

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Recovery-Atmung: Optimierung der Regeneration bei Sprint-Intervalltraining

verfasst von | submitted by

Simon Laister BSc BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree pro-
gramme as it appears on the student record
sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Robert Csapo

Abstract

Ein optimales Wechselspiel zwischen Erholung und Ermüdung ist notwendig, um sich bestmöglich an Trainingsreize anzupassen. Zur Unterstützung der Regeneration werden oftmals Entspannungstechniken empfohlen, dennoch mangelt es an längerfristigen Studien in Verbindung mit Trainingsinterventionen.

Daher untersucht die folgende Arbeit, ob sich eine individualisierte Atemregulationsübung förderlich auf die durch ein Sprint-Intervalltraining ausgelösten Trainingspassungen auswirken kann. Insgesamt 26 Proband*innen wurden anhand ihrer Maximalgeschwindigkeit und gesamt zurückgelegten Strecke bei der Eingangstestung und Geschlechtszugehörigkeit gleichmäßig einer Interventions- (M = 5, F = 9) beziehungsweise einer Kontrollgruppe (M = 4, F = 8) zugewiesen. Das durchschnittliche Gewicht betrug $69,04 \pm 10,29$ und $71,83 \pm 9,84$, während das Durchschnittsalter bei $25,45 \pm 3,45$ und $26,76 \pm 2,40$ lag. Beide Gruppen folgten einem vierwöchigen Trainingsplan mit zwei bis drei Einheiten pro Woche, in denen jeweils drei bis sechs 30-sekündige all-out Sprints, getrennt durch vier Minuten aktiver Pause, durchgeführt wurden. Die Interventionsgruppe führte zusätzlich täglich sowie nach Abschluss aller Trainingseinheiten individualisierte Atemübungen zur Unterstützung der Regeneration durch. Zur Bestimmung der Effektivität der Intervention wurden die minimale und maximale Leistung sowie die gesamt erbrachte Arbeit vor Beginn, in der Mitte und nach Abschluss des Trainings gemessen und zu allen Testungen der Fatigue Index berechnet. Die statistische Analyse basierte auf gemischt-faktoriellen Varianzanalysen (Gruppe $\times$ Zeit).

Zu Beginn konnte kein Unterschied ($p > 0,05$) zwischen den Gruppen festgestellt werden. Signifikante Haupteffekte des Faktors „Zeit“ belegten Verbesserungen der minimalen Leistung ($p = 0,001$; korrigierter $\eta^2 = 0,242$), gesamten Arbeit ($p < 0,001$; korrigierter $\eta^2 = 0,388$) und des Fatigue Index ($p = 0,043$; korrigierter $\eta^2 = 0,123$). Die Verbesserungen unterschieden sich nicht zwischen den Trainingsgruppen (alle Interaktionseffekte $p > 0,05$).

Die Ergebnisse zeigen keinen zusätzlichen Benefit der individualisierten Atemübungen hinsichtlich der Leistungssteigerung im Vergleich zur Kontrollgruppe. Möglicherweise war die Stichprobengröße zu klein oder die Interventionsdauer zu kurz, um Effekte nachzuweisen. Eine Analyse der Parameter, die einen umfassenderen Einblick in den physiologischen Erholungszustand liefern könnten, wie etwa physiologische Marker oder Schlafdaten, ist noch ausständig und könnten in dieser sowie zukünftigen Studien potenzielle Unterschiede aufzeigen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
Inhaltsverzeichnis	3
Vorwort	5
1 Einleitung	6
1.1 Das Zusammenspiel von Regeneration und Stress	6
1.2 HPA-Achse	7
1.3 Autonomes Nervensystem	9
1.3.1 Anatomie und allgemeine Funktion	9
1.3.2 Auswirkungen auf bestimmte Organe	10
1.4 Sprint-Intervalltraining	14
1.4.1 Grundlagen und Definition	14
1.4.2 Metabolische Anforderungen	14
1.4.3 Chronische Anpassungen an Sprint-Intervalltraining	17
1.5 Langsame Atemübungen	18
1.5.1 Definition und Auswirkungen auf den Körper	18
1.5.2 Potenzielle Optimierung der Regeneration	19
1.6 Forschungsfragen	22
2 Methodik	23
2.1 Proband*innen	23
2.2 Randomisierung und Stichprobengröße	23
2.3 Studiendesign	24
2.3.1 Erster Termin	24
2.3.2 Zweiter Termin	25
2.3.3 Erste Testung	25
2.3.4 Weiterer Ablauf der Studie	26
2.4 Trainingsplan und Atemübungen	26
2.5 Statistische Auswertung	29
3 Resultate	30

3.1 Deskriptive Statistik	30
3.2 Leistungsbezogene Parameter	30
4 Diskussion und praktische Empfehlungen.....	37
4.1 Interpretation der Daten	37
4.1.1 Gruppenunabhängige Veränderungen	37
4.1.2 Gruppenspezifische Veränderungen	39
4.2 Limitationen der Studie und Ausblick	45
4.3 Praktische Empfehlung	47
4.4 Schlussfolgerung	48
Literaturverzeichnis.....	49
Erklärung	60

Vorwort

Die nachfolgende Masterarbeit analysierte einen Teil der erhobenen Parameter der Sprint-Intervallstudie, welche gemeinsam mit Peter Raidl (MSc) unter Leitung von Prof. Robert Csapo geplant und gestartet wurde. In diesem Sinne gilt ihnen mein besonderer Dank für die gemeinsame Zusammenarbeit und die wertvolle Unterstützung.

Das Ziel der Intervention war es, die Regenerationsprozesse nach intensiven Trainingseinheiten durch den Einsatz einer individualisierten Atemtechnik zu optimieren. Zum Zeitpunkt der Datenanalyse war die Studie noch nicht abgeschlossen, weshalb die Arbeit vorläufige Ergebnisse auf Basis eines Subsets der angestrebten Probandenanzahl präsentiert. Ausblickend wird nach vollständiger Datenerhebung das Verfassen eines Papers über die Studie angestrebt. Bei den analysierten Daten handelte es sich um die maximale und minimale Leistung, die gesamt erbrachte Arbeit und den Fatigue Index. Weitere Parameter der Studie waren unter anderem die Erhebung subjektiver und objektiver Schlafdaten sowie die Messung der Herzfrequenz und Herzratenvariabilität während der Einheiten im Labor.

Die Arbeit baut auf grundlegende Aspekte von Regeneration und Stress auf und erklärt, warum ein optimales Zusammenspiel beider Systeme relevant ist. Sie beleuchtet insbesondere die Rolle des autonomen Nervensystems, das einen wichtigen Ansatzpunkt der Intervention darstellt. Es wurde erläutert, wie hochintensive Trainingsmethoden, spezifisch anhand eines Sprint-Intervalltrainings, den Körper fordern und wie sich dieser im Laufe der Zeit daran anpasst, sowie wie sich langsame Atemübungen auf den Körper auswirken und wie sie potenziell die Anpassungsreaktionen beeinflussen können.

Mit dem Verfassen dieser Arbeit und der Analyse der ersten Parameter der Studie wird ein tieferes Verständnis für das Zusammenspiel von Belastung, Erholung und längerfristiger Leistungsfähigkeit angestrebt.

1 Einleitung

1.1 Das Zusammenspiel von Regeneration und Stress

Das Wechselspiel zwischen Regeneration und Ermüdung und dessen Auswirkung auf die Trainingsanpassungen spielt sowohl bei Athlet*innen als auch bei Gesundheitssportler*innen eine wichtige Rolle. Ein gewisses Maß an Ermüdung ist notwendig, um Anpassungsreaktionen im Körper auszulösen, welche dann in der Erholungsphase kompensiert werden (Kellmann et al., 2018). Dieses Prinzip ist in allen Bereichen gleich, ganz egal ob es sich im Training nun um die Steigerung der Leistung, die Wiedererlangung oder den Erhalt eines bestimmten Niveaus handelt. Bei der Erholung von Trainingseinheiten ist es notwendig, nicht nur den physiologischen Stress zu beobachten, sondern laut Expert*innen wird in Positionspapieren und Leitlinien darauf eingegangen, dass psychischer Stress ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor ist (Kellmann et al., 2018). Letzterem wird allgemein eine negative Wirkung auf die Regeneration und Trainingsanpassung (Stults-Kolehmainen & Bartholomew, 2012) sowie auf die Wundheilung (Walburn et al., 2009) zugeschrieben. Zudem konnte auch gezeigt werden, dass sowohl durch intensive körperliche Belastungen als auch durch akademischen Stress die Verletzungsgefahr bei sportlichen Aktivitäten erhöht ist (Mann et al., 2016). Die Begriffe Erholung und Ermüdung sind jeweils auf einem Kontinuum zu sehen, welche durch eine Vielzahl an externen und internen Faktoren beeinflusst werden und eng miteinander verbunden sind. Ein Ungleichgewicht in diesem Wechselspiel kann somit über eine längere Zeit zu unerwünschten Begleiterscheinungen führen (Kellmann et al., 2018).

Einerseits eignet sich sportliche Betätigung gut zur Steigerung des körperlichen Wohlbefindens und zur Reduzierung von stressassoziierten Symptomen (Singh et al., 2023), aber andererseits ist sie auch ein Stressor für den Körper (Athanasίου et al., 2023) und kann sich durchaus auch negativ auf die Gesundheit des Organismus auswirken, insbesondere, wenn das Verhältnis zwischen Belastung und Erholung unausgewogen ist (Kellmann et al., 2018). Das Modell der allosterischen Last bietet (McEwen, 2000) die Basis für die Vermutung, dass sich physische und psychische Belastungen negativ auf Anpassungsprozesse des Körpers und die Regeneration auswirken können (Kellmann et al., 2018; Stults-Kolehmainen & Bartholomew, 2012; Walburn et al., 2009). Dieses Modell beschreibt den Preis, den der Körper eingehen muss, um die Homöostase aufrecht zu erhalten. Hierbei ist es wichtig zu unterscheiden, ob die Reaktionen kurzfristig auf einen physiologischen Reiz wie eine Blutdruckänderung nach dem Aufstehen abzielen oder ob es sich um eine chronische und damit pathologische Veränderung wie Bluthochdruck handelt und den Körper längerfristig schädigen kann (McEwen, 2000).

Anhand der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HPA-Achse) und des autonomen Nervensystems kann man die oben erwähnten Prozesse und Konzepte genauer betrachten. Diese sind wichtige physiologische und gut untersuchte Systeme des Körpers, welche bei der täglichen Stressantwort maßgeblich beteiligt sind und einem Tageszyklus unterliegen (McEwen, 2000).

1.2 HPA-Achse

Die HPA-Achse ist eines der Systeme, welches bei einer Stressantwort stimuliert wird. Eine Aktivierung dieses Systems führt zu einer Freisetzung von Corticotropin-Releasing-Hormon (CRH) und Arginin-Vasopressin (AVP) aus dem Hypothalamus. Diese beiden Hormone werden über das hypophysäre Pfortadersystem zum Hypophysenvorderlappen transportiert. Dort angekommen bindet das CRH an den Corticotropin-Releasing-Faktor-Rezeptor 1 und führt zur Freisetzung des Adrenocorticotropen Hormons (ACTH). AVP moduliert ebenfalls die Synthese und Freisetzung von ACTH über mehrere Mechanismen. ACTH wird in die Blutbahn abgegeben, gelangt somit zur Nebennierenrinde und bindet dort an den Melanocortin Typ 2 Rezeptor in der Zona Fasciculata, was zur Synthese und Freisetzung von Glukokortikoiden, wie Cortisol im Menschen, führt (Burford et al., 2017; Smith & Vale, 2006). Durch die Ausschüttung von Glukokortikoiden ist der Körper in der Lage, auf äußere oder innere Stressfaktoren zu reagieren. Diese modulieren die Expression von zahlreichen Genen, die den Stoffwechsel, die Immunfunktion oder die Entzündungsreaktion betreffen (Burford et al., 2017).

In Bezug auf sportliche Aktivität führt die Produktion von Glukokortikoiden zu einer verbesserten Verfügbarkeit von energiereichen Substraten sowie zur Aufrechterhaltung der normalen vaskulären Integrität und Reaktionsfähigkeit (Duclos & Tabarin, 2016). Darüber hinaus postulieren Duclos & Tabarin (2016), dass Glukokortikoide eine Überreaktion des Immunsystems auf wiederholte aktivitätsbezogene Muskelschäden verhindern, indem sie diese Reaktion formt und eindämmt (Sapolsky et al., 2000).

Betrachtet man die Antwort der HPA-Achse auf ein Ausdauertraining, dann spielen Intensität und Dauer der Aktivität eine entscheidende Rolle. Die minimale Intensität beträgt 60 % der VO_{2max} , um eine Cortisolantwort auszulösen (Athanasίου et al., 2023). Diese steigt linear mit der Intensität an. Bei Belastungen unter dieser Grenze kann es ab einer Dauer von 90 Minuten bei 40 % der VO_{2max} ebenfalls zu einem Anstieg kommen. Bereits 120 bis 150 Minuten nach Belastungsende sinkt der Cortisolspiegel wieder auf das Ausgangsniveau ab

(Athanasίου et al., 2023; Duclos & Tabarin, 2016). Wiederholte und verlängerte Cortisolsekretionen aufgrund von Training führen im peripheren Gewebe zu einer verminderten Sensitivität gegenüber Glukokortikoiden. Dies schützt den Körper vor den metabolischen und immunologischen Konsequenzen eines erhöhten Cortisolspiegels und kann so zu einer erhöhten Resilienz gegenüber Stress beitragen (Duclos & Tabarin, 2016). Glukokortikoide spielen eine wichtige Rolle bei der Regulierung der basalen Aktivität der HPA-Achse, sowie bei der Beendigung der Stressantwort. Über einen negativen Feedbackloop auf der Ebene des Hypothalamus und der Hypophyse hemmen sie die Ausschüttung von CRH und ACTH (Charmandari et al., 2005).

Dass sich die Ruheaktivität der HPA-Achse nicht zwischen trainierten und untrainierten Personen unterscheidet, wurde bereits erwiesen. Bei einer Aktivierung der HPA-Achse konnte vor allem bei ausdauertrainierten Personen, eine reduzierte hypophysäre Empfindlichkeit gegenüber der negativen Rückkoppelung von Glukokortikoiden beobachtet werden. Das führt dazu, dass diese Personen trotz einer kurzen Regenerationsphase in der Lage sind, eine weitere Trainingseinheit zu absolvieren (Duclos & Tabarin, 2016).

Die Datenlage in Bezug auf hochintensives Intervalltraining (HIIT) und die chronische Regulation der HPA-Achse ist sehr limitiert. Bogdanis et al. (2022) konnten in ihrer dreiwöchigen Studie mit neun Trainingseinheiten und vier bis sechs 30 s Sprints am Rad eine akute Steigerung des Cortisolspiegels nach 30 min beobachten. Dieser fiel aber bereits nach 24 h wieder auf das Ausgangsniveau ab. Am Ende der Studie konnte eine durchschnittliche Reduktion der Cortisolkonzentration im Vergleich zum Ausgangswert um 42 % festgestellt werden (Bogdanis et al., 2022).

Zusammengefasst basiert der Wirkmechanismus dieses Systems auf der Freisetzung von Hormonen aus dem Hypothalamus. Diese werden über das Medium Blut im Körper verteilt und können so ihre Funktion im peripheren Gewebe entfalten. Durch die hormonelle Signalweiterleitung gibt es eine gewisse Latenzzeit zwischen dem Auftreten eines Stressors und der darauf abgestimmten Wirkung am Zielort. Im Gegensatz dazu ermöglicht das autonome Nervensystem eine deutlich schnellere Reaktion auf Stressoren, welches mittels Neurotransmittern innerhalb kürzester Zeit die einzelnen Bereiche des Körpers beeinflussen kann und stellt somit eine wichtige Ergänzung zu der HPA-Achse dar. Diese beiden Systeme arbeiten eng zusammen (De Kloet et al., 2005).

1.3 Autonomes Nervensystem

1.3.1 Anatomie und allgemeine Funktion

Neben der HPA-Achse spielt das autonome Nervensystem (ANS) ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Stressreaktion. Dieses ist sehr umfangreich und innerviert nahezu alle Organe des menschlichen Körpers. Betrachtet man die Anatomie, so bekommt das ANS seinen Input vom zentralen Nervensystem (Gibbons, 2019).

Zu den wichtigen Regionen des zentralen Systems zählen vor allem das Vorderhirn, der Hirnstamm und das Rückenmark. Als Teil des Vorderhirns spielt der Hypothalamus erneut eine wichtige Funktion in der Kontrolle der Homöostase, indem er Signale über die autonomen Nervenbahnen in die Peripherie sendet. Dieser ist bei der Regulierung der Körpertemperatur, des Blutglukosespiegels, zirkadianen Rhythmus und Schlags sowie des allgemeinen Erregungszustands involviert (Gibbons, 2019).

Der funktionelle autonome Output des ANS setzt sich aus dem sympathischen (S) und parasympathischen (P) Nervensystem (NS) zusammen. Ein gut abgestimmtes Zusammenspiel dieser Systeme ermöglicht dem Körper, sich optimal an verschiedenste Situationen anzupassen (Gibbons, 2019; Wehrwein et al., 2016). Eine Stimulation des SNS führt den Organismus in einen Zustand erhöhter Leistungsfähigkeit, den sogenannten „fight or flight“-Modus. Das PNS hingegen senkt die zuvor gesteigerten Körperfunktionen wieder auf das Ausgangsniveau und wird demnach mit „rest and digest“, also Ruhe und Verdauung, assoziiert. Vereinfacht ausgedrückt, fördert das SNS katabole Effekte zur Bereitstellung von Energie, während das PNS anabole Prozesse stimuliert (Daniela et al., 2022). Die genauen Funktionen der beiden Systeme auf die verschiedenen Organe sind nicht ohne Weiteres in Überkategorien einzuteilen und können sowohl antagonistisch, synergistisch oder gar unabhängig voneinander ablaufen (Karemaker, 2017; Wehrwein et al., 2016). Durch die verschiedenen Wirkmechanismen ist es möglich, die autonomen Funktionen feiner aufeinander abzustimmen als nur mit einem unabhängigen System (Gibbons, 2019).

Eine wichtige anatomische Struktur des Parasympathikus ist der Vagusnerv. Dieser besitzt efferente Fasern, welche die glatte Muskulatur der Organe sowie exokrine und endokrine Zellen in Lunge, Herz, Bauchspeicheldrüse, Leber und auch Gastrointestinaltrakt innervieren (Capilupi et al., 2020). Zusätzlich dazu besitzt er einen großen Anteil, in etwa 80 %, an afferenten Fasern, welche Informationen aus den Körperregionen zum zentralen System leiten (Dolphin et al., 2022).

Ein Kennzeichen, welches beide Systeme dennoch gemeinsam haben, ist, dass die Zielorgane nicht direkt mit dem zentralen Nervensystem verschaltet sind. Sie besitzen nämlich Relais-Nervenzellen außerhalb des Schädels und Wirbelkanals, welche dazwischengeschaltet sind. Anhäufungen dieser Schaltzentralen werden als Ganglia bezeichnet (Karemaker, 2017).

Somit kann eine Unterteilung in eine präganglionäre und postganglionäre Fasern vorgenommen werden (Karemaker, 2017). In der Regel sind die präganglionären Fasern des SNS kurz, während die postganglionären Fasern lang sind. Dieses Verhältnis ist im PNS genau umgekehrt (Gibbons, 2019). Beide Systeme verwenden Acetylcholin als präganglionären Neurotransmitter, der an nikotinische Rezeptoren bindet. Der postganglionäre Transmitter des Sympathikus ist hauptsächlich Noradrenalin, das adrenerge Rezeptoren aktiviert, mit der Ausnahme der Nebenniere und der Schweißdrüsen, die Adrenalin beziehungsweise Acetylcholin ausschütten. Der postganglionäre Transmitter des parasympathischen Systems ist ebenfalls Acetylcholin, das nun an muskarinische Rezeptoren an den Endorganen bindet (Karemaker, 2017; Wehrwein et al., 2016). Muskarinische und adrenerge Rezeptoren gehören zu der Familie der G-Protein-gekoppelten Rezeptoren, während nikotinische Rezeptoren zu den ligandengesteuerten Ionenkanälen zählen. Diese reagieren spezifisch auf ihren jeweiligen Liganden und lösen intrazelluläre Signalkaskaden aus (Barry & Lynch, 2005; Sanders et al., 2008). Durch ein Blockieren von bestimmten Rezeptoren ist es somit möglich, die Wirkungsweisen des SNS und PNS auf den menschlichen Organismus zu untersuchen. Parallel oder gar anstelle der Hauptneurotransmitter können weitere Co-Transmitter, Neuropeptide, nicht-adrenerge und nicht-cholinerge Transmitter in spezifischen Geweben freigesetzt werden, wie zum Beispiel Stickstoffmonoxid von parasympathischen Neuronen aus den Hauptganglien (Karemaker, 2017; Wehrwein et al., 2016).

Das enterale Nervensystem wird im Sinne der Vollständigkeit nur kurz erwähnt. Es wird zwar durch das SNS und PNS innerviert, verfügt aber über ein eigenes Gangliengeflecht im Magen-Darm-Trakt, was die autonome Funktion noch weiter moduliert. Die Anzahl der Zellen des enterischen NS ist sogar vergleichbar mit der des gesamten Rückenmarks (Gibbons, 2019).

