auf einen wichtigen Reiz achten und andere Signale gezielt ignorieren – etwa bei einem notwendigen Bremsmanöver, um einen Unfall zu vermeiden. Fehlt diese Hemmungsfähigkeit, kann es zu impulsiven Handlungen kommen, etwa bei hyperaktiv-impulsiven Ausprägungen der Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung [14]. Neuropsychologisch lassen sich entsprechend zwei Formen der kognitiven Inhibition ableiten – die kontrollierte, willkürliche sowie eine unwillkürlich auftretende kognitive Inhibition [20]. Ein Mangel an kognitiver Inhibition geht zudem mit einer erhöhten Impulsivität einher, was das alltägliche Leben in Formen der Kommunikation und Entscheidungsfindung stark beeinflussen kann [20].

Besonders im Bereich der automatischen und unbewussten kognitiven Inhibition wird das Ziel verfolgt, irrelevante Reize zu unterdrücken, ohne weitere kognitive Ressourcen aktivieren zu müssen [20]. Die unwillkürliche kognitive Inhibition hat in erster Regel das Ziel, automatisiert Reize zu unterdrücken, die mit einer inadäquaten

Handlung, emotionalen Reaktion oder irrelevanten Erinnerung einhergehen würden [21].

Das Arbeitsgedächtnis ist für das kurzzeitige Behalten und Manipulieren von Informationen verantwortlich und bildet damit eine wichtige Grundlage für komplexere Denkprozesse. Unter Updating versteht man die Fähigkeit, diese Informationen laufend zu überprüfen, zu aktualisieren und bei Bedarf zu verwerfen oder zu ersetzen. Praktische Beispiele sind das Merken von Zwischenergebnissen beim Kopfrechnen oder das Notieren und ständige Anpassen einer Einkaufsliste. In solchen Situationen müssen irrelevante Informationen herausgefiltert werden, um Platz für neue Inhalte zu schaffen [12].

Planung und Organisation ist die Fähigkeit, zielgerichtete Handlungen in aufeinander abgestimmte Teilschritte zu zerlegen, Prioritäten festzulegen und die richtigen Ressourcen zur Zielerreichung einzusetzen. Hieraus folgen das fortlaufende Überwachen und Anpassen des eigenen Verhaltens [22]. Menschen müssen stets in der Lage sein, Fehler oder suboptimale Ergebnisse ihrer Handlungen zu erkennen und zeitnah zu korrigieren. Dieses Bewusstsein für den eigenen Handlungsablauf kann eine iterative Verbesserung folgen lassen, z. B., indem Misserfolge als Lernimpulse genutzt werden könnten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Kognition sich aus vielfältigen, eng miteinander verbundenen Prozessen zusammensetzt – von grundlegenden Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistungen bis hin zu Exekutivfunktionen, die eine übergeordnete Steuerungsrolle unserer Handlungen und Gedanken einnehmen. Diese Exekutivfunktionen erlauben eine flexible, zielorientierte Handlungssteuerung.

Insbesondere die kognitive Flexibilität nimmt innerhalb der Exekutivfunktionen eine zentrale Rolle ein, da sie die Anpassungsfähigkeit an wechselnde Anforderungen und komplexe Umgebungen maßgeblich bestimmt. Defizite in dieser Domäne können die Bewältigung alltäglicher Herausforderungen stark erschweren und treten bei einer Vielzahl neurologischer sowie psychiatrischer Erkrankungen auf [15]. Aus medizinischer Perspektive ist es daher wesentlich, exekutive Leistungen differenziert zu erfassen und zu berücksichtigen, um Patienten angemessen zu diagnostizieren und zu versorgen.

2.1.3. Kognitive Funktionen und subjektives Wohlbefinden

Die Beziehung zwischen kognitiven Funktionen und subjektivem Wohlbefinden ist ein zentraler Forschungsbereich der Psychologie und Neurowissenschaften. Kognitive Fähigkeiten wie Gedächtnis, Aufmerksamkeit und Problemlösungsfähigkeit spielen eine entscheidende Rolle für die Wahrnehmung und Verarbeitung von Lebensereignissen und daraus abgeleitet für das individuelle Wohlbefinden [23]. Entsprechend deutet sich an, dass Menschen mit stärker ausgeprägten kognitiven Fähigkeiten besser in der Lage sind, positive Lebensaspekte wahrzunehmen und negative Erfahrungen zu relativieren. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass ein hohes Maß an subjektiver Zufriedenheit mit einer hohen Maß an kognitiver Leistungsfähigkeit korreliert [24]. Eine aktuelle Arbeit von Pfund et al. [25] betont die bidirektionale Beziehung zwischen kognitiven Prozessen und Wohlbefinden und eröffnet somit neue Perspektiven für Interventionen. Übungsprogramme, die sowohl die kognitive Leistungsfähigkeit als auch das emotionale Wohlbefinden fördern, könnten bedeutende Verbesserungen in der Lebensqualität bewirken.

2.1.4. Kognitive Ermüdung

Kognitive Ermüdung entsteht durch einen Zustand langanhaltender Belastung durch kognitive und neuronale Prozesse [26] und lässt sich durch das Gefühl von Müdigkeit und Erschöpfung, einhergehend mit dem Unvermögen eines einzelnen Individuums, beschreiben, kognitive Arbeitsabläufe konzentriert weiterzuführen bzw. zu vollenden [1]. Des Weiteren lässt sich dem Zustand mentaler Ermüdung eine gehemmte Konzentrationsfähigkeit, eine verminderte Wachheit, eine unsortierte Gedankenstruktur und eine langsame Reaktionsfähigkeit zuschreiben [27]. Es ist hinzufügen, dass durch kognitive Ermüdung ebenfalls eine Minderung des individuellen subjektiven Wohlbefindens [28-29], einhergehend mit einem Mangel an intrinsischer Motivation für weiterführende kognitiv anspruchsvolle Aufgaben [30-31], beobachtet werden konnte. Zur weiteren Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Ermüdungsprotokolls, siehe Anhang 8, Appendix.

2.1.5. Neuroanatomische Grundlagen

Neurophysiologische Untersuchungen im hier beschriebenen Rahmen zeigten ebenfalls äußerst interessante Ergebnisse. Rezidivierende Zustände akuter mentaler Ermüdung korrelieren mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit der Chronifizierung eines kognitiven Erschöpfungszustandes, der mit langfristigen biophysiologischen Alterationen der Struktur und Funktion des zentralen Nervensystems einhergehen kann [32]. Der positive Effekt von Ausdauerbelastungen auf neuroanatomische Strukturen basiert auf mehreren Hypothesen, die anführend erwähnt werden sollten. Hierbei ist zu beachten, dass diesbezüglich eine Vielzahl an Publikationen vorliegt, die alle beachtenswert sind, jedoch nun exemplarisch zusammengefasst werden.

Endo et al. [33] bestätigten den positiven Einfluss von aerober Belastung auf die gemessene neuronale Aktivität. Die gemessene Zeit zur Bewältigung des Stroop-Tests konnte signifikant mit dem Anstieg der präfrontalen Oxygenierung (Oxy-Hb > Desoxy-Hb) im Rahmen einer Ergometer-gesteuerten aeroben Ausdauerübung gesenkt werden. Unterstützend zeigte eine weitere durchgeführte Studie von Yanagisawa et al. [34], dass die Stroop-Test-Zeit, einem Test zur Farb-Wort-Interferenz-Test zur Prüfung der selektiven Aufmerksamkeit [35], ebenfalls unter der durch aerobe Belastung gesteigerten Aktivierung des dorsolateralen präfrontalen Kortex der linken Hirnhemisphäre signifikant reduziert wurde. Dies lässt sich unter anderem durch die verbesserte Durchblutung der beschriebenen Hirnareale und die damit einhergehende Verbesserung kognitiver Leistungen und Exekutivfunktionen erklären [36]. Ebenfalls erklärte Dietrich [37] bereits 2006, dass eine zugrundeliegende Erklärung für eine solch herbeigeführte reflektorische Aktivierung des beschriebenen zerebralen Gebiets an einer – durch eine motorisch anspruchsvolle Arbeitsleistung induzierten – Hypoperfusion kognitiver Areale mit einer darauffolgenden Hyperperfusion mit sauerstoffreichem Blut ebendieser liegen könnte.

Weiter wird diskutiert, welchen Einfluss die unter aerober Belastung angepasste Hormonausschüttung auf die kognitive Leistungsfähigkeit hat. Zimmer et al. fassen in ihrer Arbeit von 2015 das grundlegende Verständnis des hormonellen Einflusses auf die neuronale Exekutivfunktion zusammen [38]: hier finden u.a. die Hormone brain-derived neurotrophic factor (BDNF), vascular-endothelial growth factor (VEGF) sowie der insuline-like growth factor 1 (IGF-1) Erwähnung. Es wird beschrieben, dass diese nicht nur die Synthese neuen Gewebes einleiten, sondern auch das Gesamtvolumen und somit idealerweise die Leistungsfähigkeit des menschlichen zentralen Nervensystems (ZNS) erhöhen können. Ebenfalls wird diesen Hormonen hier auch ein

neuroprotektiver und regenerativer Effekt zugesprochen, der hilft, langfristig die synaptische Plastizität zu stärken und zu erhalten [39].

Schmolesky et al. [40] beschreiben den Effekt bzw. die Rate der Ausschüttung des, zum Überleben und Wachsen neuronaler Zellen essentiellen [41], Neurotrophins BDNF unter aeroben Betätigung – insgesamt wurde eine 45 Prozent höhere Serumkonzentration bei den Belastungsgruppen im Vergleich zur Kontrollgruppe nachgewiesen. BDNF wird weitergehend die Funktion eines grundlegenden Moleküls zur Bildung und zum Erhalt zerebraler Plastizität zugeschrieben. Hierbei ist zu beachten, dass dies im Rahmen von kognitiven Erinnerungsfunktionen für das gesunde, jedoch auch das pathologisch beeinträchtigte Gehirn, beispielsweise im Rahmen neurodegenerativer und neuropsychiatrischer Erkrankungen, gilt [42]. Eine weitere wissenschaftliche Arbeit konnte ebenfalls die direkte Korrelation zwischen der erhöhten Ausschüttung von BDNF während langfristiger, regelmäßiger sportlicher Aktivitätsübungen und der kognitiven Funktion älterer Probanden nachweisen [43]. Aktuelle Arbeiten von Vital et al. [44] und Karakilic et al. [45] weisen darauf hin, dass die Gesamtausschüttung und Produktion des zuvor genannten VEGF ebenfalls durch Ausdauersport gesteigert werden. Vor diesem Hintergrund wird geschlussfolgert, dass durch eine gesteigerte Neurogenese, aber auch Angiogenese, die im Tierexperiment im Bereich des Hippocampus von männlichen Ratten nachgewiesen werden konnte, eine Verbesserung der Domänen der Lern- und Erinnerungsfunktion [45] erreicht wird. Des Weiteren sind therapeutische Ansätze mit einer retrograd-viralen intrazellulären VEGF-Applikation beschrieben worden, die im Mausmodell positive Auswirkungen auf die motorische Leistungsfähigkeit und das Gesamtüberleben bei neurodegenerativen Erkrankungen wie z.B. der amyotrophen Lateralsklerose zeigen konnten [39]. Eine ähnlich positive Auswirkung konnte ebenfalls bei einem Mausmodell für IGF-1

beobachtet werden [46]. Yu et al. [47] stellten zudem fest, dass Bewegungsübungen das Zellwachstum im Bereich des Hippocampus – also dem zerebralen Areal, das Lernen und Erinnern ermöglicht [48-49] – moduliert und stimuliert haben. In der von Yu et al. durchgeführten Studie wurde nach 15 Tagen regelmäßiger freiwilliger Laufradübungen bei Nagern festgestellt, dass es zu einer signifikanten Erhöhung der Proliferationszellen, der Konzentration an für BDNF und IGF-1 kodierenden mRNA sowie der Proteinkonzentration dieser Hormone im Gyrus dentatus gekommen ist. Weiter positiv beeinflusst zeigten sich außerdem Regionen im Bereich der Amygdala [50-51] sowie des Striatums [52-53].

Aktuelle Publikationen zeigten ferner signifikante Erhöhungen der aktivierenden Neurotransmitter Adrenalin und Noradrenalin unter aerober Belastung [54-56] und konnten entsprechend einen Zusammenhang mit der Verbesserung der psychomotorischen Leistungsfähigkeit feststellen [57]. Ebenfalls wird berichtet, dass der zelluläre Stoffwechsel zerebraler Neurone durch akute aerobe Belastung gesteigert wird [58].

Es lässt sich somit zusammenfassen, dass sportliche Betätigung höhere neuronale Funktionen verbessern kann – dies gilt sowohl für regelmäßige [59] als auch für eine akute Einheit sportlicher Bewegung [52-53]. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass sich im klinischen Rahmen vor allem Volumenbestimmungen einzelner Hirnareale durch MRT-Aufnahmen [60] oder Durchblutungsmessungen mittels Nahinfrarotspektroskopie [33] als einfach durchzuführende, nicht-invasive Diagnostikmaßnahmen bewährt haben. Die in-vivo Messung zentraler Hormonkonzentrationen stellt sich beim Menschen entsprechend komplizierter dar,

sodass hier zumindest angenommen werden kann, dass der peripher gemessene Anstieg der beschriebenen zerebral-wirksamen Hormone „gemessen an der arteriovenösen Differenz zwischen der Arteria radialis und der Vena jugularis interna vor, während und nach verschiedenen Ausdauerbelastungen“ [38] adäquat widergespiegelt wird [38].

2.1.6. Einfluss sportlicher Aktivität auf kognitive Exekutivfunktionen

Kognitive Flexibilität, eine der drei primären Exekutivfunktionen des menschlichen Verstands, ist definiert als die Anpassungsfähigkeit mentaler Prozesse an eine neue, kognitiv anspruchsvolle Aufgabe bzw. die Leichtigkeit, mit der eine solche Adaption stattfindet, um zielgerichtete Reaktionen auf äußere, neu verarbeitete, Stimuli durchführen zu können [61]. Ebenfalls wird diese Exekutivfunktion als „goal-shifting ability“ [62] bezeichnet, also die Fähigkeit, zielgerichtete Handlungen einer neuen Aufgabe anzupassen. Der menschliche Verstand hat mittels kognitiver Flexibilität, der Exekutivfunktion, die sich erst im späteren Verlauf der geistigen Reifung entwickelt [63], eine Möglichkeit geschaffen, neue Herangehensweisen für bisher unbekannte Probleme oder neugeschaffene Situationen zu entwickeln. Somit scheint das gedankliche Lösungskonstrukt, das uns tagtäglich adaptiv zur Seite steht, unverzichtbar, um kognitiv fordernde Aufgaben zu bewältigen. Ein erprobtes Werkzeug zur objektivierten Ermittlung und Quantifizierung bietet der sogenannte Trail Making Test (TMT). Entwickelt von Ralf Reitan, einem US-amerikanischen Neuropsychologen, war der Test initial zur allgemeinen neuropsychologischen Intelligenzmessung dienlich [64]. Seit den 1950er Jahren findet der Test jedoch zunehmend Anwendung zur Messung und Quantifizierung der Verminderung der kognitiven Leistung durch neurologische Schäden und Erkrankungen [65]. Testteil

TMT A besteht aus einer einfachen Zahlenfolge (1-25), die im computerisierten Setting mittels Mausklicks verbunden wird. Testteil TMT B besteht aus einer ähnlichen Verbindungsaufgabe, jedoch wird hier eine Zahlenfolge (1-13) durch entsprechenden Buchstaben (A-L) ergänzt. Ziel der beiden Testreihen ist es, eine schnellstmögliche fehlerfreie Verbindung zwischen den angegebenen Items herzustellen. Hierbei ergibt sich, dass Teil A die allgemeine Geschwindigkeit einer kognitiven Prozessierung misst, während Teil B ein Assessment für höhere kognitive Funktionen darstellt [64, 66-67]. Neuere Studien zeigen, dass vor allem die Verwendung von Testteil TMT B für die Messung kognitiver Ermüdung sinnvoll ist [68-70]. Mit einer Retest-Reliabilität von $r = 0.86-0.94$ für TMT B zeigt sich auch hier ein weiteres wissenschaftliches Qualitätsmerkmal des Tests [71].

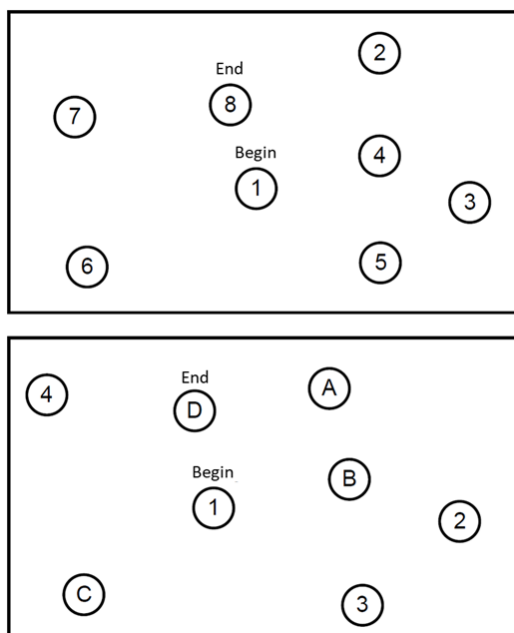


Abbildung 1: Testvarianten des TMT. Hier wird TMT A als obere Abbildung und TMT B als untere Abbildung dargestellt.

An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass kognitive Flexibilität nicht unabhängig von kognitiver Inhibition (s.u.) funktionieren kann [22].

Inhibition ist definiert als die Fähigkeit, mentale Prozesse zu koordinieren, Gedanken und Verhalten zu regulieren und dabei dominante oder vorherrschende Reaktionen zu überschreiben bzw. zu unterdrücken [61]. Statt einer reflexartigen Antwort besteht somit die Möglichkeit, eine adäquate Reaktion auf einen Reiz durchzuführen. In Abwesenheit einer solchen regulierenden Funktion wäre der menschliche Verstand lediglich Opfer äußerer Reize und würde weder Gelerntes noch Erinnertes selektiv filtern und zielgerichtet anwenden können. Kurz, der menschliche Verstand verlöre die Möglichkeit der Selbstbeherrschung und der selektiven Wahrnehmung von visuellen, auditiven oder olfaktorischen Reizen [22]. Ebenfalls würde der Mensch die Möglichkeit verlieren, rationale, zielgerichtete, freiwillige top-down gerichtete Entscheidungen zu treffen [72]. Im Sinne der Vollständigkeit sollte hier die dritte primäre Kognitivfunktion des Menschen nicht unerwähnt bleiben: das Arbeitsgedächtnis. Dieses ist definiert als die Fähigkeit, bereits erlernte Informationen in Erinnerung zu behalten und diese in ein Netz möglicher Lösungsstrategien für künftige Probleme einzuweben [22].

Interessanterweise sind für die Verarbeitung einer solchen kognitiven Kontrolle die folgenden Areale des menschlichen Gehirns verantwortlich: der bereits erwähnte präfrontale Kortex, der Nucleus caudatus sowie der Nucleus subthalamicus [22, 73]. Wie in mehreren Studien beobachtet werden konnte, zeigt sich diese Domäne der menschlichen Exekutivfunktionen als besonders vulnerabel und beeinflusst durch einen Zustand mentaler Erschöpfung [74-75].

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass unter Einfluss einer akut-induzierten Ausdauerbelastung die Leistung im Bereich der kognitiven Flexibilität, der Inhibition und dem Arbeitsgedächtnis signifikant verbessert werden konnte – unabhängig von

den vorliegenden Studien-Populationen der jeweiligen Publikationen [58, 76-77]. Es lässt sich also annehmen, dass dies im Status kognitiver Ermüdung ein probates regeneratives Mittel sein könnte, um folgenden kognitiv und exekutivfunktionell anspruchsvollen Aufgaben zu begegnen.

