



MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Recovery-Atmung zur Verbesserung von Sprint Intervall Training

verfasst von | submitted by

Simone Winkelbauer 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

Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, ein hochintensives Intervalltraining während eines vierwöchigen Trainingsplanes durchzuführen. Die Intervention stellten individualisierte Atemübungen dar, die täglich und nach den Trainingseinheiten von der Interventionsgruppe durchgeführt wurden. Die Kontrollgruppe führte keine Atemübungen aus. Die Herzfrequenz und die Herzratenvariabilität wurden in der Belastungs- und Erholungsphase aufgezeichnet. Es wurden die Hypothesen aufgestellt, dass sich durch die aktive Regeneration mittels Atemübungen eine Verbesserung der HRV-Parameter (RMSSD, HF, LF) ergibt. Sowie, dass sich im Verlauf der Trainingswochen die HRV Anfangswerte verbessern und die Herzfrequenz während Belastungs- und Erholungsphase verringert.

Die Ergebnisse zeigten nur für den Parameter RMSSD einen signifikanten Unterschied zwischen Interventions- und Kontrollgruppe. Die LF zeigte signifikante Unterschiede über die Zeit, allerdings keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. HR und HF veränderten sich zum Ende der Erholungsphase nicht. Eine signifikante Reduktion der Herzfrequenz konnte insgesamt nicht nachgewiesen werden. Somit mussten alle aufgestellten Hypothesen verworfen werden, da keine in vollem Umfang bestätigt werden konnte.

Limitationen der Studie lagen insbesondere in der zu geringen Stichprobengröße, einem potenziell zu kurzen Interventionszeitraum sowie fehlender Kontrolle der täglichen Durchführung der Atemübungen. Zukünftige Studien sollten längere Interventionen mit größeren Stichproben berücksichtigen.

Abstract

The aim of this study was to implement a high-intensity interval training program over a four-week training period. The intervention consisted of individualized breathing exercises, performed daily and after each training session by the intervention group. The control group did not perform any breathing exercises. Heart rate and heart rate variability (HRV) were recorded during both the exercise and recovery phases. It was hypothesized that active recovery through breathing exercises would lead to improvements in HRV parameters (RMSSD, HF, LF), that baseline HRV values would improve over the course of the training weeks, and that heart rate would decrease during both exercise and recovery phases.

The results showed a significant difference between the intervention and control group only for the RMSSD parameter. LF values demonstrated significant changes over time, but no differences between the groups. HR and HF did not change significantly by the end of the recovery phase. Overall, a significant reduction in heart rate could not be confirmed. Therefore, all hypotheses had to be rejected, as none could be fully supported.

The limitations of the study include a small sample size, a potentially too short intervention period, and a lack of control over the participants' daily execution of the breathing exercises. Future research should consider longer interventions with larger sample sizes.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	6
1.1 Regeneration	6
1.2 Autonomes Nervensystem und die Auswirkung von Stress	7
1.3 Herzratenvariabilität.....	8
1.4 Atemregulation und Stressreduktion	10
1.4.1 Das Konzept von Atemregulationsübungen	10
1.4.2 Physiologische Prozesse	12
1.4.3 Interventionsstudien im Sport	13
1.5 Effekte eines Sprint Intervall Trainings.....	16
1.6 Studienlage.....	17
1.7 Hypothese	17
2. Methodik	19
2.1 Proband*innen	19
2.2 Trainingsdurchführung und Aufzeichnung der Parameter	20
2.3 Ablauf einer Trainingseinheit	20
2.4 Der Trainingsplan	21
2.5 Statistische Auswertung.....	24
3. Ergebnisse.....	27
3.1 Veränderungen während der Sprints in HR.....	27
3.1.1 HR _{min}	27
3.1.2 HR _{max}	28
3.2 Veränderungen in der Erholungsphase.....	31
3.2.1 Rückgang der Herzfrequenz.....	32
3.2.2 Veränderung der HRV	35
4. Diskussion	45
4.1 Veränderungen während der Sprints in HR.....	46
4.2 Veränderungen in der Erholungsphase.....	46

4.3 Vergleich mit bestehender Literatur	47
4.4 Mögliche Erklärungen für ausbleibende Effekte.....	50
4.5 Implikationen für die Praxis	52
4.6 Limitationen der Studie.....	54
4.7 Forschungsperspektiven	55
Literaturverzeichnis	56
Abbildungsverzeichnis.....	65
Tabellenverzeichnis.....	66

Vorwort

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden alle statistischen Auswertungen mit der Software *IBM SPSS Statistics* (Version 30) durchgeführt. Zur sprachlichen Ausarbeitung einzelner Textpassagen wurde in geringem Umfang das KI-Tool *ChatGPT (Model 4o, OpenAI, USA)* unterstützend verwendet. Zur Erstellung der Abbildungen wurde *Microsoft Excel* und *Python 3.9* (Bibliothek: *matplotlib, seaborn*) verwendet.

Danke an Univ.-Prof. Mag. Dr. Robert Csapo, der mir das Thema dieser Masterarbeit zur Verfügung stellte und durch seine Unterstützung sowie die unkomplizierte Organisation den Arbeitsprozess maßgeblich erleichterte.

Mein besonderer Dank gilt Peter Raidl, MSc, der mir im Verlauf der Arbeit mit fachlicher Expertise und wertvollem Feedback stets unterstützend zur Seite stand. Ebenso danke ich allen freiwilligen Proband*innen, ohne deren engagierte Teilnahme die Durchführung dieser Studie nicht möglich gewesen wäre.

Mein weiterer Dank gilt außerdem meiner Susanna, ohne deren emotionale Unterstützung ich diese Masterarbeit vielleicht nicht zu Ende geschafft hätte.

1. Einleitung

1.1 Regeneration

Regeneration nach dem Sport ist für Athlet*innen wie auch für Freizeitsportler*innen ein ganzheitlicher Prozess. Viele Faktoren treffen zusammen, die idealerweise gut miteinander agieren. In der Regenerationsphase ist unter anderem eine erhöhte Muskelproteinsynthese notwendig, eine Wiederherstellung von Energiespeichern, die Entfernung von Stoffwechselabfallprodukten, eine Reduktion von Entzündungen und eine Erholung des Nervensystems (Peake et al., 2017).

Während dem Training kann Muskelgewebe beschädigt werden, das durch die Proteinbiosynthese repariert werden muss. Ebenso verbraucht der Körper während dem Training Glykogen und es kommt zur Anhäufung von Stoffwechselzwischenprodukten. Auch hier ist der Körper gefordert einerseits die Energiespeicher wieder aufzufüllen und andererseits die Abfallprodukte aus dem Muskel abzutransportieren. Ein intensives Training kann im Körper auch Entzündungsprozesse auslösen. Diese müssen in der Regenerationsphase wieder kontrolliert und möglichst reduziert werden. Auch belastet ein intensives Training das zentrale Nervensystem (Peake et al., 2017).

Durch die Ermüdung des ZNS kommt es zu einer Abnahme der willkürlichen Aktivierung von Muskeln, die direkt mit einer Abnahme der Frequenz und Synchronisierung von Motoneuronen und einem verringerten Antrieb durch den Motorkortex zusammenhängen (Tornero-Aguilera et al., 2022).

Um den Körper bei diesem Prozess bestmöglich zu unterstützen, sind dabei unter anderem die Ernährung, Aktivitäten zur Unterstützung der Erholung, der Schlaf und auch mentale Aspekte von großer Bedeutung.

Besteht beispielsweise eine unzureichende Ernährung, so können benötigte Nährstoffe nicht bereitgestellt werden, um Muskeln zu reparieren und Energie wiederherzustellen.

Aktivitäten zur Unterstützung der Erholung, wie beispielsweise Massagen können zu einer verbesserten Durchblutung der Muskulatur führen und so zur Entspannung beitragen (Weerapong et al., 2005).

Auch der Schlaf ist eine der wichtigsten Komponenten für eine effektive Regeneration. Während des Schlafs werden Wachstumshormone freigesetzt, die die Reparatur und den Aufbau der Muskulatur unterstützen. Ein unzureichender Schlaf kann also durch die Beeinträchtigung der Hormonproduktion und der dadurch verlangsamten Muskelreparatur zu einem verzögerten Erholungsprozess führen (Fullagar et al., 2015).

Ebenfalls eine bedeutende Rolle spielen mentale Aspekte. Stress kann den Hormonhaushalt beeinflussen und Entzündungsprozesse im Körper verstärken (Segerstrom & Miller, 2004). Entspannungstechniken wie Meditation oder Atemübungen können dazu beitragen, Stress abzubauen und die mentale Erholung zu unterstützen (Goyal et al., 2014).

Jeder dieser Faktoren kann also die Regenerationsfähigkeit und somit die Leistungsfähigkeit und das Verletzungsrisiko beeinflussen.

1.2 Autonomes Nervensystem und die Auswirkung von Stress

Stress ist die Beanspruchung unseres Systems durch innere oder äußere Einflüsse, die unser inneres Gleichgewicht (Homöostase) stören und von unserem Körper eine Reaktion erfordern. Wirken Stressoren nun auf unseren Körper ein, aktiviert das autonome Nervensystem (ANS) eine Reaktion darauf (Yaribeygi et al., 2017).

Auch intensive körperliche Aktivität löst im Körper eine Stressreaktion aus, die das sympathisch-adrenomedulläre System und die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HPA-Achse) aktiviert. Dies führt unter anderem zur Freisetzung von Stresshormonen und Entzündungsstoffen (Clark & Mach, 2016). Der Körper ist gefordert, um Anpassungsreaktionen zu starten.

Auch in dieser Studie wird durch eine intensive körperliche Belastung Stress auf den Körper ausgeübt und dadurch kurzfristig die Homöostase gestört. Nach der körperlichen Aktivität beginnt der Körper mit der Regeneration, Prozesse für Erholung und Aufbau werden gestartet.

Das ANS spielt eine wesentliche Rolle bei der Regulation von Stress und seiner Auswirkung auf die Regeneration des Körpers.

Zu den wichtigsten Funktionen zählen die Regulation der Herzfrequenz, Blutdruck, Stoffwechsel, Atmung, Körpertemperatur, Verdauung und auch Stressreaktionen. Das ANS arbeitet also unbewusst und reguliert die Körperfunktionen, um die interne Homöostase aufrechtzuerhalten (Saper, 2002).

Das ANS besteht aus zwei funktionellen Systemen: dem sympathischen Nervensystem (SNS) und dem parasympathischen Nervensystem (PNS). Um den Körper in einem ausgewogenen Zustand zu halten, wirken diese beiden Systeme oft antagonistisch

zueinander. Das SNS ist vorwiegend dafür zuständig auf Umweltveränderungen und Stressoren zu reagieren.

Kommt es im Körper zu einer Stressreaktion wird das SNS aktiviert und es werden Hormone freigesetzt, um die Energiebereitstellung zu erhöhen und die Körperreaktionen zu beschleunigen (Seegerstrom & Miller, 2004). Das PNS ist für Entspannung und Erholung zuständig.

Wird nun bedingt durch anhaltenden Stress die Freisetzung von Stresshormonen kontinuierlich gefördert, kann der Körper nicht mehr zur Ruhe kommen. Dieses Übergewicht des SNS kann Entzündungen fördern, den Schlaf stören, den Stoffwechsel beeinflussen und das Immunsystem schwächen, was wiederum die Regenerationsprozesse behindert (Seegerstrom & Miller, 2004).

Daher ist für eine gute Regeneration eine Balance des ANS wichtig und sollte auch gefördert werden.

1.3 Herzratenvariabilität

Die Herzratenvariabilität (HRV) ist ein wichtiger Indikator für die autonome Regulation des ANS und spiegelt das Gleichgewicht zwischen SNS und PNS wider. Sie beschreibt die zeitlichen Schwankungen zwischen aufeinanderfolgenden Herzschlägen (RR-Intervalle) und gilt als Maß für die Anpassungsfähigkeit des ANS (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Eine höhere HRV deutet in der Regel auf eine flexiblere und anpassungsfähigere Regulation des ANS hin (Shaffer & Ginsberg, 2017). Es wird oft mit besserer Stressbewältigung, erhöhter körperlicher Fitness oder verbesserter kognitiver Funktion in Verbindung gebracht. Während eine niedrigere HRV auf eine eingeschränkte Regulation und möglicherweise auf eine Dysfunktion hinweisen kann und mit einem erhöhten Risiko für Herzerkrankungen, metabolische Störungen, Schlafstörungen und psychische Erkrankungen assoziiert wird (Kemp & Quintana, 2013).

Die Interpretation der HRV-Parameter nach den intensiven Belastungen zeigt Einblicke in die Erholungsfähigkeit des ANS und möglichen Anpassungen. Die hier herangezogenen Parameter sind RMSSD, HF-Power und LF-Power. Sie reflektieren primär die parasympathische Aktivität des ANS.

Der RMSSD ist ein zeitbasiertes Maß der HRV, das die kurzfristige vagale Aktivität widerspiegelt. Er wird berechnet, indem die Differenzen aufeinanderfolgender

Herzschlagintervalle quadriert, gemittelt und daraus die Quadratwurzel gezogen wird. RMSSD ist eng mit der Hochfrequenzleistung der HRV korreliert, aber weniger anfällig für respiratorische Einflüsse.