1.3.2 Auswirkungen auf bestimmte Organe

Betrachtet man das Herz, so steht dieses unter dem Einfluss beider Systeme. Der parasympathische Einfluss dominiert in Ruhe und führt zu einer Senkung der Herzfrequenz sowie potenziell zu einer Abnahme der Schlagkraft und verlängert die Reizweiterleitung am AV-

Knoten. Der Sympathikus hingegen wird bei körperlicher Aktivität und Stress stimuliert, was zu einem Anstieg des zirkulierenden Adrenalins und lokal freigesetzten Noradrenalins führt und auf Grund dessen zu einer Steigerung der Herzfrequenz und Schlagkraft beiträgt (Karemaker, 2017). Der Parasympathikus ist in der Lage, schneller als der Sympathikus Einfluss auf das Herz zu nehmen. Das liegt an einer höheren Reizweiterleitungsgeschwindigkeit und an der Acetylcholin-Rezeptor-Kinematik. Zusätzlich dazu inhibiert Acetylcholin die Freisetzung von Noradrenalin am Sinus-Knoten (Russo et al., 2017). Regelmäßige sportliche Aktivität ist nun dazu in der Lage, über längere Sicht die Herzfrequenz in Ruhe zu reduzieren, indem die Aktivität des PNS angeregt wird (Fu & Levine, 2013).

Ein Marker für die autonome Regulation des Herzens ist die Herzfrequenzvariabilität (HRV). Diese ist eine physiologische Variabilität in den Zeitintervallen aufeinanderfolgender Herzschläge. Es konnte gezeigt werden, dass eine Beeinträchtigung der autonomen Modulation in Zusammenhang mit kardiovaskulären Ereignissen steht, entweder durch eine erhöhte Aktivität des Sympathikus und/oder reduzierte Aktivität des Parasympathikus. Auch Krankheiten wie Adipositas, metabolisches Syndrom, Typ 1 und 2 Diabetes oder auch das natürliche Altern sind mit einer Reduktion der HRV assoziiert. Kardiovaskuläres Training führt bei diesen Gruppen zu einer Verbesserung der autonomen Modulation. Bei gesunden Personen ist es noch unklar, wie sehr körperliche Aktivität die autonome Funktion noch weiter verstärkt (Souza et al., 2021).

Der Rückgang der Herzfrequenz nach einer Belastung ist ebenfalls ein Marker des PNS, während die Abnahme des SNS erst später in der Erholung relevanter wird. Eine rasche Abnahme der Herzfrequenz wird mit einem guten Gesundheitszustand assoziiert. Dieser wird von der Körperposition beeinflusst und fällt in einer liegenden Position größer aus als stehend. Außerdem hängt der Effekt von der erreichten maximalen Herzfrequenz ab. Eine höhere Herzfrequenz führt zu einem stärkeren Abfall in der Ruhephase. Eine niedrige Erholung der Herzfrequenz muss somit nicht zwingend in Verbindung mit einer pathologischen Ursache stehen (Fu & Levine, 2013). Zur Bestimmung der Erholung der Herzfrequenz können unterschiedliche Zeitrahmen verwendet werden. Diese sind in der Regel zwischen 30 Sekunden und zwei Minuten nach der Aktivität (Bestwick-Stevenson et al., 2022). Auf Grund einer besseren Regulierung des ANS zeigen trainierte Personen einen schnelleren Rückgang der Herzfrequenz nach Belastungsende als untrainierte Personen, was wiederum zu einer rascheren Erholung nach akuten Belastungen führen kann (Fu & Levine, 2013).

Anders als bei der Herzfrequenz ist für die Aufrechterhaltung des Blutdrucks nicht das PNS, sondern vor allem das SNS zuständig. Der Druck ergibt sich aus dem Herzzeitvolumen und dem Gefäßwiderstand. Die Regulation basiert auf Veränderungen des Gefäßwiderstands, der Herzfrequenz und des Schlagvolumens. Durch die gute Innervierung der Blutgefäße mit dem Sympathikus ist dieser dafür zuständig, den Blutfluss auf globaler Ebene zu regeln (Karemaker, 2017). Die Barorezeptoren liefern das afferente Signal, hauptsächlich im Aortenbogen und in den Aa. carotides, auf welches das SNS reagiert (Russo et al., 2017). Dies geschieht durch vaskuläre glatte Muskelzellen, welche den Durchmesser von Blutgefäßen modulieren können und läuft in enger Zusammenarbeit mit lokalen Mechanismen. Ein Großteil der Regulation auf lokaler Ebene geschieht als Reaktion auf das umgebende Milieu, wie die Laktatbildung im arbeitenden Muskel. Die glatten Muskelzellen werden entweder direkt oder durch lokal produzierte dilatierende oder kontrahierende Stoffe, wie zum Beispiel Stickstoffmonoxid (NO), beeinflusst. Abhängig von den spezifischen Rezeptoren in den Geweben kann die Stimulation des Sympathikus einerseits zu einer Erweiterung von Herzkranzgefäßen und Arterien der aktiven Muskulatur, aber gleichzeitig auch zu einer Konstriktion von Arterien und Venen der nichtverwendeten Bereiche führen. Bei gesunden Menschen spielt der Blutdruck bei der Regulation der HRV eine besonders wichtige Rolle. Durch ein Ansteigen des Druckes senden Barorezeptoren erneut ein afferentes Signal und aktivieren diesmal die Aktivität des Vagusnervs (Karemaker, 2017). Es konnte gezeigt werden, dass sportliches Training die Funktion von Barorezeptoren verbessert und somit vor einer Verringerung der Barorezeptorsensitivität im Alter schützen kann. Dass Sport zu einer Reduktion des Blutdrucks beiträgt, ist auf neuronale Mechanismen zurückzuführen, da die sympathische Aktivität nach einer Trainingseinheit herabgesetzt ist (Fu & Levine, 2013).

Die Lunge wird ebenfalls durch beide Systeme innerviert. Diese wechseln sich während eines normalen Atemzyklus ab. Bei der Inspiration wird das SNS aktiviert und es kommt zu einer Dilatation der Bronchien, während bei der Expiration das PNS zu einer Konstriktion beiträgt. Atemfrequenz und -tiefe werden jeweils an die momentanen Bedürfnisse angepasst. Chemorezeptoren liefern das afferente Signal, welches an das Zwerchfell und die Mm. intercostales weitergegeben wird, was zu einer Ausdehnung der Lunge führt. Der kardiorespiratorische Rhythmus wird vom Atemrhythmus beeinflusst und umgekehrt. Die Herzfrequenz erhöht sich bei der Einatmung und sinkt wieder während der Ausatmung. Man spricht in diesem Fall von einer respiratorischen Sinusarrhythmie (Karemaker, 2017). Zusätzlich dazu kommt es auch zu einer Synchronisation der Atemphasen mit der HRV. Es wurde ebenfalls nachgewiesen, dass die HRV und der Blutdruck natürlichen Oszillationen unterliegen, die sowohl rhythmisch als auch teils spontan auftreten können. Diese Veränderungen stehen im Zusammenhang mit dem vorhin genannten negativen

Feedbackmechanismus der Barorezeptoren (Russo et al., 2017; Sevoz-Couche & Laborde, 2022). Bei der Inspiration fallen der linksventrikuläre Output sowie der Blutdruck. Dadurch werden Barorezeptoren aktiviert und es kommt zu einer kompensatorischen Erhöhung der Herzfrequenz. Zeitgleich dazu kommt es zu einer Inhibition des PNS. Bei der Expiration geschieht jeweils das Gegenteil und es kommt zu einer Senkung der Herzfrequenz (Karemaker, 2017).

Weitere Effekte des SNS sind die Stimulierung der Glykolyse in der Leber sowie der Lipolyse in den Fettzellen und eine Suppression des Immunsystems, während das PNS die Glykogensynthese stimuliert und das Immunsystem aktiviert (Karemaker, 2017). Bei Ausdauerbelastungen reguliert das SNS über die Produktion von Katecholaminen, vor allem Adrenalin und Noradrenalin, die hepatische Glukoseproduktion und den Fettstoffwechsel. Der Anstieg der Katecholamine ist abhängig von der Intensität und Dauer der Belastung. Unabhängig von der Intensität steigt der Spiegel kontinuierlich bis zur Ausbelastung an (Zouhal et al., 2008). Die minimale notwendige Dauer ist noch unbekannt (Athanasίου et al., 2023). Kraemer et al. (1999) konnten zeigen, dass der Adrenalin Spiegel bei trainierten Powerliftern bereits vor der körperlichen Aktivität ansteigt. Das lässt auf eine antizipatorische Antwort von Athlet*innen vor Beginn des Trainings oder Wettkampf schließen, bei der der Körper schon vorab auf die kommende Belastung vorbereitet wird (Kraemer et al., 1999; Zouhal et al., 2008). Die Freisetzung von Noradrenalin ist bei gleicher Dauer wiederum von der Intensität abhängig. Nach Beendigung der Einheit kommt es zu einem schnellen Absinken der Spiegel auf das Ausgangsniveau. Eine Minute ist bereits ausreichend, um den Adrenalin Spiegel um ca. 35 % zu senken (Zouhal et al., 2008). Im Vergleich zu untrainierten Personen stoßen ausdauertrainierte Personen bei der gleichen relativen Intensität mehr Adrenalin aus. Es handelt sich um eine chronische Anpassung des Nebennierenmarks an Sport. Weiters konnte eine höhere Adrenalinantwort bei trainierten männlichen Probanden im Vergleich zu weiblichen Probanden beobachtet werden. Dies liegt teilweise an den verschiedenen Trainingsarten, -intensitäten und/oder -dauern beziehungsweise an verschiedenen Studiendesigns, welche einen direkten Vergleich erschweren. Auch in den Sexualhormonen konnten Unterschiede beobachtet werden, wofür die verschiedenen Zyklusstadien ausschlaggebend sein könnten. Bei untrainierten Personen hingegen konnte kein Unterschied der Katecholaminausschüttung zwischen den Geschlechtern beobachtet werden (Zouhal et al., 2008).

Um die Wechselwirkungen zwischen der Regulation des autonomen Nervensystems und intensiven Trainingseinheiten besser verstehen zu können, ist es notwendig, einen tieferen Einblick in die physiologischen Anforderungen und Anpassungsreaktionen dieser

Trainingsform zu bekommen. Solche Belastungen stellen einen unmittelbaren Stress für den Körper dar, auf den er adäquat reagieren muss. Dies spielt nicht nur im Breitensport eine wichtige Rolle, sondern insbesondere auch im Leistungssport (Athanasίου et al., 2023).

1.4 Sprint-Intervalltraining

1.4.1 Grundlagen und Definition

Ein Sprint-Intervalltraining (SIT) ist eine Art des Ausdauertrainings, das durch mehrere kurze, hochintensive supramaximale oder all-out Sprints gekennzeichnet ist, welche mit niedrigintensiven Erholungsphasen abwechseln. Studien zeigen, dass eine Trainingsintensität über der VO_{2max} genauso effektiv oder sogar effizienter als moderates Training sein kann, und das bei geringerem Trainingsvolumen (MacInnis & Gibala, 2017; Smith et al., 2023). Nach Hall et al. (2023) ist SIT eine effektive Methode, um sowohl die aerobe als auch die anaerobe Leistung zu steigern. Es reichen bereits zwei Wochen aus, um die ersten Leistungsverbesserungen festzustellen. Die häufigste untersuchte Dauer beträgt bis zu vier Wochen mit einer durchschnittlichen Frequenz von drei Einheiten pro Woche mit vier bis sechs Durchgängen pro Training und einer Sprintdauer von 30 Sekunden. Das Verhältnis zwischen Belastung und Erholung beträgt 1:8. Ein niedrigeres Verhältnis würde die aeroben Veränderungen begünstigen, während eine Erhöhung effektiver für anaerobe Parameter ist (Hall et al., 2023). Je nach Trainingsziel sollte hier auf der entsprechenden Ebene interveniert werden. Längere Sprintzeiten (> 20 Sekunden) scheinen effektiver zu sein als kürzere (< 10 Sekunden) und es konnte ein linearer positiver Zusammenhang zwischen der Sprintanzahl und den Leistungsverbesserungen identifiziert werden (Hall et al., 2023). Letzteres Ergebnis ist gegenteilig zu einer früheren Meta-Analyse von Vollaard et al. (2017). Diese konnten sogar einen gering negativen Zusammenhang erkennen, was bedeutet, dass die Leistungssteigerungen geringer ausfallen, wenn eine größere Anzahl an Sprints durchgeführt wird. Nach Hall et al. (2023) ist anzumerken, dass es sich vermutlich nicht um einen linearen Zusammenhang handelt, sondern, wie mit anderen Trainingsmodalitäten, eher um eine anfangs positive Steigerung mit Plateaubildung, welche erst danach negativ wird. Es ist wichtig zu erwähnen, dass ein Großteil (76 %) der Proband*innen aktiv waren, während 18 % aus einer inaktiven und nur 6 % aus einer wettkampfspezifischen Population stammten (Hall et al., 2023).

1.4.2 Metabolische Anforderungen

Die Energiebereitstellung zu Beginn von moderaten bis intensiven körperlichen Aktivitäten für die ersten 30 bis 60 Sekunden ist überwiegend anaerober Natur und das trotz

ausreichender Durchblutung und Sauerstoffversorgung der Muskeln. Diese Verzögerung des aeroben Systems beruht auf der Aktivierung mitochondrialer Enzyme, wie der Pyruvat-Dehydrogenase (PDH) und Carnitin-Acetyl-Transferase (Smith et al., 2023). Die PDH ist ein wichtiges Verbindungstück zwischen der Glykolyse und dem Citratzyklus. Es wandelt Pyruvat zu Acetyl-CoA um und ist somit maßgeblich an der aeroben Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten beteiligt (Sun et al., 2015). Carnitin-Acetyl-Transferase hingegen spielt im Fettstoffwechsel eine zentrale Rolle, indem es den Transport von Fettsäuren in die Mitochondrienmatrix ermöglicht und somit die Energiebereitstellung aus der β -Oxidation von Fettsäuren beeinflusst (Jogl et al., 2004). Durch das verzögerte Hochfahren der aeroben Prozesse findet demnach die anfängliche Resynthese von ATP zur Aufrechterhaltung der Aktivität vermehrt aus sauerstoffunabhängigen Stoffwechselvorgängen statt, bis die mitochondriale oxidative Phosphorylierung ausreichend stimuliert wurde und diese dann je nach Belastungsintensität übernimmt (Smith et al., 2023).

Bei kurzen, intensiven Belastungen steigt der muskuläre ATP-Verbrauch im Vergleich zum Ruhezustand dramatisch an. Die freien ATP-Speicher reichen bei maximalen Intensitäten in etwa nur bis zu zwei Sekunden aus. Um die Leistung weiterhin aufrecht zu halten, muss der Körper nun die Energie rasch zur Verfügung stellen und dies geschieht in erster Linie über anaerobe Prozesse. Zunächst spielt die Hydrolyse von Kreatinphosphat eine wichtige Rolle (Smith et al., 2023). Diese erreicht in den ersten sechs Sekunden bereits den Höhepunkt und fällt dann danach rapide ab. Nach Parolin et al. (1999) können sich die Kreatinspeicher bei einem 30-sekündigen all-out Sprint am Rad um bis zu 90 % entladen (Parolin et al., 1999). Die Resynthese von Kreatinphosphat ist über den Kreatin-Phosphat-Shuttle zu einem Großteil mit dem aeroben Stoffwechsel verbunden. Dabei gelangt Kreatin über spannungsabhängige Anionen-Kanäle in die Mitochondrienmembran und wird dort über die mitochondriale Kreatin-Kinase mit ATP wieder zu Kreatinphosphat aufgebaut (Perry et al., 2012). In der Studie von Parolin et al. (1999) reichten vier Minuten Pause zwischen den Sprints nicht aus, um die Kreatinphosphatspeicher wieder vollständig aufzuladen (Parolin et al., 1999). Ein weiterer wichtiger Mechanismus für eine rasche Energiebereitstellung ist der Glykogenabbau über die posttranslationale Modifikation der Glykogen-Phosphorylase in eine aktive Form mit Hilfe einer Phosphorylase-Kinase (Parolin et al., 1999; Smith et al., 2023). Diese Kinase wird über das Vorhandensein von Ca^{2+} und AMP reguliert (Katz, 2022). Nach 15 Sekunden einer all-out Belastung sinkt die Aktivität der Glykogen-Phosphorylase bereits wieder und es kommt zu einem Abfall der Glykogenolyse, was wiederum eine Erklärung für den weiteren Leistungsabfall zu diesem Zeitpunkt sein könnte (Parolin et al., 1999; Smith et al., 2023).

Gleichzeitig mit dem Absinken der anaeroben Energiebereitstellung erreicht die Aktivität der PDH ihren Höhepunkt, womit ab diesem Zeitpunkt vorrangig aerobe Prozesse für die ATP-Resynthese verantwortlich sind (Parolin et al., 1999). Laut Sousa et al. (2017) beträgt der relative Anteil des aeroben Systems bei einem einzigen 30 Sekunden all-out Sprint auf einem nicht motorisierten Laufband $20.6 \pm 7.3 \%$, während der anaerobe Anteil $79.4 \pm 7.3 \%$ ausmacht. Davon stammen wiederum $25.5 \pm 6.2 \%$ der Energiebereitstellung aus anaeroben Mechanismen aus dem Phosphagen-System (Sousa et al., 2017). Zusätzlich wurde festgestellt, dass bei wiederholten Sprintbelastungen die Aktivität der Glykogenolyse stark abnimmt, während die der PDH zunimmt (Parolin et al., 1999). Die zunehmende Bedeutung aerober Mechanismen erklärt, warum es im Laufe einer intensiven Belastung von 30 Sekunden zu einem deutlichen Leistungseinbruch kommt, da diese nicht mehr in der Lage sind eine ausreichend hohe ATP-Resynthese zu gewährleisten (Manchado-Gobatto et al., 2020; Parolin et al., 1999; Sousa et al., 2017).

Gepaart mit den Veränderungen in den Energiebereitstellungsmechanismen während der Sprintbelastungen zeigen sich Veränderungen des muskulären Milieus, welche sich auf die Ermüdung auswirken können. Laut Hureau et al. (2022) fallen anorganische Phosphate an, die ab einer gewissen Konzentration in das sarkoplasmatische Retikulum übergehen und dort die Freisetzung von Ca^{2+} beeinträchtigen können, was wiederum zu einer Störung der Muskelkontraktion führen kann (Cheng et al., 2018). Ca^{2+} -Ionen binden in der Muskelfibrille an Troponin. Dieses befindet sich am Aktinfilament und bildet gemeinsam mit Tropomyosin eine regulatorische Einheit, welche die Zugänglichkeit der Aktin-Bindungsstelle für Myosin steuert. Eine Anwesenheit von Ca^{2+} bewirkt eine Konformationsänderung im Komplex und Tropomyosin wandert von der Bindungsstelle weg und legt diese frei. Myosin kann sich somit anlagern und die Muskelkontraktion wird eingeleitet (Schiaffino & Reggiani, 2011). Nach Cheng et al. (2018) kommt es auch zu einer reduzierten Ca^{2+} -Sensitivität und zu einer verminderten Fähigkeit der Krafterzeugung durch Aktin- und Myosin-Querbrücken. Zudem kommt es im Rahmen der anaerob glykolytischen Energiebereitstellung zur Anhäufung von H^+ Protonen im Muskel zeitgleich mit der hohen Laktatproduktion von intensiven Belastungen. Ein einziger 30 Sekunden all-out Sprint ist in der Lage, den Laktatspiegel im System von $0,9 \pm 0,1 \text{ mM}$ auf $5,8 \pm 0,5 \text{ mM}$ anzuheben. Dieser Wert steigt in der Erholungsphase noch weiter an und erreicht nach ungefähr 8 bis 10 Minuten sein Maximum mit $16,2 \pm 0,7 \text{ mM}$. Die Herzfrequenz steigt rapide an und erreicht am Ende des Sprints fast maximale Werte. Wie eine aktuelle Arbeit zeigte, reichen selbst 18 Minuten passiver Erholung nicht aus, um diese physiologischen Parameter wieder auf das Ausgangsniveau zu senken (Manchado-Gobatto et al., 2020). Durch den hohen Protonengehalt sinkt der pH-Wert des Muskels, was wiederum zu einer Reduzierung der Aktivität der Glykogen-Phosphorylase

führen kann (Zagatto et al., 2022). Das könnte eine Erklärung sein, warum bei wiederholten Sprints die Aktivität der Glykolyse deutlich abnimmt (Parolin et al., 1999). Die hohe H^+ -Konzentration könnte zu einer Aktivierung von afferenten Fasern führen, welche auf metabolische Veränderungen reagieren und den motoneuronalen Output auf der Ebene des zentralen Nervensystems unterdrücken (Hureau et al., 2022). Die periphere und zentrale Ermüdung sind sehr komplex und hängen stark von der Belastungsmodalität, Intensität und Dauer ab (Cheng et al., 2018).