2.1.7. Einfluss sportlicher Reize auf das subjektive Wohlbefinden und die intrinsische Motivation

Basso et al. [78] und Reed & Ones [79] beschreiben in ihren zusammenfassenden metaanalytischen Arbeiten, welchen positiven Einfluss sportliche Betätigung auf das subjektive Wohlbefinden hat. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden verschiedene positive Eigenschaften solcher Übungen genannt. Prinzipiell gilt, dass sportliche Belastung einer der besten Wege ist, subjektiv wahrgenommene schlechte Laune bei gesunden [80], aber auch psychisch erkrankten [81-82] Probanden signifikant zu verbessern. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass mittelschwere aerobe Übungen (60 Prozent der individuellen $\dot{V}O_2\text{max}$) helfen können, ein subjektives Gefühl von Müdigkeit und Fatigue zu verbessern – interessanterweise konnte dieser benefitäre Effekt nach bereits 10 Minuten nachgewiesen werden, steigerte sich im Laufe über 20 Minuten und verstärkte sich auch mit längerer Trainingsdauer nicht weiter [83]. Klinische Studien und Studien am Tiermodell konnten sportlicher Betätigung ebenfalls anxiolytische und stressreduzierende Wirkungen zuschreiben [84]. Erklärungstheorien beschreiben in diesem Zusammenhang u. a. eine günstige und stressreduzierende Alternierung der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-Achse [85] und eine herabgesetzte Reaktivität auf erhöhte und stressinduzierende Serumkortisollevel bei gesunden Probanden [86]. Im Bezug hierzu

soll der schon beschriebene Neurotransmitter BDNF Erwähnung finden. Aktuelle Studien berichten zunehmend von Korrelationen zwischen subjektivem Wohlbefinden (vor allem im Rahmen psychiatrischer Symptomkomplexe einhergehend mit Depressionen) und der gemessenen BDNF-Konzentration [87-90]. Im Tiermodell konnte zudem eine anxiolytische ebenso wie eine abgeschwächte Stressreaktion [91] und ein stimmungsstabilisierender, antidepressiver Effekt [92] mit steigenden IGF-1 Konzentrationen nachgewiesen werden. Eine Einheit akuter sportlicher Belastung initiierte ebenfalls positive Effekte im Bereich der selbstwahrgenommenen Motivation. So konnte nicht nur gezeigt werden, dass ein positiver Effekt durch sportliche Aktivität auf das subjektive Wohlbefinden induziert wird. Die intrinsisch wahrgenommene allgemeine Motivation und die spezifische Motivation, weitere kognitiv-anspruchsvolle Aufgaben zu bewältigen, konnten ebenso signifikant verbessert werden [81-82].

2.1.8. Vorliegende Studienlage

In Anbetracht der angegebenen Studienlage ist es bemerkenswert, dass bisher nicht intensiver im Bereich der Möglichkeiten der kognitiven Regeneration durch akutes körperliches Training geforscht wurde, lässt sich dieses doch theoretisch gut und nebenwirkungsfrei [93] in unseren Alltag implementieren. Diese Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, genau diese Lücke intensiver zu beleuchten und die Verbindung zwischen kognitiver Erholung, dem emotionalen Wohlbefinden und einer einfach in den Alltag implementierbaren Strategie zur Verbesserung dieser zu schaffen. Hierzu wurden mittels einer randomisiert-kontrollierten Studie Daten gesammelt, die erklären sollen, welchen positiven Einfluss eine akute sportliche Belastung haben kann. Des Weiteren wird im Rahmen einer Diskussion eine Analyse der ermittelten Daten vollzogen, Stärken und Schwächen des Studiendesigns begutachtet und Limitationen genannt,

welche in zukünftigen wissenschaftlichen Arbeiten ebenfalls Beachtung finden sollten. Die vorliegende Arbeit beinhaltet somit die erste Studie, die den Zusammenhang zwischen einem akuten aeroben Belastungsgreiz und der kognitiven Regenerationsfähigkeit – vor allem in Bezug auf kognitive Flexibilität – dem subjektiv wahrgenommenen Wohlbefinden und der intrinsischen Motivation für anspruchsvolle Aufgaben herstellt. Ziel dieser Dissertationsschrift ist die Beantwortung der Frage, ob eine einmalige aerobe Belastung bereits ausreichend sein kann, um ein höheres Maß an Erholung (nach Erreichen des Zustands einer kognitiven Ermüdung), im Vergleich zu einer aktiven und passiven Kontrolle, der oben genannten Domänen zu erreichen. Vor diesem theoretischen Hintergrund lässt sich das Ziel der vorliegenden Studie definieren. Dies liegt darin, den potenziellen positiven Effekt einer einzigen Einheit mittlerer aerober Belastung auf die Regeneration nach experimentell induzierter kognitiver Ermüdung zu erfassen. Die Untersuchung umfasst die Interpretation des Regenerations-Effekts durch akute aerobische Belastung auf die kognitive Flexibilität und Aspekte des subjektiven Wohlbefindens wie Stimmung, geistige Wachheit, Ruhe, sowie die selbst-wahrgenommene kognitive Leistungsfähigkeit und intrinsische Motivation zur Bewältigung einer kognitiv anspruchsvollen Aufgabe. Dadurch soll nicht nur ein besseres Verständnis über Bewältigungsstrategien bei kognitiver Ermüdung entstehen, sondern auch die Verknüpfung von physiologischen Vorgängen mit psychisch-verhaltenswissenschaftlichen Mustern erstellt werden.

Vorliegende Metaanalysen fokussieren sich oft auf die anhaltenden Effekte regelmäßiger körperlicher Aktivität auf die kognitive Leistungsfähigkeit, was klinisch und gesellschaftlich unbestreitbar von hoher Relevanz ist. Die vorliegende Arbeit hebt jedoch gezielt die kurzfristigen Effekte einer einmaligen aeroben Einheit hervor: innerhalb der Domäne der kognitiven Regeneration und des individuellen

Wohlbefindens. Diese kurzfristigen Effekte sind von besonderer Bedeutung, da sie unmittelbar im Alltag nutzbar sind. Eine einzelne, moderat-intensive Bewegungseinheit erfordert nur minimalen Zeitaufwand, ist leicht in den Tagesablauf integrierbar und kann dennoch Verbesserungen der kognitiven Flexibilität, der Aufmerksamkeit und des subjektiven Wohlbefindens nach einem Erschöpfungszustand bewirken.

2.2. Fragestellung und Ziel der Arbeit

Eine kurzfristige Intervention bietet eine praktische Lösung, um geistige Ermüdung schnell zu bekämpfen und die kognitive Leistungsfähigkeit wiederherzustellen. Darüber hinaus könnten solche Interventionen auch in klinischen Kontexten eingesetzt werden, etwa bei Patienten mit neurologischen oder psychischen Erkrankungen, die möglicherweise nicht in der Lage sind, sich langfristig auf körperliche Programme einzulassen.

Die damit einhergehenden Zielsetzungen der Studie lauten:

- Das Potential einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zu einer aktiven Kontrollgruppe zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung der kognitiven Flexibilität zu evaluieren.
- Das Potential einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zu einer aktiven Kontrollgruppe zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung des subjektiven Wohlbefindens (Stimmung, geistige Wachheit, Ruhe, sowie die selbst-

wahrgenommene kognitive Leistungsfähigkeit und intrinsische Motivation zur Bewältigung einer kognitiv anspruchsvollen Aufgabe) zu evaluieren

- Das Potential einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zum Anschauen einer Episode einer Sitcom zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung der kognitiven Flexibilität zu evaluieren.

- Das Potential einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zum Anschauen einer Episode einer Sitcom zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung des subjektiven Wohlbefindens (entsprechend den o. g. Parametern) zu evaluieren.

3. Material und Methoden

3.1. Publikation

Das Paper „Acute aerobic exercise to recover from mental exhaustion – a randomized controlled trial“ wurde im Journal Physiology & Behavior, Jahrgang 2021, Ausgabe 241, am 11.09.2021 veröffentlicht [94]. Die Anteile der Arbeit „Methoden“ und „Ergebnisse werden durch die beiliegende Veröffentlichung ersetzt.



Acute aerobic exercise to recover from mental exhaustion – a randomized controlled trial

Max Oberste^{c,1}, Pascal de Waal^{b,1}, Niklas Joisten^{a,d}, David Walzik^a, Marius Egbrinchoff^b, Florian Javelle^a, Wilhelm Bloch^a, Philipp Zimmer^{d,*}

^a Department of Molecular and Cellular Sport Medicine, Institute of Cardiovascular Research and Sports Medicine, German Sport University Cologne, Am Sportpark Müngersdorf 6, 50933 Cologne, Germany

^b Medical Faculty, University of Cologne, Robert-Koch-Straße 10, 50931 Cologne, Germany

^c Institute of Medical Statistics and Computational Biology, Faculty of Medicine, University of Cologne, Cologne, Germany

^d Department of "Performance and Health (Sports Medicine)", Institute for Sport and Sport Science, TU Dortmund University, Otto-Hahn-Straße 3, 44227 Dortmund, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:

Cognitive performance
Regeneration
Cognitive flexibility
Subjective well-being
Motivation

ABSTRACT

Purpose: Prolonged periods of intense cognitive activity lead to a state of mental exhaustion. While widespread strategies to recover from mental exhaustion (i.e., watching TV) are non-effective, aerobic exercise seems to be a promising approach. This can be explained by the acute and chronic aerobic exercise-induced benefits on the central nervous system.

Methods: This study investigated the potential of a single bout of moderate aerobic exercise (65–75% of each participants' individual VO₂peak) to recover from experimentally induced mental exhaustion. A randomized controlled trial on healthy adults ($N = 99$) was conducted. They performed 60 min of a cognitively demanding test battery, in order to induce mental exhaustion. Subsequently, they were randomized to one of three treatments: 30 min of moderate aerobic exercise on a cycle ergometer, 30 min of a simple lower body stretching routine (= active control treatment) or watching a popular sitcom (= passive control treatment). Cognitive flexibility performance, mood, tiredness, restlessness, self-perceived cognitive capacity, and motivation were assessed before and after treatment.

Results: The empirical results showed that moderate aerobic exercise led to a better recovery for cognitive flexibility (mean difference divided by pooled standard deviation, Cohen's $d = 0.737$), mood ($d = 0.405$), tiredness ($d = 0.480$), self-perceived cognitive capacity ($d = 0.214$), and motivation ($d = 0.524$) compared to active control treatment. Moderate aerobic exercise was also more effective than passive control treatment ($d = 0.102 - 0.286$) with the exemption of tiredness ($d = 0.015$) and restlessness ($d = -0.473$).

Conclusion: In conclusion, this study suggests that a single bout of acute aerobic exercise supports regeneration of cognitive flexibility performance and of subjective well-being. This holds true not just compared to artificial active control treatment but also compared to widespread leisure time activity, namely watching TV.

1. Introduction

Prolonged periods of intense cognitive activity decrease neuronal activation and deteriorate top-down processes from prefrontal cortical areas [1,2]. Consequently, a state of mental exhaustion arises [3], that is characterized by a decline in cognitive performance and deterioration of subjective well-being [4,5] as well as intrinsic motivation [6,7]. In work environments, mental exhaustion negatively impacts productivity [8].

Furthermore, it increases the risk of errors and occupational accidents. In professions, such as surgeons [9,10], air traffic controllers, and pilots [11,12], mental exhaustion can have life-threatening consequences. Moreover, frequent mental exhaustion leads to a lasting psychological state of mental fatigue with permanent alterations in brain structure and function [13]. These include significant volume decreases in white and gray matter [14,15], and changes in EEG activity and cognitive processing [16].

* Corresponding author at: Technische Universität Dortmund, Otto-Hahn-Straße 3, 44227 Dortmund, Germany.

E-mail address: philipp.zimmer@tu-dortmund.de (P. Zimmer).

¹ These authors share first position.

Widespread strategies to recover from mental exhaustion, such as watching TV or smoking [17] are not effective and even detrimental [18–20]. Nevertheless, research on healthy and effective ways to recover from mental exhaustion is scarce. A promising approach to this problem is aerobic exercise. Evidence shows that already a single session of aerobic exercise leads to several positive adaptations within the central nervous system (e.g., increases in prefrontal oxygenation [21] and increases in circulating neurotrophins [22]). At the behavioral level,

a large number of studies shows that cognitive performance improves following a single bout of aerobic exercise [23]. Interestingly, a plethora of evidence exists for acute aerobic exercise induced benefits of cognitive flexibility deficits [24,25], which seems to be particularly susceptible for mental exhaustion-induced deterioration [26,27]. Concerning subjective well-being, aerobic exercise can improve mood states [28, 29], feelings of tiredness [30] and nervousness [31]. Additionally, a single session of exercise is associated with higher levels of motivation

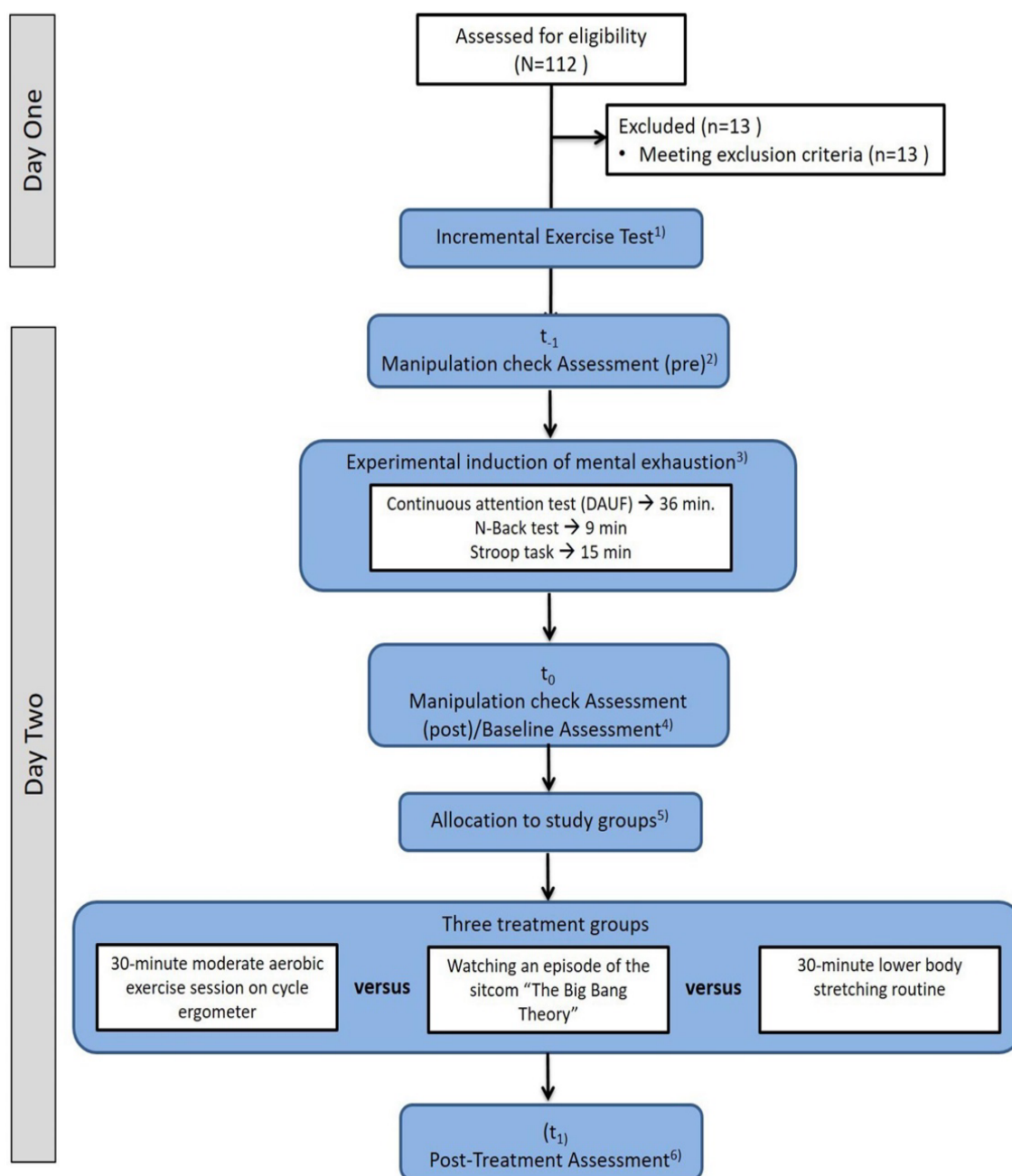


Fig. 1. (Note: 2 columns width; colored) Flowchart of the study. (1) Incremental Exercise Test was used to control training load in exercise group. Details of the Incremental Exercise Test protocol are described in the Supplementary Material to this article; (2) To control for success of manipulation of mental exhaustion, prior to and after mental exhaustion induction, study outcomes were captured. These comprised of cognitive flexibility measurement (Trail Making Test part B), measurement of mood, mental alertness, restlessness (via Multidimensional Mood State questionnaire), as well as self-perceived cognitive performance capacity and motivation (visual analogue scales) (3) Participants worked for 60 min on a demanding cognitive test battery, which comprised of a continuous attention test (DAUF), a N-Back test, and a Stroop task (4) The manipulation check post-Assessment was equal to the Baseline Assessment (t_0) of the study and comprised the study outcomes (5) A randomization with balanced allocation 1:1:1 was conducted (6) Post-Assessment (t_1) was conducted immediately after cessation of treatment and comprised of the study outcomes.

for subsequent tasks [32,33].

In this randomized controlled trial, we investigated the potential of a single bout of moderate aerobic exercise to recover from experimentally induced mental exhaustion. We examined the effects of exercise on the regeneration of cognitive flexibility performance, as well as on subjective well-being; namely, on mood, mental alertness, nervousness, self-perceived cognitive performance capacity, and motivation for cognitively demanding tasks after reaching mental exhaustion. The recovery potential of aerobic exercise was compared to the recovery potential of watching TV and to a lower body stretching routine. In conclusion, the primary aim of this study was to test the hypothesis that 30 min of moderate aerobic exercise improves the recovery of cognitive flexibility performance after cognitive exhaustion significantly more than active and passive control treatments. A secondary aim was to test the hypothesis that 30 min of moderate aerobic exercise improves the recovery of subjective well-being, after cognitive exhaustion has occurred, significantly more than active and passive control treatments. A detailed overview (Table 1) on tested hypotheses can be found in the Supplementary Material of this article.

2. Methods

2.1. Trial design

A randomized controlled study with three different treatment groups was conducted (balanced allocation ratio, 1:1:1). Randomization was implemented based on sealed, opaque envelopes provided by a co-worker who was not further involved in the study. The randomization sequence was generated using SPSS Statistics software (random number seed). The study groups comprised of a single bout of 30 min moderate aerobic exercise on a cycle ergometer, watching an episode of a popular sitcom (= passive control treatment), and a simple lower body stretching routine (= active control treatment) (refer to 2.4. Treatments). All treatments were administered after an experimental induction of mental exhaustion through 60 min of a cognitively demanding test battery. The study flow-chart is depicted in Fig. 1. The study protocol was approved by the Ethics Committee of the German Sport University (Germany) and registered at the German Clinical Trial registry (DRKS00014746). Participants were included in the study only after they gave written informed consent. The study conformed to the Declaration of Helsinki.

2.2. Participants

Participants were young healthy adults, who were students from the German Sport University Cologne. Participants were blinded to the research hypothesis in order to avoid biases due to expectations. Participants were not aware that the first part of the cognitive test battery aimed to mentally fatigue them (see details in 2.3. Procedures). The only inclusion criterion was to be 18 years of age or older. Exclusion criteria comprised of acute infections, any history of or acute cardiopulmonary, metabolic, neurological or psychiatric diseases, any limitation in the ability to exercise or complete the cognitive testing procedures, any consumption of legal psychoactive substances (including caffeine and nicotine) prior to testing, and any consumption of illegal or prescription medication during the previous month. The total number of participants was $N = 99$ with 47 females and 52 males enrolled in the study.