LF-Power und HF-Power sind frequenzbereichsbasierte Messungen. Die LF-Power (0,04–0,15 Hz) wird über mindestens 2 Minuten aufgezeichnet und reflektiert hauptsächlich die Baroreflexaktivität in Ruhe. Langsame Atmung kann vagale Einflüsse in der LF-Power verstärken. Die HF-Power (0,15–0,40 Hz) wird als respiratorisches Band bezeichnet und reflektiert hauptsächlich die parasympathische Aktivität, insbesondere durch die Atemrhythmus-bedingten Herzfrequenzschwankungen (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Beispielhaft zeigt eine Studie von Plews et al. (2012) zwei Elite-Triathleten, die 77 Tage lang täglich mittels HRV-Messungen überwacht wurden. Dabei sollte herausgefunden werden, ob HRV-Messungen Hinweise auf Trainingsüberlastung und deren Folgen geben können. Einer der Athleten zeigte eine Leistungsschwäche bei einem Wettbewerb, dieser wurde als non-functional over-reached (NFOR) diagnostiziert und es entwickelte sich Gürtelrose.

Beim Athleten mit NFOR gab es eine Veränderung in den HRV-Werten während im Vergleich dazu diese Werte beim anderen Athleten stabil blieben. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass es einen Zusammenhang zwischen der Veränderung der HRV-Werte und einer Überbelastung durch Training und weiters eine geschwächte Immunabwehr gibt.

Weiters wurde in einem systematischen Review von Manresa-Rocamora et al. (2021) die Wirksamkeit von HRV-gesteuertem Training im Vergleich zu vordefinierten Trainingsprogrammen untersucht. Bei gesunden, körperlich aktiven sowie ausdauertrainierten Personen wurde die Beeinflussung kardialer Vagustonusaktivität, aerober Fitness und Ausdauerleistung erforscht. Die analysierten Studien zeigen, dass HRV-gesteuertes Training insbesondere RMSSD-Werte stärker verbessert als vordefinierte Trainingspläne, während sich für den HF-Power keine konsistenten Vorteile zeigen.

Die Analyse deutet darauf hin, dass HRV-gesteuertes Training zu stabileren HRV-Verläufen und weniger negativen Anpassungsreaktionen führt, allerdings konnten keine signifikanten Verbesserungen der Leistungsfähigkeit aufgezeigt werden.

In einer Studie von Schneider et al. (2019) wurden 37 gut trainierte Athlet*innen untersucht. Gemessen an HR und HRV wurde bewertet, wie sich eine kurzzeitige Überlastung durch Krafttraining oder hochintensives Intervalltraining auf kardiale autonome Regulation

auswirkt. Während einer sechstägigen Überlastungsphase zeigten sich unterschiedliche autonome Reaktionen abhängig vom Trainingsmodus und der Körperposition während der Messung. Nach der Krafttrainings-Überlastung kam es in Rückenlage zu einem moderaten Anstieg der HR und einer Abnahme der LnRMSSD, während sich im Stehen keine signifikanten Veränderungen ergaben. Im Gegensatz dazu führte das hochintensive Intervalltraining zu einer Abnahme der HR und einer Erhöhung der LnRMSSD im Stehen, wobei in Rückenlage keine Veränderungen festgestellt wurden. Diese Effekte kehrten sich in der vier Tage umfassenden Erholungsphase teilweise wieder um. Die Korrelationen zwischen HRV-Veränderungen und Leistungsparametern waren insgesamt inkonsistent, wobei lediglich moderate bis starke negative Zusammenhänge zwischen HR und LnRMSSD bei der Betrachtung individueller Verläufe beobachtet wurden. Generell deuten die Ergebnisse darauf hin, dass HRV-Messungen im Rahmen orthostatischer Tests unterschiedliche autonome Anpassungen aufzeigen können. Die Veränderungen hingen allerdings nicht mit einer akuten Veränderung der Leistungsfähigkeit zusammen.

Insgesamt ist die HRV ein wertvolles Instrument zur Überwachung und Steuerung von Trainingsprozessen. Gleichzeitig reagiert die HRV jedoch empfindlich auf Störfaktoren wie Krankheit, Schlaf, Ernährungsstatus, Flüssigkeitshaushalt und Atemfrequenz. Daher sind eine standardisierte Erhebung der Messdaten sowie eine differenzierte Interpretation der Ergebnisse von zentraler Bedeutung.

1.4 Atemregulation und Stressreduktion

1.4.1 Das Konzept von Atemregulationsübungen

Atemregulationsübungen sind Techniken, die darauf abzielen die Atmung zu kontrollieren und zu verbessern. Diese Übungen werden oft beim Yoga, bei Meditationen oder in der Atemtherapie verwendet. Atemregulationsübungen können mit verschiedenen Techniken durchgeführt werden. Oft wird zur Steuerung eine Betonung auf die Ausatmung, also eine Verlängerung gegenüber der Einatmung, angewendet (Balban et al., 2023). Den Schwerpunkt auf die Ausatmung zu legen, hat mehrere physiologische Vorteile.

Eine Studie von Balban et al. (2023) hat vier verschiedene Atemübungen täglich für 5 Minuten über einen Monat mit Probanden durchgeführt. Die unterschiedlichen Übungen waren Cyclic sighing (Betonung auf lange Ausatmungen), Box breathing (gleiche Dauer von Einatmung, Atemanhalten und Ausatmung) und Cyclic hyperventilation mit Atemanhalten (längere Einatmungen und kürzere Ausatmungen). Die Kontrollgruppe führte

Achtsamkeitsmeditation für 5 Minuten pro Tag aus. Die Ergebnisse zeigen, dass die Atemübungen gegenüber Achtsamkeitsmeditation stärkere Effekte haben, wobei cyclic sighing die effektivste Methode ist. Sie führte zu einer signifikant stärkeren Verbesserung der Stimmung und eine deutliche Reduktion der Atemfrequenz. Die Atemregulierung zur verlängerten Ausatmung kann also sowohl physische wie auch psychologische Effekte aufweisen.

In einem systematischen Review beschreiben Laborde et al. (2022a) fünf wesentliche Atemtechniken, die verwendet werden:

- Slow-Paced Breathing (SPB): Langsames Atmen bei einer Atemfrequenz unter 10 Atemzüge/Minute, idealerweise etwa 6 Atemzüge/Minute. Das verlängerte Ausatmung aktiviert den Vagusnerv, steigert die HRV und fördert Entspannung.
- Fast-Paced Breathing: Schnelleres Atmen bei einer Atemfrequenz über 20 Atemzüge/Minute. Dadurch soll eine kurzfristige Leistungssteigerung bei intensiven, kurzen Übungen verschafft werden, die schnelle Energieversorgung erfordern. Besonders nützlich für Sportarten mit hoher Intensität und schnellen Reaktionszeiten.
- Voluntary Hyperventilation: Freiwillige Hyperventilation ist eine schnelle und tiefe Atmung, bei der das Verhältnis von Sauerstoffaufnahme zu Kohlendioxidabgabe erhöht ist. Dadurch erhöht sich die Pufferkapazität im Blut durch respiratorische Alkalose, wodurch die Muskelleistung unterstützt wird. Kurzfristig signifikante Leistungsverbesserungen bei intensiven, kurzen Belastungen.
- Breath-Holding: Freiwilliges Aussetzen des Atems in zwei Phasen: Anfangsphase und Kampfphase mit wachsendem Atemdrang. Training unter Sauerstoffmangel führt zu physiologischen Anpassungen.
- Alternate-Nostril and Uni-Nostril Breathing: Abwechselndes Atmen durch ein Nasenloch oder Atmung mit Blockierung eines Nasenlochs. Aktiviert mechanische Rezeptoren in der Nasenschleimhaut, die das autonome Nervensystem beeinflussen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Slow-Paced Breathing und Breath-Holding bei längerfristigen Interventionen am effektivsten zur Verbesserung der sportlichen Leistung sind. Wobei kurzfristige Effekte bei Voluntary Hyperventilation und Fast-Paced Breathing bei intensiven Belastungen sich wirksamer zeigen. Alternate-Nostril and Uni-Nostril Breathing haben auch potenzielle Wirkungen auf Aktivierung und Entspannung, aber weitere Studien sind notwendig.

1.4.2 Physiologische Prozesse

Atemregulationsübungen können positive Auswirkungen auf das Nervensystem, das Herz-Kreislauf-System und auch auf die psychische Gesundheit, beispielsweise auf das Stressniveau, haben (Jerath et al., 2006). Die physiologischen Prozesse, die durch Atemregulationsübungen gefördert werden, betreffen mehrere Systeme im Körper.

Eine zentrale Auswirkung haben diese Übungen auf das ANS, insbesondere auf das PNS. Die Ausatmung wird hauptsächlich durch das PNS gesteuert und wird dadurch mehr aktiviert. Der Körper kann sich daher mehr entspannen, die Erholung und Regeneration wird gefördert. Ein Hauptbestandteil des PNS ist der Vagusnerv, welcher unter anderem für die Verlangsamung der Herzrate und zur Senkung des Blutdruckes verantwortlich ist. Vor allem tiefe und bewusste Atemzüge können den Vagusnerv anregen und stimulieren (Jerath et al., 2006).

Das systematische Review von Laborde et al. (2022b) untersucht die Wirkung von SPB auf jene HRV-Komponenten, die durch vagale Aktivität beeinflusst werden, um den Einfluss auf das PNS zu bewerten. Die Analyse umfasst 223 Studien die HRV-Parameter wie RMSSD, LF-Power und HF-Power betrachten, um die parasympathische Aktivität zu messen. Die Messparameter werden in drei Zeitpunkte unterteilt: während der Atmung, direkt nach einer Sitzung und nach mehreren Sitzungen.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Zunahme der HRV bei allen Zeitpunkten insbesondere während der Atemübung. Die Ergebnisse stützen die Hypothese, dass langsames Atmen die Aktivität des Vagusnervs erhöht und kann daher als vielversprechende Technik angesehen werden, um diesen nicht-invasiv zu stimulieren.

Ebenso ist das respiratorische System von Auswirkungen betroffen. Durch die bewussten Atemübungen wird die Atemmuskulatur trainiert, allem voran das Zwerchfell. Dies kann wiederum die Regenerationsprozesse des Körpers unterstützen, indem mehr Sauerstoff und Nährstoffe zu den Geweben transportiert werden (Russo et al., 2017). Dadurch können sich potentielle positive Effekte auf die Lungenfunktion ergeben (Milesi et al., 2023).

Auch wird durch die gezielte Ausatmung der Abtransport von Kohlendioxid aus der Lunge verbessert, wodurch der Körper wieder besser Sauerstoff aufnehmen kann (Hamasaki et al., 2020).

Bei einer Studie von Laborde et al. (2019a) nahmen 64 Erwachsene für 30 Tage teil. Ziel war es, die Effekte von SPB auf die Schlafqualität und die kardiale vagale Aktivität zu untersuchen. Die Probanden wurden randomisiert in zwei Gruppen aufgeteilt, wobei eine Gruppe 15 Minuten SPB vor dem Schlafengehen mit geführtem Atmungstempo (Einatmung: 4,5s, Ausatmung: 5,5s) ausführte. Die Kontrollgruppe beschäftigte sich vor dem Schlafen gehen 15 Minuten mit Social Media. Ermittelt wurde einerseits die subjektive Schlafqualität und andererseits die kardiale vagale Aktivität, die über die HF HRV gemessen wurde. HF-Power wurde als Indikator für parasympathische Aktivität während des Schlafs und am Morgen nach dem Aufwachen genutzt. Die Ergebnisse zeigen Veränderungen bei der Interventionsgruppe, während die Kontrollgruppe keine Verbesserungen zeigt. Es wurden signifikante Verbesserung der subjektiven Schlafqualität und der HF-Power während des Schlafes, sowie ein leichter Anstieg bei der HF-Power am Morgen festgestellt. Da der Effekt am Morgen geringer als während des Schlafens war, kann das darauf hindeuten, dass SPB primär den parasympathischen Tonus während des Schlafs beeinflusst.

Es können daher schon viele positive Effekte von Atemregulationsübungen auf die physiologischen wie auch psychologischen Auswirkungen auf den Körper festgestellt werden.

1.4.3 Interventionsstudien im Sport

Atemregulationsübungen werden auch mit verschiedenen Zielen im Sport eingesetzt.

Eine Studie von Laborde et al. (2019b) untersuchte, ob SPB die Anpassung an psychologischen Stress verbessert, insbesondere durch eine bessere Inhibition (Hemmung von automatisierten Reaktionen). Die Studie wurde in zwei getrennten Experimenten durchgeführt, pro Experiment nahmen 60 Athlet*innen teil. Die Experimente unterschieden sich darin, wann die Entspannungsinterventionen durchgeführt wurden. Als Intervention wurde SPB oder das Ansehen einer TV-Dokumentation herangezogen. Im ersten Experiment wurde die Intervention vor der körperlichen Belastung gemacht, während sie im zweiten Experiment nach der körperlichen Belastung durchgeführt wurden.

Alle Teilnehmer*innen nahm an zwei Sitzungen teil, eine für die SPB, eine für die TV-Dokumentation als Kontrollbedingung. Die körperliche Belastung waren 5 Minuten Burpees bei 70 % der maximalen Wiederholungen.

SPB wurde definiert für 6 Atemzyklen pro Minute (4,5 s Einatmung, 5,5 s Ausatmung) für eine Dauer von 17 Minuten (3 × 5 Minuten mit 1-minütigen Pausen).