1.4.3 Chronische Anpassungen an Sprint-Intervalltraining

Die chronischen Verbesserungen auf aerober und anaerober Ebene sind auf mehrere Mechanismen zurückzuführen, die periphere und zentrale Anpassungen umfassen. Zu den peripheren Adaptionen zählen unter anderem eine erhöhte Mitochondrienkonzentration und eine gesteigerte Kapillardichte im Muskel, während zentrale Veränderungen auf der Ebene des kardiovaskulären Systems zu einer Erhöhung des Schlagvolumens, Blutvolumens sowie Herzzeitvolumens führen (MacInnis & Gibala, 2017; Smith et al., 2023). Ein SIT ist in der Lage, wichtige Signalwege der mitochondrialen Biogenese zu aktivieren, welche nach regelmäßiger Aktivierung zu Veränderungen im Muskel führen (Coffey & Hawley, 2007; Egan & Zierath, 2013). Dazu zählen die Phosphorylierung von AMP-aktivierter-Proteinkinase und p38 mitogenaktivierter Proteinkinase sowie eine erhöhte Expression der mRNA des Peroxisom-Proliferatoraktivierter-Rezeptor γ -Koaktivator-1 α (PGC-1 α) (MacInnis & Gibala, 2017). Es wird vermutet, dass PGC-1 α die Rolle eines Master-Regulators bei der mitochondrialen Biogenese einnimmt, indem es zu einer Koaktivierung zahlreicher mitochondrialer Transkriptionsfaktoren führt und somit maßgeblich an der Entwicklung des Ausdauerphänotyps beteiligt ist (Coffey & Hawley, 2007).

In Bezug auf die muskuläre Kapillarisation scheint ein SIT einem hochintensiven Intervalltraining und einem Training mit moderaten Intensitäten ähnlich oder leicht unterlegen zu sein (MacInnis & Gibala, 2017). Darüber hinaus kommt es laut Hall et al. (2023) zu einer Aktivitätszunahme mehrerer Enzyme des Metabolismus, unter anderem der Kreatinkinase, Phosphofructokinase, Laktat-Dehydrogenase und Glykogen-Phosphorylase. Es kommt zu einer Vergrößerung der Glykogenspeicher sowie der Pufferkapazität im Muskel (Hall et al., 2023). Es scheint, dass die hohe Intensität eine wichtige Rolle in der Mediation mitochondrialer Biogenese und Adaptionen der VO_{2max} spielt, vor allem in Relation zu moderateren Intensitäten. Damit ist es möglich, bessere, beziehungsweise zumindest vergleichbare Adaptionen mit weniger Volumen zu erzielen. Für andere physiologische Parameter ist die Studienlage noch nicht eindeutig genug, um beurteilen zu können, welche Trainingsmodalität die größtmöglichen Anpassungsreaktionen verspricht (MacInnis & Gibala, 2017).

Wie oben beschrieben, gehen maximale Belastungen mit hohen metabolischen Anforderungen einher, insbesondere wenn diese wiederholt durchgeführt werden. Zeitgleich steigt damit auch der Regenerationsbedarf an. Um eine optimale Leistungssteigerung oder konstant hohe Leistungen über mehrere kurz aufeinanderfolgenden Intervalle hinweg aufrechtzuerhalten, ist eine ausreichende Erholung zwischen den Einheiten und Durchgängen entscheidend. Dies gilt besonders für Sportsportarten wie zum Beispiel Fußball, Handball oder Tennis, bei denen sowohl die Intensität der Belastung als auch der dichte Turnierkalender hohe Anforderungen an die Regeneration stellen. Dabei kommt es nicht nur auf die physische Erholung, sondern auch auf den psychologischen Zustand des Individuums an (Kellmann et al., 2018). In diesem Zusammenhang können gezielt eingesetzte langsame Atemübungen sich sowohl auf Athlet*innen als auch für Gesundheitssportler*innen potentiell förderlich auswirken (Laborde et al., 2024).

1.5 Langsame Atemübungen

1.5.1 Definition und Auswirkungen auf den Körper

Unter langsamen Atemübungen versteht man das bewusste Atmen mit einer Frequenz von etwa sechs (vier bis zehn) Atemzügen pro Minute mit dem Ziel die HRV zu maximieren. Bei der Durchführung kommt es in der Regel zusätzlich dazu zu einer vermehrten Betonung der Ausatemphase in Relation zu der Einatemphase. Die spontane Atemfrequenz beim Menschen liegt im Vergleich normalerweise ungefähr in der Spanne von zehn bis zwanzig Atemzügen pro Minute (Laborde et al., 2022; Russo et al., 2017; Zaccaro et al., 2018). Laborde et al. (2024) merkten in ihrer Übersichtsarbeit auch an, dass sowohl individualisierte sowie nicht individualisierte Atemübungen sich positiv auf physiologische und psychologische Marker auswirken können.

Mit der Hilfe dieser Atemtechnik kann man nun gezielt auf der Ebene des autonomen Nervensystems eingreifen, um den physischen und psychologischen Zustand von Personen zu beeinflussen (Laborde et al., 2024; Perez-Gaido et al., 2021). Die Aktivität des Parasympathikus wird angeregt und es kommt zu einem erhöhten körperlichen Wohlbefinden (Russo et al., 2017; Zaccaro et al., 2018). Die bessere autonome Regulation durch bewusste langsame Atemübungen kann man an der gesteigerten HRV erkennen (Laborde et al., 2022). Es kommt zu einer besseren mentalen Gesundheit sowie einem niedrigeren Level an subjektivem Stress (Fincham et al., 2023). Außerdem scheint die Nasenatmung ein wichtiges Verbindungsstück zwischen langsamen Atemübungen, Gehirn und autonomer Aktivität zu sein und auch psychologische und verhaltensbezogene Prozesse zu beeinflussen (Zaccaro et al., 2018). Sevoz-Couche & Laborde (2022) konnten dies ebenfalls in ihrer

Übersichtsarbeit bestätigen und führen an, dass die Nasenatmung neuronale Oszillationen moduliert und den Blutfluss im Gehirn anregen kann, insbesondere im präfrontalen Cortex und im limbischen System. Um potenziell noch mehr Nutzen aus den Übungen zu ziehen, sollte bei der Durchführung die Ausatmung etwas länger als die Einatmung sein, da in dieser Phase der Vagusnerv vermehrt angeregt wird (Laborde et al., 2022).

Die optimierte Regulierung des autonomen Nervensystems durch langsame Atemübungen basiert in erster Linie auf einer gesteigerten Sensitivität der Barorezeptoren und einer erhöhten respiratorischen Sinusarrhythmie (Laborde et al., 2022). Auf Grund des Zusammenhangs der natürlichen Oszillationen der HRV und des Blutdrucks mit dem negativen Feedbackmechanismus der Barorezeptoren kann man mit einer Änderung der Atemfrequenz eine Verschiebung der Phasendifferenzen zwischen Atmung und HRV herbeiführen. Dies führt wiederum zu einer Beeinflussung der Amplitude der HRV. Bei etwa sechs Atemzügen pro Minute konnte eine Maximierung der HRV-Amplitude beobachtet werden. Diese Frequenz ist individuell leicht verschieden und kann von Person zu Person variieren. Man spricht dann von der sogenannten Resonanzfrequenz und sie kann mittels Biofeedbacks identifiziert werden. Durch langsames Atmen sollte es demnach möglich sein, die kardiovaskuläre Gesundheit zu fördern und die Regeneration des Organismus zu unterstützen (Russo et al., 2017; Sevoz-Couche & Laborde, 2022).

Sportler*innen werden zur Unterstützung der Regeneration und zur Vermeidung von Verletzungen Entspannungstechniken und Methoden zur Stressreduktion empfohlen (Ivarsson et al., 2017; Kellmann et al., 2018). Trotz dieser praktischen Empfehlungen haben sich dennoch erst wenige Studien mit dem Thema der Regeneration nach Trainingsinterventionen in Verbindung mit Entspannungsinterventionen beschäftigt (Pelka et al., 2017; Perez-Gaido et al., 2021; Pinto & McGill, 2020).

1.5.2 Potenzielle Optimierung der Regeneration

Ein spezifischer Ansatz zur Förderung der Regeneration besteht in der Anwendung langsamer Atemübungen. Bisher hat sich nur die Studie von Perez-Gaido et al. (2021) mit den Auswirkungen dieser Technik auf die akute Erholungsphase zwischen sowie nach submaximalen Läufen beschäftigt. Die Atemintervention wurde mit einer spontanen Atmung ohne Anweisungen vom Forschungsteam verglichen. An zwei Testtagen wurden jeweils zwei Läufe bis zum Erreichen von 80% der maximalen Herzfrequenz der Teilnehmer*innen durchgeführt. Bei allen Proband*innen wurde die Kontrollsituation zuerst getestet. Im Zeitraum zwischen den Testtagen wurde an zwei Terminen die individuelle Resonanzfrequenz ermittelt und für zehn Minuten geübt. Die konkrete Atemintervention belief sich auf 90 s

Atmen mit der individualisierten Frequenz nach der Belastung im Sitzen. Um eine bessere Adhärenz an die Frequenz zu gewährleisten, implementierten die Forscher*innen ein Zeitfenster von 30 s direkt nach der Belastung und noch vor der eigentlichen Atemübung, bei dem mit der doppelten Rate der Resonanzfrequenz geatmet wurde. Sie erhofften sich dadurch einen besseren Übergang zu der langsameren Atemfrequenz, da es ansonsten schwer wäre, diese direkt nach einem submaximalen Leistungstest auf Grund ihrer niedrigen Frequenz einzuhalten. In Hinblick auf die Erholungszeit konnten sie einen signifikanten Unterschied zwischen der langsamen Atmung und der spontan auftretenden Atmung feststellen. Diese war nach dem ersten ($45,80 \pm 30,2$ s und $56,40 \pm 30,0$ s) sowie nach dem zweiten ($55,40 \pm 28,2$ und $66,90 \pm 32,8$) Lauf in der Interventionsgruppe kürzer als in der Kontrollgruppe. Der Unterschied fiel nur nach dem zweiten Durchgang signifikant aus ($p = 0,05$), mit einer Tendenz beim ersten Durchgang ($p = 0,058$). Die Erholungszeit wurde in der Studie definiert als die Zeit, die die Proband*innen benötigen, um mit der Herzfrequenz wieder auf 50% der maximalen Herzfrequenz herunterzukommen. In der Interventionsgruppe konnte zu beiden Testungen und beiden Läufen eine längere Laufzeit beobachtet ($p < 0,05$) werden. Diese Ergebnisse sind im Einklang mit den Erkenntnissen der subjektiven Fragebögen, welche immer nach der zweiten Erholungsphase ausgefüllt wurden. Es wurden jeweils höhere Werte bei der subjektiven Beanspruchung aber auch bei der empfundenen Regeneration verzeichnet. Die Unterschiede zwischen den beiden Situationen erreichten kein signifikantes Niveau. Eine Limitation dieser Studie ist der Unterschied in der erbrachten Leistung bei den ersten Läufen. Diese sollte sehr ähnlich sein, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Intervention stattgefunden hat. Mögliche Gründe dafür könnten eine Gewöhnung an das Laufband oder auf Leistungsverbesserungen der Proband*innen zurückzuführen sein, welche zwischen den Testungen stattgefunden hat. Die Autoren sehen dennoch Potential hinter langsamen Atemübungen und ihre Effekte auf die Regeneration nach Trainingseinheiten oder auch im Wettkampf, vor allem bei Sportarten mit intermittierenden Belastungskomponenten (Perez-Gaido et al., 2021).

Es ist potenziell möglich über langsame Atemübungen einen Einfluss auf den Schlaf auszuüben und sich somit über diesen als Mediator förderlich auf die Erholung von Athlet*innen aber auch Freizeitsportler*innen auszuwirken (Laborde et al., 2019). Für eine optimale Regeneration nach anstrengenden Trainingseinheiten oder nach einem Wettkampf sowie für die psychologische und allgemeine Gesundheit spielt erholsamer Schlaf eine wichtige Rolle (Kellmann et al., 2018). Charest and Grandner (2020) geben an, dass Schlaf eine wichtige Funktion für eine optimale Leistungserbringung, sowohl körperlicher als auch kognitiver Natur, sowie bei der Reduktion der Verletzungsgefahr von Sportler*innen einnimmt. Laut ihnen unterliegen besonders Athlet*innen einem hohen Risiko für eine nicht ausreichende

Schlafdauer, Schlafqualität und damit einhergehend Tagesmüdigkeit sowie Schlafstörungen (Charest & Grandner, 2020). Das Positionspaper des Internationalen Olympischen Komitees betont, dass das Thema Schlaf einen wichtigen Punkt bei der mentalen Gesundheit sowie der Leistungserbringung von Athlet*innen einnimmt (Reardon et al., 2019). Aus diesen Gründen ist ausreichender und qualitativ hochwertiger Schlaf nicht nur für sportlich aktive Personen ein wichtiger Gesundheitsfaktor, sondern auch für die allgemeine Bevölkerung. Nach den Überlegungen von Laborde et al. (2019) sollte es möglich sein, mit Hilfe von langsamen Atemübungen die Schlafqualität zu beeinflussen. Sie konnten in ihrer 30-tägigen Intervention mittels Fragebogen einen positiven Effekt von langsamen Atemübungen im Vergleich zur Nutzung von sozialen Medien auf die subjektive Schlafqualität feststellen. Die Dauer der Atemübungen belief sich in der Studie auf 15 Minuten. Zusätzlich dazu konnten sie mit einem tragbaren EKG eine erhöhte Vagusaktivität während der Nacht beobachten. Sie nehmen an, dass es zu einer besseren kardiovaskulären Selbstregulation während des Schlafens kommt, welche sich wiederum potenziell positiv auf die Regenerationsprozesse auswirken kann. Sie konnten keine Veränderungen der Atemfrequenz in den Gruppen am folgenden Morgen beobachten (Laborde et al., 2019). Zusätzlich dazu konnten Balban et al. (2023) in ihrer Studie beobachten, dass sich bereits eine 5-minütige tägliche Atemübung im Verlauf von einem Monat positiv auf die Stimmung auswirkt und die physische Erregung verringern kann. Die Atemübungen führten im Laufe der Zeit zu einer Reduzierung der Atemfrequenz. Sie konnten in diesem Zeitrahmen keine Auswirkungen auf die Schlafqualität, gemessen an Schlaffeffizienz und Schlafstunden, HRV und Herzfrequenz in Ruhe beobachten (Balban et al., 2023). Für genauere Aussagen bezüglich der minimalen Dauer der Atemübungen beziehungsweise der Interventionsdauer bedarfs es noch weiterer Forschung (Balban et al., 2023; Laborde et al., 2019).

Basierend auf den theoretischen Überlegungen zur Rolle des autonomen Nervensystems in der Regeneration (Laborde et al., 2019, 2024; Perez-Gaido et al., 2021) und der bisher nachgewiesenen Effekte von langsamen Atemübungen auf physische und psychische Parameter (Jiménez Morgan & Molina Mora, 2017; Laborde et al., 2022; Pagaduan et al., 2020) sowie der ersten Ergebnisse von Perez-Gaido et al. (2021) sollte es demnach möglich sein, die Regeneration mittels langsamer Atemübungen über einen längeren Zeitrahmen positiv zu beeinflussen. Eine schnellere und verbesserte Regeneration würde sich nicht nur auf die sportliche Leistungserbringung bei Sportler*innen aber auch auf die allgemeine Gesundheit von gesundheitsbewussten Freizeitsportler*innen förderlich auswirken. Allerdings fehlen bisher längerfristige Trainingsinterventionsstudien in Kombination mit regenerationsfördernden Maßnahmen, um die Trainingsanpassungen zu fördern, gänzlich. Um demnach spezifische Aussagen bezüglich der konkreten Durchführung, minimalen

Dauer und sportspezifischen Outcomes zu tätigen, ist nach momentanem Stand nicht möglich.

In Anbetracht der bisherigen Erkenntnisse und der noch offenen Fragen hinsichtlich der Auswirkungen von langsamen Atemübungen auf Regenerationsprozesse, wurde die nachfolgende Studie konzipiert. Ziel der Untersuchung war es, die Effekte von individualisierten langsamen Atemübungen auf die Regeneration im Setting eines Sprint-Intervalltrainings genauer zu erforschen. Diese Studie sollte dazu beitragen, mehr Klarheit darüber zu liefern, inwiefern der Regenerationsprozess nach intensiven Belastungen durch Atemübungen verbessert werden kann, um potenziell die physiologischen Anpassungsreaktionen zu optimieren und somit langfristig zu einer besseren Leistungssteigerung zu führen.

1.6 Forschungsfragen

In dieser Forschungsarbeit wurde untersucht, ob individualisierte Atemregulationsübungen positive Auswirkungen auf die Regeneration nach einem Sprint-Intervalltraining haben und die Trainingsanpassungen fördern. Die folgenden Hypothesen wurden geprüft: Eine verbesserte Regulation des autonomen Nervensystems durch regelmäßige Atemübungen, welche täglich sowie zusätzlich nach den Trainings abgehalten werden, führt zu (1) einer schnelleren Regeneration zwischen den Sprints und zu einer verringerten Leistungsreduktion bei wiederholten Läufen, (2) einer zügigeren Erholung nach den Trainingseinheiten und somit zu einer verbesserten chronischen Leistungssteigerung.

2 Methodik

2.1 Proband*innen

Bei dem Projekt handelte es sich um eine randomisierte Studie mit zwei parallelen Gruppen, an der insgesamt 40 gesunde, junge Sportler*innen im Alter von 18 bis 40 Jahren teilnehmen. Ausgeschlossen wurden Personen mit Verletzungen der unteren Extremitäten oder der Wirbelsäule, welche im letzten Jahr eine Sportausübung für mehr als eine Woche verhinderten. Personen, welche im letzten Jahr in regelmäßiger psychiatrischer Behandlung waren, eine Störung des endokrinen oder kardiorespiratorischen Systems aufwiesen, sowie Personen mit einem BMI über 30 kg/m² wurden ausgeschlossen. Zudem wurden keine Personen inkludiert, die innerhalb des letzten Jahres regelmäßig Entspannungstechniken, Meditationen oder Atemübungen praktizierten.

2.2 Randomisierung und Stichprobengröße

Die randomisierte Zuteilung zu den beiden Studiengruppen erfolgte mittels einer erweiterten Version der Minimierungsmethode nach Pocock und Simon (Jin et al., 2019; Nishi & Takaichi, 2003). Die Gewichtung der Mittelwerte und Varianzen der variablen Maximalgeschwindigkeit und gesamt zurückgelegten Strecke bei der Eingangstestung wurden jeweils mit eins (1) gewichtet. Das Verhältnis der Anzahl an Personen in der jeweiligen Gruppe wurde mit zwei (2) gewichtet. Um einen Ausgleich zwischen beiden Geschlechtern zu erzeugen, wurde der Minimierungsprozess für weibliche und männliche Probanden einzeln durchgeführt.

Die Wahrscheinlichkeit der Zuteilung in die Gruppen wurde mit einer Stärke von 1:3 als „biased coin minimization“ (Jin et al., 2019) festgelegt. Dieses Verhältnis erwies sich in einer vorhergehenden Simulation als überlegen gegenüber einer zufälligen Zuteilung (1:1) ohne, dass es zu einer vollständigen Vorhersage durch die Forscher*innen kommen kann. Letzteres sollte vermieden werden, um (un-)bewusste Eingriffe in das Studienergebnis zu reduzieren (Scott et al., 2002).

Da uns keine vergleichbaren Studien zur Leistungssteigerung mittels Entspannungstechniken bekannt waren, orientierte sich die Ermittlung der erforderlichen Fallzahl an den Effekten von Studien mit ähnlichen Atemübungen und deren Auswirkungen auf Schlaf und HRV. Laborde (2019) verwendete in seiner Studie über einen vergleichbaren Zeitraum von 30 Tagen ein ähnliches Atemprotokoll. In dieser Studie konnte eine Verbesserung des subjektiven Schlafs mit einer Effektgröße von $\eta^2 = 0,14$ und eine Steigerung der nächtlichen HRV

mit einer Effektgröße von $\eta^2 = 0,2$ beobachtet werden (Laborde et al., 2019). Die geringste Effektgröße von Interesse wird konservativ mit $\eta^2 = 0,06$ angenommen. Diese liegt im Einklang mit den Kriterien von Cohen (1988) für eine mittlere Effektstärke. Mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5 \%$, einer konservativ angenommenen Korrelation ($r = 0,5$) zwischen den verbundenen Daten und einer angestrebten statistischen Power von $1 - \beta = 90 \%$ müssen demnach insgesamt 36 Personen eingeschlossen werden, um einen Effekt dieser Stärke nachweisen zu können. Zur Kompensation möglicher Ausfälle von Teilnehmer*innen, wurde eine Drop-out Rate von 10% eingerechnet. Daher werden insgesamt $n = 40$ Proband*innen für die Studie rekrutiert. Während die Datenerhebung in diesem Projekt zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Masterarbeit noch nicht abgeschlossen war, werden vorläufige Ergebnisse basierend auf einem Subset von 26 Personen präsentiert.

2.3 Studiendesign

2.3.1 Erster Termin

Zu Beginn der Studie wurden die Teilnehmer*innen über das Projekt informiert und gebeten, eine Einverständniserklärung zu unterzeichnen. Die Interventionsdauer betrug 4 Wochen und das Ziel des Trainingsprogramms war die Verbesserung der anaeroben Sprintleistung, während die Atemintervention darauf abzielte, die durch das Training erzielten Leistungsverbesserungen durch eine verbesserte Regeneration zu maximieren. Die Teilnehmer*innen wurden über die Ein- und Ausschlusskriterien aufgeklärt. Danach füllten sie einen Anamnesebogen sowie einen psychometrischen Test (Depressions-, Angst-, und Stressskalen, DASS-21, Nilges & Essau, 2015) aus, um Personen mit klinisch relevanten Angst-, Depressions- oder Stresssymptomen auszuschließen. Die Teilnehmer*innen werden angewiesen, ihre normalen Lebensgewohnheiten während der Studie beizubehalten. Am Ende des ersten Termins wurde, basierend auf dem Protokoll von Lehrer (2013), die individuelle Atemfrequenz ermittelt, die den größten Anstieg der HRV hervorruft.