2.3. Procedures

This study was conducted at the Institute for Cardiology and Sports Medicine of the German Sport University (Cologne, Germany) on two non-consecutive days. On the first day of their visit, participants gave demographic/anthropometric data and completed an incremental exercise test to determine their peak oxygen uptake ($\text{VO}_{2\text{peak}}$). The detailed protocol of the incremental exercise test can be found in the Supplementary Material to this article.

Intelligence is closely associated with cognitive performances [34–37]. Sleep quality and caffeine use can alter cognitive performances [38–40]. To avoid confounding of these variables participants' intelligence was captured using the Multiple-Choice Vocabulary Intelligence Test [41]. Sleep quality was captured using the Pittsburgh Sleep Quality Index [42]. Moreover, participants were instructed to refrain from caffeine prior to testing. All tests were performed only on weekdays between 9:00 a.m. and 1:00 p.m.

On day two, participants worked for 60 min on a demanding cognitive test battery to induce a state of mental exhaustion. The procedure was similar to the one used by Tanaka and colleagues [43]. The cognitive test battery comprised of a continuous attention test, an N-Back test, and a Stroop-task. All tests were computerized and operated via the 'Wiener Test-System' (Schuhfried, Vienna, Austria) (further details on the test battery are described in the Supplementary Material to this article). Participants were not aware that this cognitive testing was not an actual study endpoint but only used to mentally exhaust them. Thus, participants were more likely to stay motivated and to work focused during the mental exhaustion manipulation. To control for success of mental exhaustion manipulation, study outcomes (see details in 2.4. Treatments) were captured prior to (t_1) and after mental exhaustion manipulation (t_0). Subsequently, participants were randomly assigned to one of the three study groups and allocated treatment was carried out. Immediately after cessation of treatment, post-treatment assessment (t_1) was carried out, which comprised of the below described study outcomes.

2.3.1. Treatments

Aerobic exercise group: Thirty minutes exercise on a cycle ergometer (Lode Excalibur Sport, Groningen, Netherlands) at an intensity corresponding to 65–75% of the participants' individual $\text{VO}_{2\text{peak}}$ (as measured during incremental exercise test). The intensity was controlled using heart rate, which was measured with a Polar 92053123T31 Chest belt by Polar Electro Oy (Kempele, Finland). If heart rate would decrease under the heart rate corresponding to 65–75% of the participants' individual $\text{VO}_{2\text{peak}}$ workload was increased automatically. If heart rate would increase over that boundary workload was decreased.

Passive control group = Sitcom watching group: Watching an episode of the sitcom "The Big Bang Theory" (Episode 1, Season 4) on a laptop computer while sitting at a desk.

Active control group: Thirty minutes of simple lower body stretching routine were supposed not to induce cardiovascular arousal. A similar routine was applied in a former study [44] and it consisted of lower body stretches using basic foam roller exercises for the quadriceps femoris muscle, calf muscles, hamstrings, iliotibial band and gluteal region. Each exercise was performed for 30 s in two sets. In addition, a one-minute break was taken between each exercise. For further details on the stretching exercises refer to Junger and Stöggel [44].

The time spent on interventions was the same for each group.

2.4. Outcomes

Cognitive flexibility performance, mood, tiredness, nervousness, self-perceived cognitive performance capacity, and motivation for cognitively demanding tasks subjective symptoms were measured prior to (t_1) and after mental exhaustion manipulation (t_0), as well as directly following allocated treatment (t_1).

2.4.1. Cognitive flexibility performance measures

Cognitive flexibility is the ability to adapt cognitive processing strategies to face new and unexpected conditions in the environment. It is a core domain of executive functions [45]. In the present study, cognitive flexibility performance was measured using part B of the Trail Making Test [46], which has been used before in studies as a tool to measure mental fatigue [26, 47,48]. The test was computerized and

operated via the testing platform 'Wiener Testsystem' (Schuhfried, Vienna, Austria [49]). In this test, participants are supposed to connect the numbers "1" – "13" and the letters "A" – "L" alternating in ascending order ("1" – "A" – "2" – "B" etc.) as fast as possible. The time to complete part B represents cognitive flexibility performance [46] and was therefore used in this study as an outcome measure. A smaller value reflects a better cognitive flexibility performance. Retest reliability of TMT B was stated as $r = 0.86 - 0.94$ [50].

2.4.2. Subjective well-being scales

Mood, tiredness, and restlessness were measured using the Multidimensional Mood State Questionnaire [51]. This questionnaire contains 24 items. Each item represents two contradicting states (e.g., unhappy vs. happy) and is ranked using a Likert scale ranging from 1 = "not at all" – 5 = "extremely". Eight items each sum up to a score on a superordinate bipolar dimension, namely "bad mood vs. good mood", "tiredness vs. wakefulness", and "restlessness vs. calmness". The score on each dimension ranges from eight to 40 with lower scores representing a state of decreased subjective well-being and higher scores representing a state of increased well-being [52]. Cronbach's alpha of MDBF was reported as $\alpha = 0.66 - 0.92$ [51].

Participants self-perceived cognitive performance capacity and their motivation to work on cognitively demanding tasks were measured additionally using separate visual analogue scales [53]. Each scale was exactly 100 mm wide with extreme points labelled. The left endpoint always represented the low extreme (e.g., extremely low self-perceived cognitive performance capacity/ extremely low motivation for cognitively demanding tasks), the right endpoint the high extreme (e.g., extremely high self-perceived cognitive performance capacity/ extremely high motivation for cognitively demanding tasks). The number of millimeters between the low endpoint and participants' marking on each scale was used as measure for further analyses.

2.5. Sample size

Sample size calculation was done for the main hypothesis using G*Power 3.1.9.2 software [54]. As relevant effect size, a moderate effect ($d = 0.50$) was defined. Alpha was set at 5%. Test power ($1 - \beta$) was set at 80%. Participants' baseline values were included in the model as covariate. Required sample size in such an analysis of covariance model can be calculated as $(1 - \rho^2) \cdot n$, with ρ representing the correlation between participants' baseline and post-treatment outcome-scores, and n representing the sample size that would have been required if a t -test of post-treatment outcome-scores was applied [55]. We estimated the correlation between patients' baseline and at post-treatment values with $\rho = 0.70$. Under the presuppositions made, sample size calculation showed that 33 participants would be required in each group leading to a total sample size of $N = 99$.

2.6. Statistical methods

To check if mental exhaustion manipulation was successful, cognitive performance and subjective well-being were analyzed prior to and after manipulation attempt using dependent t -tests. As criterion for successful manipulation of mental exhaustion, a significant deterioration was defined a-priori. The main hypothesis was analyzed using one-factor analyses of covariance. The time to complete TMT part B at post-treatment assessment was defined as dependent variable in this analysis. "Treatment group" (acute moderate aerobic exercise group vs. active control group) was defined as between-subjects factor and time to complete TMT part B at baseline as covariate. The secondary hypotheses were also analyzed using one-factor analyses of covariance.

Dependent variables were mood, tiredness, and restlessness scores in the Multidimensional Mood State Questionnaire, as well as participants self-perceived cognitive performance capacity and their motivation to work on cognitively demanding tasks measured on visual analogue

scales at post-treatment assessment. "Treatment group" (acute moderate aerobic exercise group vs. passive control group vs. active control group) was defined as between-subjects factor and scores in the Multidimensional Mood State Questionnaire/visual analogue scales of the variables concerned at baseline as covariate. Pairwise comparisons of estimated marginal means of intervention groups were carried out using least significant difference. Analysis of covariance assumptions were examined and in case of violation corrections were carried out or non-parametric procedures were applied. Cohen's d values were calculated as effect size measures for group comparisons. Statistical analyses were conducted using SPSS 25® (IBM®, Armonk, NY, USA). A result was considered significant at a p -value equal to or less than 5%.

3. Results

All randomized participants received treatment and were included into analysis. Table 2 provides descriptive and anthropometric data of the tested sample.

3.1. Success of mental exhaustion manipulation

Participants' empirical data concerning cognitive flexibility performance, as well as subjective well-being before and after the mental exhaustion manipulation are presented in Table 3. The criterion for successful mental exhaustion manipulation was fulfilled for subjective well-being. Participants showed significantly worse mood ($d = -0.57$, $t = 6.15$, $p < 0.001$), significantly more tiredness ($d = -1.20$, $t = 7.27$, $p < 0.001$), significantly more restlessness ($d = -0.59$, $t = 2.52$, $p < 0.001$), significantly less self-perceived cognitive capacity ($d = -2.02$, $t = 13.55$, $p < 0.001$), and significantly less motivation for a cognitively demanding task ($d = -0.93$, $t = 8.16$, $p < 0.001$) after the mental exhaustion manipulation. However, the mental exhaustion manipulation applied in this study did not lead to a significant deterioration of cognitive flexibility performance. Participants' cognitive flexibility measured as performance in the TMT part B improved from before to after the mental exhaustion manipulation (see Table 3).

Table 2

Descriptive and anthropometric data of the tested sample (mean $\pm$ standard deviation).

	Aerobic exercise group ($n = 34$)	Active control group ($n = 32$)	Passive control group ($n = 33$)	Total ($N = 99$)	p -value*
Sex	$\varphi = 17 / \delta = 17$	$\varphi = 15 / \delta = 17$	$\varphi = 15 / \delta = 18$	$\varphi = 47 / \delta = 52$	0.93
Age (yr)	22.00 ± 3.47	21.00 ± 2.39	21.03 ± 4.59	21.61 ± 3.60	0.56
Height (m)	1.75 ± 0.09	1.75 ± 0.08	1.76 ± 0.08	1.76 ± 0.09	0.86
Weight (kg)	68.67 ± 10.97	69.12 ± 11.58	69.54 ± 10.76	69.83 ± 10.93	0.94
BMI (kg/m ²)	22.30 ± 2.16	22.52 ± 2.39	22.27 ± 2.24	22.46 ± 2.18	0.86
Heart rate (bpm)	66.81 ± 8.92	69.30 ± 10.78	71.44 ± 10.02	69.43 ± 10.05	0.22
VO ₂ peak (mL min ⁻¹)	49.92 ± 8.98	46.63 ± 9.23	48.25 ± 11.8	48.81 ± 7.26	0.26
MWT-B Score	29.24 ± 3.01	28.78 ± 2.38	28.39 ± 3.02	28.71 ± 2.90	0.52
PSQI Score	4.64 ± 2.70	4.28 ± 1.76	5.61 ± 3.12	4.83 ± 2.63	0.72

BMI = Body Mass Index; MWT-B = Multiple Choice Vocabulary Test; PSQI = Pittsburgh Sleep Quality Index; φ = Female; δ = Male.

p -values indicate significance of empirical differences between treatment groups for descriptive and anthropometric data.

Table 3Empirical data of the tested sample ($N = 99$) before and after mental exhaustion (mean $\pm$ standard deviation).

	Prior to mental exhaustion manipulation	After mental exhaustion manipulation	<i>p</i> -value of dependent <i>t</i> -test	Cohen's <i>d</i>
Cognitive flexibility	20.36 $\pm$ 5.49	18.44 $\pm$ 4.65	$p < 0.001$	-0.38
Tiredness vs. wakefulness	28.12 $\pm$ 6.78	19.47 $\pm$ 7.53	$p < 0.001$	-1.33
Bad mood vs. good mood	33.76 $\pm$ 5.52	30.28 $\pm$ 6.61	$p < 0.001$	-0.69
Restlessness vs. calmness	31.62 $\pm$ 5.22	27.87 $\pm$ 7.08	$p < 0.001$	-0.75
Cognitive capacity	7.04 $\pm$ 1.54	4.48 $\pm$ 2.04	$p < 0.001$	-1.62
Motivation	6.93 $\pm$ 1.83	5.53 $\pm$ 2.23	$p < 0.001$	-0.93

p = statistical *p*-value.

3.2. Success of exercise manipulation

At the end of t_1 , participants in the exercise group showed on average a heart rate of 149.67 bpm $\pm$ 20.53. The participants in the passive control group and active control group on average reached a heart rate at t_1 of 60.67 bpm $\pm$ 9.07 and 76.15 bpm $\pm$ 13.55, respectively. The increase in heart rate in the exercise group was significantly larger compared to the active ($d = 5.21$, $t = 18.29$, $p < 0.001$) and to the passive control group ($d = 4.30$, $t = 15.49$, $p < 0.001$). All participants in the exercise group were able to follow the protocol and stayed within the heart rate corresponding to 65–75% of the participants' individual VO_2 peak.

3.3. Recovery from mental exhaustion

Recovery from mental exhaustion was investigated in 99 participants (aerobic exercise group: $n = 34$, active control group: $n = 32$, passive control group: $n = 33$). Empirical data on how cognitive performance and subjective well-being changed from before to after treatments is summarized in Table 4. The table shows that cognitive flexibility performance, as well as the measures of subjective well-being improved from t_0 to t_1 in each treatment group. Fig. 2 shows the estimated marginal means (represented by the bars) and standard deviations (represented by the vertical line over each bar) of each treatment group and for each outcome. Effect sizes of pairwise comparisons, Cohen's *d* values, as well as the results of post hoc testing are also depicted in Fig. 2. The pairwise comparisons of the estimated marginal means of intervention groups depicted in Fig. 2 showed that, on average, the exercise group reported better cognitive flexibility performance, better mood, less tiredness, more motivation for cognitively demanding tasks, and more self-perceived cognitive performance capacity than the active control group. The exemption was restlessness, for which exercise group recovered slightly worse than active control group. On average, the exercise group also recovered better if compared to the passive control group. The only exemptions were tiredness, in which exercise group and passive control group showed almost identical recovery and restlessness,

Table 4Empirical data of the tested sample before and after respective treatment (mean $\pm$ standard deviation).

	Aerobic exercise group ($n = 34$)		Active control group ($n = 32$)		Passive control group ($n = 33$)	
	t_0	t_1	t_0	t_1	t_0	t_1
Cognitive flexibility	18.50 $\pm$ 4.91	16.16 $\pm$ 2.88	19.70 $\pm$ 6.03	17.26 $\pm$ 3.13	18.16 $\pm$ 3.68	18.12 $\pm$ 4.40
Tiredness vs. wakefulness	19.06 $\pm$ 6.52	26.21 $\pm$ 6.12	19.59 $\pm$ 8.37	26.56 $\pm$ 5.98	19.79 $\pm$ 7.85	24.18 $\pm$ 7.01
Bad mood vs. good mood	30.09 $\pm$ 6.29	33.88 $\pm$ 4.72	31.09 $\pm$ 6.97	34.19 $\pm$ 5.78	29.70 $\pm$ 6.69	32.21 $\pm$ 6.18
Restlessness vs. calmness	28.35 $\pm$ 5.61	31.38 $\pm$ 4.49	27.88 $\pm$ 8.40	32.81 $\pm$ 5.50	27.36 $\pm$ 7.22	31.33 $\pm$ 6.57
Cognitive capacity	4.25 $\pm$ 1.86	6.26 $\pm$ 1.73	4.45 $\pm$ 2.06	5.99 $\pm$ 2.15	4.73 $\pm$ 2.13	6.16 $\pm$ 1.90
Motivation	5.47 $\pm$ 2.33	6.91 $\pm$ 1.88	5.44 $\pm$ 2.39	6.45 $\pm$ 2.24	5.67 $\pm$ 2.01	6.24 $\pm$ 2.27

 t_0 = prior to treatment; t_1 = immediately following treatment.

in which the passive control group recovered better. However, overall testing of between-subjects factor "treatment group" on different outcomes did not reach significance for mood ($F(2, 95) = 1.47$, $p = 0.23$, $\eta^2 = 0.03$), restlessness ($F(2, 95) = 1.92$, $p = 0.15$, $\eta^2 = 0.04$), self-perceived cognitive performance capacity ($F(2, 95) = 0.55$, $p = 0.58$, $\eta^2 = 0.01$), or for motivation for a cognitively demanding task ($F(2, 95) = 2.30$, $p = 0.11$, $\eta^2 = 0.05$).

A small to moderate effect size was revealed for tiredness. This difference between did reach statistical significance ($F(2, 95) = 2.61$, $p = 0.08$, $\eta^2 = 0.05$) and a statistically significant moderate effect of between-subjects factor "treatment group" was revealed on cognitive flexibility performance ($F(2, 76) = 3.81$, $p = 0.03$, $\eta^2 = 0.09$). Pairwise comparisons revealed significant difference between exercise group and active control group ($p = 0.01$) for cognitive flexibility recovery. The difference between exercise group and passive control group ($p = 0.21$), as well as the difference between passive control group and active control group ($p = 0.12$) did not reach statistical significance for cognitive flexibility recovery.

4. Discussion

The aim of the present study was to investigate the potential of a single bout of moderate aerobic exercise to recover from experimentally induced mental exhaustion. We examined the recovery effect of acute moderate aerobic exercise on cognitive flexibility performance, shown through the results of TMT part B. Moreover, we investigated the recovery effects of acute moderate aerobic exercise on aspects of subjective well-being, namely on mood, mental alertness, calmness, self-perceived cognitive capacity, and motivation for a cognitively demanding task. The effect of exercise was compared to watching an episode of a popular sitcom (= passive control group treatment) and to active control group treatment.

The single bout of aerobic exercise applied in this study led to better recovery of participants' cognitive flexibility performance than active control treatment after mental exhaustion. The acute exercise treatment showed advantageous recovery effects also on subjective well-being compared to active control group treatment after mental exhaustion. Empirical data showed a uniform pattern with beneficial effects of exercise treatment on cognitive flexibility performance, mood, mental alertness, self-perceived cognitive capacity, and motivation for cognitively demanding tasks after mental exhaustion induction compared to active control group treatment (compare Fig. 2). The effect on cognitive flexibility performance was most pronounced reaching an almost large degree ($d = 0.737$) following Cohen's classification [56]. Concerning aspects of subjective well-being small to moderate effects were shown ($d = 0.149 - 0.524$). This is surprising - in participants who are not mentally exhausted, the effects of acute moderate aerobic exercise on subjective well-being were reported higher [28–33] than the effects on cognitive flexibility performance [23,24]. The described phenomenon that individuals with lower cognitive baseline levels benefit most from acute exercise [57–59] seems to hold true also for the transient cognitive decline with mental exhaustion. At the same time, this seems to be not the case for the examined aspects of subjective well-being.