Zu Beginn wurde eine Ruhe-Messung von Herzfrequenz, HRV/RMSSD (als Index für kardiale vagale Aktivität), Atemfrequenz und Perceived Stress (über eine Skala von 0–100 mm) durchgeführt, ebenso danach wurden diese Parameter erneut gemessen.

Zur kognitiven Belastungsmessung wurde ein computergesteuerter Stroop-Test durchgeführt, dabei wurden Fehlerrate und Reaktionszeit gemessen. Nach dem Stroop-Test wurden HR, HRV (RMSSD), Atemfrequenz und Perceived Stress erneut erfasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die SPB-Teilnehmer signifikant weniger Fehler im Stroop Test machten als die TV-Teilnehmer. Es lässt sich eine bessere kognitive Kontrolle durch SPB daraus ableiten. Der stärkste Effekt war zu sehen, wenn SPB nach der körperlichen Aktivität durchgeführt wurde. Kein Unterschied war in der Reaktionszeit zu erkennen. SPB führte zu einer signifikant erhöhten RMSSD vor dem Stroop-Test, aber dieser Effekt hat sich nicht auf die Fehleranzahl ausgewirkt.

SPB könnte eine effektive Technik sein, um nach körperlicher Belastung kognitive Fehler zu reduzieren, für Athleten würde das bedeuten, fokussiert bleiben zu können.

Eine Studie von You et al. (2024) hat die Auswirkungen einer kurzen SPB-Intervention (5 Minuten) auf die Herz-Vagus-Aktivität, gemessen anhand der HRV bei 75 AthletInnen untersucht. Dabei kamen bei SPB fünf verschiedene Atemzyklen zum Einsatz (5; 5,5; 6; 6,5 und 7 Atemzüge pro Minute), während die Kontrollgruppe spontan atmete. Zur Bestimmung der kardialen vagalen Aktivität wurden RMSSD und LF-Power ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass alle SPB-Bedingungen zu einer signifikanten Erhöhung der kardialen vagalen Aktivität im Vergleich zur spontanen Atmung führen. Für Sportler kann es eine effektive Methode zur Stressbewältigung sein.

Es konnte auch festgestellt werden, dass LF-Power ein genauerer Indikator war als RMSSD, um die Atemfrequenzen zu unterscheiden.

Eine Studie von Merlin et al. (2024) untersuchte die Auswirkungen von SPB bei 13 halbprofessionellen jugendlichen Schwimmern (ca. 14 Jahre) während einer siebenwöchigen Trainingsphase. Die Interventionsgruppe (n = 7) führen 2-mal täglich 10 Minuten SPB, mit einer Atemfrequenz von 6 Atemzügen pro Minute aus. Die Kontrollgruppe trainierte ohne Atemübungen. Das Ziel war es einerseits herauszufinden, welche

psychologischen Auswirkungen SPB hat und andererseits wurden die physiologischen Marker Herzfrequenz und HRV gemessen.

Die subjektive Trainingsleistung war höher als in der Kontrollgruppe. Allerdings konnten keine Effekte bei der Herzfrequenz und der HRV festgestellt werden. Mögliche Veränderung von SPB-Anwendungsdauer, mehr Kontrollvariablen für HRV-Messungen und individuelle Atemfrequenzen könnten bessere Ergebnisse bringen.

Stress betrifft nicht nur Athleten, sondern auch Trainer, die während des Spiels schnelle und komplexe Entscheidungen treffen und hohen psychischen Druck standhalten sollen. In einer Fallstudie von Nikolovski et al. (2023) wurde untersucht, wie sich SPB auf akuten Stress bei einem professionellen Handballtrainer während offizieller Spiele auswirkt.

Die gemessenen Parameter zur Analyse der Stressreaktionen waren die Herzfrequenz, Cortisol und Alpha-Amylase (ein Marker für sympathische Aktivierung) bei 6 offiziellen Spielen vor, während und nach den Spielen. Die ersten drei Spiele wurden ohne Intervention beobachtet, und die letzten drei Spiele wurden mit täglichem SPB-Training interveniert. SPB wurde zweimal täglich und direkt vor den Spielen praktiziert. Der Trainer atmete dabei 4,5 Atemzüge pro Minute (4,5 Sekunden Einatmen, 9,1 Sekunden Ausatmen).

Die Ergebnisse zeigen den größten Effekt in der Alpha-Amylase. Herzfrequenz und Cortisol zeigen zwar Unterschiede, die Interventions-Spiele zeigen eine positive Tendenz, allerdings sind die Unterschiede nicht signifikant. Signifikante Veränderungen in der Alpha-Amylase zeigten sich in den Interventions-Spielen, bei den Ausgangswerten vor dem Spiel, die niedriger waren als ohne Intervention. Und beim Anstieg zur Halbzeit, der ebenfalls geringer ausfiel als bei den Kontroll-Spielen.

Die Effektgrößen der Alpha-Amylase-Veränderung waren zur Halbzeit sehr groß, und erreichten 90 Minuten nach dem Spiel einen besonders starken Effekt. Die langfristigen Effekte von SPB führten zu einer allgemein geringeren sympathischen Aktivierung und niedrigeren Speichel Konzentrationen an Alpha Amylase.

Im Zusammenhang mit Athlet*innen ist erkennbar, dass Atemregulationsübungen zahlreiche unterschiedliche Effekte haben, es bedarf allerdings noch weiterer Forschung, um genauere Auswirkungen erklären zu können.

1.5 Effekte eines Sprint Intervall Trainings

Sprint-Intervall-Training (SIT) ist eine Trainingsmethode des anaeroben Trainings bei der, die Trainingsintensität sehr hoch ist. SIT besteht aus mehreren kurzen, maximal intensiven Sprints, gefolgt von Erholungspausen. Die Sprints werden meist so nahe wie möglich an der maximalen Anstrengung durchgeführt und dauern typischerweise von 10 bis 30 Sekunden. Die anschließenden Erholungspausen können aktiv oder passiv gestaltet sein und mehrere Minuten dauern. Aktive Pausen sind dann gekennzeichnet durch sehr niedrige Intensitäten und die passiven Pausen sind eine komplette Ruhe.

Atakan et al. (2022) zeigten, dass SIT und High-Intensity Interval Training (HIIT) signifikante Verbesserungen in der körperlichen Leistungsfähigkeit und physiologischen Anpassungen hervorrufen können.

Liu et al. (2024) hebt hervor, dass HIIT eine effektive Trainingsmethode ist, um die kardiovaskuläre Ausdauer signifikant zu verbessern und gleichzeitig die Gesamtkraft zu steigern. Durch HIIT wird nicht nur die anaerobe Kapazität verbessert, sondern auch die Geschwindigkeit und Kraft von Athlet*innen. Es kommt zu spezifischen Entwicklungen der Energiesysteme und Muskelanpassungen.

In einem systematischen Review und Metaanalyse von Hall et al. (2023) konnte gezeigt werden, dass SIT moderate Verbesserungen der körperlichen Leistungsfähigkeit erzielt. Besonders deutliche Effekte wurden dabei für anaerobe Leistungsparameter, wie z.B. die Sprintkraft, festgestellt, während auch aerobe und gemischt aerobe-anaerobe Leistungsparameter in moderatem Ausmaß profitierten.

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Trainingswirksamkeit waren laut der Analyse die Sprintdauer sowie die Anzahl der Sprintwiederholungen pro Trainingseinheit. Längere Sprints (mehr als 20 Sekunden) und ein höheres Sprintvolumen zeigten größere Effekte auf die Leistungsverbesserung. Allerdings war in der Literatur überwiegend eine sehr kurze Interventionsdauer von nur 2 bis 4 Wochen zu beobachten, was die Übertragbarkeit auf langfristige Trainingsprogramme einschränkt.

Obwohl theoretisch positive Effekte durch SIT auf HRV-Parameter und Herzfrequenz zu erwarten gewesen wären, konnten in der vorliegenden Studie nur wenige signifikante Veränderungen festgestellt werden. Die wenigen beobachteten signifikanten Unterschiede erscheinen eher zufällig und ohne konsistentes Muster. Auch Hall et al. (2023) empfehlen,

zukünftige Studien methodisch robuster zu gestalten und größere Stichproben zu wählen, um die tatsächlichen Effekte sicherer bewerten zu können.

1.6 Studienlage

Es haben sich erst wenige Studien damit auseinandergesetzt wie sich die Regeneration nach Trainingsinterventionen und Entspannungsmaßnahmen verhält (Pelka et al., 2017; Pinto & McGill, 2020). Vor allem als Entspannungsmaßnahme Atemregulationsübungen einzusetzen, wurde bisher noch nicht geprüft.

Daher will diese Arbeit erforschen, ob eine gezielte Beeinflussung des autonomen Nervensystems dazu beitragen kann, Trainingsanpassungen und die Erholung während und nach sportlichen Trainings zu optimieren.

In dieser Studie wird als Trainingsintervention ein 4-wöchiges Sprint Intervall Training eingesetzt, das gezielt die Veränderung im anaeroben System trainieren soll. Zusätzlich werden tägliche Atemregulationsübungen festgelegt, die eine gezielte Veränderung des autonomen Nervensystems hervorbringen sollen. Dadurch kann getestet werden, ob eine Verbesserung in der Regeneration sichtbar wird und ob Trainingsanpassungen verbessert werden.

Nach der aktuellen Forschung werden Verbesserungen, einerseits im aeroben und anaeroben System, wie von Hall et al. (2023) dargelegt, und andererseits potenzielle Effekte durch Atemregulationsübungen, wie von Balban et al. (2023) beschrieben, erwartet.

1.7 Hypothese

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es festzustellen, inwieweit sich individualisierte Atemregulationsübungen auf eine verbesserte Regeneration des autonomen Nervensystems auswirken. Dazu werden folgende Hypothesen aufgestellt:

(1) Es wird erwartet, dass die Interventionsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe durch die aktive Regeneration der Atemübungen eine Verbesserung der HRV-Parameter RMSSD, HF und LF aufweist. (2) Es wird angenommen, dass sich im Verlauf der Trainingswochen bei der Interventionsgruppe ein verbesserter Anfangswert der HRV-Parameter (RMSSD, HF, LF) im Vergleich zur Kontrollgruppe entwickelt. (3) Es wird erwartet, dass sich durch eine verbesserte Regulation des autonomen Nervensystems bei

der Interventionsgruppe im Verlauf der Trainingswochen eine Verringerung der Herzfrequenz sowohl während der aktiven Phase als auch in der Erholungsphase zeigt.

2. Methodik

In dieser Forschungsarbeit handelt es sich um eine randomisierte Studie mit zwei parallelen Gruppen. Alle Proband*innen absolvieren ein Trainingsprogramm von Sprint-Intervall-Trainings für 4 Wochen. Eine der beiden Gruppen führt zusätzlich individualisierte Atemregulationsübungen aus, wobei diese hierbei die Intervention darstellen und zu einer verbesserten Regeneration führen sollen. Die Atemregulationsübungen werden täglich und auch als Bestandteil des Trainings durchgeführt.

2.1 Proband*innen

Die Studie wird 40 Proband*innen beinhalten, wobei hier bereits mögliche Ausfälle mit eingerechnet werden. Zur Ermittlung der erforderlichen Fallzahl wurde die Effektstärke einer Studie von Laborde et al. (2019) mit ähnlichen Atemübungen herangezogen, die Effekte auf den Schlaf beziehungsweise auf die Herzfrequenzvariabilität (HRV) untersuchte.

Die Studienteilnehmer*innen sind Sportler*innen zwischen 18 und 40 Jahren und aller Geschlechter. Sie sollten aktuell bzw. im letzten Jahr keine Verletzungen der unteren Extremitäten oder der Wirbelsäule erlitten haben. Eine regelmäßig psychiatrische Behandlung oder eine Störung des endokrinen oder kardiorespiratorischen Systems sowie ein BMI über 30 kg/m² wären ebenso ein Ausschlusskriterium für die Studienteilnehmer*innen.

Als Methode zur Randomisierung wurde eine erweiterte Version der Minimierungsmethode nach Pocock und Simon herangezogen (Nishi & Takaichi 2003; Jin et al. 2021). Für eine ausgeglichene Verteilung der Probanden in zwei Gruppen wurde folgende Gewichtung festgelegt. Mit eins (1) gewichtet wurden die Mittelwerte und Varianzen der Variablen Maximalgeschwindigkeit und zurückgelegter Strecke bei der Eingangstestung und mit zwei (2) gewichtet wurde das Verhältnis der Anzahl an Personen in der jeweiligen Gruppe. Ebenso wichtig war es einen Ausgleich der Geschlechter zu schaffen, dazu wurde der Prozess für alle Geschlechter einzeln durchgeführt.

2.2 Trainingsdurchführung und Aufzeichnung der Parameter

Die Trainingseinheiten werden auf einem nicht motorisierten Laufband (NMLB; Woodway, Force 3.0, USA) im Kraftlabor der Subeinheit Trainingswissenschaften am Institut für Sport- und Bewegungswissenschaft der Universität Wien durchgeführt. Um das Verletzungsrisiko möglichst zu minimieren, wird am NMLB ein Widerstand von 5 % des Körpergewichtes eingestellt. Dadurch wird eine Verringerung der Laufgeschwindigkeit und so eine Entlastung der Muskulatur der Beinrückseite (Edouard et al., 2022) geschaffen.