Zur Messung der Herzfrequenz wurden die Proband*innen mit einem Brustgurt (Polar H10 Brustgurt, Finnland) ausgestattet, welcher zusätzlich dazu einen Beschleunigungssensor zur Kontrolle der Atemfrequenz besitzt. Die Messungen erfolgten im Sitzen nach einer fünfminütigen Ruhephase. Die Teilnehmer*innen atmeten jeweils zwei Minuten lang mit den Frequenzen 4.5, 5, 5.5, 6 und 6.5 Atemzügen pro Minute bei einem Ausatemungs-Einatmungsverhältnis von 2:1, gesteuert durch die App "Breathe" (Havabee, Indien). Zwischen den Durchgängen folgte eine zweiminütige Pause. In der nachfolgenden Analyse wurde jene Frequenz identifiziert, welche die höchste Anpassung der HRV und eine starke Sinusarrhythmie hervorruft. Anschließend erfolgte die Übergabe des Fitnesstrackers (Fitbit

Inspire 3, USA) zur Aufzeichnung des Schlafs und der Aktivität. Die Teilnehmer*innen erhielten ein Trainings- und Schlaftagebuch, welches sie ab diesem Tag täglich führten.

2.3.2 Zweiter Termin

Der zweite Termin erfolgte in der nächsten Woche. An diesem Tag fand die Validierung der individuellen Resonanzfrequenz und eine Eingewöhnung am nicht motorisierten Laufband (NMLB; Woodway, Force 3.0, USA) statt. Bei jedem Training durchliefen die Proband*innen vor dem Start des eigentlichen Sprint-Intervalltrainings ein standardisiertes Aufwärmprogramm. Dieses bestand aus fünf Minuten Radfahren am Ergometer bei 1 W/kg Körpergewicht, Schwunggymnastik und drei Steigerungsläufen am Laufband (20 s bei 50 %, 10 s bei 80 % und 5 s bei 100 % der maximalen subjektiven Laufleistung), die durch Pausen von 30 s und einer Minute getrennt waren. Danach erfolgte eine dreiminütige Pause, bevor es mit dem eigentlichen Training losging. Bei der Familisierungssession wurden nach dem Aufwärmprogramm 3 x 30 s Sprints mit 50 %, 80–90 % und 100 % der individuellen subjektiven Leistung, getrennt durch vierminütige Pausen, durchgeführt.

Abschließend wurden die Proband*innen im Entnehmen der Speichelprobe (Salivette, Sarstedt, Deutschland) geschult. Die Saugrolle muss am Morgen der Testtage direkt nach dem Aufstehen jeweils für zwei Minuten im Mundraum gehalten werden. Danach wurde sie wieder in die Salivette gesteckt. Diese wurde fest verschlossen im Kühlschrank aufbewahrt und zum nächsten Termin im Kraftlabor mitgenommen. Die Probe wurde vom Studienleiter für zwei Minuten bei 1000 g (RCF) zentrifugiert und zur späteren Analyse eingefroren. An den Testtagen wurden die Fragebögen „Erfassung subjektiver wahrgenommener Belastung (PSQ-20, Fliege et al., 2009)“ und „Akutmaß Erholung und Beanspruchung (AEB, Kellmann et al., 2016)“ ausgefüllt.

Die Teilnehmer*innen wurden darüber informiert, dass sie 24 h vor den Testterminen kein intensives sportliches Training durchführen sowie auf Alkohol, Schmerzmedikamente, entzündungsmodulierende Medikamente (NSAIDs) und/oder Nahrungsergänzungsmittel (z.B. Omega 3) verzichten sollten. Weiters sollten die Proband*innen am Tag der Testung kein Koffein, Nikotin oder andere ergogene Substanzen zu sich nehmen.

2.3.3 Erste Testung

Die erste Testung (W1T2) fand 48 bis 72 h nach der Familisierung statt. Vor dem Testprotokoll wurden Gewicht und Körpergröße bestimmt sowie eine Bioimpedanz-Analyse (BIA; DataInput, Deutschland) durchgeführt. Danach fand das standardisierte Warm-Up, gefolgt von 4 × 30 s maximaler Sprints mit vier Minuten aktiver Pause (lockeres gehen)

dazwischen, statt. Nach dem letzten Sprint wurden die Proband*innen aufgefordert, für vier Minuten locker zu gehen und sich dann für zehn Minuten in einen ruhigen Raum zu setzen. Die subjektive Anstrengung wurde an allen Testtagen zu fünf Zeitpunkten mittels VAS100 erfragt. Während der Sprints wurden die Teilnehmer*innen vom Forschungsteam durch aufmunternde Zurufe motiviert. Die Teilnehmer wurden explizit instruiert, während der Sprintintervalle keine Pacing-Strategien anzuwenden, sondern von Beginn an ihre maximale Leistung abzurufen. Zudem wurde ihnen empfohlen, etwa drei Sekunden vor dem eigentlichen Startsignal mit dem Beschleunigen zu beginnen, um eine optimale Sprintgeschwindigkeit zu erreichen. Am Ende des ersten Testtermins erfolgte die Zuweisung in die Interventions- oder Kontrollgruppe. Die Interventionsgruppe wurde in der Atemübung geschult, während die Kontrollgruppe einen 15-minütigen Vortrag über Stress und Sport bekam.

2.3.4 Weiterer Ablauf der Studie

Die weiteren Testtermine waren das erste Training in Woche 3 (W3T1) und das letzte Training in Woche 4 (W4T2). Bei der letzten Testung wurde erneut eine BIA durchgeführt. Während aller Testungen und Trainings im Labor wurde die Herzfrequenz und HRV mittels Brustgurt aufgezeichnet.

2.4 Trainingsplan und Atemübungen

Alle Einheiten, bis auf maximal drei, fanden auf einem NMLB im Kraftlabor am Institut für Sport- und Bewegungswissenschaft der Universität Wien statt. Diese Einheiten wurden von einer geschulten Person des Forschungsteams beaufsichtigt. Insgesamt waren über vier Wochen verteilt zehn Trainingseinheiten vorgesehen. Die Proband*innen durften in den Wochen zwei, drei und vier jeweils eine Einheit selbständig durchführen.

Das Trainingsvolumen wurde gemäß Trainingsplan wellenförmig von 3 bis 6 x 30 s Sprints erhöht. In der letzten Woche fand ein Tapering statt, um in der letzten Testung möglichst regeneriert zu sein. Angesichts der starken Belastung des Muskel-Sehnen-Apparats während Hochgeschwindigkeitsläufen, vor allem bei der Muskulatur der Beinrückseite (Edouard et al., 2022), wurde bei den Läufen am NMLB ein Widerstand von 5 % des Körpergewichts implementiert. Die Laufgeschwindigkeit verringert sich dadurch und es kommt zu einer höheren Leistung (Andre et al., 2013; Petrakos et al., 2016).

Die Atemübungen sollten täglich abends sowie nach den Trainingseinheiten für jeweils zehn Minuten durchgeführt werden. Die Kontrollgruppe führte keine zusätzlichen Übungen aus, blieb ebenfalls zehn Minuten nach den Trainingseinheiten im Labor, um die akute Zeit nach dem Training zu kontrollieren. Es stand den Teilnehmer*innen der Kontrollgruppe frei,

ob sie in dieser Zeit lesen, Musik hören oder einfach ruhig sitzen wollten, während die Proband*innen in der Atemübungsgruppe angewiesen wurden, die Übungen in ihrer individuell bestimmten Frequenz durchzuführen, die zuvor für jeden Teilnehmer*in ermittelt wurde.

Abbildung 1 zeigt das Studienprotokoll inklusive des Ablaufes der Trainingseinheiten im Überblick.

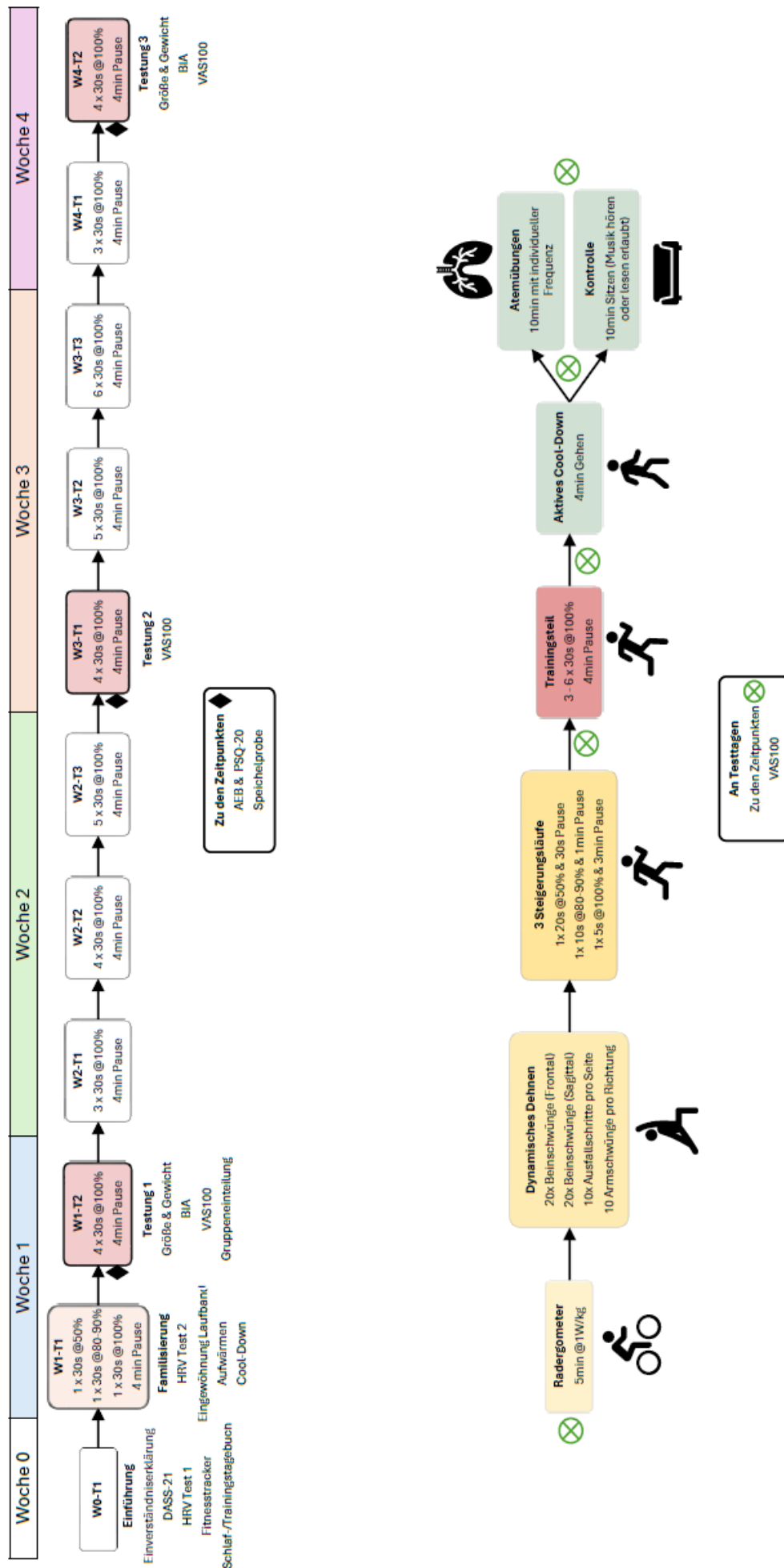


Abb. 1: Studienprotokoll inklusive Trainingsinhalte. In der oberen Zeile befindet sich eine schematische Darstellung des Studienprotokolls mit den jeweiligen Inhalten der einzelnen Tage, während sich darunter eine genauere Aufschlüsselung der Trainingseinheiten befindet.

2.5 Statistische Auswertung

Während der Testungen am Laufband wurde die Leistung ($P_{\max}$, $P_{\min}$) und Arbeit (W_{sum}) erfasst und für die statistische Auswertung relativ auf das Körpergewicht normiert. Die Spitzenleistung ($P_{\max}$) wurde für die Berechnung aus dem ersten Sprint und die minimale Leistung ($P_{\min}$) aus dem vierten Sprint entnommen und jeweils über einen gleitenden Durchschnitt mit einem Zeitfenster von zwei Sekunden ermittelt. Für die Entwicklung der Leistung wurden demnach die Sprints eins und vier betrachtet, während bei der physikalischen Arbeit hingegen die Summe aller Sprints analysiert wurde. Für die Analyse wurden die horizontalen Kräfte verwendet und immer die ersten 27 Sekunden der Sprints herangezogen. Die letzten drei Sekunden wurden auf Grund psychologischer Faktoren und dem damit verbundenen potenziellen Nachlass der Leistung von der Analyse ausgeschlossen. Die Arbeit wurde als Produkt der Kraft und des zurückgelegten Wegs und die Leistung als Verhältnis von Arbeit und Zeit berechnet. Die Leistungsentwicklung der beiden Gruppen wurde miteinander verglichen. Zusätzlich wurde aus der Leistung der Fatigue Index (FI) berechnet, um den Leistungsabfall während den Sprints zu quantifizieren. Dieser wurde nach der folgenden Formel berechnet: $FI = \frac{P_{\text{peak}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{peak}}} \times 100$ und ermöglichte es, festzustellen, ob sich die Interventionsgruppe während der Sprinteinheiten besser erholte als die Kontrollgruppe und somit die Leistung konstanter aufrechterhalten konnte.

Für die statistische Auswertung der erhobenen Parameter wurde IBM SPSS Statistics (Version 29, IBM Corporation, USA) verwendet. Mit einem t-Test für unabhängige Stichproben wurden zunächst die Ausgangswerte auf statistische Unterschiede geprüft. Zur Überprüfung der formulierten Hypothesen wurden gemischt-faktorielle Varianzanalysen (ANOVAs) durchgeführt, um die Effekte der Gruppenzugehörigkeit und der Zeit sowie deren Interaktion, zu analysieren. Bei signifikanten Effekten ($p < 0,05$) wurden zusätzlich zum p-Wert die Effektstärken (korrigierter η^2) angegeben und Bonferroni-korrigierte post-hoc Tests durchgeführt. Außerdem wurden die nicht standardisierten Effektgrößen und deren 95 % Konfidenzintervall (CI) mitangegeben, sowie die Effektgröße Cohen's d berechnet und nach Cohen (1988) interpretiert. Zur Überprüfung der Normalverteilung der Ausgangswerte wurde der Shapiro-Wilk Test herangezogen und die Überprüfung der Sphärizität der Daten für die ANOVAs erfolgte mittels Test nach Mauchly. Bei fehlender Normalverteilung und Sphärizität oder Verletzung anderer Anwendungsvoraussetzungen für parametrische Tests, erfolgten die Auswertungen mittels Mann-Whitney U-Test oder Friedman-Test. Die Resultate der deskriptiven Analyse wurden mit Mittelwert $\pm$ Standardabweichung sowie 95 % CI dargestellt.

3 Resultate

3.1 Deskriptive Statistik

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Masterarbeit war die Datenerhebung an insgesamt 29 Personen abgeschlossen. Auf Grund fehlerhafter und somit unvollständiger Daten wurden drei Personen von der statistischen Analyse ausgeschlossen. Schlussendlich wurden daher die Daten von vierzehn Personen aus der Interventionsgruppe und zwölf Personen aus der Kontrollgruppe ausgewertet. Zu Beginn der Studie gab es keine signifikanten Unterschiede der Leistungsparameter sowie des Gewichts und Alters zwischen beiden Gruppen. Genauere Details können aus der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tab. 1: Deskriptive Statistik der Gruppen

	Intervention (M = 5; F = 9)	Kontrolle (M = 4; F = 8)	p-Wert
Gewicht [kg]	69,04 ± 10,29 [63,10; 74,99]	71,83 ± 9,84 [65,57; 78,08]	0,490
Alter [Jahre]	25,45 ± 3,45 [23,45; 27,44]	26,76 ± 2,40 [25,23; 28,28]	0,280
P_{max} [W/kg]	8,29 ± 2,07 [7,09; 9,49]	7,44 ± 1,81 [6,29; 8,59]	0,282
P_{min} [W/kg]	3,42 ± 0,76 [2,98; 3,86]	3,13 ± 0,69 [2,69; 3,57]	0,318
W_{sum} [J/kg]	111,91 ± 20,28 [100,20; 123,62]	100,35 ± 18,41 [88,65; 112,05]	0,328
FI [%]	56,38 ± 15,00 [47,72; 65,04]	56,60 ± 10,18 [50,13; 63,07]	0,837

3.2 Leistungsbezogene Parameter

Die maximale Leistung der Interventionsgruppe reduzierte sich von der ersten bis zur zweiten Testung um $-0,28 \pm 0,90$ [-0,79; 0,24] W/kg, bevor sie bis zum Ende der Studie leicht um $0,09 \pm 0,70$ [-0,32; 0,49] W/kg anstieg. Im Gegensatz dazu zeigte die Kontrollgruppe eine kontinuierliche Leistungssteigerung in Schritten von zunächst $0,08 \pm 0,82$ [-0,44; 0,60] W/kg und dann $0,38 \pm 1,03$ [-0,28; 1,04] W/kg. Die Leistungssteigerung unterschied sich zwischen den Gruppen nicht signifikant ($F(1, 24) = 0,350$; $p = 0,559$). Es konnte kein Interaktionseffekt ($F(2, 48) = 1,507$; $p = 0,232$) sowie Zeiteffekt ($F(2, 48) = 0,782$; $p = 0,463$) beobachtet werden.

Bei der minimalen Leistung kam es in der Interventionsgruppe zu einem stetigen Anstieg zu allen Messzeitpunkten. Diese stieg um $0,29 \pm 0,46$ [0,03; 0,56] W/kg und $0,16 \pm 0,56$ [-0,16; 0,48] W/kg an. Die Kontrollgruppe hingegen verzeichnete überwiegend zwischen der zweiten und dritten Testung eine Leistungssteigerung von $0,31 \pm 0,56$ [-0,05; 0,66] W/kg, während der Ausgangswert zwischen der ersten und zweiten Messung nahezu unverändert blieb ($0,00 \pm 0,47$ [-0,30; 0,30]). Die statistische Analyse zeigte keinen signifikanten Interaktionseffekt ($F(2, 48) = 1,146$; $p = 0,326$) und keine Gruppenunterschiede ($F(1, 24) = 2,597$; $p = 0,120$). Es wurde ein signifikanter Unterschied über die Zeit hinweg festgestellt

($F(2, 48) = 7,670$; $p = 0,001$; korrigierter $\eta^2 = 0,242$). Eine anschließende post-hoc Analyse identifizierte einen signifikanten Unterschied zwischen dem ersten und dritten Zeitpunkt von $0,38 [0,14; 0,61]$ W/kg ($p < 0,001$) mit einer großen Effektstärke (Cohen's $d = 0,83$).

Betrachtet man die insgesamt geleistete Arbeit, so konnte in beiden Gruppen eine kontinuierliche Steigerung verzeichnet werden. Die Interventionsgruppe verbesserte sich in Schritten von $3,77 \pm 4,91 [0,94; 6,61]$ J/kg und $2,20 \pm 4,16 [-0,20; 4,60]$ J/kg, während die von der Kontrollgruppe erbrachten Arbeit um $4,21 \pm 9,40 [-1,76; 10,19]$ J/kg und $5,95 \pm 7,61 [1,12; 10,79]$ J/kg anstieg. Während kein signifikanter Interaktionseffekt ($F(2, 48) = 1,240$; $p = 0,299$) oder Gruppenunterschied ($F(1, 24) = 1,456$; $p = 0,239$) festgestellt werden konnten, war der Effekt des Faktors „Zeit“ statistisch signifikant ($F(2, 48) = 15,228$; $p < 0,001$; korrigierter $\eta^2 = 0,388$). Post-hoc Tests ergaben signifikante, mäßige bis starke Unterschiede zwischen allen Testungen ($p_{\text{mid-pre}} = 0,032$, $d_{\text{mid-pre}} = 0,54$; $p_{\text{post-mid}} = 0,006$, $d_{\text{post-mid}} = 0,68$; $p_{\text{post-pre}} < 0,001$, $d_{\text{post-pre}} = 0,92$).

Der Fatigue Index verbesserte sich zwischen der ersten und zweiten Messung in der Interventionsgruppe ($-6,75 \pm 11,59 [-13,44; -0,06]$ %) stärker als in der Kontrollgruppe ($-0,56 \pm 10,98 [-7,54; 6,41]$ %). Die Verbesserungen zwischen der zweiten und dritten Messung hingegen waren in der Kontrollgruppe ($-2,41 \pm 10,34 [-8,71; 4,43]$ %) größer als in der Interventionsgruppe ($-1,75 \pm 10,83 [-8,01; 4,50]$ %). In der statistischen Auswertung konnte wieder ein Effekt des Faktors „Zeit“ identifiziert werden ($F(2, 48) = 3,364$; $p = 0,043$; korrigierter $\eta^2 = 0,123$), die von den post-hoc Analysen nicht bestätigt werden konnte ($p_{\text{mid-pre}} = 0,341$; $p_{\text{post-mid}} = 1,000$; $p_{\text{post-pre}} = 0,062$, $d_{\text{post-pre}} = -0,49$). Ein Effekt des Faktors „Gruppe“ ($F(1, 24) = 0,538$; $p = 0,471$) sowie Interaktionseffekte ($F(2,48) = 1,249$; $p = 0,296$) konnten nicht festgestellt werden.