In this study, potential of acute moderate aerobic exercise to recover from mental exhaustion was not only compared to active control

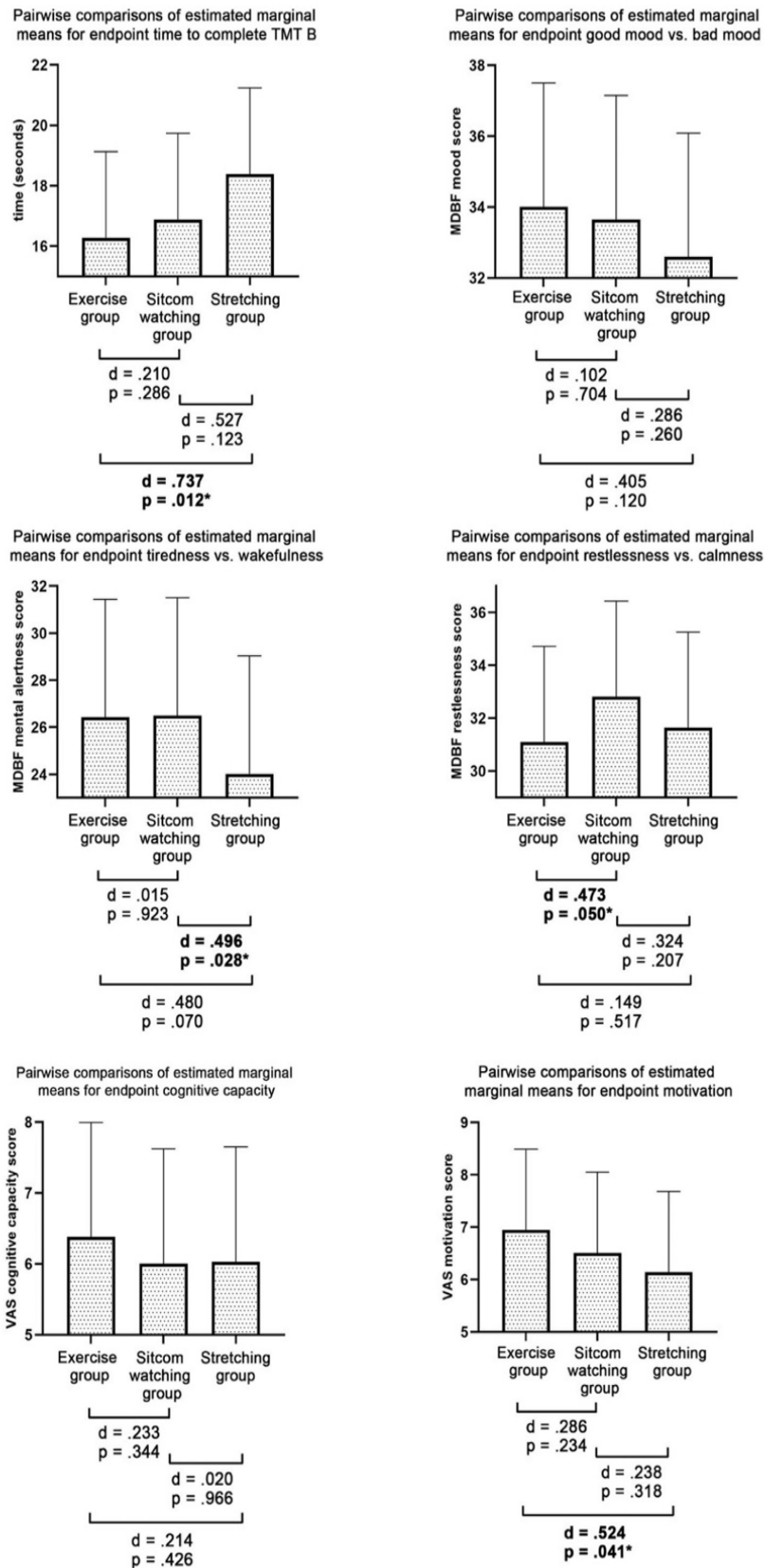


Fig. 2. (Note: 2 columns width) Pairwise comparisons of estimated marginal means for each group and for each outcome (mean $\pm$ standard deviation). TMT = trail making test; MDBF = multidimensional mood state questionnaire; VAS = visual analog scale; d = Cohen's effect size; p = statistical p -value.

treatment but also to a widespread strategy to recover from mental exhaustion, namely watching a sitcom (= passive control treatment) [17]. Acute aerobic exercise remained advantageous if compared to watching an episode of a sitcom. However, it is quite surprising that the recovery effects of acute exercise were smaller if compared to watching a sitcom than if compared to active control treatment for cognitive flexibility, mood, and motivation for a cognitively demanding task. In this study, watching a sitcom was more beneficial on the increase of calmness than exercise. Former research described watching TV as non-effective strategy to recover from mental exhaustion [17]. In addition, our findings show that 30 min of sitting while watching TV increase wakefulness. Former findings, which indicate that prolonged sitting while watching TV causes tiredness [60], were not replicated. However, existing studies that showed an increase in tiredness while sitting usually induce several hours of sitting.

The results presented here must be interpreted against the background of limitations. The participants of the present study were students at the German Sport University Cologne. This population can be described as physically fit and very active as practical exercise is part of their studies. If compared to the general population, the participants of the present study seem to be less prone to physical exhaustion. Experimental induction of mental exhaustion was successful concerning subjective well-being. However, the applied cognitive testing battery to induce mental exhaustion in participants did not deteriorate participants' time to complete TMT part B. This clearly is a limitation of the present study because transient decline in cognitive performance has been repeatedly described for mental exhaustion [4,5]. Therefore, our study did not confirm former evidence that showed that cognitive flexibility was particularly deteriorated by mental exhaustion [26]. Future trials may need to apply a larger amount of cognitive work load over a longer period of time to induce mental exhaustion [2, 26]. Potentially, in our study an actual deterioration of cognitive flexibility performance after mental exhaustion manipulation was superimposed by learning effects in TMT handling, even though parallel forms were used. Learning effects are a common problem in cognitive testing [61, 62]. Individual results of cognitive tests significantly improve when exposed to the same stimuli more than once, furthermore, such effects occur particularly between the first and second trial of a cognitive test [63]. Future studies should give the participants more time to practice the test procedure before the actual experiment starts [64]. The fact that acute moderate aerobic exercise had a large positive effect on participants' time to complete TMT part B compared to active control group ($d = 0.737$) supports the assumption that actual cognitive decline was superimposed by learning effects. Still, the present study was designed to rule out such learning effects by using different trials for cognitive testing, as recommended by other researchers [65]. The benefits of a single bout of aerobic exercise on following cognitive flexibility performance in participants that had not been mentally exhausted were reported to be small [24]. The present study gives no hint on what mediates the recovery effect of acute moderate exercise on mental exhaustion. There are several factors that are less likely to have significant effects in both control groups than in the aerobic group. First, the increase of cerebral blood flow and tissue oxygenation through exercise [66]. Second, the impact of glucocorticoids, released through exercise [67–69], on cognition, attention, and vigilance [70,71]. In addition, dopamine and other monoamines, which are also partly regulated through exercise [72], also benefit motivation [73]. Furthermore, physiological correlates like cardiovascular fitness and its connection to cognitive testing should be examined. Future trials should investigate these physiological and psychological mediators more closely. The present study was only powered for at least moderate effects and the minimum sample size in each group of 33 slightly fell below that ($n = 32$ in active control group). However, some effects of exercise for aspects of subjective well-being in this study were only small to moderate. To provide more generalizable data future studies should power for small effects. Moreover, future studies should try to apply acute exercise as

strategy to recover from mental exhaustion in applied contexts – this could be, e.g., aviation, surgeons or the academic field. Future studies could consider other populations (students in school/different educational fields) and even clinical populations that include patients suffering from anxiety [74], depression [75,76] and addiction [77,78] and examine benefits of acute aerobic exercise after mental exhaustion on these groups.

Acknowledgments

We would like to thank all participants for the time and effort they put into our study. All authors contributed to the study concept and design, data acquisition and data analysis. All authors critically revised and approved the final manuscript. The authors have no conflicts-of-interest to declare. The authors have no professional relationships with companies or manufacturers who will benefit from the results of the present study. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or non-for-profit sectors. The results of the study are presented clearly, honestly, and without fabrication, falsification, or inappropriate data manipulation.

Supplementary materials

Supplementary material associated with this article can be found, in the online version, at [doi:10.1016/j.physbeh.2021.113588](https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2021.113588).

Reference

- [1] P. Qi, H. Ru, L. Gao, et al., Neural mechanisms of mental fatigue revisited: new insights from the brain connectome, *Engineering* 5 (2) (2019) 276–286, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.025>.
- [2] K. Mizuno, M. Tanaka, K. Yamaguchi, O. Kajimoto, H. Kuratsune, Y. Watanabe, Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity, *Behav. Brain Funct* 7 (2011) 17, <https://doi.org/10.1186/1744-9081-7-17>. Epub 2011/05/25PubMed PMID: 21605411; PubMed Central PMCID: PMC3113724.
- [3] M. Segal, How automation is changing work, *Nature* 563 (7733) (2018) 132–135, <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07501-y>. Epub 2018/11/30PubMed PMID: 30487630.
- [4] M.A. Boksem, M. Tops, Mental fatigue: costs and benefits, *Brain Res. Rev* 59 (1) (2008) 125–139, <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2008.07.001>.
- [5] M.A. Boksem, T.F. Meijman, M.M. Lorist, Mental fatigue, motivation and action monitoring, *Biol. Psychol* 72 (2) (2006) 123–132, <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.08.007>.
- [6] K. Martin, K.G. Thompson, R. Keegan, N. Ball, B. Rattray, Mental fatigue does not affect maximal anaerobic exercise performance, *Eur. J. Appl. Physiol* 115 (4) (2015) 715–725, <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3052-1>. Epub 2014/11/27PubMed PMID: 25425259.
- [7] J. Van Cutsem, S. Marcora, K. De Pauw, S. Bailey, R. Meeusen, B. Roelands, The effects of mental fatigue on physical performance: a systematic review, *Sports Med* 47 (8) (2017) 1569–1588, <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0>. Epub 2017/01/04PubMed PMID: 28044281.
- [8] C. O'Neill, K. Panuwatwanich, The impact of fatigue on labour productivity: case study of dam construction project in Queensland. The 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management, EPPM, Bangkok, Thailand. Bangkok, 2013, pp. 993–1005, 2013 Oct 23 - Oct 25Oct.
- [9] F. McCormick, J. Kadzielski, C.P. Landrigan, B. Evans, J.H. Herndon, H.E. Rubash, Surgeon fatigue: a prospective analysis of the incidence, risk, and intervals of predicted fatigue-related impairment in residents, *Arch. Surg* 147 (5) (2012) 430–435, <https://doi.org/10.1001/archsurg.2012.84>. Epub 2012/07/13PubMed PMID: 22785637.
- [10] E. Persson, K. Barrafrén, A. Meunier, G. Tinghog, The effect of decision fatigue on surgeons' clinical decision making, *Health Econ* 28 (10) (2019) 1194–1203, <https://doi.org/10.1002/hec.3933>.
- [11] M.A. Nealley, V. Gawron, The effect of fatigue on air traffic controllers, *Int. J. Aviat. Psychol* 25 (2015), <https://doi.org/10.1080/10508414.2015.981488>.
- [12] J. Caldwell, Fatigue in aviation, *Travel Med. Infect. Dis* 3 (2005) 85–96, <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2004.07.008>.
- [13] D.B. Cook, O'Connor PJ, G. Lange, J. Steffener, Functional neuroimaging correlates of mental fatigue induced by cognition among chronic fatigue syndrome patients and controls, *Neuroimage* 36 (1) (2007) 108–122, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.02.033>. Epub 2007/04/06PubMed PMID: 17408973.
- [14] Z.Y. Shan, R. Kwiatek, R. Burnet, et al., Progressive brain changes in patients with chronic fatigue syndrome: a longitudinal MRI study, *J. magnetic Reson. Imaging: JMIR* 44 (5) (2016) 1301–1311, <https://doi.org/10.1002/jmri.25283>. Epub 2016/04/28PubMed PMID: 27123773.

- [15] Li-W Tang, H. Zheng, L. Chen, et al., Gray matter volumes in patients with chronic fatigue syndrome, *Evid. Based Complement Alternat. Med* 2015 (2015), 380615, <https://doi.org/10.1155/2015/380615>. Epub 2015/02/22PubMed PMID: 25792998.
- [16] R. Maksoud, S. du Preez, N. Eaton-Fitch, et al., A systematic review of neurological impairments in myalgic encephalomyelitis/chronic fatigue syndrome using neuroimaging techniques, *PLoS ONE* 15 (4) (2020), e0232475, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232475>. Epub 2020/05/01PubMed PMID: 32353033; PubMed Central PMCID: PMC7192498.
- [17] J.A. Foster, S.A. Gore, D.S. West, Altering TV viewing habits: an unexplored strategy for adult obesity intervention? *Ann. J. Health Behav* 30 (1) (2006) 3–14, <https://doi.org/10.5555/ajhb.2006.30.1.3>. Epub 2006/01/25PubMed PMID: 16430316.
- [18] E.J. Corwin, L.C. Klein, K. Rickelman, Predictors of fatigue in healthy young adults: moderating effects of cigarette smoking and gender, *Biol. Res. Nurs* 3 (4) (2002) 222–233, <https://doi.org/10.1177/109980040200300407>.
- [19] L. Reinecke, T. Hartmann, A. Eden, The guilty couch potato: the role of ego depletion in reducing recovery through media use, *J. Commun* 64 (4) (2014) 569–589, <https://doi.org/10.1111/jcom.12107>.
- [20] L. Exelmans, Jvd Bulck, Binge viewing, sleep, and the role of pre-sleep arousal, *J. Clin. Sleep Med* 13 (08) (2017) 1001–1008, <https://doi.org/10.5664/jcsn.6704>.
- [21] K. Endo, K. Matsukawa, N. Liang, et al., Dynamic exercise improves cognitive function in association with increased prefrontal oxygenation, *J. Physiol. Sci* 63 (4) (2013) 287–298, <https://doi.org/10.1007/s12576-013-0267-6>. Epub 2013/05/11PubMed PMID: 23661275.
- [22] M.T. Schmolesky, D.L. Webb, R.A. Hansen, The effects of aerobic exercise intensity and duration on levels of brain-derived neurotrophic factor in healthy men, *J. Sports Sci. Med* 12 (3) (2013) 502–511. Epub 2013/10/24. PubMed PMID: 24149158; PubMed Central PMCID: PMC3772595.
- [23] M. Oberste, F. Javelle, S. Sharma, et al., Effects and moderators of acute aerobic exercise on subsequent interference control: a systematic review and meta-analysis, *Front Psychol* 10 (2019) (2019), <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02616>.
- [24] S. Ludyga, M. Gerber, S. Brand, E. Holsboer-Trachsler, U. Pühse, Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: a meta-analysis, *Psychophysiology* 53 (11) (2016) 1611–1626, <https://doi.org/10.1111/psyp.12736>. Epub 2016/08/25PubMed PMID: 27556572.
- [25] M. Pontifex, A. McGowan, M. Chandler, et al., A primer on investigating the after effects of acute bouts of physical activity on cognition, *Psychol. Sport Exerc* 40 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.08.015>.
- [26] K. Mizuno, Y. Watanabe, Utility of an advanced trail making test as a neuropsychological tool for an objective evaluation of work efficiency during mental fatigue, *fatigue Sci. Hum. Health* (2008) 47–54, https://doi.org/10.1007/978-4-431-73464-2_4.
- [27] D. van der Linden, M. Frese, T.F. Meijman, Mental fatigue and the control of cognitive processes: effects on perseveration and planning, *Acta. Psychol. (Amst)* 113 (1) (2003) 45–65, [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(02)00150-6). Epub 2003/04/08PubMed PMID: 12679043.
- [28] J.C. Basso, W.A. Suzuki, The effects of acute exercise on mood, cognition, neurophysiology, and neurochemical pathways: a review, *Brain Plast* 2 (2) (2017) 127–152, <https://doi.org/10.3233/BPL-160040>. PubMed PMID: 29765853.
- [29] J. Reed, D. Ones, The effect of acute aerobic exercise on positive activated affect: a meta-analysis, *Psychol. Sport. Exerc* 7 (2006) 477–514, <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2005.11.003>.
- [30] C.J. Hansen, L.C. Stevens, J.R. Coast, Exercise duration and mood state: how much is enough to feel better? *Health Psychol* 20 (4) (2001) 267–275, <https://doi.org/10.1037/0278-6133.20.4.267>. Epub 2001/08/23PubMed PMID: 11515738.
- [31] E. Anderson, G. Shivakumar, Effects of exercise and physical activity on anxiety, *Front. Psychiatry* 4 (2013) 27, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00027>. PubMed PMID: 23630504.
- [32] K.M. Fritz, P.J. O'Connor, Acute exercise improves mood and motivation in young men with ADHD symptoms, *Med. Sci. Sports Exerc* 48 (6) (2016) 1153–1160, <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000000864>. Epub 2016/01/08PubMed PMID: 26741120.
- [33] S. Brand, F. Colledge, S. Ludyga, et al., Acute bouts of exercising improved mood, rumination and social interaction in inpatients with mental disorders, *Front. Psychol* 9 (249) (2018), <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00249>.
- [34] R. Colon, S. Karama, R.E. Jung, R.J. Haier, Human intelligence and brain networks, *Dialogues Clin. Neurosci* 12 (4) (2010) 489–501, <https://doi.org/10.31887/DCNS.2010.12.4/rcolon>. Epub 2011/02/16PubMed PMID: 21319494; PubMed Central PMCID: PMC3181994.
- [35] R.T. Staff, M.J. Hogan, D.S. Williams, L.J. Whalley, Intellectual engagement and cognitive ability in later life (the “use it or lose it” conjecture): longitudinal, prospective study, *Bmj* 363 (2018) k4925, <https://doi.org/10.1136/bmj.k4925>. Epub 2018/12/12PubMed PMID: 30530522; PubMed Central PMCID: PMC6287118, www.icmje.org/coi_disclosure.pdf. and declare: support from the University of Aberdeen for the submitted work; no financial relationships with any organisations that might have an interest in the submitted work in the previous three years; no other relationships or activities that could appear to have influenced the submitted work.
- [36] L.L.U. Tongran, J. Shi, Z. Daheng, Y. Jie, The relationship between EEG band power, cognitive processing and intelligence in school-age children, *Psychol. Sci. Q* 50 (2008).
- [37] D.M. Higgins, J.B. Peterson, R.O. Pihl, A.G.M. Lee, Prefrontal cognitive ability, intelligence, Big Five personality, and the prediction of advanced academic and workplace performance, *J. Pers. Soc. Psychol* 93 (2) (2007) 298–319, <https://doi.org/10.1037/0022-3514.93.2.298>. Epub 2007/07/25PubMed PMID: 17645401.
- [38] F. O'Callaghan, O. Muurlink, N. Reid, Effects of caffeine on sleep quality and daytime functioning, *Risk Manag. Healthc. Policy* 11 (2018) 263–271, <https://doi.org/10.2147/rmh.S156404>. Epub 2018/12/24PubMed PMID: 30573997; PubMed Central PMCID: PMC6292246.
- [39] J. Snel, M.M. Lorist, Effects of caffeine on sleep and cognition, *Prog. Brain Res.* 190 (2011) 105–117, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53817-8.00006-2>.
- [40] Z. Zavecz, T. Nagy, A. Galkó, D. Nemeth, K. Janacsek, The relationship between subjective sleep quality and cognitive performance in healthy young adults: evidence from three empirical studies, *Sci. Rep* 10 (1) (2020) 4855, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61627-6>.
- [41] S. Lehl, G. Triebig, B. Fischer, Multiple choice vocabulary test MWT as a valid and short test to estimate premorbid intelligence, *Acta. Neurol. Scand* 91 (5) (1995) 335–345, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0404.1995.tb07018.x>. Epub 1995/05/01PubMed PMID: 7639062.
- [42] T. Mollaveva, P. Thuraijah, K. Burton, S. Mollaveva, C.M. Shapiro, A. Colantonio, The Pittsburgh sleep quality index as a screening tool for sleep dysfunction in clinical and non-clinical samples: a systematic review and meta-analysis, *Sleep Med. Rev* 25 (2016) 52–73, <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2015.01.009>. Epub 2015/07/15PubMed PMID: 26163057.
- [43] M. Tanaka, A. Ishii, Y. Watanabe, Neural effects of mental fatigue caused by continuous attention load: a magnetoencephalography study, *Brain Res* 1561 (2014) 60–66, <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2014.03.009>. Epub 2014/03/20PubMed PMID: 24642273.
- [44] D. Junker, T. Stöggel, The training effects of foam rolling on core strength endurance, balance, muscle performance and range of motion: a randomized controlled trial, *J. Sports Sci. Med* 18 (2) (2019) 229–238. Epub 2019/06/14. PubMed PMID: 31191092; PubMed Central PMCID: PMC6543984.
- [45] A. Diamond, Executive Functions, *Annu. Rev. Psychol* 64 (1) (2013) 135–168, <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>. PubMed PMID: 23020641.
- [46] R.M. Reitan, Trail Making Test: Manual for Administration and Scoring, Reitan Neuropsychology Laboratory, Tucson, AZ, 1992, p. 10.
- [47] L. Tischler, F. Petermann, Trail making test (TMT), *Z. Psychiatrie Psychol. Psychother* 58 (2010) 79–81, <https://doi.org/10.1024/1661-4747.a000009>. German.
- [48] B.M. Abdelhamid, H. Omar, M.M. Hassan, S.A. Embaby, A. Rady, Mohamed Aly H. Effects of partial sleep deprivation following night shift on cognitive functions of Egyptian anesthesiologists; prospective observational study, *Egypt. J. Anaesth* 36 (1) (2020) 61–68, <https://doi.org/10.1080/11101849.2020.1768630>.
- [49] Rodewald K., Weisbrod M., Aschenbrenner M. TMT-L Manual by schulfried gmbh (moedling, Austria) moedling, Austria. 2019. [cited 2019 September 17]. Available from: <https://www.schulfried.at/assets/de/TMT-L/TMT-L.pdf>.
- [50] S. Wagner, I. Helmreich, N. Dahmen, K. Lieb, A. Tadic, Reliability of three alternate forms of the trail making tests a and B, *Arch. Clin. Neuropsychol* 26 (4) (2011) 314–321, <https://doi.org/10.1093/arclin/acr024>. Epub 2011/05/18PubMed PMID: 21576092.
- [51] R. Steyer, P. Schwenkmezger, P. Notz, M. Eid, Entwicklung Des Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens (MDBF), Primärdatensatz. [Development of the Multidimensional Mood State Questionnaire (MDBF). Primary data.], 2004, 1.0.0 ed. [Internet]. Trier: Psychologisches Datenarchiv PsychData des Leibniz-Zentrums für Psychologische Information und Dokumentation ZPID [cited 2020 Aug 10]. Available from: <https://www.psychdata.de/index.php?main=search&sub=browse&id=srfr91en15.German>.
- [52] A. Hinz, I. Daig, K. Petrowski, E. Brähler, Die stimmung in der deutschen bevölkerung: referenzwerte für den mehrdimensionalen befindlichkeitsfragebogen MDBF [mood in the german population: norms of the multidimensional mood questionnaire MDBF], *Psychother. Psych. Med* 62 (02) (2012) 52–57, <https://doi.org/10.1055/s-0031-1297960>. German. Epub 23.01.2012.
- [53] J.M. Cox, A. Davison, The visual analogue scale as a tool for self-reporting of subjective phenomena in the medical radiation sciences, *Radiograph* 52 (1) (2005) 22–24, <https://doi.org/10.1002/j.2051-3909.2005.tb00026.x>.
- [54] F. Faul, E. Erdfelder, A.G. Lang, A. Buchner, G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences, *Behav. Res. Methods* 39 (2) (2007) 175–191, <https://doi.org/10.3758/BF03193146>.
- [55] G.F. Borm, J. Fransen, W.A. Lemmens, A simple sample size formula for analysis of covariance in randomized clinical trials, *J. Clin. Epidemiol* 60 (12) (2007) 1234–1238, <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2007.02.006>. Epub 2007/11/14PubMed PMID: 17998077.
- [56] J. Cohen, *Statistical Power Analysis For the Behavioral Sciences*. 2nd ed., Routledge, New York, NY, 2013, p. 567.
- [57] J. Dimitrova, M. Hogan, P. Khader, et al., Comparing the effects of an acute bout of physical exercise with an acute bout of interactive mental and physical exercise on electrophysiology and executive functioning in younger and older adults, *Aging Clin. Exp. Res* 29 (5) (2017) 959–967, <https://doi.org/10.1007/s40520-016-0683-6>. Epub 2016/11/21PubMed PMID: 27866346.
- [58] M. Janssen, H. Toussaint, W. Mecklen, E. Verhagen, Effects of acute bouts of physical activity on children's attention: a systematic review of the literature, *Springerplus* 3 (2014) 410, <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-410>.
- [59] B.A. Sibley, S.L. Beilock, Exercise and working memory: an individual differences investigation, *J. Sport Exerc. Psychol* 29 (6) (2007) 783–791, <https://doi.org/10.1123/jsep.29.6.783>. Epub 2007/12/20PubMed PMID: 18089904.
- [60] A. Bergouignan, K.T. Leggett, N. De Jong, et al., Effect of frequent interruptions of prolonged sitting on self-perceived levels of energy, mood, food cravings and