Alle Trainingseinheiten, die im Labor stattfinden, werden von einer geschulten Person angeleitet. Die Proband*innen werden bei jedem Training mit einem Brustgurt (Polar H10, Finnland) ausgestattet, sodass die Herzfrequenz (HR), der Rückgang der Herzfrequenz (HRR) sowie die Herzratenvariabilität (HRV) erfasst werden können. Durch das NMLB werden weiters die maximale Laufgeschwindigkeit (V_{peak}), die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit (V_{mean}), die maximale Leistung (P_{peak}), die durchschnittliche Leistung (P_{mean}), die niedrigste Leistung (P_{min}) und die Distanz (D) aufgezeichnet.

Während der gesamten Zeit werden alle Proband*innen mit einem Fitnesstracker (Fitbit Inspire 3, USA) ausgestattet, um den Schlaf bzw. die Aktivität außerhalb der Studie aufzeichnen zu können.

Ebenfalls wird eine Bioelektrische Impedanz-Analyse (BIA) bei der Eingangs- bzw. auch bei der Abschlusstestung durchgeführt.

Für die Atemregulationsübungen werden eine Eingangs- und eine Validierungsmessung an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt, um die individuelle Atemfrequenz zu ermitteln. Während der Testung von 5 verschiedenen Atemfrequenzen (4,5; 5; 5,5; 6; 6,5 Atemzüge pro Minute) zu jeweils 2 Minuten wird mittels HRV-Messung getestet, welche Atemfrequenz für den Körper das PNS am stärksten aktivieren kann.

Nach der Testung der individuellen Atemfrequenz werden die Atemregulationsübungen mithilfe der Applikation Breathe (Havabee) ausgeführt. Die Interventionsgruppe wendet die Übungen täglich zuhause und bei jedem Training an.

2.3 Ablauf einer Trainingseinheit

Jede Trainingseinheit besteht aus einem Aufwärmteil, einem Hauptteil und einem Cool down.

Das Aufwärmprogramm besteht aus fünf Minuten Radfahren am Ergometer bei einem Widerstand von 1 W/kg Körpergewicht, gefolgt von einem 3-minütigen dynamischen Dehnen bestehend aus Schwunggymnastik, Ausfallschritten und Armschwüngen zu je 20 Wiederholungen. Abschließend werden drei Steigerungsläufen am NMLB zu 50%, 80% und 100% zur subjektiv eingeschätzten maximalen Laufgeschwindigkeit absolviert. Nach einer 4-minütigen Pause beginnt dann der Hauptteil.

Der Hauptteil besteht aus den Sprint Intervallen. Hier werden im Verlauf der Trainingseinheiten 3 – 6 x 30s all-Out Sprints mit jeweils 4 min aktiven Pausen (Gehen) gemacht. Die Teilnehmer*innen versuchen die 30 Sekunden Sprints mit voller Power und ihrer höchsten Geschwindigkeit zu absolvieren.

Das abschließende Cool down dauert 10 Minuten. Hier erfolgt dann die Teilung der Interventions- beziehungsweise Kontrollgruppe. Die Interventionsgruppe absolviert ihr individualisiertes Atemübungsprogramm für 10 Minuten, während die Kontrollgruppe in dieser Zeit ruhig sitzen Lesen oder Musik hören kann.

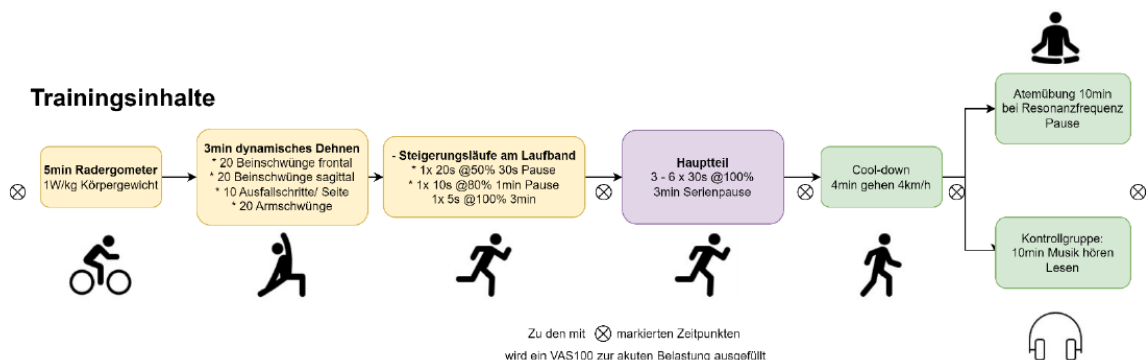


Abbildung 1: Trainingsinhalte

2.4 Der Trainingsplan

Der Trainingsplan, den alle Proband*innen durchlaufen, beinhaltet gesamt 10 Trainingseinheiten und erstreckt sich über 4 Wochen. Eine Woche vor dem Beginn des Trainingsplans (Woche 0) wird als Einführung genutzt. Im Trainingsplan werden pro Woche 2-3 Trainingseinheiten absolvieren, dabei werden drei von diesen Einheiten als Testtermine behandelt und befinden sich in Woche 1 (W1T2), Woche 3 (W3T1) und Woche 4 (W4T2). Diese Testtermine werden für die Datenauswertung herangezogen, da hier auch der Hauptteil identisch ist.

Studienprotokoll

Alle Trainings werden am Nicht-motorisierten Laufband im Kraftlabor des Instituts für Sportwissenschaft und Universitätsport der Universität Wien abgehalten.

Bei allen Trainings ist eine eingeschultes Mitglied des Forschungsteams im Labor anwesend.

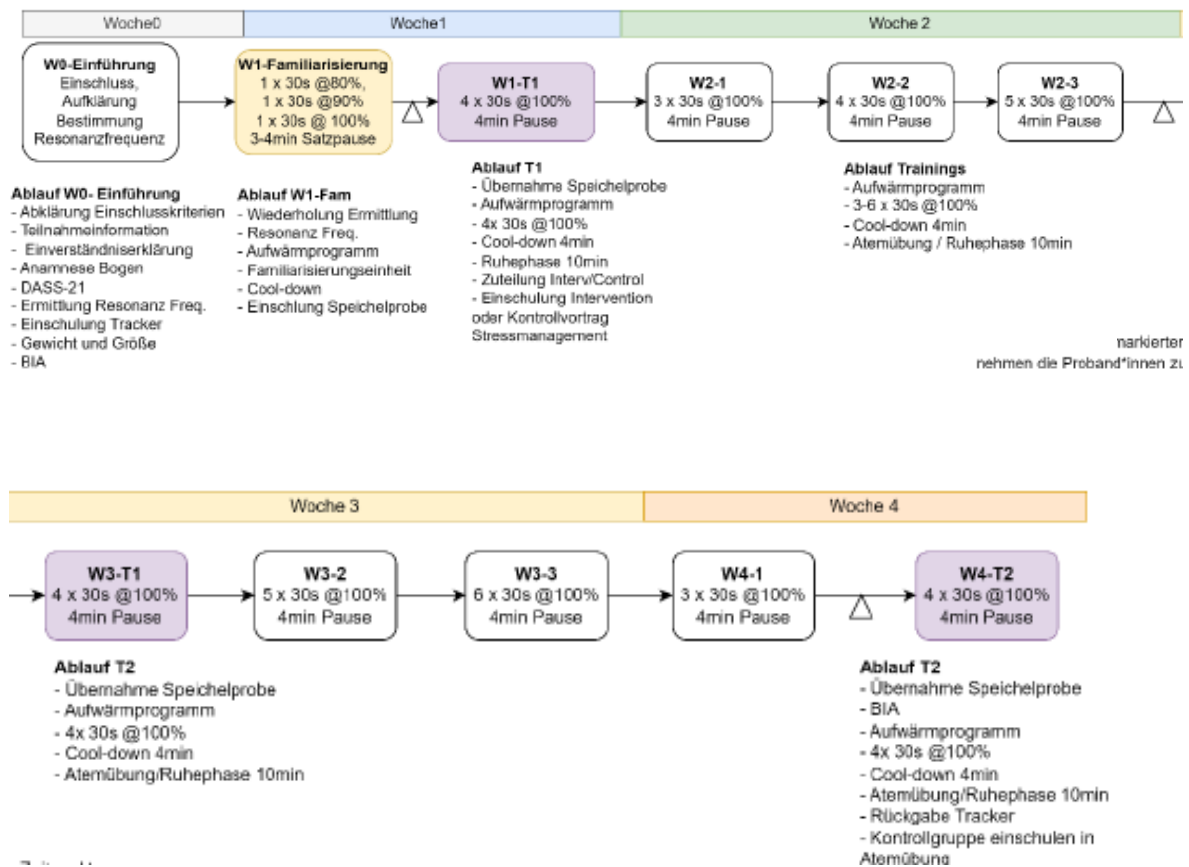


Abbildung 2: Studienprotokoll

Erste Einheit: W0 Einführung

Die Proband*innen starten die Studie mit einer Einverständniserklärung, gleichzeitig wird abgeklärt, ob mögliche Ausschlusskriterien vorliegen. Weiters müssen die Proband*innen einen Anamnesebogen und einen psychometrischen Test (DASS-21) (Nilges & Essau, 2015) ausfüllen. Für die künftige Aufzeichnung bekommen die Proband*innen ein Trainings- und Schlafstagebuch, sowie zwei Fragebögen PSQ-20 (Fliege et al., 2009) und AEB (Kellmann et al., 2016) in dreifacher Ausführung für die folgenden Testtage. Am Ende der ersten Einheit wird die erste Testung für die individuelle Atemfrequenz durchgeführt.

Die individuell optimale Atemfrequenz für Atemübungen, bei der das PNS am aktivsten ist, wird als Resonanzfrequenz bezeichnet. Diese Frequenz variiert individuell und liegt

typischerweise zwischen 4,5 und 6,5 Atemzügen pro Minute. Um die Resonanzfrequenz für eine Person feststellen zu können, wird eine Analyse der HRV durchgeführt. Es wird festgestellt bei welcher Atemfrequenz die LF Power maximiert wird und gleichzeitig eine hohe Kohärenz zwischen Atmung und Herzrhythmus besteht. Dazu wird typischerweise die Atemfrequenz in kleinen Schritten systematisch getestet, während HRV-Parameter gemessen werden (Fisher & Lehrer, 2022).

Mithilfe der Applikation Breathe (Havabee) werden nach dem Protokoll von Lehrer (2013) fünf Atemfrequenzen (4,5; 5,0; 5,5; 6,0 und 6,5 Atemzüge pro Minute) für 2 Minuten getestet. Mittels dem Brustgurt (Polar H10) werden hierbei die Atemfrequenz (durch die inkludierten Beschleunigungssensoren) und die HRV aufgezeichnet. Diese Testung findet in der nächsten Einheit nochmals statt. Dabei werden die Ergebnisse der ersten Testung als Familiarisierung angenommen und die Ergebnisse der zweiten Testung verwendet. Danach wird die individualisierte Atemfrequenz ermittelt und später für die Atemregulationsübungen angewendet.

Erste Trainingseinheit: W1-Familiarisierung

Die erste Trainingseinheit (W1T1) findet nach einer Woche statt und startet mit der wiederholten Testung der individuellen Atemfrequenz, um diese zu validieren.

Danach beginnt für die Proband*innen das Eingewöhnungstraining und ist ein Vertraut machen mit dem Ablauf des Trainings und dem NMLB.

Die Proband*innen werden zunächst in das standardisierte Aufwärmprogramm eingeführt und absolvieren danach ihre ersten Sprints.

Zweite Trainingseinheit: W1T2 Erster Testtag

Die zweite Trainingseinheit (W1T2) stellt gleichzeitig den ersten Testtag dar. An den drei Testtagen erfolgen noch zusätzliche Schritte zum normalen Testablauf. Die Proband*innen werden darauf hingewiesen 24h vor den Testtagen kein intensives Training abzuhalten sowie am Testtag keinen Alkohol, Medikamente, Koffein oder Nikotin zu sich zu nehmen.

Die Proband*innen haben sich an diesem Tag bereits in der Früh selbstständig eine Speichelprobe entnommen und bringen diese zum Training mit. Ebenso in der Früh füllen

die Proband*innen die beiden Fragebögen PSQ-20 und AEB aus. Bevor die Trainingseinheit startet, wird die erste BIA gemacht.

Der Trainingsablauf des Hauptteils mit 4 x 30s Sprint und jeweils 4 Minuten aktiver Pause ist an den drei Testtagen identisch. Zusätzlich wird an fünf festgelegten Zeitpunkten zur Feststellung der subjektiven Anstrengung ein VAS100 von den Proband*innen ausgefüllt.

Weitere Trainingseinheiten: W2T1 bis W4T1

Die Teilung der Proband*innen in Interventions- und Kontrollgruppe erfolgt nach dem ersten Testtag. Ab diesem Zeitpunkt führt die Interventionsgruppe das individualisierte Atemprogramm täglich für 10 Minuten am Abend bzw. direkt nach dem Training (Cool down) durch. Die Kontrollgruppe führt keine Atemübungen aus.

Das Trainingsvolumen wird während der nächsten Trainingseinheit von Woche 2 bis Woche 4 wellenförmig erhöht, wobei in der letzten Woche ein Tapering durchgeführt wird, um die Abschlusstestung in möglichst regeneriertem Zustand absolvieren zu können.