Für weitere Details können die genauen Werte der Leistungsparameter sowie p-Werte aus der nachfolgenden Tabelle 2 entnommen werden. Die Differenzen sind aus Tabelle 3 zu entnehmen. Zusätzlich dazu sind die gruppenspezifischen Entwicklungen der Leistungsparameter in den darauffolgenden Abbildungen 2-5 grafisch dargestellt. Um individuelle Veränderungen aufzuzeigen, werden diese aufgeteilt auf die Gruppen in den Abbildungen 6 bis 9 präsentiert.

Tab. 2: Leistungsparameter vor, während und nach der Intervention und p-Werte der ANOVAs

	Gruppe	Pre	Mid	Post	p-Wert (Zeit×Gruppe)	p-Wert (Zeit)	p-Wert (Gruppe)
P_{max} [W/kg]	Interven- tion	8,29 ± 2,07 [7,09; 9,49]	8,01 ± 2,45 [6,60; 9,43]	8,10 ± 2,48 [6,67; 9,53]	0,232	0,463	0,559
	Kontrolle	7,44 ± 1,81 [6,29; 8,59]	7,52 ± 2,29 [6,07; 8,98]	7,90 ± 2,39 [6,38; 9,42]			
P_{min} [W/kg]	Interven- tion	3,42 ± 0,76 [2,98; 3,86]	3,72 ± 0,65 [3,34; 4,09]	3,88 ± 0,67 [3,49; 4,26]	0,326	0,001	0,120
	Kontrolle	3,13 ± 0,69 [2,69; 3,57]	3,13 ± 0,86 [2,58; 3,68]	3,43 ± 0,88 [2,88; 3,99]			
W_{sum} [J/kg]	Interven- tion	111,91 ± 20,28 [100,20; 123,62]	115,68 ± 20,16 [104,05; 127,32]	117,89 ± 22,85 [104,70; 131,08]	0,299	< 0,001	0,239
	Kontrolle	100,35 ± 18,41 [88,65; 112,05]	104,56 ± 22,77 [90,10; 119,03]	110,52 ± 24,41 [95,01; 126,02]			
FI [%]	Interven- tion	56,38 ± 15,00 [47,72; 65,04]	49,63 ± 18,16 [39,15; 60,12]	47,88 ± 18,61 [37,14; 58,63]	0,296	0,043	0,471
	Kontrolle	56,60 ± 10,18 [50,13; 63,07]	56,04 ± 16,17 [45,77; 66,31]	53,90 ± 15,40 [44,11; 63,68]			

Tab. 3: Differenzen der Leistungsparameter zu den jeweiligen Zeitpunkten

	Gruppe	Δ Mid-Pre	Δ Post-Mid	Δ Post-Pre
P_{max} [W/kg]	Intervention	-0,28 ± 0,90 [-0,79; 0,24]	0,09 ± 0,70 [-0,32; 0,49]	-0,19 ± 1,16 [-0,86; 0,48]
	Kontrolle	0,08 ± 0,82 [-0,44; 0,60]	0,38 ± 1,03 [-0,28; 1,04]	0,46 ± 1,04 [-0,20; 1,12]
P_{min} [W/kg]	Intervention	0,29 ± 0,46 [0,03; 0,56]	0,16 ± 0,56 [-0,16; 0,48]	0,45 ± 0,44 [0,20; 0,70]
	Kontrolle	0,00 ± 0,47 [-0,30; 0,30]	0,31 ± 0,56 [-0,05; 0,66]	0,30 ± 0,49 [-0,01; 0,61]
W_{sum} [J/kg]	Intervention	3,77 ± 4,91 [0,94; 6,61]	2,20 ± 4,16 [-0,20; 4,60]	5,98 ± 6,79 [2,06; 9,90]
	Kontrolle	4,21 ± 9,40 [-1,76; 10,19]	5,95 ± 7,61 [1,12; 10,79]	10,17 ± 10,60 [3,43; 16,90]
FI [%]	Intervention	-6,75 ± 11,59 [-13,44; -0,06]	-1,75 ± 10,83 [-8,01; 4,50]	-8,50 ± 11,84 [-15,34; -1,66]
	Kontrolle	-0,56 ± 10,98 [-7,54; 6,41]	-2,41 ± 10,34 [-8,71; 4,43]	-2,70 ± 11,07 [-9,73; 4,33]

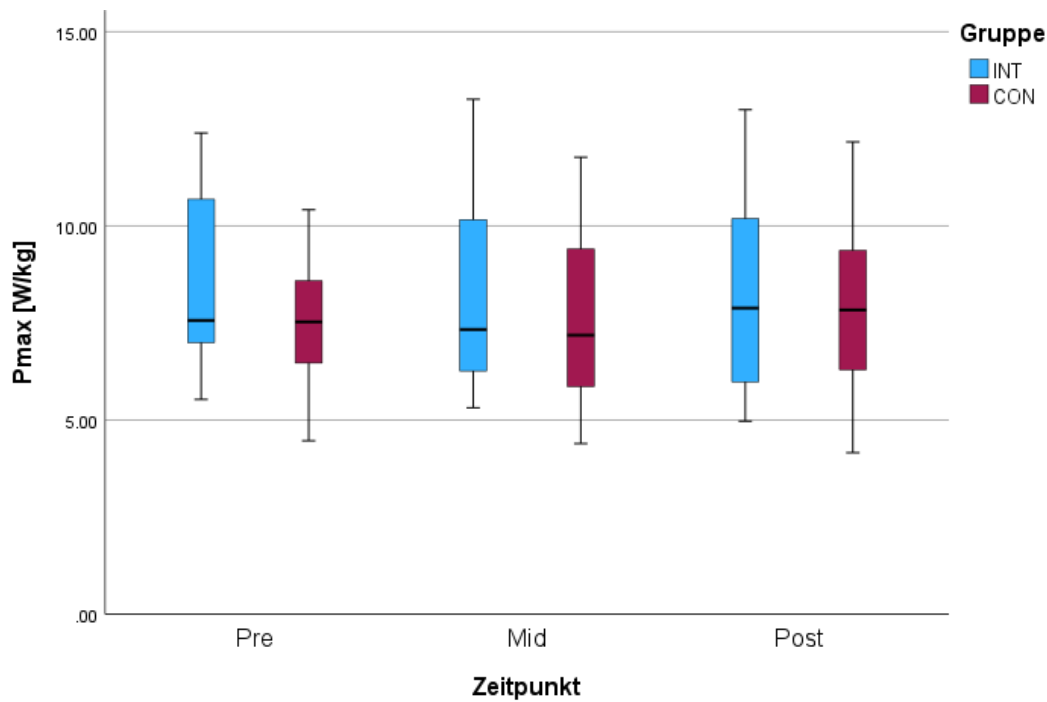


Abb. 2: Entwicklung der maximalen Leistung in Relation zum Körpergewicht. Die maximale Leistung (entnommen aus dem ersten Sprint) der Interventionsgruppe (blau) wird mit der Kontrollgruppe (rot) verglichen. Auf der x-Achse befinden sich die Testzeitpunkte: zu Beginn (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie. Der Leistungsparameter wird auf der y-Achse in W/kg dargestellt. Die Ergebnisse werden anhand des Medians sowie den Quartilen illustriert. Es wurden keine gruppenspezifischen Unterschiede festgestellt ($p > 0,05$).

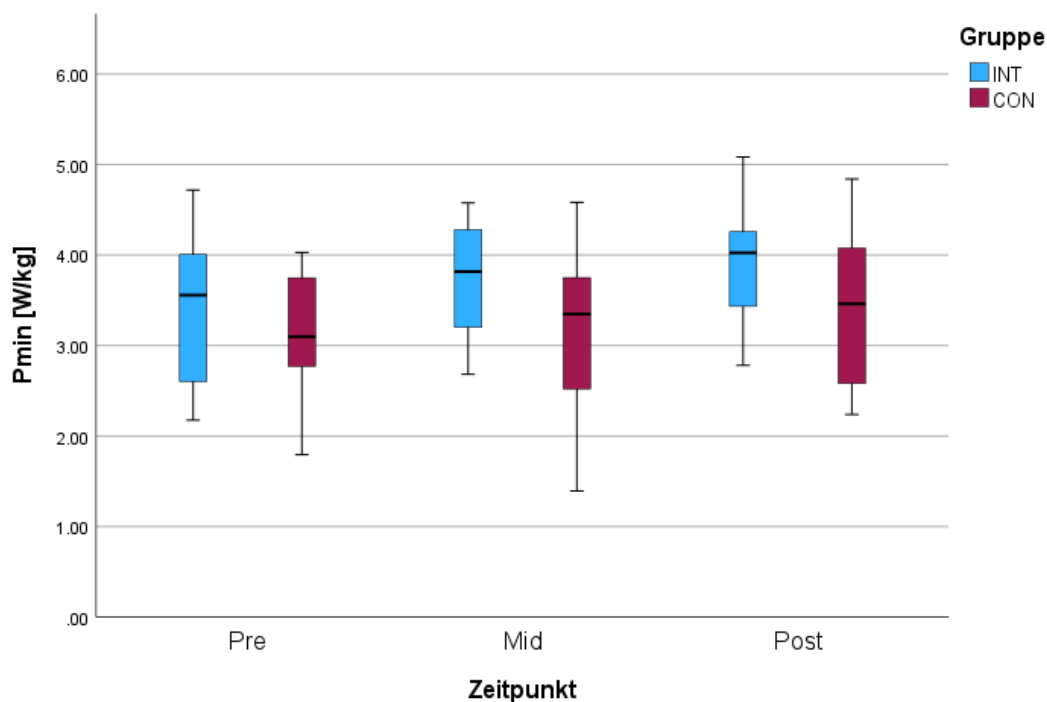


Abb. 3: Entwicklung der minimalen Leistung in Relation zum Körpergewicht. Die minimale Leistung (entnommen aus dem letzten Sprint) der Interventionsgruppe (blau) wird mit der Kontrollgruppe (rot) verglichen. Auf der x-Achse befinden sich die Testzeitpunkte: zu Beginn (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie. Der Leistungsparameter wird auf der y-Achse in W/kg dargestellt. Die Ergebnisse werden anhand des Medians sowie den Quartilen illustriert. Es wurden keine gruppenspezifischen Unterschiede festgestellt ($p > 0,05$).

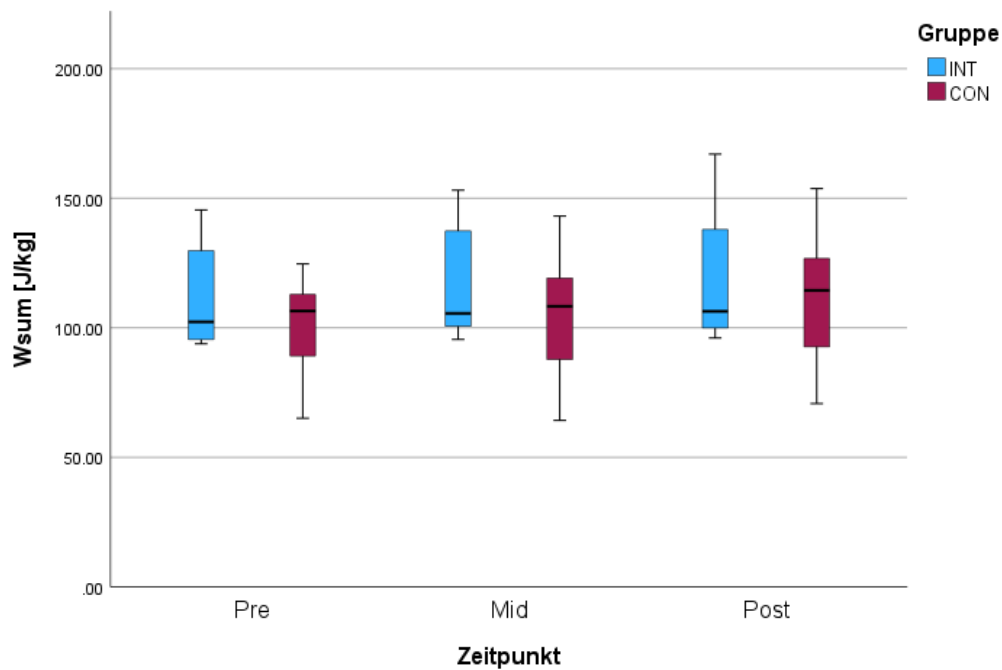


Abb. 4: Entwicklung der Summe der Arbeit über alle Sprints in Relation zum Körpergewicht. Die gesamte Arbeit der Interventionsgruppe (blau) wird mit der Kontrollgruppe (rot) verglichen. Auf der x-Achse befinden sich die Testzeitpunkte: zu Beginn (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie. Der Leistungsparameter wird auf der y-Achse in J/kg dargestellt. Die Ergebnisse werden anhand des Medians sowie den Quartilen illustriert. Es wurden keine gruppenspezifischen Unterschiede festgestellt ($p > 0,05$).

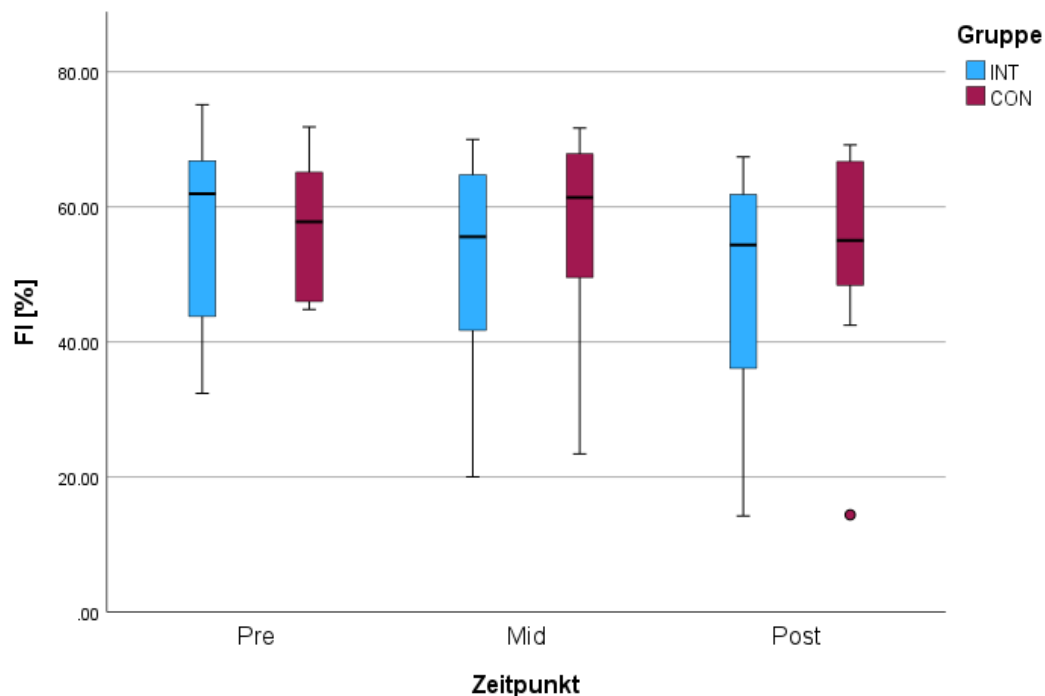


Abb. 5: Entwicklung des Fatigue Index. Der Fatigue Index (berechnet mit der folgenden Formel: $FI = \frac{P_{peak} - P_{min}}{P_{peak}} \times 100$) der Interventionsgruppe (blau) wird mit der Kontrollgruppe (rot) verglichen. Auf der x-Achse befinden sich die Testzeitpunkte: zu Beginn (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie. Der Leistungsparameter wird auf der y-Achse in % dargestellt. Die Ergebnisse werden anhand des Medians sowie den Quartilen illustriert. Es wurden keine gruppenspezifischen Unterschiede festgestellt ($p > 0,05$).

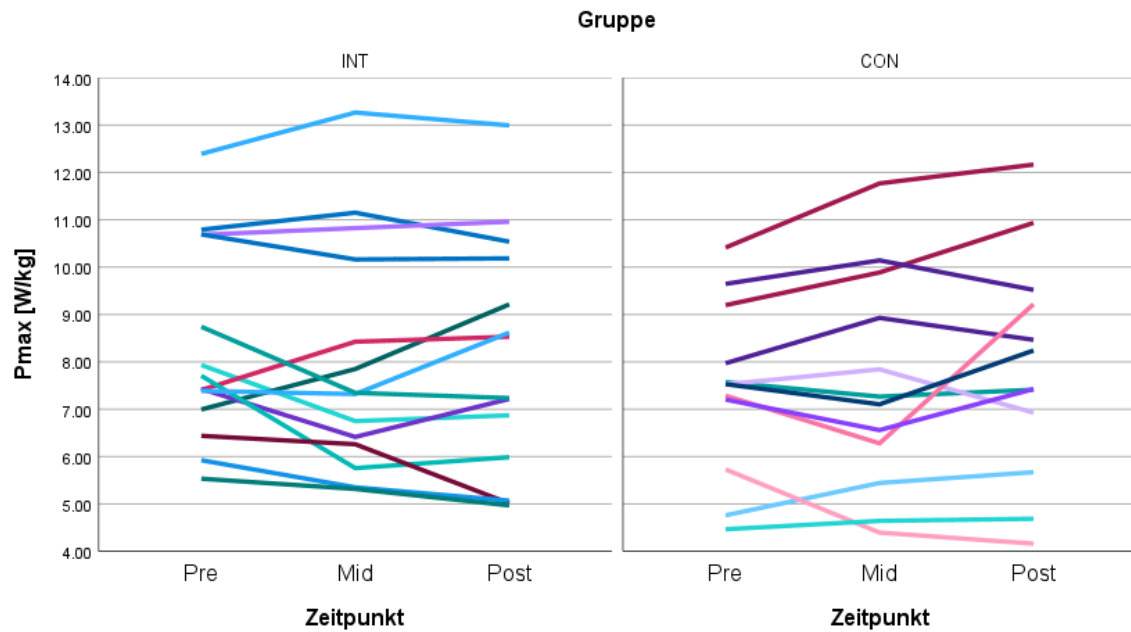


Abb. 6: Gegenüberstellung der Gruppen in Bezug auf die individuelle Entwicklung der maximalen Leistung in Relation zum Körpergewicht. Die Interventionsgruppe wird auf der linken Seite und die Kontrollgruppe auf der rechten Seite dargestellt. Auf der x-Achse befinden sich die jeweiligen Testzeitpunkte. Diese fanden am Anfang (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie statt. Die y-Achse zeigt die Leistung in W/kg und wurde aus dem ersten Sprint entnommen.

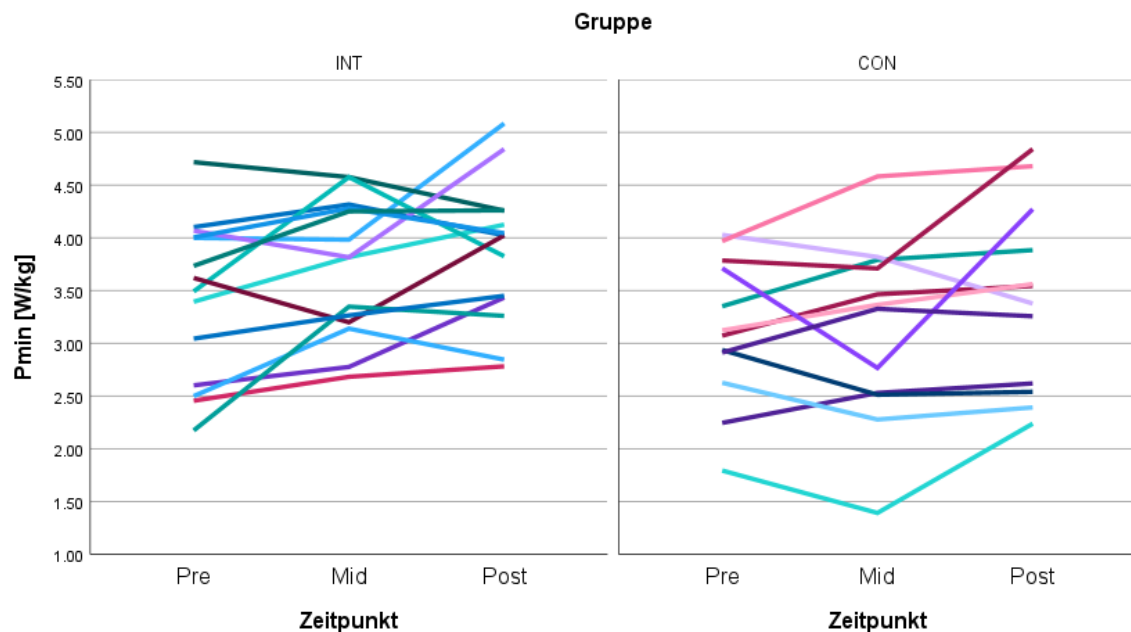


Abb. 7: Gegenüberstellung der Gruppen in Bezug auf die individuelle Entwicklung der minimalen Leistung in Relation zum Körpergewicht. Die Interventionsgruppe wird auf der linken Seite und die Kontrollgruppe auf der rechten Seite dargestellt. Auf der x-Achse befinden sich die jeweiligen Testzeitpunkte. Diese fanden am Anfang (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie statt. Die y-Achse zeigt die Leistung in W/kg und wurde aus dem letzten Sprint entnommen.