- cognitive function, *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act* 13 (1) (2016) 113, <https://doi.org/10.1186/s12966-016-0437-z>. PubMed PMID: 27809874.
- [61] K. Wesnes, C. Pincock, Practice effects on cognitive tasks: a major problem? *Lancet Neurol* 1 (8) (2002) 473, [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(02\)00236-3](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(02)00236-3). Epub 2003/07/10PubMed PMID: 12849328.
- [62] C. Bartels, M. Wegryn, A. Wiedl, V. Ackermann, H. Ehrenreich, Practice effects in healthy adults: a longitudinal study on frequent repetitive cognitive testing, *BMC Neurosci* 11 (1) (2010) 118, <https://doi.org/10.1186/1471-2202-11-118>.
- [63] A. Collie, D. Darby, M. McStephen, The effects of practice on the cognitive test performance of neurologically normal individuals assessed at brief test-retest intervals, *J. Int. Neuropsychol. Soc.*: JINS 9 (2003) 419–428, <https://doi.org/10.1017/S1355617703930074>.
- [64] K. Srinagesh, *The Principles of Experimental Research*, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, UK, 2006, 432 p.
- [65] L.J. Beglinger, B. Gaydos, O. Tangphao-Daniels, et al., Practice effects and the use of alternate forms in serial neuropsychological testing, *Arch. Clin. Neuropsychol* 20 (4) (2005) 517–529, <https://doi.org/10.1016/j.acn.2004.12.003>.
- [66] C.R. Rooks, N.J. Thom, K.K. McCully, R.K. Dishman, Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: a systematic review, *Prog. Neurobiol* 92 (2) (2010) 134–150, <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2010.06.002>. Epub 2010/06/15PubMed PMID: 20542078.
- [67] G.D. Tharp, *The role of glucocorticoids in exercise*, *Med. Sci. Sports* 7 (1) (1975) 6–11. Epub 1975/01/01. PubMed PMID: 1143055.
- [68] M. Sayyah, Z. Vakili, H. Ehteram, F. Sarbandi, Z. Amooyi, Effects of aerobic exercise on testosterone and cortisol hormone of blood serum of sedentary male students, *Int. J. Sport Stud. Health* 2 (1) (2019) e87635, <https://doi.org/10.5812/intjssh.87635>. Epub 2019-01-01.
- [69] E.E. Hill, E. Zack, C. Battaglini, M. Viru, A. Viru, A.C. Hackney, Exercise and circulating cortisol levels: the intensity threshold effect, *J. Endocrinol. Invest* 31 (7) (2008) 587–591, <https://doi.org/10.1007/bf03345606>. Epub 2008/09/13PubMed PMID: 18787373.
- [70] M. Joëls, Corticosteroids and the brain, *J. Endocrinol* 238 (3) (2018) R121–r130, <https://doi.org/10.1530/joe-18-0226>. Epub 2018/06/08PubMed PMID: 29875162.
- [71] M.M. Wirth, Hormones, Stress, and cognition: the effects of glucocorticoids and oxytocin on memory, *Adapt. Human Behav. Physiol* 1 (2) (2015) 177–201, <https://doi.org/10.1007/s40750-014-0010-4>.
- [72] T.W. Lin, Y.M. Kuo, Exercise benefits brain function: the monoamine connection, *Brain Sci* 3 (1) (2013) 39–53, <https://doi.org/10.3390/brainsci3010039>. Epub 2013/01/01PubMed PMID: 24961306; PubMed Central PMCID: PMC34061837.
- [73] E.S. Bromberg-Martin, M. Matsumoto, O. Hikosaka, Dopamine in motivational control: rewarding, aversive, and alerting, *Neuron* 68 (5) (2010) 815–834, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.11.022>. Epub 2010/12/15PubMed PMID: 21144997; PubMed Central PMCID: PMC3032992.
- [74] F.B. Schuch, B. Stubbs, J. Meyer, et al., Physical activity protects from incident anxiety: a meta-analysis of prospective cohort studies, *Depress. Anxiety* 36 (9) (2019) 846–858, <https://doi.org/10.1002/da.22915>.
- [75] L.L. Craft, F.M. Perna, The Benefits of exercise for the clinically depressed, *Prim. Care Companion J. Clin. Psychiatry* 6 (3) (2004) 104–111, <https://doi.org/10.4088/pcc.v06n0301>. Epub 2004/09/14PubMed PMID: 15361924; PubMed Central PMCID: PMC474733.
- [76] C.J. Brush, G. Hajcak, A.J. Bocchine, et al., A randomized trial of aerobic exercise for major depression: examining neural indicators of reward and cognitive control as predictors and treatment targets, *Psychol. Med* (2020) 1–11, <https://doi.org/10.1017/S0033291720002573>. Epub 2020/08/24.
- [77] S. Li, Q. Wu, C. Tang, Z. Chen, L. Liu, Exercise-based interventions for internet addiction: neurobiological and neuropsychological evidence, *Front. Psychol* 11 (1296) (2020), <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01296>.
- [78] W.J. Lynch, A.B. Peterson, V. Sanchez, J. Abel, M.A. Smith, Exercise as a novel treatment for drug addiction: a neurobiological and stage-dependent hypothesis, *Neurosci. Biobehav. Rev* 37 (8) (2013) 1622–1644, <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.011>.

4. Ergebnisse

Siehe 3.1. Publikation.

5. Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, das Potenzial einer einzelnen moderaten Einheit aeroben Trainings zu untersuchen, um sich von experimentell induzierter mentaler Erschöpfung zu erholen. Diese Untersuchung zielte darauf ab, zu analysieren, wie eine einmalige körperliche Aktivität die kognitive Flexibilität verbessert, was durch den Trail Making Test (TMT) Teil B gemessen wurde. Darüber hinaus wurde der Einfluss einer solchen Übung auf verschiedene Dimensionen des subjektiven Wohlbefindens untersucht, einschließlich der Stimmung, der geistigen Wachsamkeit, des Gefühls innerer Ruhe, der selbstwahrgenommenen kognitiven Leistungsfähigkeit und der Motivation, sich folgend kognitiv anspruchsvollen Aufgaben zu widmen. Um die Effektivität des aeroben Trainings präzise zu bewerten, wurden die Ergebnisse mit denen zweier Kontrollgruppen verglichen: einer aktiven Kontrollgruppe, die einfach-replizierbare Dehnübungen durchführte, und einer passiven Kontrollgruppe, die eine Episode einer beliebten Sitcom ansah.

5.1. Empirische Analyse der Ergebnisse in Bezug auf die angegebene Zielsetzung

Ziel 1 - Analyse des Potentials einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zu einer aktiven Kontrollgruppe zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung der kognitiven Flexibilität.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine einzelne Einheit moderaten aeroben Trainings zu einer signifikanten Verbesserung der kognitiven Flexibilität der Teilnehmer führte, insbesondere im Vergleich zu den Dehnübungen der aktiven Kontrollgruppe. Diese

Verbesserung war durch eine deutlich schnellere Bearbeitungszeit des TMT B gekennzeichnet, was darauf hindeutet, dass aerobes Training besonders effektiv ist, wenn es darum geht, die Fähigkeit zur kognitiven Anpassung und Problemlösung nach einer Phase intensiver geistiger Ermüdung zu fördern. Die Effektstärke erreichte einen Wert von Cohen's $d = 0,737$, was die Wirksamkeit dieser Methode unterstreicht.

Ziel 2 - Analyse des Potentials einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zu einer aktiven Kontrollgruppe zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung des subjektiven Wohlbefindens (Stimmung, geistige Wachheit, Ruhe, sowie die selbst-wahrgenommene kognitive Leistungsfähigkeit und intrinsische Motivation zur Bewältigung einer kognitiv anspruchsvollen Aufgabe).

Interessanterweise waren die positiven Effekte des aeroben Trainings auch in Bezug auf das subjektive Wohlbefinden im Vergleich zu beiden Kontrollgruppen nachweisbar. Hier zeigten sich insbesondere Verbesserungen in den Bereichen Stimmung, Wachsamkeit, selbstwahrgenommene kognitive Leistungsfähigkeit und Motivation für weitere geistige Herausforderungen. Die Effektgrößen für diese Parameter lagen im Bereich von $d = 0,149$ bis $0,524$, was kleine bis moderate Effekte anzeigt. Diese Ergebnisse sind bemerkenswert, da frühere Studien darauf hinwiesen, dass bei nicht mental erschöpften Personen die Effekte von körperlicher Aktivität auf das Wohlbefinden in der Regel stärker ausfallen als auf die kognitive Flexibilität. Die vorliegende Untersuchung zeigt jedoch, dass gerade Personen, die unter akuter mentaler Erschöpfung leiden, besonders von moderatem aerobem Training profitieren können.

Das Phänomen, dass Personen mit geringeren kognitiven Ausgangswerten oder einer durch mentale Ermüdung bedingten Leistungsminderung am meisten von akuter körperlicher Aktivität profitieren, wurde auch in dieser Studie bestätigt. Es scheint, dass körperliche Betätigung eine effektive Methode zur kurzfristigen Wiederherstellung kognitiver Funktionen nach intensiver geistiger Belastung darstellt. Dieser Effekt ist besonders relevant in Kontexten, in denen eine schnelle Wiederherstellung der geistigen Leistungsfähigkeit von Bedeutung ist, beispielsweise in Berufen mit hohen kognitiven Anforderungen. Allerdings waren die Auswirkungen des aeroben Trainings auf das subjektive Wohlbefinden, insbesondere auf die Stimmung und Motivation, weniger stark ausgeprägt als die Effekte auf die kognitive Flexibilität.

Ziel 3 – Analyse des Potentials einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zum Anschauen einer Episode einer Sitcom zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung der kognitiven Flexibilität.

Ein weiteres interessantes Ergebnis dieser Studie war, dass das aerobe Training nicht nur gegenüber aktiven Dehnübungen, sondern auch gegenüber der passiven Kontrollgruppe – dem Ansehen einer Sitcom – überlegen war. Hierbei ist interessanterweise zu erwähnen, dass der Effekt insgesamt schwächer war als der gegenüber der aktiven Kontrollgruppe.

Ziel 4 - Analyse des Potentials einer 30-minütigen aeroben Übung mittlerer Intensität im Vergleich zum Anschauen einer Episode einer Sitcom zur Unterstützung der Regeneration der durch kognitive Ermüdung induzierten Verminderung des subjektiven Wohlbefindens (entsprechend den o. g. Parametern).

Obwohl das aerobe Training in den meisten gemessenen Parametern überlegen war, zeigte sich jedoch, dass das Schauen einer Sitcom kurzfristig zu einer signifikanten Verbesserung des Ruhe- und Entspannungsgefühls führte. Dies legt nahe, dass passive Freizeitaktivitäten wie das Schauen von unterhaltsamen Inhalten, obwohl sie nicht die gleichen langfristigen kognitiven Vorteile bieten wie körperliche Aktivität, dennoch kurzfristig eine beruhigende Wirkung haben können. Dies könnte insbesondere für Personen von Bedeutung sein, die nach intensiver geistiger Arbeit schnelle Entspannung suchen.

Die dargestellten Ergebnisse legen nahe, dass kognitive Regeneration im alltäglichen Leben eine wichtige - wenn nicht sogar essenzielle - Rolle spielt. Durch länger andauernde kognitive Leistungen entsteht nach längerer Zeit ein Status mentaler Erschöpfung [95] – dies ist gekennzeichnet durch die Verminderung der kognitiven Leistungsfähigkeit sowie des subjektiven Wohlbefindens [28-29] und der intrinsischen Motivation für weiterführende kognitiv anspruchsvolle Aufgaben [30-31]. Somit wird nicht nur die Produktivität am Arbeitsplatz gefährdet [96]; für bestimmte Berufsgruppen wie beispielsweise Chirurgen [2-3], Piloten und Fluglotsen [4-5] können sich lebensbedrohliche Konsequenzen ergeben. Im Weiteren zeigten sich in vorausgegangenen Studien, bei Erreichen eines chronischen Zustands mentaler Erschöpfung, permanente Veränderungen der Gehirnstruktur und Funktion [32]. Diese beinhalten signifikante Verminderungen der Substantia nigra und alba [97-98] sowie Veränderungen der EEG-Aktivität und der kognitiven Prozessierung [99]. Weitverbreitete Strategien zur Erholung bei kognitiver Erschöpfung wie beispielsweise langes Fernsehschauen oder Rauchen sind nicht nur wenig effektiv, sondern können das Erholungspotential signifikant minimieren [100-102]. Vorausgegangene Studien

zeigen, dass bereits eine einmalige Einheit einer aeroben Übung einen positiven Einfluss auf das zentrale Nervensystem haben kann (z. B. durch die Erhöhung der präfrontalen Oxygenierung [33] oder die Ausschüttung von Neurotrophen [40]). Bezüglich des verhaltens-psychologischen Aspekts zeigte sich, dass die kognitive Leistungsfähigkeit ebenfalls durch bereits eine einzelne Einheit einer aeroben Übung positiv beeinflusst wird [58].

Interessanterweise gibt es eine Fülle von Beweisen dafür, dass Defizite der kognitiven Flexibilität durch akutes aerobes Training günstig beeinflusst werden [76-77], was besonders für eine durch mentale Erschöpfung verursachte Verschlechterung dieser Domäne zu gelten scheint [70, 75]. Hinsichtlich des subjektiven Wohlbefindens kann aerobes Training das subjektive Wohlbefinden [78-79], die Müdigkeit [83] und die Nervosität [84] verbessern. Darüber hinaus ist eine einzelne aerobe Trainingseinheit mit einer höheren Motivation für nachfolgende Aufgaben assoziiert [81-82].

Das Potential einer einmaligen akuten aeroben Intervention (entsprechend 65-75 Prozent der jeweiligen individuellen $\dot{V}O_2\text{max}$) zur Erholung einer experimentell induzierten mentalen Erschöpfung wurde analysiert. Hierzu wurde eine randomisierte kontrollierte Studie mit gesunden Erwachsenen ($N = 99$; Einschlusskriterium = Alter ≥ 18 Jahre; Ausschlusskriterien = akute Infektionen, bekannte kardiopulmonale, metabolische, neurologische oder psychische Erkrankungen, Konsum von legalen psychoaktiven Substanzen wie z.B. Nikotin oder Koffein vor den Testungen oder Einnahme illegaler/verschreibungspflichtiger Medikation im Monat vor der Testung) durchgeführt, welche zum Zeitpunkt der Erhebung Studenten der Sporthochschule

Köln waren. Insgesamt wurden 47 weibliche Probanden und 52 männliche Probanden in die Studie eingeschlossen.

Die empirischen Ergebnisse der vorliegenden Dissertationsschrift weisen darauf hin, dass die Erholung der kognitiven Flexibilität ($d = 0,737$), des subjektiven Wohlbefindens ($d = 0,405$), der Müdigkeit ($d = 0,480$), der subjektiven kognitiven Kapazität ($d = 0,214$) und der Motivation ($d = 0,524$) - verglichen mit einer aktiven Kontrolle - in höherem Maße positiv durch eine einmalige aerobe Belastung beeinflusst wurden, mit Ausnahme der subjektiv Wahrgenommenen Rastlosigkeit/Unruhe. Im Vergleich zu einer passiven Kontrolle zeigte sich jene aerobe Belastung ebenfalls effektiver ($d = 0,102$ bis $0,286$), ausgenommen sind die Bereiche der Müdigkeit ($d = 0,015$) und Rastlosigkeit/Unruhe ($d = -0,473$). Somit lassen sich die Annahmen der zuvor definierten Zielsetzungen der vorliegenden Studie im großen Teil, jedoch unter der Beachtung der unten angegebenen Limitationen, bestätigen. Besonders hervorzuheben ist, dass sich diese Arbeit bewusst auf die Untersuchung der kurzfristigen Effekte einer einzigen aeroben Einheit fokussiert hat. Diese Herangehensweise zielt darauf ab, praktikable Strategien zu identifizieren, die ohne großen Zeitaufwand in den Alltag integriert werden könnten. Diese Art der Intervention ist nicht nur im klinischen Kontext, sondern auch in beruflichen und schulischen Umgebungen von großer Bedeutung. Denn die Studienergebnisse zeigen, dass bereits eine kurze, moderat-intensive Bewegungseinheit ausreicht, um signifikante Verbesserungen der kognitiven Leistungsfähigkeit zu erzielen. Durch die einfache Implementierung solcher Interventionen könnten nicht nur die kognitive Regeneration gefördert, sondern auch die allgemeine Lebensqualität verbessert werden. Besonders im medizinischen Bereich eröffnen sich hier neue Möglichkeiten für die Anwendung

bei Patienten, die aufgrund von Zeitmangel oder körperlichen Einschränkungen keine intensiveren Trainingsprogramme durchführen können. Diese Studie liefert eine solide evidenzbasierte Grundlage für die Integration kurzer Bewegungseinheiten in die Rehabilitation und Prävention, beispielsweise auch zur Unterstützung von Patienten mit neurologischen oder psychischen Beeinträchtigungen. Darüber hinaus könnte die Integration solcher Programme in den Alltag von Berufstätigen oder Schülern die mentale Leistungsfähigkeit und Konzentration nachhaltig steigern. Dies ist insbesondere in stressreichen Umgebungen relevant, wo die kognitive Leistungsfähigkeit oft unter zeitlich bedingtem Druck beeinträchtigt wird. Die Erkenntnisse dieser Arbeit könnten daher zur Entwicklung alltagsnaher, präventiver Maßnahmen beitragen, die ohne großen Aufwand umsetzbar sind und dennoch positive Effekte auf die kognitive Regeneration und geistige Gesundheit haben.