Die jeweils dritten Trainingseinheiten in Woche 2 (W2T3) und Woche 3 (W3T3) können die Proband*innen auch außerhalb des Labors durchführen, wenn sie das möchten.

Die Trainingseinheit W3T1 wird wieder als Testtag behandelt. Die Proband*innen bringen wieder eine Speichelprobe zum Training mit und füllen in der Früh die beiden Fragebögen PSQ-20 und AEB aus. Während des Trainings wird wieder die subjektiven Anstrengung mit dem VAS100 abgefragt.

Abschlusstestung: W4T2

Die zweite Trainingseinheit in der vierten Woche stellt die Abschlusstestung und das letzte Training dar. Zu Beginn wird die zweite BIA bei den Proband*innen durchgeführt. Der weitere Verlauf des letzten Trainings wird wie ein Testtag abgehalten.

2.5 Statistische Auswertung

Die Auswertungen umfassen Herzfrequenz und HRV-Parameter, die zur Interpretation herangezogen werden. Es werden sowohl Daten während der Sprints wie auch in der

Erholungsphase analysiert. Hauptsächlich wird sich die Analyse allerdings auf die Erholungsphase, die vom Ende des 4. Sprints bis zum Ende des Cooldowns verläuft, konzentrieren.

Während der Sprints wird nur die Veränderung der Herzfrequenz analysiert. Beim ersten und letzten Sprint eines Trainings wurden jeweils HR_{min} und HR_{max} herangezogen und über die Testtage verglichen.

Alle Zeitpunkte werden über die Testtage in Woche 1, 3 und 4 verglichen, während in der Erholungsphase neben der HR auch die HRV-Parameter analysiert werden. Dabei werden für die Testtage in der Woche 1, 3 und 4 jeweils drei Messzeitpunkte herangezogen. Die Daten wurden nach dem 4. und letzten Sprint des Trainings gemessen, zu jeweils am Ende des Sprints (endlastrun), am Ende der 4-minütigen aktiven Pause (endactive) und am Ende des 10-minütigen Cooldowns (endbreath), das sich in der Aktivität dann zwischen Interventions- und Kontrollgruppe unterscheidet. Die analysierten Parameter sind HR, RMSSD, HF-Power und LF-Power.

Durch die Analyse dieser Parameter sollte es möglich sein, die bereits angeführten Hypothesen klar beantworten zu können

Die statistische Auswertung der Parameter erfolgt mittels IBM SPSS Statistics (Version 30) und der dazu verwendete statistische Test ist eine mixed ANOVA.

Zur Vorbereitung der statistischen Auswertung wurden die HRV-Parameter (RMSSD, HF-Power, LF-Power) mithilfe des natürlichen Logarithmus (Ln) transformiert, um Verzerrungen durch stark streuende oder extreme Werte zu reduzieren und die Vergleichbarkeit zu erleichtern. Da häufig Ausreißer in den Daten vorhanden sind, konnte so dazu beigetragen werden, die Voraussetzung der Normalverteilung einfacher erreichen zu können.

Um die mixed ANOVA nun berechnen zu können werden alle Voraussetzungen geprüft. Zunächst wird die Normalverteilung aller Parameter getestet. Dazu werden für alle Q-Q Diagramme erstellt und es wird auf Ausreißer überprüft. Als weitere Testung für die Normalverteilung wird der Shapiro-Wilk Test herangezogen, ist der Signifikanzwert $p > 0.05$ wird eine Normalverteilung angenommen.

Konnte die Normalverteilung der Daten nicht angenommen werden, wurden potenzielle Ausreißer vor der Analyse identifiziert und entfernt. Als Ausreißer galten Datenpunkte, die außerhalb von 1,5-fachen Interquartilsabständen (IQR) unterhalb des ersten Quartils (Q1)

oder oberhalb des dritten Quartils (Q3) lagen. Q1 ist der 25. Perzentilwert, der Wert unter dem 25% der Daten liegen. Q3 ist der 75. Perzentilwert, der Wert unter dem 75% der Daten liegen.

Alle Datenpunkte außerhalb dieser Grenzen wurden als Ausreißer definiert und entfernt.

Nach dem Entfernen der Ausreißer wurden die Voraussetzungen erneut geprüft. Sind beide Verfahren als unauffällig zu bewerten, können weitere Testungen durchgeführt werden. Im nächsten Schritt wird zur Testung der Homogenität der Varianzen der Levene-Test genutzt. Ebenso wird der Mauchly-Test auf Sphärizität ausgeführt. Die Signifikanz $p > 0,05$ sollte wieder erfüllt sein. Sollte das nicht gegeben sein, muss ein Korrekturverfahren herangezogen werden. Dazu bietet SPSS drei Verfahren zur Auswahl an: Greenhouse-Geisser, Huynh-Feldt und Untergrenze. Je nach Höhe des Epsilon wird das Korrekturverfahren ausgewählt. Huynh-Feldt wird herangezogen, wenn $\text{Epsilon} > 0.75$ ist. Greenhouse-Geisser wird herangezogen, wenn $\text{Epsilon} \leq 0.75$ ist.

Sind nun alle Voraussetzungen und oben angeführten Testungen unauffällig kann der F-Test durchgeführt werden. Zeigt dieser einen signifikanten Unterschied an, werden weiters Post-hoc Tests (Games-Howell) durchgeführt. Für einen Vergleich aller Faktorenstufen miteinander, um eine Aussage über den Unterschied zwischen Gruppen und Zeitpunkten treffen zu können.

3. Ergebnisse

Es werden die Veränderungen während der Sprints und die Veränderungen in der Erholungsphase mittels mixed Anova überprüft. Die herangezogenen Parameter sind die Herzfrequenz (in der Aktivität und in der Erholungsphase) und die HRV-Parameter RMSSD, HF-Power und LF-Power (nur in der Erholungsphase).

3.1 Veränderungen während der Sprints in HR

Die Herzfrequenz während der Sprints wurde auf ihre Unterschiede überprüft. Über die drei Testtage wurde die HR_{min} und HR_{max} zum Zeitpunkt des ersten Sprints mit dem Zeitpunkt des letzten Sprints verglichen.

3.1.1 HR_{min}

Die minimale HR wurde über die vier Wochen beim ersten und beim letzten Sprint des Trainings analysiert.

Die Normalverteilung war nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots nicht verletzt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Es wurde ein signifikanter Effekt der Zeit auf HR_{min} zum Zeitpunkt des ersten Sprints gefunden, die HR_{min} veränderte sich über die Zeit signifikant ($F(2; 40) = 8,051$; $p = 0,001$; $\eta_p^2 = 0,287$).

Die Post-hoc Analyse zeigte signifikante Veränderungen der HR_{min} über die Zeit von W1 zu W4 (Mittelwertsunterschied = 6,0 bpm (95% CI [1,3; 10,7], $p = 0,010$) sowie von W3 zu W4 (Mittelwertsunterschied = 3,4 bpm (95% CI [0,2; 6,5], $p = 0,036$). Das bedeutet, dass sich die HR_{min} zu Beginn des ersten Sprints über die 4 Wochen Trainingszeit signifikant verringert hat, siehe Tabelle 1.

Die Interaktion zwischen Zeit und Gruppe war nicht signifikant ($F(2; 40) = 0,993$; $p = 0,331$; $\eta_p^2 = 0,047$).

Ebenso gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($F(1; 20) = 1,723$; $p = 0,204$; $\eta_p^2 = 0,079$).

HR_{min}			
Woche	Mittelwert (bpm)	95% CI	Signifikanzen
W1	133,0	[126,0; 140,0]	W1 und W4 p = 0,010
W3	130,3	[123,9; 126,8]	W3 und W4 p = 0,036
W4	127,0	[121,5; 132,5]	

Tabelle 1: HR_{min} Mittelwerte, 95% CI und Signifikanzen – erster Sprint

Die minimale HR wurde auch im letzten Sprint des Testtages über die 4 Wochen analysiert. Normalverteilung war nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots nicht verletzt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Die HR_{min} vom letzten Sprint hat sich über die Zeit hinweg nicht signifikant verändert, ($F(2; 40) = 0,614$; $p = 0,546$; $\eta_p^2 = 0,030$).

Ebenso konnte kein Unterschied zwischen den beiden Gruppen über die Zeit festgestellt werden ($F(2; 40) = 1,114$; $p = 0,338$; $\eta_p^2 = 0,053$).

Es wurde auch kein signifikanter Unterschied zwischen der Interventions- und Kontrollgruppe festgestellt ($F(1; 20) = 2,359$; $p = 0,140$; $\eta_p^2 = 0,106$).

3.1.2 HR_{max}

Die maximale HR wurde im ersten Sprint und im letzten Sprint eines Testtages über die vier Wochen überprüft.

Die Normalverteilung war nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots nicht verletzt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Die HR_{max} hatte sich über die Wochen hinweg zum Zeitpunkt des ersten Sprints nicht signifikant verändert ($F(2; 38) = 2,253$; $p = 0,118$; $\eta_p^2 = 0,101$).

Die Veränderung der HR_{max} über die Zeit war in beiden Gruppen ähnlich ($F(2; 38) = 3,044$; $p = 0,059$; $\eta_p^2 = 0,138$).

Der Unterschied zwischen den Gruppen über alle Zeitpunkte hinweg war ebenfalls nicht signifikant ($F(1; 20) = 1,833$; $p = 0,191$; $\eta_p^2 = 0,084$).

Die $HR_{\max}$ wurde auch im letzten Sprint des Testtages über die 4 Wochen analysiert.

Die Normalverteilung war nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots nicht verletzt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Es gab keinen signifikanten Haupteffekt der Zeit. Die Messwerte unterschieden sich nicht signifikant voneinander ($F(2; 38) = 2,809$; $p = 0,073$; $\eta_p^2 = 0,129$).

Auch die Interaktion zwischen Zeit und Gruppe war nicht signifikant ($F(2; 38) = 2,588$; $p = 0,091$; $\eta_p^2 = 0,120$).

Es zeigte sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied im Gruppenvergleich über alle Zeitpunkte hinweg ($F(1; 19) = 1,679$; $p = 0,211$; $\eta_p^2 = 0,081$).

Bei der Analyse der HR während der Sprints konnte nur eine signifikante Veränderung gefunden werden. Bei $HR_{\min}$ zum Zeitpunkt des ersten Sprints gab es eine Verbesserung über die Zeit, die signifikant war (siehe Tabelle 3 und 4 sowie Abbildung 4).

In den Mittelwerten sind nur kleinere Unterschiede erkennbar, beispielsweise zeigt Tabelle 2 und Abbildung 3, dass die Kontrollgruppe durchgehend niedrigere Werte aufweist als die Interventionsgruppe.

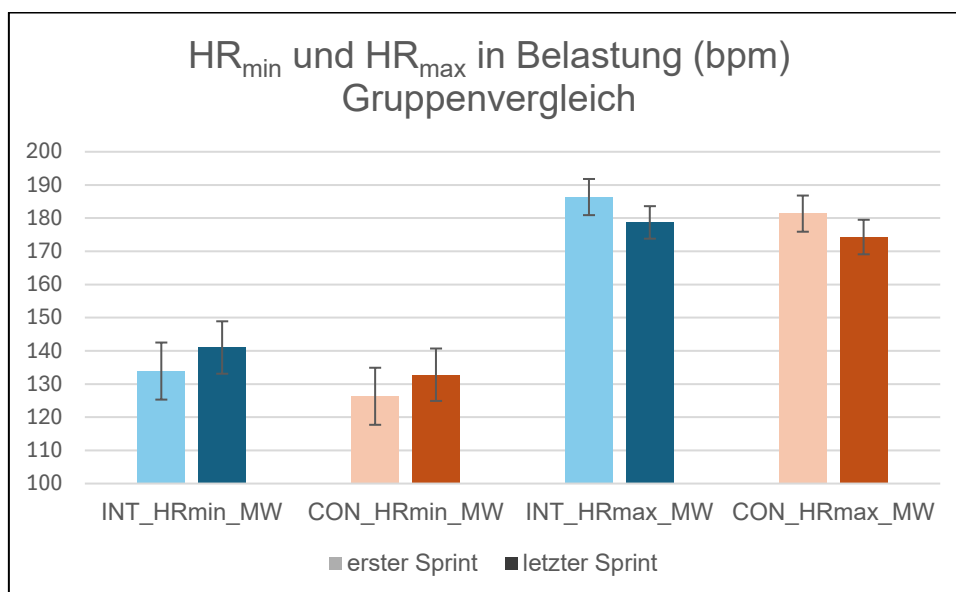


Abbildung 3: $HR_{\min}$ und $HR_{\max}$ erster und letzter Sprint: Mittelwerte (MW) und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppen

	Mittelwert [95% CI] (bpm)	
Zeitpunkt	Interventionsgruppe	Kontrollgruppe
HR _{min}		
erster Sprint	133,9 [125,3; 142,5]	126,3 [117,7; 134,9]
letzter Sprint	141,0 [133,1; 148,9]	132,8 [124,9; 140,7]
HR _{max}		
erster Sprint	186,4 [180,9; 191,8]	181,4 [175,9; 186,8]
letzter Sprint	178,7 [173,8; 183,6]	174,3 [169,1; 179,5]