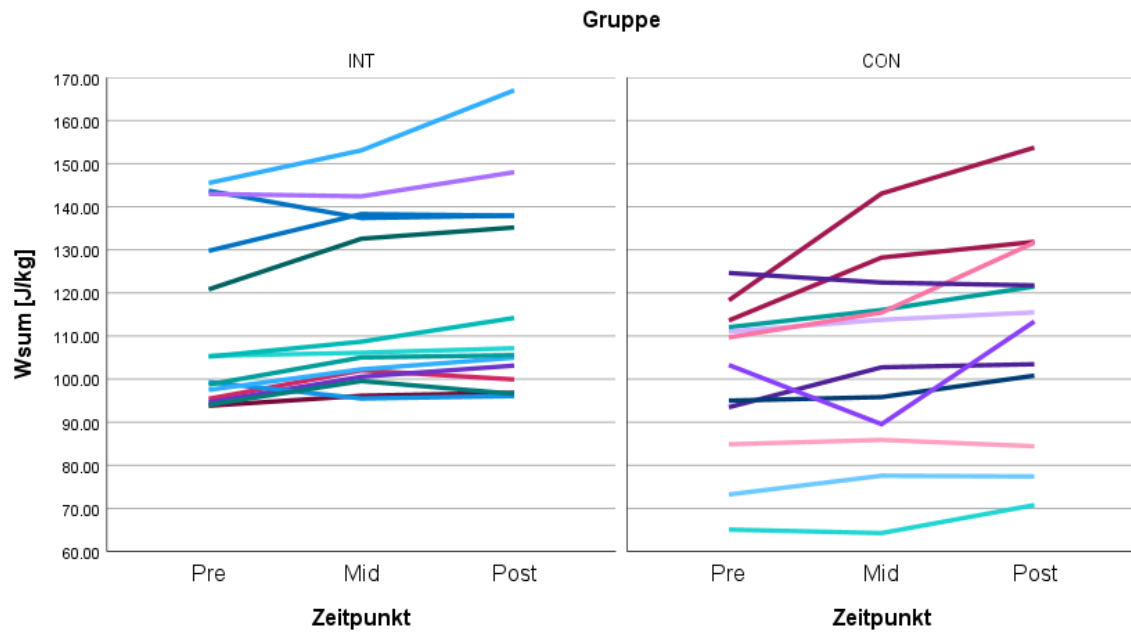


Abb. 8: Gegenüberstellung der Gruppen in Bezug auf die individuelle Entwicklung der Summe der Arbeit über alle Sprints in Relation zum Körpergewicht. Die Interventionsgruppe wird auf der linken Seite und die Kontrollgruppe auf der rechten Seite dargestellt. Auf der x-Achse befinden sich die jeweiligen Testzeitpunkte. Diese fanden am Anfang (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie statt. Die y-Achse zeigt die Arbeit in J/kg.

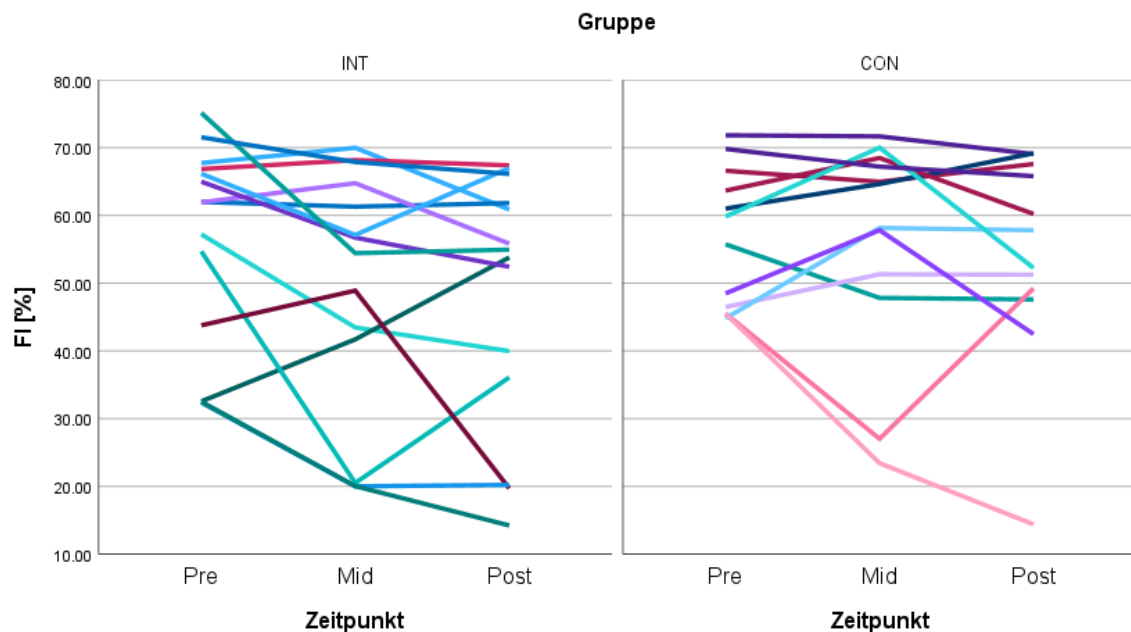


Abb. 9: Gegenüberstellung der Gruppen in Bezug auf die individuelle Entwicklung des Fatigue Index. Die Interventionsgruppe wird auf der linken Seite und die Kontrollgruppe auf der rechten Seite dargestellt. Auf der x-Achse befinden sich die jeweiligen Testzeitpunkte. Diese fanden am Anfang (Pre), in der Mitte (Mid) und am Ende (Post) der Studie statt. Die y-Achse zeigt den Fatigue Index in %. Dieser wurde nach der folgenden Formel berechnet: $FI = \frac{P_{peak} - P_{min}}{P_{peak}} \times 100$.

4 Diskussion und praktische Empfehlungen

4.1 Interpretation der Daten

4.1.1 Gruppenunabhängige Veränderungen

Im Zuge der Studie konnten mehrere Zeiteffekte festgestellt werden. Innerhalb der vier Wochen kam es zu einer statistisch signifikanten Verbesserung der minimalen Leistung, gesamten Arbeit und des Fatigue Index, unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit. Die Ergebnisse bestätigen die Effektivität der Trainingsintervention und stehen im Einklang mit der momentanen Literatur, die ebenfalls die Effektivität von SIT belegt (Hall et al., 2023).

Aus diesen Parametern lässt sich ableiten, dass SIT vor allem die Ermüdungsresistenz sowie die Fähigkeit, eine größere Leistung über einen längeren Zeitraum zu erbringen, verbesserte, was gleichermaßen auf eine Verbesserung der aeroben und anaeroben Energiebereitstellungsmechanismen zurückzuführen sein könnte. Diese Veränderungen basieren laut der Literatur wahrscheinlich in erster Linie auf einer verbesserten Pufferkapazität sowie einer erhöhten Mitochondrienanzahl und einer Steigerung von Enzymen, welche am Energiestoffwechsel beteiligt sind (Hall et al., 2023; MacInnis & Gibala, 2017; Smith et al., 2023).

Die maximale Leistung im Sample verbesserte sich im Laufe der Studie minimal um $1,06 \pm 15,52$ [-5,21; 7,33] %. Dieser Effekt war statistisch nicht signifikant. Um die maximale Sprintleistungsfähigkeit gezielter zu trainieren, wäre es effektiver, das Prinzip der Spezifität stärker zu berücksichtigen und kürzere Sprints mit einem niedrigeren Verhältnis zwischen Belastung und Pause einzuplanen. Die Akkumulation der Ermüdung wird reduziert, wodurch in einer kürzeren Belastungszeit eine höhere Leistung erzielt und der Leistungsabfall in weiteren Sprints reduziert wird (Hall et al., 2023; Hazell et al., 2010, 2010; Myrvang & Van Den Tillaar, 2024; Sousa et al., 2017). Hazell et al. (2010) konnten dies gut veranschaulichen: In ihren Trainingseinheiten zeigte die Gruppe, die Sprints mit einer Dauer von 30 Sekunden und vier Minuten Pause absolvierte, größere Leistungsabfälle (Reduktion der maximalen Leistung auf 89 %), als in jenen Gruppen, die Sprints mit nur 10 Sekunden Dauer trainierten. Diese konnten nach Pausenzeiten von vier Minuten 96% beziehungsweise nach zwei Minuten 95 % ihrer maximalen Leistung erneut erbringen. Ebenso konnten die Gruppen mit einer kürzeren Sprintzeit zusätzlich dazu auch die durchschnittliche und minimale Leistung während den Trainingseinheiten höher halten und erbrachten somit ungefähr 50 % der gesamten Arbeit mit nur 33 % der Belastungszeit (Hazell et al., 2010). Die maximale Leistung wird bereits nach den ersten Sekunden eines all-out Sprints auf dem NMLB erreicht (Manchado-Gobatto et al., 2020; Sousa et al., 2017). Kürzere Sprintzeiten

genügen auch, um die anaeroben Prozesse der Energiebereitstellung ausreichend zu stimulieren. Zehn Sekunden sind ausreichend, um eine maximale Antwort der Energieproduktion aus energiereichen Phosphaten zu erzielen, während 20 Sekunden notwendig sind, um das glykolytische Maximum zu erreichen. Eine weitere Verlängerung der Belastungszeit auf 30 Sekunden führt hingegen überwiegend zu einer Aktivierung des oxidativen Systems (Sousa et al., 2017). Relativ betrachtet nimmt der Anteil der anaeroben Energiebereitstellung mit steigender Belastungsdauer kontinuierlich ab, während aerobe Prozesse zunehmend an Bedeutung gewinnen (Hall et al., 2023; Sousa et al., 2017).

Unabhängig von den Zusammenhängen zwischen Belastungsdauer und Energiebereitstellung zeigte sich, dass Laufen auf einem nichtmotorisierten Laufband kardiometabolisch anspruchsvoller ist als Laufen auf einem motorisierten Laufband oder freies Laufen (Edwards et al., 2017; Smoliga et al., 2015). In Verbindung damit führt der implementierte Widerstand am Laufband zu einer Erhöhung der erbrachten Leistung, was wiederum zu einem weiteren Anstieg der muskulären Belastung beiträgt, aber gleichzeitig auch die maximale Geschwindigkeit verringert (Andre et al., 2013). Diese betrug im Sample beim ersten Sprint in der ersten Testung durchschnittlich $4,32 \pm 0,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dies dürfte potenziell zu einem protektiven Effekt für die Beinrückseite beitragen, welche vor allem bei Sprintbelastungen vermehrt zu Verletzungen tendiert (Edouard et al., 2022). Reljic et al. (2019) konnten in diesem Sinne zeigen, dass ein HIIT per se bei zuvor inaktiven Personen gut toleriert wird und nicht zu einer erhöhten Verletzungsgefahr beiträgt (Reljic et al., 2019). Willoughby et al. (2016) verzeichneten hingegen eine hohe Prävalenz an Verletzungen der Beinrückseite sowie -innen-seite. Davon war eine Person in der jüngeren Gruppe ($n = 17$) und fünf Personen der älteren Gruppe ($n = 23$) betroffen. Das jeweilige Alter der Gruppen betrug $22,9 \pm 3,1$ und $44,7 \pm 2,7$. Willoughby et al. (2016) vermuteten, dass die muskuläre Beanspruchung bei Verwendung eines gewölbten NMLB oder auch die Intensität bei all-out Sprints in untrainierten Populationen einen Einfluss auf das Verletzungsrisiko haben könnten. Macpherson et al. (2011) konnten auf einem flachen NMLB keine derartigen Effekte beobachten. Die an dieser Studie teilnehmenden Personen waren in ihrer Freizeit sportlich aktiv und ihr Alter entsprach eher der jüngeren Altersgruppe der Proband*innen aus der Studie von Willoughby et al. (2016). Diese Unterschiede in den Personenmerkmalen der Proband*innen könnten darauf hindeuten, dass sowohl das Ausgangsaktivitätsniveau als auch das Alter das Verletzungsrisiko beeinflussen. In der durchgeführten Studie traten nur vereinzelt leichtere muskuläre Beschwerden auf. Es wurde individuell darauf eingegangen und es kam zu leichten Adaptationen des Trainingsplans, was es schlussendlich allen Betroffenen ermöglichte, die Studie erfolgreich abzuschließen. Es kam in diesen Fällen zu einer Adaption der zeitlichen Abfolge der Trainings, sodass die Proband*innen mindestens 80 % der Sprints

absolvieren konnten. Tatsächliche Dropouts waren in erster Linie auf terminliche Gründe sowie Erkrankungsfälle auf Seiten der Proband*innen zurückzuführen. Diese erreichten trotzdem eine Rate von fast 30 %, was wiederum die Frage aufwirft, ob vor allem die Erkrankungsfälle womöglich zu einem gewissen Grad auf das intensive Training zurückzuführen sind. Es konnte nämlich gezeigt werden, dass eine einzelne Einheit eines Intervalltrainings, abhängig von der Intensität, zu einer vorübergehenden herabgesetzten Infektabwehr nach der Belastung führen kann. Vor allem bei Protokollen, die zu einer hohen metabolischen Beanspruchung führen, wie es zum Beispiel bei all-out Belastungen der Fall ist (Souza et al., 2021). Bei hoch intensiven Trainings können besonders die oberen Atemwege von Infekten betroffen sein (Sabzevari Rad, 2024). Die herabgesetzte Immunabwehr kann nach langer körperlicher Beanspruchung zwischen 3 und 72 Stunden anhalten (Gonçalves et al., 2020). Da die Proband*innen die Sprinteinheiten zusätzlich zu ihrem normalen Alltag durchführten, kann es durchaus sein, dass durch die weitere Belastung für den Körper die Immunabwehr herabgesetzt war. Dies könnte vor allem in der zweiten und dritten Woche relevant gewesen sein, da jeweils drei Trainings stattgefunden haben und somit nur zwischen 48 und 72 Stunden Pause stattgefunden hat. Diese Zeit würde genau in das vorhin erwähnte Zeitfenster von Gonçalves et al. (2020) hineinfallen.

Die Kombination der spezifischen Belastungsmodalitäten der Trainingsintervention mit den durch intensive Belastungen ausgelösten Veränderungen der Enzymaktivitäten (Parolin et al., 1999) erklärt, weshalb die Ergebnisse unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit nicht überraschend sind. Ein direkter Vergleich der Leistungsparameter mit weiteren Interventionsstudien ist aufgrund der Unterschiede in den untersuchten Populationen oder Messmethoden schwierig. In anderen Studien wurden beispielsweise Radergometer und Time Trials verwendet oder andere Leistungsparameter gemessen (Denham et al., 2015; Hall et al., 2023; Macpherson et al., 2011; Willoughby et al., 2016).

4.1.2 Gruppenspezifische Veränderungen

Im Laufe der Studie konnte kein statistischer Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden, was zunächst darauf hindeutet, dass die Atemübungen keinen sichtbaren Effekt hatten. Eine detaillierte Betrachtung der Gruppenwerte zeigt Unterschiede im Verlauf. Die Interventionsgruppe wies zu Beginn ein nicht signifikant höheres Ausgangsniveau bei der maximalen Leistung, minimalen Leistung und gesamten Arbeit auf. Dieses Niveau konnte die Kontrollgruppe am Ende der Studie bei der minimalen Leistung und gesamten Arbeit erreichen, während sich die Atemgruppe in diesen Parametern weiterhin verbessern konnte.

Bei der maximalen Leistung zeigte sich in der Interventionsgruppe zunächst eine Verminderung, gefolgt von einer leichten Steigerung. Insgesamt führte dies zu einer leichten Verschlechterung von $-2,76 \pm 15,82$ $[-11,89; 6,37]$ %. Die Kontrollgruppe hingegen näherte sich im Lauf der Intervention dem Niveau der Atemgruppe an. In Bezug auf den Fatigue Index konnten größere Unterschiede beobachtet werden: Bei nahezu identem Ausgangswert verbesserte sich die Interventionsgruppe um $-15,68 \pm 30,16$ $[-33,10; 1,73]$ %, während die Kontrollgruppe eine Verbesserung von $-5,06 \pm 23,67$ $[-20,10; 9,98]$ erreichte.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Atemübungen möglicherweise spezifische Auswirkungen auf die Fatigue-Parameter haben könnten, während sie in anderen Leistungsparametern weniger konsistent erscheinen. Wie die Ergebnisse von Perez-Gaido bereits aufzeigt haben, könnte durch die wiederholte Stimulation des parasympathischen Systems es zu einer schnelleren Erholung zwischen den Sprints gekommen sein. In dieser Studie wurden die Atemübungen nur nach den Sprints durchgeführt und nicht dazwischen. Nach Laborde et al. (2024) würden längerfristige Interventionen zu einer chronischen Verbesserung der kardialen Vagusaktivität führen, was wiederum für eine besser Regeneration auch zwischen den Belastungen sprechen würde. Die Proband*innen wären in der Lage, die Leistung besser aufrecht zu erhalten und somit im Laufe mehrere Sprints einen geringeren Leistungsabfall zu verzeichnen. Außerdem bestätigen die ersten Erkenntnisse, dass nach dem Sprinttraining eine schnellere Einleitung der Erholungsphase erreicht wurde (Laborde et al., 2024; Perez-Gaido et al., 2021).

Bei genauerer Betrachtung der individuellen Entwicklungen fiel auf, dass Personen beider Gruppen teilweise deutliche Veränderung des Fatigue Index und zeitgleich auch in der maximalen Leistung in dieselbe Richtung aufwiesen. Da in die Berechnung des Fatigue Index die maximale Leistung einfließt, ist die gleichgerichtete Veränderung nicht überraschend. Es erweckte dennoch den Eindruck, dass vereinzelt Proband*innen bei manchen Einheiten nicht ihre maximale Leistung abgerufen haben und es somit zu einer eventuellen Verzerrung der Daten gekommen ist. Dies wurde auch bei der Betrachtung der Daten der normalen Trainingseinheiten auf dem Laufband erkenntlich, obwohl bei diesen die Anweisungen bei der Durchführung nicht anders waren. Da es sich hier nicht um Testungen handelt, ist die Aussagekraft dieser Daten auf jeden Fall mit Vorsicht zu interpretieren. Eine weitere Erklärung dafür könnte sein, dass es sich um natürliche Leistungsschwankungen handelt, die von der Tagesverfassung der Teilnehmer*innen abhängig sind. In diesem Zusammenhang wurde aber interessanterweise in der Studie von Sousa et al. (2017) ein signifikanter Unterschied zwischen der maximalen Leistung bei all-out Sprints am NMLB mit einer Dauer von 10 Sekunden und 30 Sekunden festgestellt. Die Autoren vermuteten ein unbewusstes

Pacing der Probanden als Reaktion auf die hohe körperliche Belastung bei 30-sekündigen Sprints, mit der sie während der Familisierung erstmals konfrontiert wurden. Dieses Phänomen trat bei einer Sprintdauer von 20 Sekunden nicht auf (Sousa et al., 2017). Ähnliche Beobachtungen wurden in der Studie von Zajac et al. (1999) an einem Radergometer gemacht. Auch sie verwendeten 10- und 30-Sekunden Sprints und berichteten neben einer verminderten maximalen Leistung über eine Verzögerung der Zeit bis zur Erreichung des Maximums, eine Reduzierung der in den ersten 10 Sekunden geleisteten physikalischen Arbeit und ein längeres Halten der maximalen Leistung im 30-sekündigen all-out Test. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Proband*innen bei längeren Sprints trotz eines hohen Trainingsniveaus möglicherweise nicht ihre maximale Anstrengung aufbrachten. Zajac et al. (1999) schlussfolgerten, dass psychologische Faktoren eine Rolle bei diesen Beobachtungen spielen könnten. Wittekind et al. (2011) untersuchten ebenfalls diesen Zusammenhang und verwendeten in ihrer Studie eine größere Spanne an Sprintzeiten und konnten das Auftreten eines Pacing bei all-out Belastung genauer eingrenzen. Die verwendeten Sprintzeiten auf einem Radergometer beliefen sich auf 5 s, 15 s, 30 s und 45 s. Die Ergebnisse zeigten eindeutigen Indizien eines Zurückhalten der Leistung bei einer Sprintzeit von 45 s und erste Anzeichen bei einer Dauer von 30 s. Unterschiede wurden vor allem in den ersten zehn Sekunden der Belastung ersichtlich. Die erreichte maximale Leistung in den 45 s unterschied sich signifikant zu den 5 s und 15 s ($p < 0,01$) und keinem signifikanten Unterschied zu den 30 s Sprintzeiten. Betrachtet man die benötigte Zeit zum Erreichen des Maximums, konnte kein Unterschied zwischen den Bedingungen festgestellt werden. Der Fatigue Index der ersten 15 s unterschied sich hingegen signifikant ($p < 0,05$) zwischen den 15 s und den 30 s Belastungen (Wittekind et al., 2011). Anhand dieser Studien lässt es sich ableiten, dass es ab einer Dauer von 15s bis 20s zu einem Pacing der Proband*innen kommt und es keine wahren all-out Belastungen mehr sind (Sousa et al., 2017; Wittekind et al., 2011; Zajac et al., 1999).