5.2. Limitationen

Die Untersuchung fokussierte sich ausschließlich auf die kurzfristigen Effekte einer einzigen aeroben Einheit. Studien zeigen jedoch, dass die Dauer und Häufigkeit körperlicher Aktivität einen entscheidenden Einfluss auf die kognitive Regeneration haben kann. Insbesondere haben langfristige Trainingspläne das Potenzial, nicht nur die kognitive Leistungsfähigkeit, sondern auch die neuronale Plastizität nachhaltig zu verbessern [103]. Eine Studie von Collins et al. [104] zeigt, dass regelmäßiges, moderates Training über einen Zeitraum von mindestens sechs Monaten zu einer signifikanten Zunahme des Hippocampusvolumens führen kann, was mit verbesserten Gedächtnisleistungen einhergeht. Dies unterstreicht die Bedeutung von Langzeitinterventionen, die über einmalige Einheiten hinausgehen. Der positive Effekt scheint insbesondere bei älteren Erwachsenen hervorzuheben, dass kontinuierliche

Bewegung ein Mittel zur Vorbeugung von kognitivem Abbau sein kann [104]. Während kurzfristige Interventionen, wie in dieser Studie verwendet, unmittelbare Verbesserungen der exekutiven Funktionen zeigen können, legen weitere Untersuchungen nahe, dass wiederholte Einheiten erforderlich sind, um nachhaltige Veränderungen in der kognitiven Leistungsfähigkeit zu erzielen [105]. Langzeitstudien sollten daher die Frage klären, ob regelmäßige moderate Bewegung, wie z.B. 30 Minuten an fünf Tagen pro Woche, zu nachhaltigeren kognitiven Verbesserungen führt. Eine weitere Untersuchung deutet darauf hin, dass moderate bis intensive Belastungen, wenn sie über einen längeren Zeitraum wiederholt werden, zu einer anhaltenden Verbesserung der kognitiven Flexibilität führen können [106]. Allerdings könnte eine zu hohe Trainingsintensität kontraproduktiv sein und die kognitive Ermüdung erhöhen [107]. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein moderates Intensitätsniveau optimal sein könnte, um sowohl die körperliche als auch die geistige Erholung zu fördern. Die Analyse der zeitlichen und intensitätsbezogenen Faktoren der Bewegung könnte zu einem besseren Verständnis der optimalen Trainingsparameter zur Förderung der kognitiven Gesundheit führen. Künftige Studien sollten nicht nur die Dauer, sondern auch die Häufigkeit und Intensität der Interventionen systematisch variieren, um differenziertere Erkenntnisse darüber zu gewinnen, welche Arten von Bewegung für die kognitive Regeneration am effektivsten sind.

Ein weiterer Kritikpunkt der Studie ist ebenfalls die begrenzte Stichprobengröße und die Homogenität der Teilnehmer. Die Probanden waren fast ausschließlich Studierende der Sporthochschule Köln, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Diese spezifische Gruppe, die durch ein höheres Maß an körperlicher

Fitness gekennzeichnet ist, könnte weniger empfänglich für die Effekte akuter physischer Belastung sein als eine heterogenere Bevölkerungsgruppe. Dies wirft die Frage auf, inwieweit die Ergebnisse auf Personen mit geringerer körperlicher Fitness oder auf ältere Bevölkerungsgruppen übertragbar sind. Da der körperliche Fitnesszustand als potenzieller Moderator akuter, belastungsinduzierter Effekte auf kognitive Leistungen gilt [108], hätte die $\dot{V}O_2\text{max}$ als Kovariate oder Stratifizierungsmerkmal in die Auswertung einbezogen werden können, um entsprechend abgeleitete Effekte hierdurch hervorzuheben. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass kognitiv ermüdete und nicht ermüdete Personen möglicherweise unterschiedlichen Populationen angehören, wodurch die Übertragbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt sein könnte. Eine diversere Probandenauswahl könnte potenziell unterschiedliche Ergebnisse in Bezug auf die kognitive Regeneration nach sich ziehen. Zukünftige Studien sollten daher eine breitere und diversere Stichprobe umfassen, um die Ergebnisse auf die allgemeine Bevölkerung zu übertragen und Unterschiede in der Reaktion auf akute Belastungen zu untersuchen. Eine zusätzliche Berücksichtigung von Geschlecht und Alter als moderierende Variablen könnte ebenfalls wertvolle Erkenntnisse liefern.

Die experimentelle Induktion von mentaler Ermüdung zeigte sich bezüglich insgesamt im Rahmen des subjektiven wahrgenommenen und gemessenen Wohlbefindens erfolgreich. Im Gegensatz hierzu konnte die angewandte kognitive Testbatterie zur Induktion mentaler Ermüdung die Testzeiten des TMT B jedoch nicht ausschlaggebend verschlechtern. Dies ist eine klare Limitation des vorliegenden Studiendesigns, zumal vorausgehende Studien zeigen konnten, dass die kognitive Leistungsfähigkeit im Rahmen der kognitiven Ermüdung signifikant abnahm [28-29]. Dementsprechend

konnte die vorliegende Studie den Beweis, dass vor allem das Maß kognitiver Flexibilität unter mentaler Erschöpfung abnimmt [70], nicht replizieren.

Zukünftige Studien sollten ein höheres Maß an kognitiver Belastung über einen längeren Zeitraum durchführen, um einen klar messbaren Status der mentalen Erschöpfung zu erreichen [69-70]. Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertationsschrift wurden im Rahmen der durchgeführten Studie wahrscheinlich durch auftretende Lerneffekte während der kognitiven Testung im Bereich des TMT-Tests überlagert, obwohl verschiedene Parallelförmen des Tests angewandt wurden. Lerneffekte wurden in Bezug auf kognitive Testungen bereits in der Vergangenheit ausführlich analysiert [109-110]. Individuelle Ergebnisse der kognitiven Testung wurden signifikant besser, je öfter der gleiche Stimulus angewandt wurde, insbesondere zwischen der ersten und zweiten Durchführung eines solchen kognitiven Tests [111]. Zudem sollten zukünftige Studien den Probanden einen größeren Übungszeitraum vor der eigentlichen experimentellen Testung gewähren [112]. Trotz der Anwendung von Parallelförmen des Trail Making Tests (TMT) zur Minimierung von Lerneffekten ist es möglich, dass diese Effekte die Ergebnisse beeinflusst haben. Studien zeigen, dass wiederholte kognitive Testungen, insbesondere bei kurzen Zeitabständen, zu einer Verbesserung der Leistung führen können, die nicht allein auf eine Verbesserung der kognitiven Fähigkeiten zurückzuführen ist [113]. Eine längere Trainingsperiode vor der eigentlichen experimentellen Testung könnte helfen, diese Effekte zu minimieren und die Validität der Ergebnisse zu erhöhen. Um Lerneffekte weiter zu verringern, könnten alternative Testverfahren oder eine zufällige Reihenfolge der Testdurchführung implementiert werden [64]. Die engere Beobachtung und Dokumentation des Lernverlaufs bei den Probanden könnten entsprechend ebenfalls

von Vorteil sein, um den Einfluss dieser Variable besser zu verstehen. Der Umstand, dass akutes moderates aerobes Training im Vergleich zur aktiven Kontrollgruppe ($d = 0,737$) einen großen positiven Effekt auf die Zeit der Teilnehmer hatte, den TMT Teil B abzuschließen, stützt die Annahme, dass das tatsächliche Maß an kognitiver Erschöpfung durch Lerneffekte überlagert wurde. Dennoch wurde die vorliegende Studie so konzipiert, dass Lerneffekte ausgeschlossen werden sollten, indem, wie bereits in vorausgehenden Studien empfohlen, variierende kognitive Tests verwendet wurden [114]. Es wurde zudem berichtet, dass der Nutzen einer einzigen aeroben Übungseinheit auf die kognitive Flexibilitätsleistung bei Teilnehmenden, die nicht geistig erschöpft waren, gering war [76].

Die vorliegende Studie gibt keinen Hinweis darauf, was den Erholungseffekt akuten moderaten körperlichen Trainings bei geistiger Erschöpfung vermittelt. Es gibt mehrere Faktoren, die in beiden Kontrollgruppen mit geringerer Wahrscheinlichkeit signifikante Auswirkungen haben als in der aeroben Gruppe. Erstens: die Erhöhung des zerebralen Blutflusses und der Sauerstoffversorgung des Gewebes durch körperliche Betätigung [115]. Zweitens: die Wirkung von Glukokortikoiden, die durch körperliche Betätigung freigesetzt werden [116-118], auf Kognition, Aufmerksamkeit und Wachsamkeit [119-120]. Darüber hinaus fördern auch Dopamin und andere Monoamine, die ebenfalls teilweise durch Bewegung reguliert werden [121], die Motivation [122]. Weiterhin sollten zuvor definierte physiologische Korrelate wie die kardiovaskuläre Fitness und deren Zusammenhang mit kognitiven Testungen untersucht werden. Zukünftige Studien sollten diese physiologischen und psychologischen Mediatoren genauer untersuchen und in ihre Ergebnisse mit einbeziehen.

Die in der Studie verwendeten Verhaltenstests zur Erfassung der kognitiven Ermüdung und der Regeneration basieren hauptsächlich auf subjektiven Einschätzungen der Probanden. Diese können durch Faktoren wie Motivation, Tagesform oder externe Ablenkungen beeinflusst sein und damit die Validität der Ergebnisse einschränken. Verhaltenstests wie der Trail Making Test (TMT) oder Stroop-Test sind zwar etabliert, jedoch nicht ausreichend, um die zugrunde liegenden neurophysiologischen Mechanismen zu erklären. Der Einsatz moderner bildgebender Verfahren, wenn auch viel aufwendiger als die Messverfahren hier vorliegenden Arbeit, wie der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) und der Elektroenzephalographie (EEG) könnte helfen, neuronale Korrelate der kognitiven Ermüdung und Erholung präziser zu erfassen. Studien haben gezeigt, dass fMRT verwendet werden kann, um Veränderungen in der Aktivität des präfrontalen Kortex während und nach kognitiver Belastung zu visualisieren [123]. EEG-Studien hingegen bieten Einblicke in die zeitlichen Muster neuronaler Aktivität und können Veränderungen der Hirnwellenmuster (z.B. Alpha- und Beta-Wellen) in Echtzeit aufzeichnen, die mit mentaler Ermüdung korrelieren [27]. Eine weitere Studie zeigte, dass eine einzige Einheit moderater aerober Belastung die Aktivierung des dorsolateralen präfrontalen Kortex erhöht, was mit einer verbesserten Leistung bei kognitiven Aufgaben korreliert [34]. Dies legt nahe, dass neuroimaging-Techniken wie fMRT spezifische Gehirnregionen identifizieren könnten, die von kognitiver Erholung profitieren. EEG Untersuchungen können ergänzend eingesetzt werden, um die Dynamik der neuronalen Reaktionsfähigkeit unmittelbar nach der Belastung zu erfassen [124]. Der Einsatz von fMRT und EEG bringt jedoch auch Herausforderungen mit sich. fMRT erfordert eine aufwendige Infrastruktur, hohe Kosten und kann für die Probanden

belastend sein, was die Generalisierbarkeit auf alltägliche Situationen einschränkt. Die EEG hingegen ist weniger invasiv und kostengünstiger, aber es fehlt die hohe räumliche Auflösung, die die MRT-Bildgebung bietet. Beide Methoden ergänzen sich jedoch und könnten in zukünftigen Studien kombiniert werden, um ein umfassenderes Bild der kognitiven Prozesse zu erhalten. Die Integration dieser Techniken in zukünftige Studien könnte nicht nur die objektive Messung der kognitiven Erholung verbessern, sondern auch dazu beitragen, spezifische neuronale Mechanismen zu identifizieren, die durch körperliche Aktivität moduliert werden. Dies könnte langfristig zu gezielteren Interventionen zur Verbesserung der kognitiven Leistungsfähigkeit beitragen.

Die vorliegende Studie war nur auf mindestens als mittelmäßig berechnete Effektstärken ausgelegt und die minimale Stichprobengröße in jeder Gruppe von 33 lag leicht darunter ($n = 32$ in der aktiven Kontrollgruppe). Einige Wirkungen von Bewegung auf Aspekte des subjektiven Wohlbefindens waren in dieser Studie jedoch nur gering bis mittelmäßig (bzgl. der berechneten Effektstärken) ausgeprägt. Um verallgemeinerbare Daten zu liefern, sollten zukünftige Studien auf kleinere Effektstärken ausgelegt werden. Darüber hinaus sollten zukünftige Studien versuchen, akutes Training als Strategie zur Erholung von geistiger Erschöpfung in angewandten Kontexten anzuwenden – dies könnte, wie erwähnt, z. B. die Luftfahrt, die Chirurgie oder der akademische Bereich sein. Zukünftige Studien könnten ebenfalls weitgreifende Populationen (Schülerinnen und Schüler sowie Studierende verschiedener Bildungsbereiche) und sogar klinische Gruppen, die z.B. Patienten mit Angstzuständen [125], Depressionen [126-127] und Suchterkrankungen [128-129]

umfassen, berücksichtigen und die Vorteile akuter aerober Übungen nach geistiger Erschöpfung bei diesen Gruppen untersuchen.

Des Weiteren sollte ebenfalls ein Augenmerk auf die Kontrolle externer Variablen wie Schlafverhalten und vorheriger körperlicher Aktivität gelegt werden. Dies ist in kognitiven Studien von entscheidender Bedeutung, da diese Faktoren erheblich die kognitive Leistungsfähigkeit beeinflussen können. Zahlreiche Studien zeigen, dass eine unzureichende Schlafdauer und -qualität zu einer erhöhten kognitiven Ermüdung führt und die Leistung bei Aufgaben, die Konzentration und Aufmerksamkeit erfordern, deutlich beeinträchtigen kann [130-131]. Schlafdefizite beeinträchtigen insbesondere die exekutiven Funktionen, was zu einer verminderten Reaktionsgeschwindigkeit und einer höheren Fehleranfälligkeit führt [132]. Eine konsistente Schlafqualität ist daher von entscheidender Bedeutung für die Aufrechterhaltung der kognitiven Leistungsfähigkeit, insbesondere in stressigen oder anspruchsvollen Lebenssituationen. Die körperliche Aktivität vor kognitiven Tests kann ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit haben. Die Balance zwischen der Intensität und Dauer der körperlichen Aktivität ist entscheidend, um positive Effekte auf die kognitive Regeneration zu erzielen. Eine gezielte Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schlafqualität und körperlicher Aktivität könnte in zukünftigen Studien helfen, die Effekte dieser Faktoren auf die kognitive Regeneration besser zu verstehen [133]. So kann schlechte Schlafqualität in Kombination mit intensiver körperlicher Belastung zu einer verstärkten kognitiven Ermüdung führen, während eine moderate körperliche Aktivität die negativen Auswirkungen von Schlafmangel möglicherweise abmildern kann [134]. Diese Wechselwirkungen sind bisher nur unzureichend erforscht und bieten ein

interessantes Feld für weiterführende Untersuchungen. Die Integration dieser externen Einflussfaktoren in experimentelle Designs könnte nicht nur die Validität der Ergebnisse erhöhen, sondern auch zu einem besseren Verständnis beitragen, wie Lebensstiländerungen die kognitive Leistungsfähigkeit langfristig beeinflussen können. Zukünftige Studien sollten die Wechselwirkungen systematisch erfassen, um differenziertere und präzisere Aussagen über die Auswirkungen auf die kognitive Regeneration zu ermöglichen.

Zusammenfassend lassen sich diese Limitationen nutzen, um den Kontext der Ergebnisse besser zu verstehen und konkrete Ansatzpunkte für weiterführende Forschungen zu definieren. Die Berücksichtigung objektiverer Messmethoden, die Kontrolle externer Faktoren und die Erprobung längerer oder wiederholter Interventionen könnten den Erkenntnisgewinn erheblich steigern. Zukünftige Studien könnten evidenzbasierte Empfehlungen für die Integration körperlicher Aktivität in den Arbeitsalltag entwickeln. Erste Hinweise zeigen positive Auswirkungen von Bewegungs- und Übungsprogrammen auf spezifische kognitive Funktionen, wie in dieser Arbeit dargelegt – hier wird die praktische Relevanz kurzfristiger Interventionen, die einfach in den Alltag integriert werden können und dennoch signifikante Vorteile für die kognitive Leistungsfähigkeit bieten betont. Die Möglichkeit, kognitive Funktionen durch kurze, moderate Trainingseinheiten zu verbessern, unterstreicht das Potenzial solcher Maßnahmen, insbesondere in stressigen Alltags- und Arbeitsumgebungen [78]. Langfristige Interventionen hingegen zeigen, dass regelmäßige körperliche Aktivität positive Auswirkungen auf die neuronale Gesundheit und Plastizität hat [135]. Die Ergebnisse legen nahe, dass sowohl kurzfristige als auch langfristige Interventionen für unterschiedliche Zielgruppen – vom Büroangestellten bis

hin zu älteren Erwachsenen – wertvolle Ansätze zur Förderung der geistigen Gesundheit darstellen.