Tabelle 2: HR_{min} und HR_{max} erster und letzter Sprint: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppen

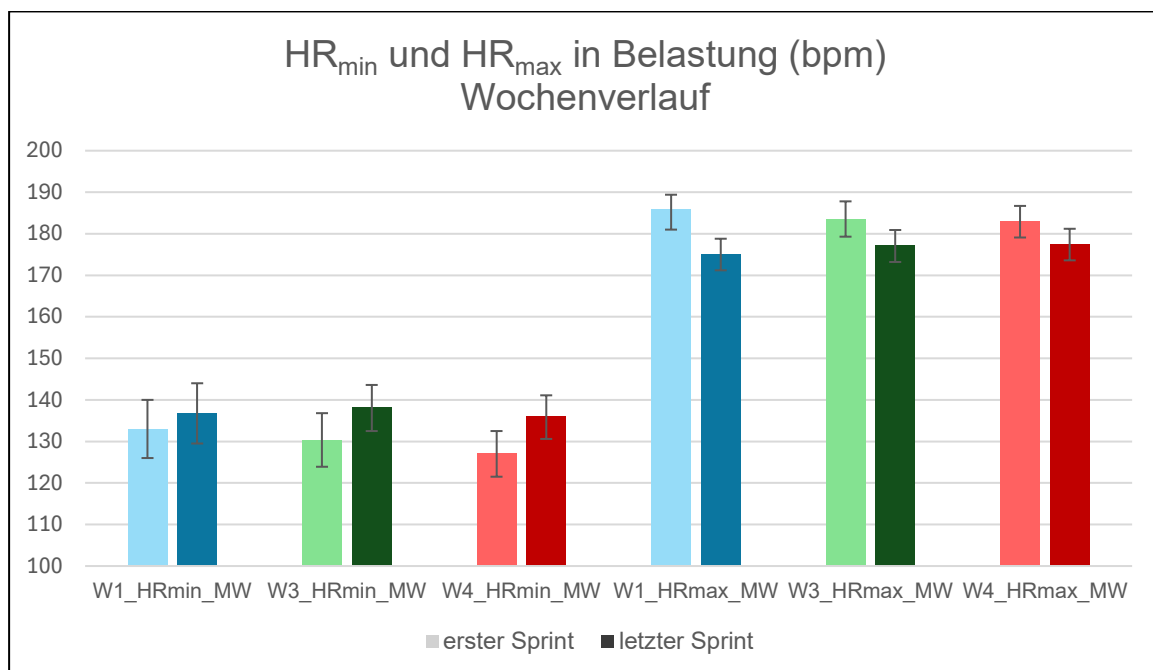


Abbildung 4: Tabelle 3: HR_{min} und HR_{max} erster und letzter Sprint: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen

	Mittelwert [95% CI] (bpm)		
Zeitpunkt	W1	W3	W4
HR_{min}			
erster Sprint	133,0 [126,0; 140,0]	130,3 [123,9; 136,8]	127,0 [121,5; 132,5]
letzter Sprint	136,7 [129,5; 144,0]	138,1 [132,5; 143,6]	135,9 [130,6; 141,1]
HR_{max}			
erster Sprint	185,8 [181,0; 189,4]	183,5 [179,3; 187,8]	182,9 [179,1; 186,7]
letzter Sprint	175,0 [171,2; 178,8]	177,1 [173,2; 180,9]	177,4 [173,6; 181,2]

Tabelle 3: HR_{min} und HR_{max} erster und letzter Sprint: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen

	HR _{min}				HR _{max}			
	erster Sprint		letzter Sprint		erster Sprint		letzter Sprint	
	p	η _p ²	p	η _p ²	p	η _p ²	p	η _p ²
Zeit	0,001	0,287	0,546	0,030	0,118	0,101	0,073	0,129
Zeit x Gruppe	0,993	0,331	0,338	0,053	0,059	0,138	0,091	0,120
Gruppe	0,204	0,079	0,140	0,106	0,191	0,084	0,211	0,081

Tabelle 4: HR_{min} und HR_{max} erster und letzter Sprint: Signifikanzen und Eta-quadrat

3.2 Veränderungen in der Erholungsphase

In der Zeit von Ende des letzten Sprints bis zum Ende des Cooldowns wurden die Veränderung der Herzfrequenz und der HRV-Parameter RMSSD, HF und LF analysiert, um mögliche Unterschiede zu überprüfen. Alle Parameter haben drei Messzeitpunkte: endlastrun (Ende des letzten Sprints), endactive (Ende der letzten 4-minütigen Gehpause) und endbreath (Ende des 10-minütigen Cooldowns). Für die Analyse wurde der

Messzeitpunkt endbreath herangezogen. Da sich die Aktivität der beiden Gruppen im Cooldown unterschieden und der Einfluss auf die Parameter durch das Atemtraining zu erwarten war.

3.2.1 Rückgang der Herzfrequenz

Der Rückgang der HR in der Erholungsphase wurde zu den drei Testtagen (Woche 1, 3 und 4) und zwischen der Interventions- und der Kontrollgruppe mittels mixed Anova verglichen.

3.2.1.1 HR endbreath

Der Zeitpunkt der Analyse der HR war zum Ende des 10-minütigen Cooldowns.

Die Normalverteilung war nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots nicht verletzt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Die HR am Ende des Cooldowns zeigte keine signifikanten Unterschiede im Laufe der Testtage ($F(2; 40) = 0,356$; $p = 0,703$; $\eta_p^2 = 0,017$).

Auch die Interaktion zwischen Zeit und Gruppe war nicht signifikant ($F(2; 20) = 1,870$; $p = 0,167$; $\eta_p^2 = 0,086$).

Der Vergleich der Mittelwerte der Gruppen über alle Zeitpunkte hinweg zeigte ebenfalls keinen signifikanten Unterschied ($F(1; 20) = 0,265$; $p = 0,612$; $\eta_p^2 = 0,013$).

Die Analyse der HR zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen Kontroll- und Interventionsgruppe, wie auch in Abbildung 5, 6 und 13 erkennbar. Ebenso konnte kein Unterschied über die Zeit der Testtage festgestellt werden.

Zusätzlich werden deskriptiv alle Werte in Tabelle 5 und 6 dargestellt.

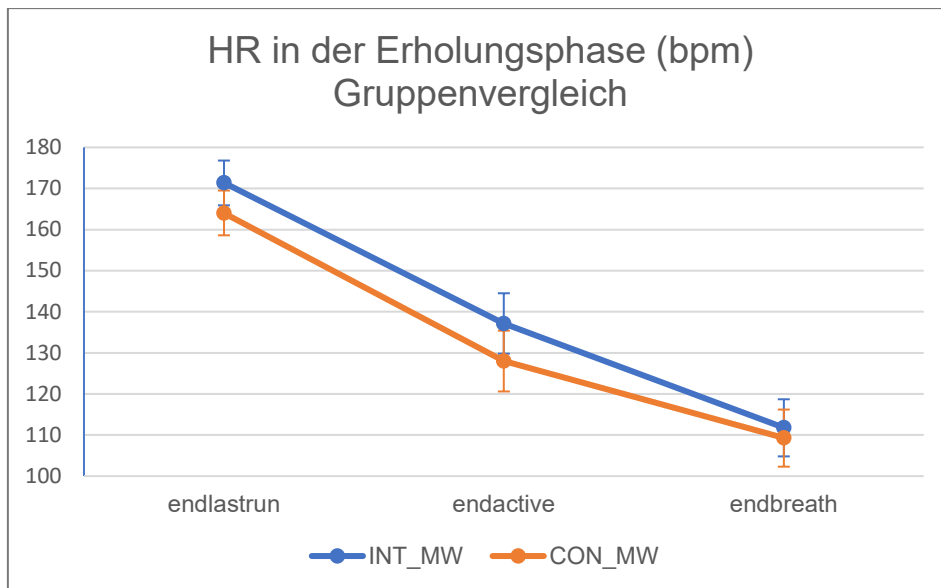


Abbildung 5: HR in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI für Interventions- und Kontrollgruppe

HR			
Zeitpunkt	Gruppe	Mittelwert (bpm)	95% CI
endlastrun	INT	171,4	[165,9; 176,8]
	CON	164,0	[158,6; 169,5]
endactive	INT	137,1	[129,8; 144,5]
	CON	128,0	[120,6; 135,4]
endbreath	INT	111,8	[104,8; 118,7]
	CON	109,3	[102,3; 116,3]

Tabelle 5: HR in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI für Interventions- und Kontrollgruppe

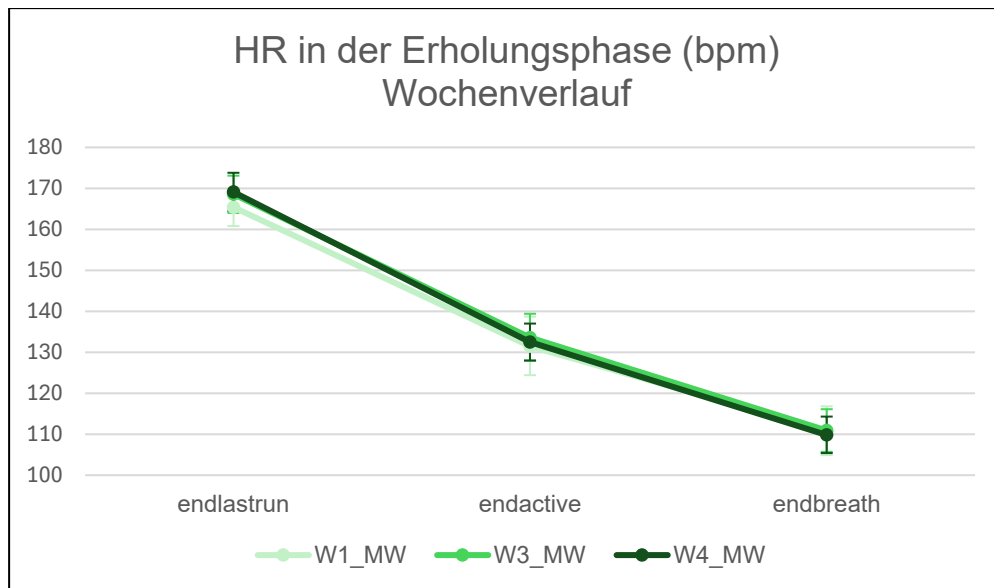


Abbildung 6: HR in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen

HR			
Zeitpunkt	Woche	Mittelwert (bpm)	95% CI
endlastrun	W1	165,4	[160,8; 170,0]
	W3	168,6	[164,0; 173,1]
	W4	169,1	[164,5; 173,8]
endactive	W1	131,5	[124,4; 138,7]
	W3	133,6	[127,9; 139,4]
	W4	132,5	[128,0; 137,0]
endbreath	W1	110,8	[104,9; 116,8]
	W3	110,9	[105,7; 116,1]
	W4	109,8	[105,4; 114,3]

Tabelle 6: HR in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen

3.2.2 Veränderung der HRV

3.2.2.1 RMSSD endbreath (Ln)

Die Analyse von RMSSD zeigte das Ende des Cooldowns bei den Testtagen über die vier Wochen.

Die Normalverteilung nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots konnte erst nach dem Entfernen von Ausreißern nicht mehr verletzt werden. Es wurden aus den Daten nach Berechnung der IQR in W4 drei Ausreißer entfernt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Die RMSSD hatte sich zum Zeitpunkt von endbreath über die Zeit nicht signifikant verändert ($F(2; 36) = 0,227$; $p = 0,798$; $\eta_p^2 = 0,012$).

Die Veränderung der RMSSD über die Zeit in beiden Gruppen hatte sich nicht signifikant unterschiedlich entwickelt ($F(2; 36) = 2,593$; $p = 0,089$; $\eta_p^2 = 0,126$).

Der Gruppenunterschied in den durchschnittlichen RMSSD-Werten über alle Zeitpunkte war jedoch signifikant ($F(1; 18) = 5,044$; $p = 0,040$; $\eta_p^2 = 0,252$).

In Abbildung 7, 8 und 13 wird der Verlauf über die Wochen von Interventions- und Kontrollgruppe dargestellt, alle Messzeitpunkte und Gruppen werden in Tabelle 7 und 8 beschrieben.