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob die Veränderungen der maximalen Leistung und des Fatigue Index in der vorliegenden Studie auf unbewusste Pacing-Strategien einzelner Studienteilnehmer*innen zurückzuführen sind, was eine mögliche Verzerrung der Parameter bedeuten könnte, oder ob diese Veränderungen auf physiologische Faktoren zurückzuführen sind. Durch ein Zurückhalten der maximalen Leistung können die anderen Parameter ebenfalls mitbeeinflusst werden. Ausgehend von dieser Überlegung würden den Proband*innen durch ein anfängliches Pacing mehr Reserven für die restliche Zeit zur Verfügung stehen. Dadurch könnte womöglich die Leistung höher gehalten, beziehungsweise auf die gesamte Sprintdauer ausgelegt auch konstanter hochgehalten werden als bei einem wahren all-out Versuch. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass es bei

wiederholten kurzen all-out Belastungen in Antizipation der Durchgänge auf einem Radergometer zu einem Pacing der Teilnehmer*innen gekommen ist. Das verwendete Belastungsprotokoll setzte sich aus zehn Mal 6 s Sprints mit 24 s Pause zusammen und wurde gesamt dreimal durchlaufen. Die Testbedingungen unterschieden sich lediglich in der Information zur Anzahl der durchzuführenden Sprints. In einer zweiten Bedingung wurden die Teilnehmenden instruiert, zehn Sprints zu absolvieren. In einer weiteren Bedingung hatten sie zu Beginn keine Kenntnis über die geplante Anzahl der Sprints. In der dritten Bedingung wurden sie getäuscht. Es wurde ihnen zuerst mitgeteilt, dass nur fünf Sprints vorgesehen seien. Nach Beendigung dieser, mussten sie anschließend unerwartet fünf weitere absolvieren. Die Ergebnisse zeigten unter anderem eine höhere akkumulierte Arbeit bei den ersten fünf Sprints sowie eine größere maximale Leistung im ersten Sprint in der getäuschten Gruppe im Vergleich zu den beiden anderen Situationen ($p < 0,05$). Daraus lässt sich rückschließen, dass das vorherige Wissen der geplanten Sprintanzahl ebenfalls zu einem Einteilen der Leistung führen kann (Billaut et al., 2011).

Bei der Kontrollgruppe fiel auf, dass sich die meisten Leistungsparameter – mit Ausnahme der gesamten Arbeit – bei der zweiten Testung nur geringfügig veränderten. Erst bei der dritten Testung in der letzten Woche wurden größere Veränderungen sichtbar. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Intervention möglicherweise positiv auf die Regeneration und Leistungserbringung gewirkt hatte, insbesondere in den ersten Wochen der Studie, bevor potenzielle Unterschiede durch die Taperingphase am Ende der Intervention verdeckt wurden. Diese Überlegung beruht unter anderem auf der Annahme, dass ein solcher Effekt auf einen verbesserten Schlaf zurückzuführen sein könnte, da Schlaf eine entscheidende Rolle bei der Regeneration während anstrengender Trainingsphasen zugeschrieben wird (Kellmann et al., 2018; Laborde et al., 2019).

Eine essentielle Rolle trägt optimaler Schlaf für die psychologische, physiologische und allgemeine Gesundheit sowie für die Reduktion der Verletzungsgefahr von Athlet*innen und ist somit an einer optimalen Leistungserbringung maßgeblich beteiligt (Charest & Grandner, 2020; Kellmann et al., 2018; Reardon et al., 2019). Wie man bereits bei Laborde et al. (2019) sehen konnte, können sich tägliche Atemübungen bereits im ersten Monat bei einer Übungsdauer von fünfzehn Minuten positiv auf die subjektive Schlafqualität auswirken (Laborde et al., 2019). Nach Balban et al. (2023) reichten hingegen fünf Minuten täglicher Atemübungen nicht aus, um die Schlafqualität sichtbar zu beeinflussen. Dennoch konnten positive Veränderungen in Zusammenhang mit der Stimmung und der physischen Erregung nachgewiesen werden (Balban et al., 2023). Demnach ist es möglich, dass sich die in der

vorliegenden Studie verwendete Dauer von zehn Minuten täglicher Atemübungen positiv auf einen oder mehrere dieser Aspekte ausgewirkt hatte.

Langsame Atemübungen können sich nicht nur auf der Ebene der Regeneration förderlich auf den Organismus auswirken, sondern können auch direkt die sportliche Leistung über die Beeinflussung des psychischen Zustandes der Sportler*innen beeinflussen (Jiménez Morgan & Molina Mora, 2017; Laborde et al., 2024; Pagaduan et al., 2020).

Pagaduan et al. (2020) untersuchten, ob sich individualisierte langsame Atemübungen in der Form von HRV-Biofeedback-Training auf die athletische Leistung auswirken können. Zu den inkludierten Sportarten zählen Tanzen, Langstreckenlaufen, Basketball und Fußball. Sie konnten bei grobmotorischen kurzen Belastungen (< zehn Minuten) sowie bei feinmotorischen Fertigkeiten widersprüchliche Resultate beobachten. Dies ist auf eine unzureichende Stichprobengröße zurückzuführen, welche die statistische Aussagekraft limitiert. Bei längeren Belastungen (> zehn Minuten) hingegen ist die Studienlagen gänzlich unklar, da es dazu nur wenig Literatur gibt. Es konnte allerdings ein positiver Trend in Bezug auf die allgemeine motorische Funktion identifiziert werden. Die genauen Mechanismen dahinter sind noch unklar. Die Aktivierung des Vagusnervs führt zu einer Stimulierung des anterioren cingulären Cortex, ein Bereich des Präfrontalcortex, welcher für komplexere Verhaltensvorgänge zuständig ist. In Personen, die zusätzlich zum körperlichen Training langsame Atemübungen durchführten, wurde eine höhere Trainingspräsenz beobachtet (Rusciano et al., 2017). Dies ist eventuell auf eine verbesserte physiologische Anpassung und damit einhergehend einer besseren Resilienz gegenüber Stressoren, beziehungsweise Verletzungen, zurückzuführen. In dieser Arbeit zeigte sich ein potenziell leistungssteigernder Effekt von HRV-Biofeedback-Training in Bezug auf grobmotorische Fertigkeiten. Für genauere Aussagen ist noch weitere Forschung mit größeren Stichproben notwendig (Pagaduan et al., 2020).

Eine frühere systematische Übersichtsarbeit von Jiménez Morgan & Molina Mora (2017) analysierten ebenfalls, ob sich ein HRV-Biofeedback-Training positiv auf die sportliche Leistungserbringung auswirken kann. Zusätzlich zu den Leistungsparametern, welche sportartspezifisch gemessen wurden, wurden auch psychologische Aspekte untersucht. Zu den vorkommenden Sportarten zählen Tanzen, Golf, Basketball und Laufen. Bei den beiden inkludierten Arbeiten über Golf handelte es sich jeweils um Case Reports (n=1) Studien, während die anderen eine Teilnehmeranzahl zwischen 13 und 30 Proband*innen vorwiesen. Sie merkten an, dass es in dem Bereich der Leistungssteigerung mittels Atemtraining erst wenige experimentelle Studien dazu gibt. In Bezug auf die inkludierten Studien ordnen

sie langsamen Atemübungen dennoch einen denkbaren positiven Effekt auf die athletische Leistungserbringung zu. Laut ihnen handelte es sich um eine sichere, schnelle und leicht zugängliche Methode, um mehrere psychologische Variablen zu verbessern, welche an der sportlichen Leistung beteiligt sind. Von Interesse sind die Parameter Konzentration, Stress und Angst. Die positiven Effekte auf psychologische Prozesse beruhen auf einem Umschwenken der Aufmerksamkeit auf interne Elemente, wie eben die Atmung, und weg von externalen Ablenkungsfaktoren, dem Publikum oder anderen Wettkämpfer*innen. Die verwendeten Protokolle der Studien wiesen eine große Heterogenität auf und unterschieden sich von zehn Tagen mit täglich 20 Minuten bis hin zu zweimal täglich selbständig und einmal wöchentlich unter Aufsicht für zehn Wochen. Genauere Aussagen bezüglich der minimalen Dauer sowie über Langzeiteffekte über zehn Wochen können an Hand der zur Verfügung stehenden Literatur noch nicht getätigt werden (Jiménez Morgan & Molina Mora, 2017).

Die Meta-Analyse von Laborde et al. (2024) bestätigte, dass sich langsame Atemübungen bei längeren Interventionen förderlich auf die sportliche Performance auswirken können ($p < 0,001$; $g = 0,64$ [95 % CI = 0,31 - 0,98]). Für kurze Interventionen konnte kein signifikanter Effekt identifiziert werden. Mögliche Ursachen dafür sind womöglich eine geringe Anzahl an Effektgrößen, die große Heterogenität bei den verwendeten Atemprotokollen oder dass eine einzelne Einheit nicht ausreicht, um merkbare Effekte hervorzurufen. Längere Studien wurden definiert als Interventionen mit mehr als einer Einheit. Darunter fallen mehrere Tage bis hin zu Wochen und Monate, während in akuten Studien das Atemprotokoll nur ein einzelnes Mal angewendet wurde. Inkludierte Sportarten sind Basketball, Laufen, Radfahren, Tanzen und Schwimmen. In Bezug auf längerfristige Interventionen geben sie an, dass es eine große Heterogenität auf Grund von Stichprobenfehlern gegeben hat. Die tatsächliche Effektgröße befindet sich eher in einem größeren Bereich, und zwar von vernachlässigbaren bis hin zu großen Effekten ($g = 0 - 1,29$). Die Leistungsveränderungen bei längerfristigen Interventionen basieren wahrscheinlich auf anhaltenderen Veränderungen selbstregulatorischer Mechanismen, wie der kardialen Vagusaktivität, welche sich förderlich auf die sportliche Leistung auswirken können. Eine weitere Überlegung wäre die Mediation von längerfristigen Trainingsadaptionen über eine verbesserte kardiovaskuläre Erholung mittels Stimulierung des Parasympathikus nach der Belastung. Nicht die Leistung direkt wird beeinflusst, sondern man interveniert auf der Ebene der Erholung. Bei kurzen Interventionen muss eine potenzielle Effektivität vorerst noch mit weiteren Studien erforscht werden. Dabei sollten, wenn möglich, größere Gruppen, ein längeres Familiarisierungsprotokoll und eine Individualisierung der Atemfrequenz implementiert werden. Mögliche akute ergogene Wirkungen beruhen auf Veränderungen psychologischer Zustände, welche im sportlichen Setting

womöglich mit einer Leistungssteigerung assoziiert sind. Dazu zählen unter anderem ein verbessertes Stressmanagement sowie die Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen (Laborde et al., 2024).

Wie man bei den Arbeiten von Pagaduan et al. (2020), Jiménez Morgan & Molina Mora (2017) und Laborde et al. (2024) sehen konnte, werden langsame Atemübungen im sportlichen Setting zur potenziellen Leistungssteigerung über die Regulierung psychischer Vorgänge bereits versucht einzusetzen. You et al. (2024) haben in ihrer Studie erwiesen, dass alle langsamen Atemübungen mit einer Frequenz von fünf bis sieben Atemzügen pro Minute zu einer Verbesserung der HRV geführt haben im Vergleich zu einer spontanen Atmung. Das zeigt auf, dass es sich um einen Bereich handelt, der mit positiven Auswirkungen auf die autonome Regulation verbunden ist. Das ist vor allem relevant, wenn keine Zeit zur Bestimmung der Resonanzfrequenz gegeben ist, wie zum Beispiel beim Seitenwechsel im Tennis. Sie weisen auf einen potenziell förderlichen Effekt von Atemübungen auf die Leistungserbringung über ein verbessertes Stressmanagement und eine bessere emotionale Kontrolle hin. Dies könnte vor allem in Wettkampfsituationen sowie in kurzen Pausen bei intermittierend Belastungsphasen einen Vorteil mit sich bringen (You et al., 2024).

Die Implementierung von langsamen Atemübungen in der Studie kann sich somit nicht nur über eine Verbesserung der Regeneration auf die Leistungserbringung ausgewirkt haben, sondern auch direkt über die Regulierung psychologischer Prozesse.

4.2 Limitationen der Studie und Ausblick

Die Aussagekraft der durchgeführten Analyse ist auf Grund der geringen Teilnehmeranzahl der Gruppen und geringen Studiendauer limitiert. Zusätzlich dazu kann es durch die intensive körperliche Anstrengung der Trainingsintervention zu unbewussten Pacing-Strategien der Proband*innen gekommen sein, was zu einer potenziellen Verzerrung der Ergebnisse geführt haben könnte (Sousa et al., 2017; Wittekind et al., 2011; Zajac et al., 1999). Es war auffällig, dass viele Studienteilnehmer*innen die Familiarisierung als die unangenehmste Einheit empfanden. Bei dieser wurden sie zum ersten Mal mit einer all-out Belastung von 30 Sekunden konfrontiert. Dies würde die vorhin genannte Überlegung zum Pacing bekräftigen. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um den potenziellen Einfluss von Pacing-Strategien näher zu untersuchen. Ebenso sind potenzielle Vergleiche der gemessenen Parameter am NMLB mit anderen Studien auf Grund geringfügiger Kalibrierungsprobleme zu Beginn der Studie nur eingeschränkt möglich, auch wenn sich diese während der Studie ausgeglichen haben sollten.

In Bezug auf die regenerationsfördernde Intervention ist es wichtig zu erwähnen, dass einige Personen der Atemgruppe direkt nach den Trainingseinheiten vermehrt Schwierigkeiten hatten, sich an die individuelle Atemfrequenz zu halten. Sie wurden in diesen Fällen instruiert, zumindest die Ausatemphase mehr zu betonen als die Einatemphase. Im Laufe der Studie konnten sie sich zunehmend an die Intervention gewöhnen und der vorgegebenen Atemfrequenz besser folgen. Das wirft die Frage auf, ob es in künftigen Studien vorteilhaft wäre, etwas mehr Zeit zwischen dem letzten Sprint und dem Beginn der Atemübungen einzuplanen. Wie Manchado-Gobatto et al. (2020) zeigen konnten, blieb nach einem einzigen 30-sekündigen all-out Sprint die Herzfrequenz im Vergleich zum Ruhezustand (74 ± 3) selbst nach 18 Minuten passiver Erholung noch deutlich erhöht (100 ± 3). Das deutet darauf hin, dass es unproblematisch wäre, die Erholungsphase nach der Belastungsphase länger zu gestalten. Damit würde den Proband*innen mehr Zeit zur Verfügung stehen, um ihre Atmung nach der Anstrengung zu beruhigen, was wiederum zu einer höheren Compliance an die individuelle Atemfrequenz beitragen kann. Eine weitere Möglichkeit wäre wie bei Perez-Gaido et al. (2021) eine Zeitspanne mit einer erhöhten Atemfrequenz zwischen Belastungsende und Beginn der Atemübungen zu implementieren. Es sollte damit ebenfalls möglich sein, den Übergang zu der langsamen Frequenz zu verbessern, was wiederum zu einer schnelleren Stimulierung des parasympathischen Systems nach körperlichen Beanspruchungen beitragen würde.

Weiterführende Auswertungen der Schlafdaten sind nötig, um die Effektivität der Atemübungen besser zu verstehen. Eine verbesserte Schlafqualität könnte ein potenzieller Modulator einer gesteigerten Regeneration sein und dahingehend über einen längeren Zeitraum zu einer gesteigerten Leistungserbringung führen (Kellmann et al., 2018; Laborde et al., 2019; Laborde et al., 2024). Es ist fraglich, ob bereits bei einer kurzen Interventionsdauer von vier Wochen die Regenerationskapazitäten vollkommen ausgereizt werden und man auf Grund dessen einen Leistungsunterschied beobachten kann. In diesem Sinne war die Taperingphase in der Studie möglicherweise sogar kontraproduktiv, da sie der Kontrollgruppe die Möglichkeit gegeben haben könnte, sich ausreichend zu regenerieren und somit potenzielle Unterschiede zwischen den Gruppen ausgeglichen wurden.

Zukünftige Studien sollten für potenziell aussagekräftigere Messergebnisse kürzere Sprintzeiten einsetzen, um ein nicht beabsichtigtes Pacing zu minimieren und eventuelle kleine Gruppenunterschiede reliabler aufzudecken. Es ist zu empfehlen, eine längere Regenerationszeit oder eine Phase mit einer erhöhten Atemfrequenz zwischen dem letzten Sprint und dem Beginn der Atemübungen einzuplanen, um eine hohe Adhärenz an die individuelle Atemfrequenz von Anfang an zu gewährleisten. Ein weiterer Ansatzpunkt die Regeneration

zu unterstützen, könnte darin bestehen, wie bei Perez-Gaido et al. (2021) bereits durchgeführt wurde, ebenfalls zwischen den Belastungen eine langsame Atemtechnik zu implementieren. Aufgrund der erhöhten Atmung unmittelbar nach einer intensiven all-out Belastung wäre es notwendig, eine initiale Phase mit erhöhter Atemfrequenz in so einer Intervention einzubauen. In der vorliegenden Studie zeigte sich, dass vereinzelt Proband*innen Schwierigkeiten hatten, die vorgegebene Atemfrequenz während der zehnminütigen Atemintervention nach der Trainingseinheit konsequent einzuhalten. Dies würde ein Atmen mit der Resonanzfrequenz zwischen den Sprints deutlich erschweren. In diesem Setting wäre es spannend zu sehen, ob ansonsten eine leicht erhöhte Atmung, die über der optimalen Resonanzfrequenz liegt, ebenfalls positive Effekte auf die Regeneration haben könnte und wie sie im Vergleich zu einer spontanen Atmung abschneidet. Nach You et al. (2024) sollte es sich um einen Bereich handeln, welcher sich förderlich auf die kardiale Vagusaktivität auswirken kann. Es ist notwendig, längere Interventionen mit ausreichend fordernden Trainingsmodalitäten durchzuführen, um mögliche Unterschiede in der Regeneration nachweisen zu können.

4.3 Praktische Empfehlung

Trotz des fehlenden sichtbaren Effekts in der Studie sind langsame bewusste Atemübungen nach momentanem Stand der Literatur dennoch für Sportler*innen zu empfehlen, beziehungsweise sollten sie diesen sowie Trainer*innen als mögliche Option der Beeinflussung der Leistungserbringung und Regeneration zumindest bekannt sein. Eine tatsächliche Anwendung bleibt den jeweiligen Athlet*innen selbst überlassen. Sollten keine positiven Effekte beobachtet oder die Anwendung als unangenehm empfunden werden, wäre es ratsam, die Durchführung einzustellen und stattdessen den Fokus auf andere Methoden zur Förderung der Regeneration zu legen.

Nach ersteren Ergebnissen stellen langsame Atemübungen eine zeit- und kostengünstige Methode dar, um in einem kurzen Zeitrahmen sowohl physiologische als auch psychologische Veränderungen zu erzielen. Die sich bei akuter als auch chronischer Anwendung positiv auf die Leistungserbringung, aber auch potenziell auf die Regeneration auswirken können (Laborde et al., 2024; Perez-Gaido et al., 2021). Bei der Durchführung ist es wichtig, den Fokus auf eine verlängerte Ausatemphase sowie auf die Nasenatmung zu legen. Eine Atemfrequenz von etwa sechs Atemzügen pro Minute sollte angestrebt werden. Diese Frequenz sollte zehn Atemzyklen pro Minute nicht überschreiten (Balban et al., 2023; Laborde et al., 2019; Russo et al., 2017; Zaccaro et al., 2018). Das exakte Verhältnis zwischen Inspiration und Expiration, sowie das Einfügen einer Atempause stellen weitere große

Stellschrauben zu einer Optimierung der HRV dar (Laborde et al., 2024). Um optimale Ergebnisse zu erzielen, sollte der genauere Ablauf anhand der erwähnten Parameter stets individuell angepasst werden. In stressigen Situationen, in denen es nicht möglich ist, sich exakt an die Resonanzfrequenz zu halten oder diese präzise zu bestimmen, kann dennoch versucht werden, die Atmung auf etwa fünf bis sieben Zyklen pro Minute zu verlangsamen, um mögliche Vorteile zu erzielen. Dies kann während Trainingsphasen gezielt geübt werden, um ein besseres Gefühl für diesen Rhythmus zu entwickeln (You et al., 2024).

Es reichen bereits täglich fünf Minuten aus, um erste positive und chronische Veränderungen bei einer Mehrzahl an Personen zu beobachten (Balban et al., 2023). Für weitere förderliche Veränderungen sind womöglich Zeiten von bis zu fünfzehn Minuten notwendig (Laborde et al., 2019). Bereits kurze Interventionen eignen sich zur akuten Steuerung der psychischen Erregung oder auch zur potenziellen Beeinflussung der Regeneration nach Belastungen (Laborde et al., 2024; Perez-Gaido et al., 2021).

Diese Vorteile sind nicht nur für wettkampforientierte Leistungssportler*innen von Bedeutung, sondern stellen für reguläre Freizeitathlet*innen eine kostengünstige Ergänzung dar. Besonders bei intensiven Belastungen oder intermittierenden Sportarten könnten Atemübungen dazu beitragen, die Regenerationszeit zu verkürzen und den Organismus schneller wieder in einen leistungsbereiten Zustand zu bringen und würde zu einem erheblichen Vorteil beitragen. Dadurch würde es nicht nur zu einer Unterstützung der allgemeinen Belastbarkeit kommen, sondern auch zur Förderung der langfristigen Leistungserbringung.

4.4 Schlussfolgerung

Anhand der in dieser Studie erhobenen leistungsbezogenen Parameter lässt sich keine klare Aussage über die Effektivität individualisierter Atemübungen auf die Regeneration und die damit einhergehenden Trainingsanpassungen treffen. Zwar konnten innerhalb der vier Wochen keine deutlichen positiven Effekte festgestellt werden, es traten aber auch keine negativen Auswirkungen auf. Eine Erweiterung der Untersuchung durch zusätzliche physiologische Parameter und Schlafdaten könnte ein genaueres Bild ermöglichen. Trotz der aufgezeigten Ergebnisse deutet die Studienlage darauf hin, dass Atemübungen großes regeneratives Potenzial bergen. Weitere Forschungsarbeit ist erforderlich, um die Modalitäten von Training und Atemübungen zu untersuchen, die den größtmöglichen Benefit erzielen.