Zuletzt zeigen aktuelle systematische Übersichtsarbeiten, dass moderate Bewegung, wie etwa aerobe Übungen, die Durchblutung des Gehirns verbessert und die Freisetzung neurotropher Faktoren wie BDNF (Brain-Derived Neurotrophic Factor) fördert [51, 136]. Diese neurochemischen Veränderungen können das Gedächtnis, die Lernfähigkeit und die allgemeine kognitive Flexibilität positiv beeinflussen [137]. Solche Erkenntnisse unterstreichen die Bedeutung regelmäßiger Bewegung für die kognitive Gesundheit über die gesamte Lebensspanne hinweg. Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass selbst kurze, intensive Trainingseinheiten einen bedeutenden Beitrag zur kognitiven Regeneration leisten können. Dies ist besonders wertvoll in einer Welt, in der Zeit ein knappes Gut ist und dennoch die Notwendigkeit besteht, mentale Gesundheit und Leistungsfähigkeit zu fördern oder zumindest zu erhalten [138]. Zukünftige Studien sollten somit ebenfalls die positiven Effekte solcher Interventionen weiter untersuchen, um ein umfassenderes Verständnis der Mechanismen hinter der kognitiven Regeneration zu gewinnen und evidenzbasierte Empfehlungen für die Praxis zu entwickeln

6. Literaturverzeichnis

1. Qi P, Ru H, Gao L, et al. Neural Mechanisms of Mental Fatigue Revisited: New Insights from the Brain Connectome. *Engineering*. 2019;5(2):276-286. doi: 10.1016/j.eng.2018.11.025.
2. McCormick F, Kadzielski J, Landrigan CP, Evans B, Herndon JH, Rubash HE. Surgeon fatigue: a prospective analysis of the incidence, risk, and intervals of predicted fatigue-related impairment in residents. *Arch Surg*. 2012;147(5):430-435. Epub 2012/07/13. doi: 10.1001/archsurg.2012.84. PubMed PMID: 22785637.
3. Persson E, Barrafreem K, Meunier A, Tinghog G. The effect of decision fatigue on surgeons' clinical decision making. *Health Economics*. 2019;28(10):1194-1203. doi: 10.1002/hec.3933.
4. Nealley MA, Gawron V. The Effect of Fatigue on Air Traffic Controllers. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2015;25. doi: 10.1080/10508414.2015.981488.
5. Caldwell J. Fatigue in aviation. *Travel Medicine and Infectious Disease*. 2005;3:85–96. doi: 10.1016/j.tmaid.2004.07.008.
6. Fan J, Smith AP. Effects of Occupational Fatigue on Cognitive Performance of Staff From a Train Operating Company: A Field Study. *Front Psychol*. 2020;11. doi: 10.3389/fpsyg.2020.558520.
7. Wiehler A, Branzoli F, Adanyeguh I, Mochel F, Pessiglione M. A neuro-metabolic account of why daylong cognitive work alters the control of economic decisions. *Current Biology*. 2022;32(16):3564-3575.e3565. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.07.010>.
8. Skarpsno ES, Nilsen TIL, Sand T, Hagen K, Mork PJ. Work-Related Mental Fatigue, Physical Activity and Risk of Insomnia Symptoms: Longitudinal Data from the Norwegian HUNT Study. *Behav Sleep Med*. 2020;18(4):488-499. Epub 2019/07/17. doi: 10.1080/15402002.2019.1614927. PubMed PMID: 31307230.
9. Jia H, Lin CJ, Wang EM-y. Effects of mental fatigue on risk preference and feedback processing in risk decision-making. *Scientific Reports*. 2022;12(1):10695. doi: 10.1038/s41598-022-14682-0.
10. Bayne T, Brainard D, Byrne RW, et al. What is cognition? *Curr Biol*. 2019;29(13):R608-r615. Epub 2019/07/10. doi: 10.1016/j.cub.2019.05.044. PubMed PMID: 31287972.
11. Harvey PD. Domains of cognition and their assessment . *Dialogues Clin Neurosci*. 2019;21(3):227-237. Epub 2019/11/22. doi: 10.31887/DCNS.2019.21.3/pharvey. PubMed PMID: 31749647; PubMed Central PMCID: PMCPMC6829170.

12. Dhakal A, Bobrin BD. Cognitive Deficits. StatPearls. Treasure Island (FL) ineligible companies. Disclosure: Bradford Bobrin declares no relevant financial relationships with ineligible companies.: StatPearls Publishing Copyright © 2023, StatPearls Publishing LLC.; 2023.
13. Robbins TW. Cognition: the ultimate brain function. *Neuropsychopharmacology*. 2011;36(1):1-2. Epub 2010/12/01. doi: 10.1038/npp.2010.171. PubMed PMID: 21116247; PubMed Central PMCID: PMCPMC3055511.
14. Kipp K. A Developmental Perspective on the Measurement of Cognitive Deficits in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry*. 2005;57(11):1256-1260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.03.012>.
15. Hohl K, Dolcos S. Measuring cognitive flexibility: A brief review of neuropsychological, self-report, and neuroscientific approaches. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2024;Volume 18 - 2024. doi: 10.3389/fnhum.2024.1331960.
16. Desai SJ, Allman BL, Rajakumar N. Infusions of Nerve Growth Factor Into the Developing Frontal Cortex Leads to Deficits in Behavioral Flexibility and Increased Perseverance. *Schizophrenia Bulletin*. 2017;44(5):1081-1090. doi: 10.1093/schbul/sbx159.
17. Tarasi L, Martelli ME, Bortoletto M, di Pellegrino G, Romei V. Neural Signatures of Predictive Strategies Track Individuals Along the Autism-Schizophrenia Continuum. *Schizophr Bull*. 2023;49(5):1294-1304. Epub 2023/07/14. doi: 10.1093/schbul/sbad105. PubMed PMID: 37449308; PubMed Central PMCID: PMCPMC10483460.
18. Sosa R. Conditioned inhibition, inhibitory learning, response inhibition, and inhibitory control: Outlining a conceptual clarification. *Psychol Rev*. 2024;131(1):138-173. Epub 2022/12/23. doi: 10.1037/rev0000405. PubMed PMID: 36548060.
19. Aron AR, Poldrack RA. Cortical and subcortical contributions to Stop signal response inhibition: role of the subthalamic nucleus. *J Neurosci*. 2006;26(9):2424-2433. Epub 2006/03/03. doi: 10.1523/jneurosci.4682-05.2006. PubMed PMID: 16510720; PubMed Central PMCID: PMCPMC6793670.
20. Bari A, Robbins TW. Inhibition and impulsivity: Behavioral and neural basis of response control. *Progress in Neurobiology*. 2013;108:44-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2013.06.005>.
21. Aron AR. The neural basis of inhibition in cognitive control. *Neuroscientist*. 2007;13(3):214-228. Epub 2007/05/24. doi: 10.1177/1073858407299288. PubMed PMID: 17519365.

22. Diamond A. Executive Functions. *Annual Review of Psychology*. 2013;64(1):135-168. doi: 10.1146/annurev-psych-113011-143750. PubMed PMID: 23020641.
23. Allerhand M, Gale CR, Deary IJ. The dynamic relationship between cognitive function and positive well-being in older people: A prospective study using the English Longitudinal Study of Aging. *Psychology and Aging*. 2014;29(2):306-318. doi: 10.1037/a0036551.
24. Llewellyn DJ, Lang IA, Langa KM, Huppert FA. Cognitive function and psychological well-being: findings from a population-based cohort. *Age Ageing*. 2008;37(6):685-689. Epub 2008/10/15. doi: 10.1093/ageing/afn194. PubMed PMID: 18852289; PubMed Central PMCID: PMC2720691.
25. Pfund GN, James BD, Willroth EC. Bidirectional Relationships Between Well-Being and Cognitive Function. *Psychol Sci*. 2025;36(5):350-366. Epub 2025/05/12. doi: 10.1177/09567976251335578. PubMed PMID: 40354460.
26. Mackworth NH. The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 1948;1(1):6-21.
27. Li G, Huang S, Xu W, et al. The impact of mental fatigue on brain activity: a comparative study both in resting state and task state using EEG. *BMC Neuroscience*. 2020;21(1):20. doi: 10.1186/s12868-020-00569-1.
28. Boksem MA, Meijman TF, Lorist MM. Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological Psychology*. 2006;72(2):123-132. doi: 10.1016/j.biopsycho.2005.08.007.
29. Boksem MA, Tops M. Mental fatigue: costs and benefits. *Brain Res Rev*. 2008;59(1):125-139. Epub 2008/07/26. doi: 10.1016/j.brainresrev.2008.07.001. PubMed PMID: 18652844.
30. Martin K, Thompson KG, Keegan R, Ball N, Rattray B. Mental fatigue does not affect maximal anaerobic exercise performance. *Eur J Appl Physiol*. 2015;115(4):715-725. Epub 2014/11/27. doi: 10.1007/s00421-014-3052-1. PubMed PMID: 25425259.
31. Van Cutsem J, Marcora S, De Pauw K, Bailey S, Meeusen R, Roelands B. The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance: A Systematic Review. *Sports Med*. 2017;47(8):1569-1588. Epub 2017/01/04. doi: 10.1007/s40279-016-0672-0. PubMed PMID: 28044281.
32. Cook DB, O'Connor PJ, Lange G, Steffener J. Functional neuroimaging correlates of mental fatigue induced by cognition among chronic fatigue syndrome patients and controls. *Neuroimage*. 2007;36(1):108-122. Epub 2007/04/06. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.02.033. PubMed PMID: 17408973.
33. Endo K, Matsukawa K, Liang N, et al. Dynamic exercise improves cognitive function in association with increased prefrontal oxygenation. *J Physiol Sci*.

- 2013;63(4):287-298. Epub 2013/05/11. doi: 10.1007/s12576-013-0267-6. PubMed PMID: 23661275.
34. Yanagisawa H, Dan I, Tsuzuki D, et al. Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test. *NeuroImage*. 2010;50(4):1702-1710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.023>.
 35. Schuhfried G. STROOP Manual by Schuhfried GmbH [Internet]. Moedling, Austria. [cited 2019 August 12]. Available from: <https://www.schuhfried.com/assets/en/STROOP/STROOP.pdf>.
 36. Leeuwis AE, Smith LA, Melbourne A, et al. Cerebral Blood Flow and Cognitive Functioning in a Community-Based, Multi-Ethnic Cohort: The SABRE Study. *Front Aging Neurosci*. 2018;10:279. Epub 2018/10/04. doi: 10.3389/fnagi.2018.00279. PubMed PMID: 30279656; PubMed Central PMCID: PMC6154257.
 37. Dietrich A. Transient hypofrontality as a mechanism for the psychological effects of exercise. *Psychiatry Research*. 2006;145(1):79-83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2005.07.033>.
 38. Zimmer P, Oberste M, Bloch W. Einfluss von Sport auf das zentrale Nervensystem – Molekulare und zelluläre Wirkmechanismen. *Dtsch Z Sportmed*. 2015; 66:42-49. doi: 10.5960/dzsm.2015.164.
 39. Almodovar CRd, Lambrechts D, Mazzone M, Carmeliet P. Role and Therapeutic Potential of VEGF in the Nervous System. *Physiological Reviews*. 2009;89(2):607-648. doi: 10.1152/physrev.00031.2008. PubMed PMID: 19342615.
 40. Schmolesky MT, Webb DL, Hansen RA. The effects of aerobic exercise intensity and duration on levels of brain-derived neurotrophic factor in healthy men. *J Sports Sci Med*. 2013;12(3):502-511. Epub 2013/10/24. PubMed PMID: 24149158; PubMed Central PMCID: PMC3772595.
 41. Bathina S, Das UN. Brain-derived neurotrophic factor and its clinical implications. *Arch Med Sci*. 2015;11(6):1164-1178. Epub 2016/01/21. doi: 10.5114/aoms.2015.56342. PubMed PMID: 26788077; PubMed Central PMCID: PMC4697050.
 42. Miranda M, Morici JF, Zanoni MB, Bekinschtein P. Brain-Derived Neurotrophic Factor: A Key Molecule for Memory in the Healthy and the Pathological Brain. *Front Cell Neurosci*. 2019;13:363. Epub 2019/08/24. doi: 10.3389/fncel.2019.00363. PubMed PMID: 31440144; PubMed Central PMCID: PMC6692714.
 43. Leckie RL, Oberlin LE, Voss MW, et al. BDNF mediates improvements in executive function following a 1-year exercise intervention. *Front Hum Neurosci*. 2014;8:985. Epub 2015/01/08. doi: 10.3389/fnhum.2014.00985. PubMed PMID: 25566019; PubMed Central PMCID: PMC4263078.

44. Vital TM, Stein AM, de Melo Coelho FG, Arantes FJ, Teodorov E, Santos-Galduróz RF. Physical exercise and vascular endothelial growth factor (VEGF) in elderly: A systematic review. *Archives of Gerontology and Geriatrics*. 2014;59(2):234-239. doi: <https://doi.org/10.1016/j.archger.2014.04.011>.
45. Karakilic A, Yuksel O, Kizildag S, et al. Regular aerobic exercise increased VEGF levels in both soleus and gastrocnemius muscles correlated with hippocampal learning and VEGF levels. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*. 2021;81(1):1-9. Epub 2021/05/06. doi: 10.21307/ane-2021-001. PubMed PMID: 33949164.
46. Kaspar BK, Lladó J, Sherkat N, Rothstein JD, Gage FH. Retrograde Viral Delivery of IGF-1 Prolongs Survival in a Mouse ALS Model. *Science*. 2003;301(5634):839-842. doi: [doi:10.1126/science.1086137](https://doi.org/10.1126/science.1086137).
47. Yu JL, Ma L, Ma L, Tao YZ. [Voluntary wheel running enhances cell proliferation and expression levels of BDNF, IGF1 and WNT4 in dentate gyrus of adult mice]. *Sheng Li Xue Bao*. 2014;66(5):559-568. Epub 2014/10/22. PubMed PMID: 25332001.
48. Hainmueller T, Bartos M. Dentate gyrus circuits for encoding, retrieval and discrimination of episodic memories. *Nat Rev Neurosci*. 2020;21(3):153-168. Epub 2020/02/12. doi: 10.1038/s41583-019-0260-z. PubMed PMID: 32042144; PubMed Central PMCID: PMCPMC7115869.
49. Amaral DG, Scharfman HE, Lavenex P. The dentate gyrus: fundamental neuroanatomical organization (dentate gyrus for dummies). *Prog Brain Res*. 2007;163:3-22. Epub 2007/09/04. doi: 10.1016/s0079-6123(07)63001-5. PubMed PMID: 17765709; PubMed Central PMCID: PMCPMC2492885.
50. Weinberg L, Hasni A, Shinohara M, Duarte A. A single bout of resistance exercise can enhance episodic memory performance. *Acta Psychol (Amst)*. 2014;153:13-19. Epub 2014/09/30. doi: 10.1016/j.actpsy.2014.06.011. PubMed PMID: 25262058; PubMed Central PMCID: PMCPMC4597774.
51. Segal SK, Cotman CW, Cahill LF. Exercise-induced noradrenergic activation enhances memory consolidation in both normal aging and patients with amnesic mild cognitive impairment. *J Alzheimers Dis*. 2012;32(4):1011-1018. Epub 2012/08/24. doi: 10.3233/jad-2012-121078. PubMed PMID: 22914593; PubMed Central PMCID: PMCPMC3951984.
52. Skriver K, Roig M, Lundbye-Jensen J, et al. Acute exercise improves motor memory: exploring potential biomarkers. *Neurobiol Learn Mem*. 2014;116:46-58. Epub 2014/08/17. doi: 10.1016/j.nlm.2014.08.004. PubMed PMID: 25128877.
53. Roig M, Skriver K, Lundbye-Jensen J, Kiens B, Nielsen JB. A single bout of exercise improves motor memory. *PLoS One*. 2012;7(9):e44594. Epub 2012/09/14. doi: 10.1371/journal.pone.0044594. PubMed PMID: 22973462; PubMed Central PMCID: PMCPMC3433433.

54. Marisol S, Carlos G-H, Miguel Angel A, Carmen I, Maria Luisa C, Jesús Fernando E. Variations in serum magnesium and hormonal levels during incremental exercise. *Magnesium Research*. 2014;27(4):155-164. doi: 10.1684/mrh.2014.0372.
55. Zouhal H, Lemoine-Morel S, Mathieu M-E, Casazza GA, Jabbour G. Catecholamines and Obesity: Effects of Exercise and Training. *Sports Medicine*. 2013;43(7):591-600. doi: 10.1007/s40279-013-0039-8.
56. Messan F, Tito A, Gouthon P, et al. Comparison of Catecholamine Values Before and After Exercise-Induced Bronchospasm in Professional Cyclists. *Tanaffos*. 2017;16(2):136-143. Epub 2018/01/09. PubMed PMID: 29308078; PubMed Central PMCID: PMC5749326.
57. Chmura J, Nazar K, Kaciuba-Uściłko H. Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds. *International journal of sports medicine*. 1994;15(04):172-176.
58. Oberste M, Javelle F, Sharma S, et al. Effects and Moderators of Acute Aerobic Exercise on Subsequent Interference Control: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Psychol*. 2019;10(2616). doi: 10.3389/fpsyg.2019.02616.
59. Winter B, Breitenstein C, Mooren FC, et al. High impact running improves learning. *Neurobiol Learn Mem*. 2007;87(4):597-609. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2006.11.003>.
60. Keller SS, Roberts N. Measurement of brain volume using MRI: software, techniques, choices and prerequisites. *J Anthropol Sci*. 2009;87:127-151. Epub 2009/08/12. PubMed PMID: 19663172.
61. Miyake A, Friedman NP. The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science*. 2012;21(1):8-14. doi: 10.1177/0963721411429458. PubMed PMID: 22773897.
62. Altamirano LJ, Miyake A, Whitmer AJ. When mental inflexibility facilitates executive control: beneficial side effects of ruminative tendencies on goal maintenance. *Psychol Sci*. 2010;21(10):1377-1382. Epub 2010/08/28. doi: 10.1177/0956797610381505. PubMed PMID: 20798398; PubMed Central PMCID: PMC4323352.
63. Davidson MC, Amso D, Anderson LC, Diamond A. Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*. 2006;44(11):2037-2078.
64. Tombaugh TN. Trail Making Test A and B: Normative data stratified by age and education. *Archives of Clinical Neuropsychology*. 2004;19(2):203-214. doi: 10.1016/s0887-6177(03)00039-8.

65. Reitan RM. Validity of the Trail Making Test as an Indicator of Organic Brain Damage. *Perceptual and Motor Skills*. 1958;8(3):271-276. doi: 10.2466/pms.1958.8.3.271.
66. Reitan RM. Trail Making Test: Manual for administration and scoring. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory; 1992. 10 p.
67. Tischler L, Petermann F. Trail making test (TMT). *Zeitschrift für Psychiatrie Psychologie und Psychotherapie*. 2010;58:79-81. German. doi: 10.1024/1661-4747.a000009.
68. Abdelhamid BM, Omar H, Hassan MM, Embaby SA, Rady A, Mohamed Aly H. Effects of partial sleep deprivation following night shift on cognitive functions of Egyptian anesthesiologists; prospective observational study. *Egyptian Journal of Anaesthesia*. 2020;36(1):61-68. doi: 10.1080/11101849.2020.1768630.
69. Mizuno K, Tanaka M, Yamaguti K, Kajimoto O, Kuratsune H, Watanabe Y. Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity. *Behav Brain Funct*. 2011;7:17. Epub 2011/05/25. doi: 10.1186/1744-9081-7-17. PubMed PMID: 21605411; PubMed Central PMCID: PMC3113724.
70. Mizuno K, Watanabe Y. Utility of an Advanced Trail Making Test as a Neuropsychological Tool for an Objective Evaluation of Work Efficiency During Mental Fatigue. *Fatigue Science for Human Health*. 2008:47-54. doi: 10.1007/978-4-431-73464-2_4.
71. Wagner S, Helmreich I, Dahmen N, Lieb K, Tadic A. Reliability of three alternate forms of the trail making tests a and B. *Arch Clin Neuropsychol*. 2011;26(4):314-321. Epub 2011/05/18. doi: 10.1093/arclin/acr024. PubMed PMID: 21576092.
72. Theeuwes J. Top-down and bottom-up control of visual selection. *Acta Psychologica*. 2010;135(2):77-99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.02.006>.
73. Malenka R, Nestler E, Hyman S. Higher cognitive function and behavioral control. *Molecular neuropharmacology: A foundation for clinical neuroscience*. 2009:313-321.
74. Guo Z, Chen R, Liu X, et al. The impairing effects of mental fatigue on response inhibition: An ERP study. *PLoS One*. 2018;13(6):e0198206. Epub 2018/06/02. doi: 10.1371/journal.pone.0198206. PubMed PMID: 29856827; PubMed Central PMCID: PMC5983454.
75. van der Linden D, Frese M, Meijman TF. Mental fatigue and the control of cognitive processes: effects on perseveration and planning. *Acta Psychologica*. 2003;113(1):45-65. doi: [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(02)00150-6).