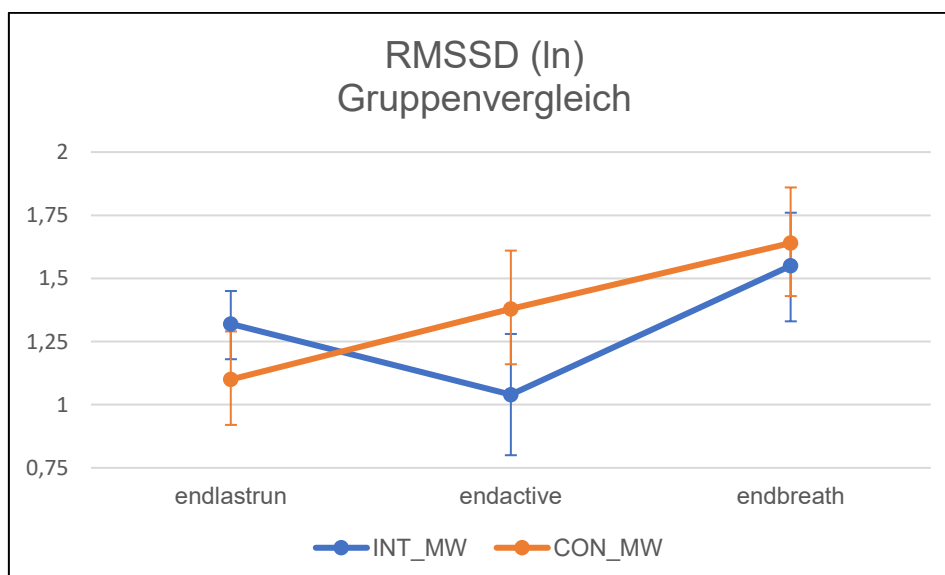


Abbildung 7: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe transformiert mittels natürlichen Logarithmus

RMSSD					
		Ln-tranformiert		Rohwerte	
Zeitpunkt	Gruppe	Ln Mittelwert (ms)	95% CI	Mittelwert (ms)	95% CI
endlastrun	INT	1,32	[1,18; 1,45]	3,74	[3,24; 4,28]
	CON	1,10	[0,92; 1,29]	3,00	[2,50; 3,63]
endactive	INT	1,04	[0,80; 1,28]	2,83	[2,23; 3,59]
	CON	1,38	[1,16; 1,61]	3,97	[3,19; 4,99]
endbreath	INT	1,55	[1,33; 1,76]	4,71	[3,78; 5,81]
	CON	1,64	[1,43; 1,86]	5,16	[4,18; 6,42]

Tabelle 7: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus

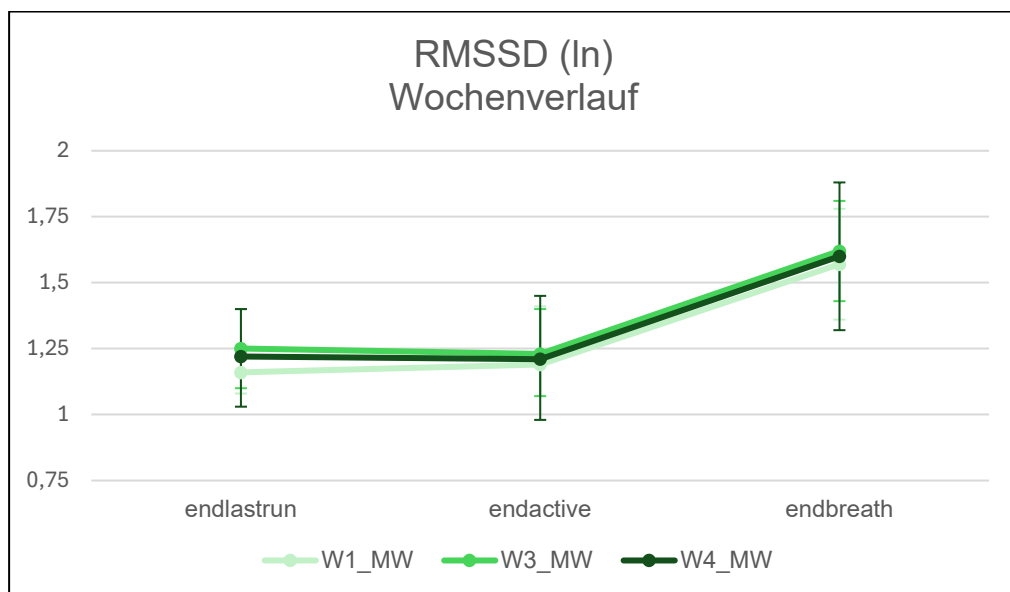


Abbildung 8: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen transformiert mittels natürlichen Logarithmus

RMSSD					
		Ln-transformiert		Rohwerte	
Zeitpunkt	Woche	Ln Mittelwert (ms)	95% CI	Mittelwert (ms)	95% CI
endlastrun	W1	1,16	[1,08; 1,24]	3,19	[2,94; 3,46]
	W3	1,25	[1,10; 1,40]	3,49	[3,00; 4,06]
	W4	1,22	[1,03; 1,40]	3,39	[2,80; 4,06]
endactive	W1	1,19	[0,98; 1,41]	3,29	[2,66; 4,10]
	W3	1,23	[1,07; 1,40]	3,42	[2,92; 4,06]
	W4	1,21	[0,98; 1,45]	3,35	[2,66; 4,26]
endbreath	W1	1,57	[1,36; 1,78]	4,81	[3,90; 5,93]
	W3	1,62	[1,43; 1,81]	5,05	[4,18; 6,11]
	W4	1,60	[1,32; 1,88]	4,95	[3,74; 6,55]

Tabelle 8: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus

3.2.2.2 HF endbreath (Ln)

Die Analyse von HF zeigte auch das Ende des Cooldowns der Testtage über die vier Wochen.

Die Normalverteilung nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots konnte erst nach dem Entfernen von Ausreißern nicht mehr verletzt werden. Es wurden aus den Daten nach Berechnung der IQR in W1 zwei Ausreißer und in W3 ein Ausreißer entfernt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Es wurde keine statistisch signifikante Veränderung der HF Power zum Zeitpunkt endbreath über die Zeit gefunden ($F(2; 34) = 2,783$; $p = 0,076$; $\eta_p^2 = 0,141$).

Auch die Interaktion zwischen Zeit und Gruppe war nicht signifikant, ($F(2; 34) = 0,824$; $p = 0,447$; $\eta_p^2 = 0,046$). Der Vergleich der beiden Gruppen über alle Zeitpunkte hinweg zeigte ebenfalls keinen signifikanten Unterschied, ($F(1; 17) = 1,340$; $p = 0,263$; $\eta_p^2 = 0,073$). In Abbildung 13 ist der ähnliche Verlauf über die Wochen erkennbar.

Alle Messzeitpunkte und Gruppen werden in Tabelle 10 und 11 sowie in Abbildung 9 und 10 dargestellt.

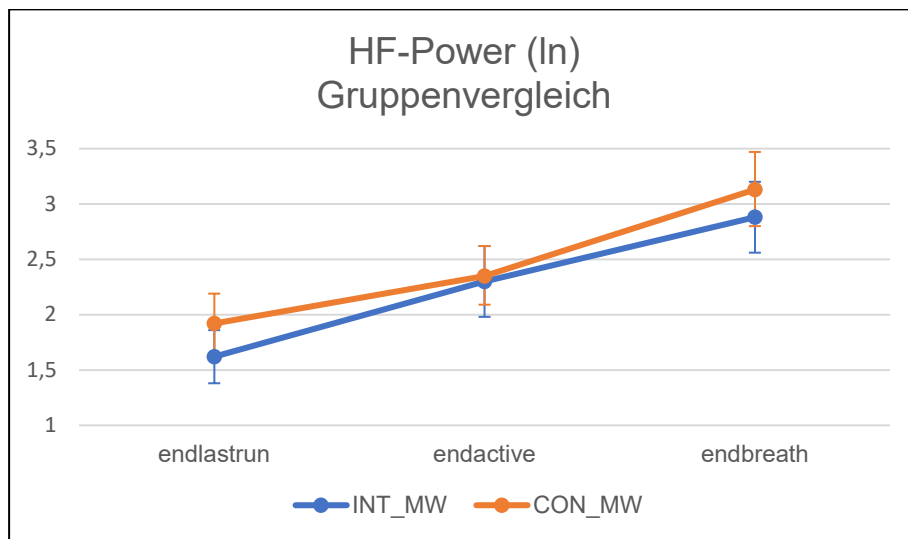


Abbildung 9: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe transformiert mittels natürlichen Logarithmus

HF-Power					
		Ln-transformiert		Rohwerte	
Zeitpunkt	Gruppe	Ln Mittelwert (ms ²)	95% CI	Mittelwert (ms ²)	95% CI
endlastrun	INT	1,62	[1,38; 1,86]	5,05	[3,97; 6,42]
	CON	1,92	[1,64; 2,19]	6,82	[5,16; 8,94]
endactive	INT	2,30	[1,98; 2,62]	9,97	[7,24; 13,74]
	CON	2,35	[2,09; 2,62]	10,49	[8,08; 13,74]
endbreath	INT	2,88	[2,56; 3,20]	17,81	[12,94; 24,53]
	CON	3,13	[2,80; 3,47]	22,87	[16,44; 32,14]

Tabelle 9: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus

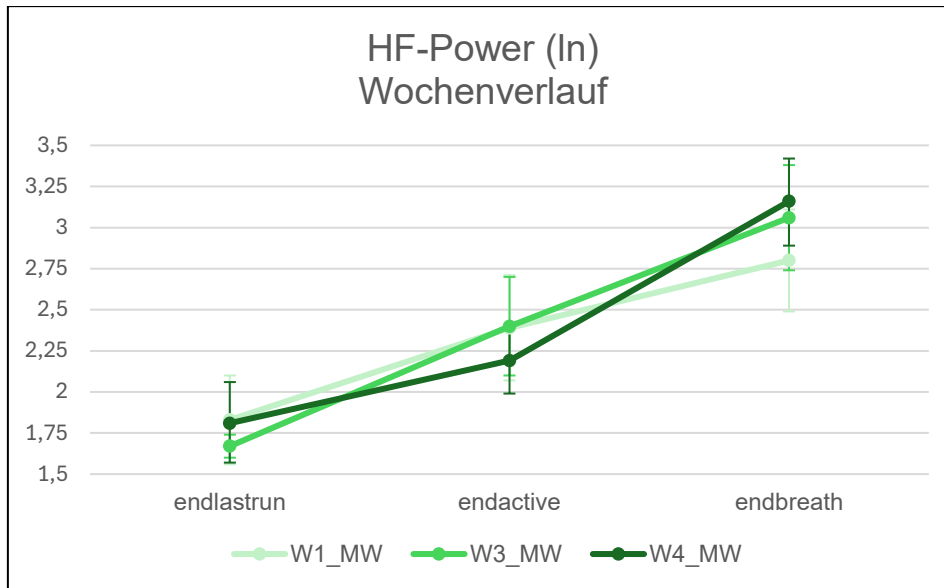


Abbildung 10: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen transformiert mittels natürlichen Logarithmus

HF-Power					
		Ln-transformiert		Rohwerte	
Zeitpunkt	Woche	Ln Mittelwert (ms ²)	95% CI	Mittelwert (ms ²)	95% CI
endlastrun	W1	1,83	[1,56; 2,10]	6,23	[4,76; 8,17]
	W3	1,67	[1,60; 1,74]	5,31	[5,95; 5,70]
	W4	1,81	[1,57; 2,06]	6,11	[4,81; 7,85]
endactive	W1	2,39	[2,07; 2,71]	10,91	[7,92; 15,03]
	W3	2,40	[2,10; 2,70]	11,02	[8,17; 14,88]
	W4	2,19	[1,99; 2,39]	8,94	[7,32; 10,91]
endbreath	W1	2,80	[2,49; 3,11]	16,44	[12,06; 22,42]
	W3	3,06	[2,74; 3,38]	21,33	[15,49; 29,37]
	W4	3,16	[2,89; 3,42]	23,57	[17,99; 30,57]

Tabelle 10: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus

3.2.2.3 LF endbreath (Ln)

Die Analyse von LF zeigte das Ende des Cooldowns der Testtage über die vier Wochen.

Die Normalverteilung nach Shapiro Wilk und Q-Q Plots konnte erst nach dem Entfernen von Ausreißern nicht mehr verletzt werden. Es wurden aus den Daten nach Berechnung der IQR in W1 zwei Ausreißer und in W3 ein Ausreißer entfernt. Die Homogenität der Varianzen wurde nach dem Levene Test nicht verworfen. Die Sphärizität konnte nach dem Mauchly Test angenommen werden.

Die LF zeigte zum Zeitpunkt endbreath signifikante Unterschiede über die Messungen der Wochen ($F(2; 36) = 8,878$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,330$).

Einen signifikanten Unterschied zeigte der Vergleich zwischen den Messzeitpunkten bei zwei Zeitpunkten. Zwischen Zeitpunkt W1 und W3, die Mittelwertdifferenz beträgt 1,26 (95 % CI [0,30; 2,23]). Der Wert bei W3 war signifikant höher als bei W1. Sowie zwischen Zeitpunkt W1 und W4, die Mittelwertdifferenz beträgt 1,14 (95% CI [0,44; 1,84]). Auch hier war der Wert bei W4 signifikant höher als bei W1. Die gemessenen Werte veränderten sich über die Zeit hinweg deutlich, siehe Tabelle 12 sowie Abbildung 12 und 13.

Zwischen Zeitpunkt W3 und W4 wurde jedoch kein signifikanter Unterschied festgestellt.

Die Veränderung der LF über die Zeit verlief in beiden Gruppen ähnlich ($F(2; 36) = 2,807$; $p = 0,073$; $\eta_p^2 = 0,135$).

Der Unterschied zwischen den Gruppen über alle Zeitpunkte hinweg war ebenfalls nicht signifikant ($F(1; 18) = 0,698$; $p = 0,414$; $\eta_p^2 = 0,037$).

LF-Power				
Zeitpunkt	p	Mittelwertdifferenz	95% CI	Unterschied
W1 und W3	0,009	1,26	[0,30; 2,23]	signifikant, W1 < W3
W1 und W4	0,001	1,14	[0,44; 1,84]	signifikant, W1 < W4
W3 und W4	>0,999	0,12	[-0,80; 1,05]	nicht signifikant

Tabelle 11: LF zum Zeitpunkt endbreath: Kontraste

Alle Messzeitpunkte und Gruppen werden in Tabelle 13 und 14 sowie Abbildung 11 und 12 dargestellt.