Literaturverzeichnis

- Andre, M. J., Fry, A. C., & Lane, M. T. (2013). Appropriate Loads for Peak-Power During Resisted Sprinting on a Non-Motorized Treadmill. *Journal of Human Kinetics*, 38, 161–167. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0056>
- Athanasίου, N., Bogdanis, G. C., & Mastorakos, G. (2023). Endocrine responses of the stress system to different types of exercise. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 24(2), 251–266. <https://doi.org/10.1007/s11154-022-09758-1>
- Balban, M. Y., Neri, E., Kogon, M. M., Weed, L., Nouriani, B., Jo, B., Holl, G., Zeitzer, J. M., Spiegel, D., & Huberman, A. D. (2023). Brief structured respiration practices enhance mood and reduce physiological arousal. *Cell Reports Medicine*, 4(1), 100895. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2022.100895>
- Barry, P. H., & Lynch, J. W. (2005). Ligand-Gated Channels. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 4(1), 70–80. <https://doi.org/10.1109/TNB.2004.842497>
- Bestwick-Stevenson, T., Toone, R., Neupert, E., Edwards, K., & Kluzek, S. (2022). Assessment of Fatigue and Recovery in Sport: Narrative Review. *International Journal of Sports Medicine*, 43(14), 1151–1162. <https://doi.org/10.1055/a-1834-7177>
- Billaut, F., Bishop, D. J., Schaerz, S., & Noakes, T. D. (2011). Influence of Knowledge of Sprint Number on Pacing during Repeated-Sprint Exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(4), 665–672. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181f6ee3b>
- Bogdanis, G. C., Philippou, A., Stavrinou, P. S., Tenta, R., & Maridaki, M. (2022). Acute and delayed hormonal and blood cell count responses to high-intensity exercise before and after short-term high-intensity interval training. *Research in Sports Medicine*, 30(4), 400–414. <https://doi.org/10.1080/15438627.2021.1895783>
- Burford, N., Webster, N., & Cruz-Topete, D. (2017). Hypothalamic-Pituitary-Adrenal Axis Modulation of Glucocorticoids in the Cardiovascular System. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(10), 2150. <https://doi.org/10.3390/ijms18102150>

- Capilupi, M. J., Kerath, S. M., & Becker, L. B. (2020). Vagus Nerve Stimulation and the Cardiovascular System. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 10(2), a034173. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a034173>
- Charest, J., & Grandner, M. A. (2020). Sleep and Athletic Performance. *Sleep Medicine Clinics*, 15(1), 41–57. <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2019.11.005>
- Charmandari, E., Tsigos, C., & Chrousos, G. (2005). ENDOCRINOLOGY OF THE STRESS RESPONSE. *Annual Review of Physiology*, 67(1), 259–284. <https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.67.040403.120816>
- Cheng, A. J., Place, N., & Westerblad, H. (2018). Molecular Basis for Exercise-Induced Fatigue: The Importance of Strictly Controlled Cellular Ca²⁺ Handling. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 8(2), a029710. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a029710>
- Coffey, V. G., & Hawley, J. A. (2007). The Molecular Bases of Training Adaptation: *Sports Medicine*, 37(9), 737–763. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737090-00001>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed). L. Erlbaum Associates.
- Daniela, M., Catalina, L., Ilie, O., Paula, M., Daniel-Andrei, I., & Ioana, B. (2022). Effects of Exercise Training on the Autonomic Nervous System with a Focus on Anti-Inflammatory and Antioxidants Effects. *Antioxidants*, 11(2), 350. <https://doi.org/10.3390/antiox11020350>
- De Kloet, E. R., Joëls, M., & Holsboer, F. (2005). Stress and the brain: From adaptation to disease. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(6), 463–475. <https://doi.org/10.1038/nrn1683>
- Denham, J., Feros, S. A., & O'Brien, B. J. (2015). Four Weeks of Sprint Interval Training Improves 5-km Run Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(8), 2137–2141. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000862>
- Dolphin, H., Dukelow, T., Finucane, C., Commins, S., McElwaine, P., & Kennelly, S. P. (2022). “The Wandering Nerve Linking Heart and Mind” – The Complementary

- Role of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation in Modulating Neuro-Cardiovascular and Cognitive Performance. *Frontiers in Neuroscience*, 16, 897303.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2022.897303>
- Duclos, M., & Tabarin, A. (2016). Exercise and the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis. In F. Lanfranco & C. J. Strasburger (Hrsg.), *Frontiers of Hormone Research* (Bd. 47, S. 12–26). S. Karger AG. <https://doi.org/10.1159/000445149>
- Edouard, P., Pollock, N., Guex, K., Kelly, S., Prince, C., Navarro, L., Branco, P., Depiesse, F., Gremeaux, V., & Hollander, K. (2022). Hamstring Muscle Injuries and Hamstring Specific Training in Elite Athletics (Track and Field) Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 10992.
<https://doi.org/10.3390/ijerph191710992>
- Edwards, R. B., Tofari, P. J., Cormack, S. J., & Whyte, D. G. (2017). Non-motorized Treadmill Running Is Associated with Higher Cardiometabolic Demands Compared with Overground and Motorized Treadmill Running. *Frontiers in Physiology*, 8, 914.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00914>
- Egan, B., & Zierath, J. R. (2013). Exercise Metabolism and the Molecular Regulation of Skeletal Muscle Adaptation. *Cell Metabolism*, 17(2), 162–184.
<https://doi.org/10.1016/j.cmet.2012.12.012>
- Fincham, G. W., Strauss, C., Montero-Marin, J., & Cavanagh, K. (2023). Effect of breathwork on stress and mental health: A meta-analysis of randomised-controlled trials. *Scientific Reports*, 13(1), 432. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27247-y>
- Fu, Q., & Levine, B. D. (2013). Exercise and the autonomic nervous system. In *Handbook of Clinical Neurology* (Bd. 117, S. 147–160). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53491-0.00013-4>
- Gibbons, C. H. (2019). Basics of autonomic nervous system function. In *Handbook of Clinical Neurology* (Bd. 160, S. 407–418). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64032-1.00027-8>

- Gonçalves, C. A. M., Dantas, P. M. S., Dos Santos, I. K., Dantas, M., Da Silva, D. C. P., Cabral, B. G. D. A. T., Guerra, R. O., & Júnior, G. B. C. (2020). Effect of Acute and Chronic Aerobic Exercise on Immunological Markers: A Systematic Review. *Frontiers in Physiology*, 10, 1602. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01602>
- Hall, A. J., Aspe, R. R., Craig, T. P., Kavaliauskas, M., Babraj, J., & Swinton, P. A. (2023). *The Effects of Sprint Interval Training on Physical Performance: A Systematic Review and Meta- Analysis*.
- Hazell, T. J., MacPherson, R. E. K., Gravelle, B. M. R., & Lemon, P. W. R. (2010). 10 or 30-s sprint interval training bouts enhance both aerobic and anaerobic performance. *European Journal of Applied Physiology*, 110(1), 153–160. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1474-y>
- Hureau, T. J., Broxterman, R. M., Weavil, J. C., Lewis, M. T., Layec, G., & Amann, M. (2022). On the role of skeletal muscle acidosis and inorganic phosphates as determinants of central and peripheral fatigue: A ^{31}P -MRS study. *The Journal of Physiology*, 600(13), 3069–3081. <https://doi.org/10.1113/JP283036>
- Ivarsson, A., Johnson, U., Andersen, M. B., Tranaeus, U., Stenling, A., & Lindwall, M. (2017). Psychosocial Factors and Sport Injuries: Meta-analyses for Prediction and Prevention. *Sports Medicine*, 47(2), 353–365. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0578-x>
- Jiménez Morgan, S., & Molina Mora, J. A. (2017). Effect of Heart Rate Variability Biofeedback on Sport Performance, a Systematic Review. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 42(3), 235–245. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9364-2>
- Jin, M., Polis, A., & Hartzel, J. (2019). Algorithms for minimization randomization and the implementation with an R package. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 50, 1–11. <https://doi.org/10.1080/03610918.2019.1619765>
- Jogl, G., Hsiao, Y., & Tong, L. (2004). Structure and Function of Carnitine Acyltransferases. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1033(1), 17–29. <https://doi.org/10.1196/annals.1320.002>

- Karemaker, J. M. (2017). An introduction into autonomic nervous function. *Physiological Measurement*, 38(5), R89–R118. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aa6782>
- Katz, A. (2022). A century of exercise physiology: Key concepts in regulation of glycogen metabolism in skeletal muscle. *European Journal of Applied Physiology*, 122(8), 1751–1772. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-04935-1>
- Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., Erlacher, D., Halson, S. L., Hecksteden, A., Heidari, J., Kallus, K. W., Meeusen, R., Mujika, I., Robazza, C., Skorski, S., Venter, R., & Beckmann, J. (2018). Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2), 240–245. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0759>
- Kraemer, W. J., Fleck, S. J., Maresh, C. M., Ratamess, N. A., Gordon, S. E., Goetz, K. L., Harman, E. A., Frykman, P. N., Volek, J. S., Mazzetti, S. A., Fry, A. C., Marchitelli, L. J., & Patton, J. F. (1999). Acute hormonal responses to a single bout of heavy resistance exercise in trained power lifters and untrained men. *Canadian Journal of Applied Physiology = Revue Canadienne De Physiologie Appliquee*, 24(6), 524–537. <https://doi.org/10.1139/h99-034>
- Laborde, S., Allen, M. S., Borges, U., Dosseville, F., Hosang, T. J., Iskra, M., Mosley, E., Salvotti, C., Spolverato, L., Zammit, N., & Javelle, F. (2022). Effects of voluntary slow breathing on heart rate and heart rate variability: A systematic review and a meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 138, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104711>
- Laborde, S., Hosang, T., Mosley, E., & Dosseville, F. (2019). Influence of a 30-Day Slow-Paced Breathing Intervention Compared to Social Media Use on Subjective Sleep Quality and Cardiac Vagal Activity. *Journal of Clinical Medicine*, 8(2), 193. <https://doi.org/10.3390/jcm8020193>
- Laborde, S., Zammit, N., Iskra, M., Mosley, E., Borges, U., Allen, M. S., & Javelle, F. (2024). The influence of breathing techniques on physical sport performance: A

- systematic review and meta-analysis. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 17(2), 1222–1277. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2022.2145573>
- Lehrer, P., Vaschillo, B., Zucker, T., Graves, J., Katsamanis, M., Aviles, M., & Wamboldt, F. (2013). Protocol for Heart Rate Variability Biofeedback Training. *Biofeedback*, 41(3), 98–109. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-41.3.08>
- MacInnis, M. J., & Gibala, M. J. (2017). Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity. *The Journal of Physiology*, 595(9), 2915–2930. <https://doi.org/10.1113/JP273196>
- Macpherson, R. E. K., Hazell, T. J., Olver, T. D., Paterson, D. H., & Lemon, P. W. R. (2011). Run Sprint Interval Training Improves Aerobic Performance but Not Maximal Cardiac Output. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(1), 115–122. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181e5eacd>
- Manchado-Gobatto, F. B., Marostegan, A. B., Rasteiro, F. M., Cirino, C., Cruz, J. P., Moreno, M. A., & Gobatto, C. A. (2020). New Insights into Mechanical, Metabolic and Muscle Oxygenation Signals During and After High-Intensity Tethered Running. *Scientific Reports*, 10(1), 6336. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63297-w>
- Mann, J. B., Bryant, K. R., Johnstone, B., Ivey, P. A., & Sayers, S. P. (2016). Effect of Physical and Academic Stress on Illness and Injury in Division 1 College Football Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 20–25. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001055>
- McEwen, B. S. (2000). The neurobiology of stress: From serendipity to clinical relevance. *Brain Research*.
- Myrvang, S., & Van Den Tillaar, R. (2024). The Longitudinal Effects of Resisted and Assisted Sprint Training on Sprint Kinematics, Acceleration, and Maximum Velocity: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine - Open*, 10(1), 110. <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00777-7>

- Nishi, T., & Takaichi, A. (2003). An Extended Minimization Method to Assure Similar Means of Continuous Prognostic Variables between Treatment Groups. *Japanese Journal of Biometrics*, 24(2), 43–55. <https://doi.org/10.5691/jjb.24.43>
- Pagaduan, J. C., Chen, Y.-S., Fell, J. W., & Wu, S. S. X. (2020). Can Heart Rate Variability Biofeedback Improve Athletic Performance? A Systematic Review. *Journal of Human Kinetics*, 73(1), 103–114. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0004>
- Parolin, M. L., Chesley, A., Matsos, M. P., Spriet, L. L., Jones, N. L., & Heigenhauser, G. J. F. (1999). Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 277(5), E890–E900. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1999.277.5.E890>
- Pelka, M., Kölling, S., Ferrauti, A., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Kellmann, M. (2017). Acute effects of psychological relaxation techniques between two physical tasks. *Journal of Sports Sciences*, 35(3), 216–223. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1161208>
- Perez-Gaido, M., Lalanza, J. F., Parrado, E., & Capdevila, L. (2021). Can HRV Biofeedback Improve Short-Term Effort Recovery? Implications for Intermittent Load Sports. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 46(2), 215–226. <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09495-8>
- Perry, C. G. R., Kane, D. A., Herbst, E. A. F., Mukai, K., Lark, D. S., Wright, D. C., Heigenhauser, G. J. F., Neufer, P. D., Spriet, L. L., & Holloway, G. P. (2012). Mitochondrial creatine kinase activity and phosphate shuttling are acutely regulated by exercise in human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 590(21), 5475–5486. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.234682>
- Petrakos, G., Morin, J.-B., & Egan, B. (2016). Resisted Sled Sprint Training to Improve Sprint Performance: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 46(3), 381–400. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0422-8>

- Pinto, B. L., & McGill, S. M. (2020). Voluntary Muscle Relaxation Can Mitigate Fatigue and Improve Countermovement Jump Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(6), 1525–1529. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003326>
- Reardon, C. L., Hainline, B., Aron, C. M., Baron, D., Baum, A. L., Bindra, A., Budgett, R., Campriani, N., Castaldelli-Maia, J. M., Currie, A., Derevensky, J. L., Glick, I. D., Gorczynski, P., Gouttebauge, V., Grandner, M. A., Han, D. H., McDuff, D., Mountjoy, M., Polat, A., ... Engebretsen, L. (2019). Mental health in elite athletes: International Olympic Committee consensus statement (2019). *British Journal of Sports Medicine*, 53(11), 667–699. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-100715>
- Reljic, D., Lampe, D., Wolf, F., Zopf, Y., Herrmann, H. J., & Fischer, J. (2019). Prevalence and predictors of dropout from high-intensity interval training in sedentary individuals: A meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(9), 1288–1304. <https://doi.org/10.1111/sms.13452>
- Russo, M. A., Santarelli, D. M., & O'Rourke, D. (2017). The physiological effects of slow breathing in the healthy human. *Breathe*, 13(4), 298–309. <https://doi.org/10.1183/20734735.009817>
- Sabzevari Rad, R. (2024). The impact of different training intensities on athletes' immune system function and the management of upper respiratory traction infections: A narrative review. *Sport Sciences for Health*, 20(2), 415–426. <https://doi.org/10.1007/s11332-023-01110-7>
- Sanders, R. D., Brian, D., & Maze, M. (2008). *G-Protein-Coupled Receptors*.
- Sapolsky, R. M., Romero, L. M., & Munck, A. U. (2000). *How Do Glucocorticoids Influence Stress Responses? Integrating Permissive, Suppressive, Stimulatory, and Preparative Actions*. 21(1).
- Schiaffino, S., & Reggiani, C. (2011). Fiber Types in Mammalian Skeletal Muscles. *Physiological Reviews*, 91(4), 1447–1531. <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2010>

- Scott, N. W., McPherson, G. C., Ramsay, C. R., & Campbell, M. K. (2002). The method of minimization for allocation to clinical trials. A review. *Controlled Clinical Trials*, 23(6), 662–674. [https://doi.org/10.1016/s0197-2456\(02\)00242-8](https://doi.org/10.1016/s0197-2456(02)00242-8)
- Sevoz-Couche, C., & Laborde, S. (2022). Heart rate variability and slow-paced breathing: when coherence meets resonance. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 135, 104576. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104576>
- Singh, B., Olds, T., Curtis, R., Dumuid, D., Virgara, R., Watson, A., Szeto, K., O'Connor, E., Ferguson, T., Eglitis, E., Miatke, A., Simpson, C. E., & Maher, C. (2023). Effectiveness of physical activity interventions for improving depression, anxiety and distress: An overview of systematic reviews. *British Journal of Sports Medicine*, 57(18), 1203–1209. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106195>
- Smith, J. A. B., Murach, K. A., Dyar, K. A., & Zierath, J. R. (2023). Exercise metabolism and adaptation in skeletal muscle. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 24(9), 607–632. <https://doi.org/10.1038/s41580-023-00606-x>
- Smith, S. M., & Vale, W. W. (2006). The role of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in neuroendocrine responses to stress. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 8(4), 383–395. <https://doi.org/10.31887/DCNS.2006.8.4/ssmith>
- Smoliga, J. M., Hegedus, E. J., & Ford, K. R. (2015). Increased physiologic intensity during walking and running on a non-motorized, curved treadmill. *Physical Therapy in Sport*, 16(3), 262–267. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2014.09.001>
- Sousa, F. A. B., Vasque, R. E., & Gobatto, C. A. (2017). Anaerobic metabolism during short all-out efforts in tethered running: Comparison of energy expenditure and mechanical parameters between different sprint durations for testing. *PLOS ONE*, 12(6), e0179378. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179378>
- Souza, D., Vale, A. F., Silva, A., Araújo, M. A. S., De Paula Júnior, C. A., De Lira, C. A. B., Ramirez-Campillo, R., Martins, W., & Gentil, P. (2021). Acute and Chronic Effects of Interval Training on the Immune System: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Biology*, 10(9), 868. <https://doi.org/10.3390/biology10090868>

- Souza, H. C. D., Philbois, S. V., Veiga, A. C., & Aguilar, B. A. (2021). Heart Rate Variability and Cardiovascular Fitness: What We Know so Far. *Vascular Health and Risk Management, Volume 17*, 701–711. <https://doi.org/10.2147/VHRM.S279322>
- Stults-Kolehmainen, M. A., & Bartholomew, J. B. (2012). Psychological Stress Impairs Short-Term Muscular Recovery from Resistance Exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 44*(11), 2220–2227. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31825f67a0>
- Sun, W., Liu, Q., Leng, J., Zheng, Y., & Li, J. (2015). The role of Pyruvate Dehydrogenase Complex in cardiovascular diseases. *Life Sciences, 121*, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2014.11.030>
- Walburn, J., Vedhara, K., Hankins, M., Rixon, L., & Weinman, J. (2009). Psychological stress and wound healing in humans: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Psychosomatic Research, 67*(3), 253–271. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2009.04.002>
- Wehrwein, E. A., Orer, H. S., & Barman, S. M. (2016). Overview of the Anatomy, Physiology, and Pharmacology of the Autonomic Nervous System. In R. Terjung (Hrsg.), *Comprehensive Physiology* (1. Aufl., S. 1239–1278). Wiley. <https://doi.org/10.1002/cphy.c150037>
- Willoughby, T. N., Thomas, M. P. L., Schmale, M. S., Copeland, J. L., & Hazell, T. J. (2016). Four weeks of running sprint interval training improves cardiorespiratory fitness in young and middle-aged adults. *Journal of Sports Sciences, 34*(13), 1207–1214. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1102316>
- Wittekind, A. L., Micklewright, D., & Beneke, R. (2011). Teleoanticipation in all-out short-duration cycling. *British Journal of Sports Medicine, 45*(2), 114–119. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.061580>
- You, M., Laborde, S., Ackermann, S., Borges, U., Dosseville, F., & Mosley, E. (2024). Influence of Respiratory Frequency of Slow-Paced Breathing on Vagally-Mediated

- Heart Rate Variability. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 49(1), 133–143. <https://doi.org/10.1007/s10484-023-09605-2>
- Zaccaro, A., Piarulli, A., Laurino, M., Garbella, E., Menicucci, D., Neri, B., & Gemignani, A. (2018). How Breath-Control Can Change Your Life: A Systematic Review on Psycho-Physiological Correlates of Slow Breathing. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 353. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00353>
- Zagatto, A. M., Bishop, D. J., Antunes, B. M., Beck, W. R., Malta, E. S., De Poli, R. A. B., Cavaglieri, C. R., Chacon-Mikahil, M. P. T., & Castro, A. (2022). Impacts of high-intensity exercise on the metabolomics profile of human skeletal muscle tissue. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 32(2), 402–413. <https://doi.org/10.1111/sms.14086>
- Zajac, A., Jarzabek, R., & Waskiewicz, Z. (1999). The Diagnostic Value of the 10- and 30-Second Wingate Test for Competitive Athletes: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 13(1), 16–19. <https://doi.org/10.1519/00124278-199902000-00003>
- Zouhal, H., Jacob, C., Delamarche, P., & Gratas-Delamarche, A. (2008). Catecholamines and the Effects of Exercise, Training and Gender: *Sports Medicine*, 38(5), 401–423. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838050-00004>

Erklärung

„Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und nur die ausgewiesenen Hilfsmittel verwendet habe. Diese Arbeit wurde weder an einer anderen Stelle eingereicht (z.B. für andere Lehrveranstaltungen) noch von anderen Personen (z.B. Arbeiten von anderen Personen aus dem Internet) vorgelegt.“

Ort, Datum

Unterschrift