76. Ludyga S, Gerber M, Brand S, Holsboer-Trachsler E, Puhse U. Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: A meta-analysis. *Psychophysiology*. 2016;53(11):1611-1626. Epub 2016/08/25. doi: 10.1111/psyp.12736. PubMed PMID: 27556572.
77. Pontifex M, McGowan A, Chandler M, et al. A primer on investigating the after effects of acute bouts of physical activity on cognition. *Psychology of Sport and Exercise*. 2018;40. doi: 10.1016/j.psychsport.2018.08.015.
78. Basso JC, Suzuki WA. The Effects of Acute Exercise on Mood, Cognition, Neurophysiology, and Neurochemical Pathways: A Review. *Brain Plast*. 2017;2(2):127-152. doi: 10.3233/BPL-160040. PubMed PMID: 29765853.
79. Reed J, Ones D. The effect of acute aerobic exercise on positive activated affect: A meta-analysis. *Psychology of Sport and Exercise*. 2006;7:477-514. doi: 10.1016/j.psychsport.2005.11.003.
80. Thayer RE, Newman JR, McClain TM. Self-regulation of mood: strategies for changing a bad mood, raising energy, and reducing tension. *J Pers Soc Psychol*. 1994;67(5):910-925. Epub 1994/11/01. doi: 10.1037//0022-3514.67.5.910. PubMed PMID: 7983582.
81. Brand S, Colledge F, Ludyga S, et al. Acute Bouts of Exercising Improved Mood, Rumination and Social Interaction in Inpatients With Mental Disorders. *Front Psychol*. 2018;9(249). doi: 10.3389/fpsyg.2018.00249.
82. Fritz KM, O'Connor PJ. Acute Exercise Improves Mood and Motivation in Young Men with ADHD Symptoms. *Med Sci Sports Exerc*. 2016;48(6):1153-1160. Epub 2016/01/08. doi: 10.1249/mss.0000000000000864. PubMed PMID: 26741120.
83. Hansen CJ, Stevens LC, Coast JR. Exercise duration and mood state: how much is enough to feel better? *Health Psychol*. 2001;20(4):267-275. Epub 2001/08/23. doi: 10.1037//0278-6133.20.4.267. PubMed PMID: 11515738.
84. Anderson E, Shivakumar G. Effects of exercise and physical activity on anxiety. *Front Psychiatry*. 2013;4:27-27. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00027. PubMed PMID: 23630504.
85. Droste SK, Gesing A, Ulbricht S, Müller MB, Linthorst ACE, Reul JM. Effects of Long-Term Voluntary Exercise on the Mouse Hypothalamic-Pituitary-Adrenocortical Axis. *Endocrinology*. 2003;144(7):3012-3023. doi: 10.1210/en.2003-0097.
86. Gerber M, Imboden C, Beck J, et al. Effects of Aerobic Exercise on Cortisol Stress Reactivity in Response to the Trier Social Stress Test in Inpatients with Major Depressive Disorders: A Randomized Controlled Trial. *J Clin Med*. 2020;9(5). Epub 2020/05/15. doi: 10.3390/jcm9051419. PubMed PMID: 32403243; PubMed Central PMCID: PMC7291068.

87. Pelosof R, Santos LAd, Farhat LC, Gattaz WF, Talib L, Brunoni AR. BDNF blood levels after electroconvulsive therapy in patients with mood disorders: An updated systematic review and meta-analysis. *The World Journal of Biological Psychiatry*. 2022;1-10. doi: 10.1080/15622975.2022.2058083.
88. Lin L, Fu X-y, Zhou X-F, Liu D, Bobrovskaya L, Zhou L. Analysis of blood mature BDNF and proBDNF in mood disorders with specific ELISA assays. *Journal of Psychiatric Research*. 2021;133:166-173. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2020.12.021>.
89. Calabrese F, Rossetti AC, Racagni G, Gass P, Riva MA, Molteni R. Brain-derived neurotrophic factor: a bridge between inflammation and neuroplasticity. *Front Cell Neurosci*. 2014;8:430. Epub 2015/01/08. doi: 10.3389/fncel.2014.00430. PubMed PMID: 25565964; PubMed Central PMCID: PMC4273623.
90. Jin Y, Sun LH, Yang W, Cui RJ, Xu SB. The Role of BDNF in the Neuroimmune Axis Regulation of Mood Disorders. *Frontiers in Neurology*. 2019;10. doi: 10.3389/fneur.2019.00515.
91. Santi A, Bot M, Aleman A, Penninx BWJH, Aleman IT. Circulating insulin-like growth factor I modulates mood and is a biomarker of vulnerability to stress: from mouse to man. *Translational Psychiatry*. 2018;8(1):142. doi: 10.1038/s41398-018-0196-5.
92. Hoshaw BA, Hill TI, Crowley JJ, et al. Antidepressant-like behavioral effects of IGF-I produced by enhanced serotonin transmission. *European Journal of Pharmacology*. 2008;594(1):109-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2008.07.023>.
93. Barbour KA, Edenfield TM, Blumenthal JA. Exercise as a Treatment for Depression and Other Psychiatric Disorders: A REVIEW. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention*. 2007;27(6):359-367. doi: 10.1097/01.Hcr.0000300262.69645.95. PubMed PMID: 01273116-200711000-00002.
94. Oberste M, de Waal P, Joisten N, et al. Acute aerobic exercise to recover from mental exhaustion – a randomized controlled trial. *Physiology & Behavior*. 2021;241:113588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2021.113588>.
95. Segal M. How automation is changing work. *Nature*. 2018;563(7733):132-135. Epub 2018/11/30. doi: 10.1038/d41586-018-07501-y. PubMed PMID: 30487630.
96. O'Neill C, Panuwatwanich K. The Impact of Fatigue on Labour Productivity: Case Study of Dam Construction Project in Queensland. *The 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*; 2013 Oct 23 - Oct 25; Bangkok, Thailand. Bangkok: EPPM; 2013 Oct. p. 993-1005.
97. Shan ZY, Kwiatek R, Burnet R, et al. Progressive brain changes in patients with chronic fatigue syndrome: A longitudinal MRI study. *J Magn Reson*

- Imaging. 2016;44(5):1301-1311. Epub 2016/04/28. doi: 10.1002/jmri.25283. PubMed PMID: 27123773.
98. Tang L-W, Zheng H, Chen L, et al. Gray matter volumes in patients with chronic fatigue syndrome. *Evid Based Complement Alternat Med*. 2015;2015:380615-380615. Epub 2015/02/22. doi: 10.1155/2015/380615. PubMed PMID: 25792998.
 99. Maksoud R, du Preez S, Eaton-Fitch N, et al. A systematic review of neurological impairments in myalgic encephalomyelitis/ chronic fatigue syndrome using neuroimaging techniques. *PLoS One*. 2020;15(4):e0232475. Epub 2020/05/01. doi: 10.1371/journal.pone.0232475. PubMed PMID: 32353033; PubMed Central PMCID: PMC7192498.
 100. Corwin EJ, Klein LC, Rickelman K. Predictors of Fatigue in Healthy Young Adults: Moderating Effects of Cigarette Smoking and Gender. *Biological Research For Nursing*. 2002;3(4):222-233. doi: 10.1177/109980040200300407.
 101. Reinecke L, Hartmann T, Eden A. The Guilty Couch Potato: The Role of Ego Depletion in Reducing Recovery Through Media Use. *Journal of Communication*. 2014;64(4):569-589. doi: <https://doi.org/10.1111/jcom.12107>.
 102. Exelmans L, Bulck JVD. Binge Viewing, Sleep, and the Role of Pre-Sleep Arousal. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. 2017;13(08):1001-1008. doi: 10.5664/jcsm.6704.
 103. Mandolesi L, Polverino A, Montuori S, et al. Effects of Physical Exercise on Cognitive Functioning and Wellbeing: Biological and Psychological Benefits. *Front Psychol*. 2018;9:509. Epub 2018/05/15. doi: 10.3389/fpsyg.2018.00509. PubMed PMID: 29755380; PubMed Central PMCID: PMC5934999.
 104. Collins AM, Molina-Hidalgo C, Aghjayan SL, et al. Differentiating the influence of sedentary behavior and physical activity on brain health in late adulthood. *Experimental Gerontology*. 2023;180:112246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2023.112246>.
 105. Ren F-F, Hillman CH, Wang W-G, et al. Effects of aerobic exercise on cognitive function in adults with major depressive disorder: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Clinical and Health Psychology*. 2024;24(2):100447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijchp.2024.100447>.
 106. Pallesen H, Bjerk M, Pedersen AR, Nielsen JF, Evald L. The Effects of High-Intensity Aerobic Exercise on Cognitive Performance After Stroke: A Pilot Randomised Controlled Trial. *J Cent Nerv Syst Dis*. 2019;11:1179573519843493. Epub 2019/05/02. doi: 10.1177/1179573519843493. PubMed PMID: 31040737; PubMed Central PMCID: PMC6477759.

107. Sudo M, Costello JT, McMorris T, Ando S. The effects of acute high-intensity aerobic exercise on cognitive performance: A structured narrative review. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2022;16. doi: 10.3389/fnbeh.2022.957677.
108. Chang YK, Labban JD, Gapin JI, Etnier JL. The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain Res*. 2012;1453:87-101. Epub 2012/04/07. doi: 10.1016/j.brainres.2012.02.068. PubMed PMID: 22480735.
109. Wesnes K, Pincock C. Practice effects on cognitive tasks: a major problem? *Lancet Neurol*. 2002;1(8):473. Epub 2003/07/10. doi: 10.1016/s1474-4422(02)00236-3. PubMed PMID: 12849328.
110. Bartels C, Wegrzyn M, Wiedl A, Ackermann V, Ehrenreich H. Practice effects in healthy adults: A longitudinal study on frequent repetitive cognitive testing. *BMC Neuroscience*. 2010;11(1):118. doi: 10.1186/1471-2202-11-118.
111. Collie A, Darby D, McStephen M. The effects of practice on the cognitive test performance of neurologically normal individuals assessed at brief test-retest intervals. *Journal of the International Neuropsychological Society : JINS*. 2003;9:419-428. doi: 10.1017/S1355617703930074.
112. Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann Ltd; 2006. 432 p.
113. Endres T, Renkl A. Indirekte Effekte von Abrufübungen – Intuitiv und doch häufig unterschätzt/Indirect effects of retrieval practice—Intuitive yet often underestimated. *Unterrichtswissenschaft*. 2021;50. doi: 10.1007/s42010-021-00140-9.
114. Beglinger LJ, Gaydos B, Tangphao-Daniels O, et al. Practice effects and the use of alternate forms in serial neuropsychological testing. *Archives of Clinical Neuropsychology*. 2005;20(4):517-529. doi: 10.1016/j.acn.2004.12.003.
115. Rooks CR, Thom NJ, McCully KK, Dishman RK. Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: a systematic review. *Prog Neurobiol*. 2010;92(2):134-150. Epub 2010/06/15. doi: 10.1016/j.pneurobio.2010.06.002. PubMed PMID: 20542078.
116. Sayyah M, Vakili Z, Ehtram H, Sarbandi F, Amooyi Z. Effects of Aerobic Exercise on Testosterone and Cortisol Hormone of Blood Serum of Sedentary Male Students. *Int J Sport Stud Hlth*. 2019;2(1):e87635. Epub 2019-01-01. doi: 10.5812/intjssh.87635.
117. Tharp GD. The role of glucocorticoids in exercise. *Med Sci Sports*. 1975;7(1):6-11. Epub 1975/01/01. PubMed PMID: 1143055.
118. Hill EE, Zack E, Battaglini C, Viru M, Viru A, Hackney AC. Exercise and circulating cortisol levels: the intensity threshold effect. *J Endocrinol Invest*. 2008;31(7):587-591. Epub 2008/09/13. doi: 10.1007/bf03345606. PubMed PMID: 18787373.

119. Joëls M, Baram TZ. The neuro-symphony of stress. *Nat Rev Neurosci*. 2009;10(6):459-466. doi: 10.1038/nrn2632. PubMed PMID: 19339973.
120. Wirth MM. Hormones, Stress, and Cognition: The Effects of Glucocorticoids and Oxytocin on Memory. *Adaptive Human Behavior and Physiology*. 2015;1(2):177-201. doi: 10.1007/s40750-014-0010-4.
121. Lin TW, Kuo YM. Exercise benefits brain function: the monoamine connection. *Brain Sci*. 2013;3(1):39-53. Epub 2013/01/01. doi: 10.3390/brainsci3010039. PubMed PMID: 24961306; PubMed Central PMCID: PMC4061837.
122. Bromberg-Martin ES, Matsumoto M, Hikosaka O. Dopamine in motivational control: rewarding, aversive, and alerting. *Neuron*. 2010;68(5):815-834. Epub 2010/12/15. doi: 10.1016/j.neuron.2010.11.022. PubMed PMID: 21144997; PubMed Central PMCID: PMC4061837.
123. Tsujii T, Komatsu K, Sakatani K, editors. *Acute Effects of Physical Exercise on Prefrontal Cortex Activity in Older Adults: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study* 2013; New York, NY: Springer New York.
124. Stikic M, Johnson RR, Levendowski DJ, Popovic DP, Olmstead RE, Berka C. Eeg-Derived Estimators of Present and Future Cognitive Performance. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2011;5. doi: 10.3389/fnhum.2011.00070.
125. Schuch FB, Stubbs B, Meyer J, et al. Physical activity protects from incident anxiety: A meta-analysis of prospective cohort studies. *Depression and Anxiety*. 2019;36(9):846-858. doi: <https://doi.org/10.1002/da.22915>.
126. Craft LL, Perna FM. The Benefits of Exercise for the Clinically Depressed. *Prim Care Companion J Clin Psychiatry*. 2004;6(3):104-111. Epub 2004/09/14. doi: 10.4088/pcc.v06n0301. PubMed PMID: 15361924; PubMed Central PMCID: PMC474733.
127. Brush CJ, Hajcak G, Bocchine AJ, et al. A randomized trial of aerobic exercise for major depression: examining neural indicators of reward and cognitive control as predictors and treatment targets. *Psychological Medicine*. 2020;1-11. Epub 2020/08/24. doi: 10.1017/S0033291720002573.
128. Li S, Wu Q, Tang C, Chen Z, Liu L. Exercise-Based Interventions for Internet Addiction: Neurobiological and Neuropsychological Evidence. *Front Psychol*. 2020;11(1296). doi: 10.3389/fpsyg.2020.01296.
129. Lynch WJ, Peterson AB, Sanchez V, Abel J, Smith MA. Exercise as a novel treatment for drug addiction: A neurobiological and stage-dependent hypothesis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2013;37(8):1622-1644. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.011>.
130. Walker M. *Why We Sleep: The New Science of Sleep and Dreams*: Penguin Books Limited; 2017.

131. Khan MA, Al-Jahdali H. The consequences of sleep deprivation on cognitive performance. *Neurosciences (Riyadh)*. 2023;28(2):91-99. Epub 2023/04/13. doi: 10.17712/nsj.2023.2.20220108. PubMed PMID: 37045455; PubMed Central PMCID: PMCPCMC10155483.
132. Killgore WD. Effects of sleep deprivation on cognition. *Prog Brain Res*. 2010;185:105-129. Epub 2010/11/16. doi: 10.1016/b978-0-444-53702-7.00007-5. PubMed PMID: 21075236.
133. Smith PJ, Sherwood A, Avorgbedor F, et al. Sleep Quality, Metabolic Function, Physical Activity, and Neurocognition Among Individuals with Resistant Hypertension. *Journal of Alzheimer's Disease*. 2023;93:995-1006. doi: 10.3233/JAD-230029.
134. Youngstedt SD. Effects of exercise on sleep. *Clin Sports Med*. 2005;24(2):355-365, xi. Epub 2005/05/17. doi: 10.1016/j.csm.2004.12.003. PubMed PMID: 15892929.
135. Macpherson H, Teo WP, Schneider LA, Smith AE. A Life-Long Approach to Physical Activity for Brain Health. *Front Aging Neurosci*. 2017;9:147. Epub 2017/06/08. doi: 10.3389/fnagi.2017.00147. PubMed PMID: 28588474; PubMed Central PMCID: PMCPCMC5440589.
136. Cotman CW, Berchtold NC. Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity. *Trends in Neurosciences*. 2002;25(6):295-301. doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(02\)02143-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(02)02143-4).
137. Gómez-Pinilla F. Brain foods: the effects of nutrients on brain function. *Nat Rev Neurosci*. 2008;9(7):568-578. Epub 2008/06/24. doi: 10.1038/nrn2421. PubMed PMID: 18568016; PubMed Central PMCID: PMCPCMC2805706.
138. Ratey J, Hagerman E. *Spark: The Revolutionary New Science of Exercise and the Brain*. Psychiatric Services - PSYCHIATR SERVICES. 2008;59.
139. Rodewald K, Weisbrod M, Aschenbrenner M. TMT-L Manual by Schuhfried GmbH (Moedling, Austria) Moedling, Austria. 2019. [cited 2019 September 17]. Available from: <https://www.schuhfried.at/assets/de/TMT-L/TMT-L.pdf>.
140. Borg G. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1982;14(5):377-381. PubMed PMID: 00005768-198205000-00012.
141. Schuhfried G. DAUF Manual by Schuhfried GmbH [Internet]. Moedling, Austria. [cited 2019 August 12]. Available from: <https://www.schuhfried.com/assets/en/DAUF/DAUF.pdf>.
142. Schelling D, Schuri U. NBV Manual by Schuhfried GmbH [Internet]. Moedling, Austria. [cited 2019 August 12]. Available from: <https://www.schuhfried.com/assets/en/NBV/NBV.pdf>.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Testvarianten des TMT. Hier wird TMT A als obere Abbildung und TMT B als untere Abbildung dargestellt [139].

7.2. Publierte Ergebnisse

1. Oberste M, de Waal P, Joisten N, et al. Acute aerobic exercise to recover from mental exhaustion – a randomized controlled trial. *Physiology & Behavior*. 2021;241:113588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2021.113588>.

2. Appendix Material der o.g. Publikation:

- a) Description of the IXT Program:

Each participant executed the IXT on an Ergoselect 100 bicycle ergometer by Ergoline GmbH (Bitz, Germany), with the spirometry data being collected using a ZAN 600 USB by ZAN e.U. (Steyr-Dietach, Austria). Participants started with a two-minute warm-up at 0 watts. Subsequently the workload began with 30 watts for females and 50 watts for males at the 3-minute mark, followed by a 25 watt increase per minute for females and a 35 watt increase for males, respectively. The load was increased until physical exhaustion of each individual was reached, and the correspondent workload could not be handled for the expected 60 second interval - this was considered the desired outcome in order to evaluate the maximum respiratory capability before reaching a point of momentary muscle failure. However, an output rate of below 60 rpm for a longer period or different criteria like cramps, nausea, dizziness, dyspnea or acute indisposition led to an immediate termination of the exercise. Following exhaustion, a cool-down phase of 3 minutes at 50 watts was carried out. In addition to the respiratory coefficients, the heart rate was measured every minute using a Polar 92053123T31

Chest belt by Polar Electro Oy (Kempele, Finland). A Borg scale [140] ranging from 6 (= none) to 20 (= very, very hard) was inquired in order to have a better impression of the perceived exertion. Both latter variables were noted at baseline, for each consecutive step-up, and after the cool-down phase.

b) Description of the Cognitive Exhaustion Program:

I. Sustained Attention (DAUF), 36 min:

A test which measures long term attention and concentration. The test consists of seven randomly upwards- or downwards pointing triangles which are regularly and irregularly spaced. The objective is to press a button each time exactly three triangles are pointing downwards. After a few seconds the set of triangles changes. Output variables include the accuracy of correct reactions and the average correct reaction time [141].

II. N-Back Verbal (NBV) S1: 2 back Standard Form (2-back paradigm), 9 min:

A test which assesses verbal working memory. It consists of different consonants which are presented in black on a white field. The objective is to press a button each time the same consonant reappears with exactly one other consonant being presented in between. Output variables include the ability to recall memory representations from short- and long-term memory, store them in short and continuously update them. Reaction speed and working speed are measured, no matter if the reaction was correct or incorrect [142].

III. Stroop Interference Test S7: Color-Word Interference, 15 min:

A test which was constructed to measure speed and recognition of words and colors under the influence of a color-word interference. First, a baseline of reading and

reaction speed is set up by identifying color terms in black letters and colored blocks, then pressing the corresponding-colored button (red, green, yellow, blue). Afterwards, the objective is to read different colored color terms and only react to the exact word, not the color of the letters, while being presented antagonistic colors. Again, the corresponding button must be pushed. At last, the participants must identify the color of the letters, which are also presented in antagonistic colors, not the word itself, as quickly as possible and – again – press the corresponding button on the keyboard. Output variables are the reading and naming interference tendency and factors which measures sensomotor speed, the ability to control cognitive interference, information processing and attention processes [35].