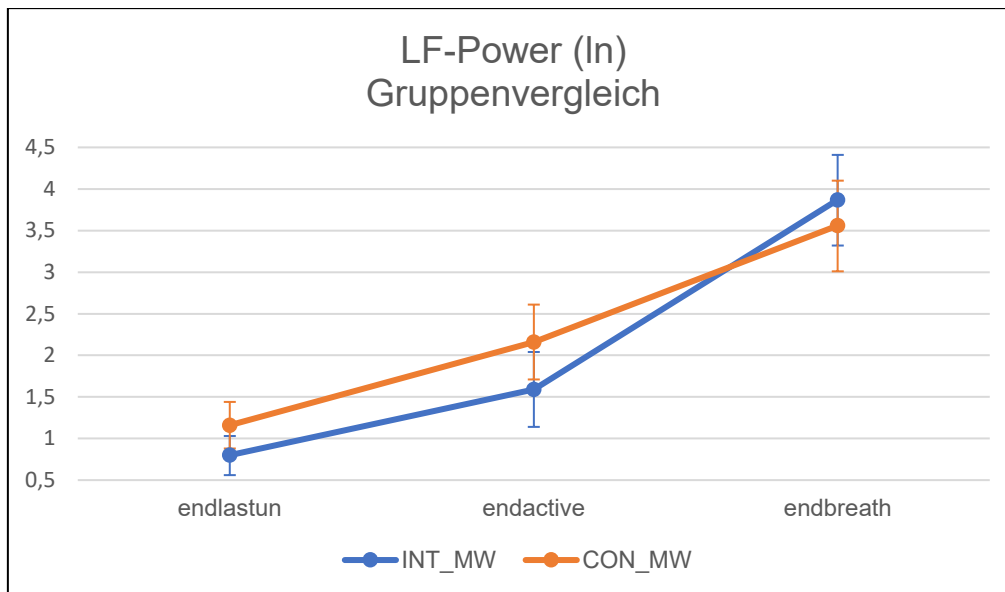


Abbildung 11: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe transformiert mittels natürlichen Logarithmus

LF-Power					
		Ln-transformiert		Rohwerte	
Zeitpunkt	Gruppe	Ln Mittelwert (ms ²)	95% CI	Mittelwert (ms ²)	95% CI
endlastun	INT	0,80	[0,56; 1,03]	2,23	[1,75; 2,80]
	CON	1,16	[0,88; 1,44]	3,19	[2,41; 4,22]
endactive	INT	1,59	[1,14; 2,04]	4,90	[3,13; 7,69]
	CON	2,16	[1,71; 2,61]	8,67	[5,53; 13,60]
endbreath	INT	3,87	[3,32; 4,41]	47,94	[27,66; 82,27]
	CON	3,56	[3,01; 4,10]	35,16	[20,29; 60,34]

Tabelle 12: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus

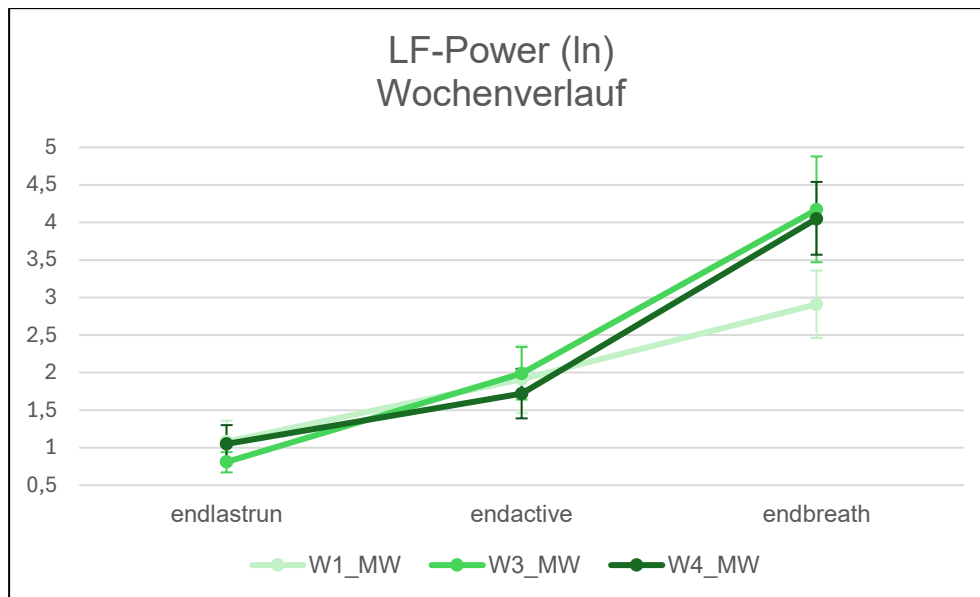


Abbildung 12: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI über die Wochen transformiert mittels natürlichen Logarithmus

LF-Power					
		Ln-transformiert		Rohwerte	
Zeitpunkt	Woche	Ln Mittelwert (ms ²)	95% CI	Mittelwert (ms ²)	95% CI
endlastrun	W1	1,08	[0,80; 1,36]	2,94	[2,23; 3,90]
	W3	0,81	[0,67; 0,94]	2,25	[1,95; 2,56]
	W4	1,05	[0,79; 1,30]	2,86	[2,20; 3,67]
endactive	W1	1,91	[1,46; 2,36]	6,75	[4,31; 10,59]
	W3	1,99	[1,64; 2,34]	7,32	[5,16; 10,38]
	W4	1,72	[1,39; 2,05]	5,58	[4,01; 7,77]
endbreath	W1	2,91	[2,46; 3,36]	18,36	[11,70; 28,79]
	W3	4,17	[3,47; 4,88]	64,72	[32,14; 131,63]
	W4	4,05	[3,57; 4,54]	57,40	[35,52; 93,69]

Tabelle 13: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI über die Wochen als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus

In Abbildung 13 wurden die Ergebnisse der Erholungsphase von RMSSD, HF-Power, LF-Power und HR zum Zeitpunkt endbreath dargestellt und zeigten den Vergleich zwischen Interventions- und Kontrollgruppe über die Wochen.

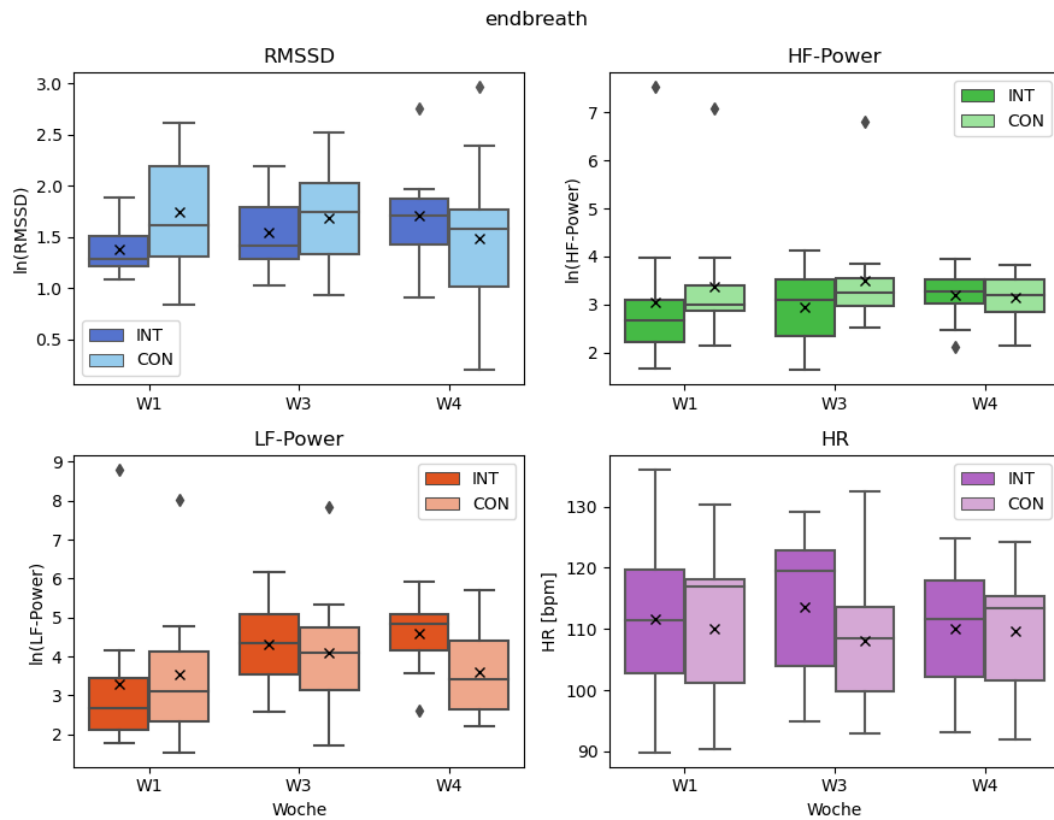


Abbildung 13: Ergebnisse endbreath: RMSSD, HF-Power, LF-Power und HR: Vergleich zwischen Interventions- und Kontrollgruppe über die Wochen

	HR						RMSSD					
	endlastrun		endactive		endbreath		endlastrun		endactive		endbreath	
	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2
Zeit	0,155	0,089	0,673	0,020	0,703	0,017	0,469	0,061	0,926	0,005	0,798	0,012
Zeit x Gruppe	0,225	0,072	0,126	0,098	0,167	0,086	0,910	0,007	0,484	0,033	0,097	0,126
Gruppe	0,062	0,163	0,082	0,144	0,612	0,013	0,072	0,245	0,389	0,041	0,040	0,252

Tabelle 14: HRV Ergebnisse (HR, RMSSD) Signifikanzen und Eta-quadrat zusammengefasst (1)

	HF-Power						LF-Power					
	endlastrun		endactive		endbreath		endlastrun		endactive		endbreath	
	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2	p	η_p^2
Zeit	0,186	0,113	0,305	0,076	0,076	0,141	0,057	0,174	0,287	0,067	0,001	0,330
Zeit x Gruppe	0,081	0,165	0,008	0,280	0,447	0,046	0,498	0,045	0,058	0,185	0,073	0,135
Gruppe	0,105	0,177	0,795	0,005	0,263	0,073	0,049	0,234	0,075	0,165	0,414	0,037

Tabelle 15: HRV Ergebnisse (HF, LF) Signifikanzen und Eta-quadrat zusammengefasst (2)

4. Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es ein hochintensives Sprintintervalltraining über einen vierwöchigen Trainingsplan durchzuführen. Dabei wurden die Proband*innen in Kontroll- und Interventionsgruppe geteilt. Die Interventionsgruppe führte ein zusätzliches, individualisiertes Atemtraining (Slow-Paced Breathing) täglich und am Ende des Trainings durch. Die Analyse sollte feststellen, ob diese Atemintervention einen Einfluss nimmt auf die Erholung nach dem Training und im Verlauf der vier Wochen. Für die Untersuchung wurden die Parameter HR und HRV (RMSSD, HF-Power und LF-Power) herangezogen.

SPB unterstützt durch die verlängerte Ausatmung die Aktivierung des parasympathischen Nervensystems. Das zeigt sich in der Steigerung der HRV sowie einer generellen Stressreduktion was unter anderem von Jerath et al. (2006) vorweisen. Der zentrale physiologische Mechanismus beruht auf der Stimulation des N. vagus, welcher über die verlängerte Ausatmung aktiviert wird und so vagale Effekte verstärkt.

Weiters wird die respiratorische Sinusarrhythmie (RSA) verstärkt, also das Ansteigen und Abfallen der Herzfrequenz im Zuge von Ein- bzw. Ausatmung (Shaffer und Meehan, 2020). Die Baroreflexfunktion verbessert sich, indem die Atemfrequenz mit der intrinsischen Frequenz des Baroreflexes synchronisiert wird (Lehrer und Gevirtz, 2014).

In vielen Studien konnte SPB wiederholt als effektive Methode zur kurzfristigen Verbesserung der autonomen Regulation nachgewiesen werden.

Auch die Arbeit von You et al. (2024) mit 75 Athlet*innen bestätigte, dass bereits fünf Minuten SPB mit Atemraten zwischen 5 und 7 Atemzügen pro Minute eine signifikant erhöhte vagale Aktivität erzeugen im Vergleich zur spontanen Atmung.

In dieser Arbeit wurde durch die individualisierten Atemintervention (SPB) eine Verbesserung der HR und HRV-Parametern nach der intensiven körperlichen Belastung erwartet. Im Vergleich zur Kontrollgruppe sollten die HRV-Parameter am Ende der Erholungsphase signifikant höher sein. Ebenso sollten Veränderungen in der HR erkennbar sein, diese sollte signifikant niedriger sein.

Trotz des bekannten Einflusses des Atemtrainings auf das ANS, konnten insgesamt nur wenige Unterschiede festgestellt werden. Die wenigen signifikanten Unterschiede erscheinen eher zufällig und lassen kein durchgehendes Muster im Sinne der Hypothesen erkennen.

4.1 Veränderungen während der Sprints in HR

Die Studie zeigt, dass die Atemintervention keinen Einfluss auf die HR während der Belastung hatte. HR_{min} hat sich über die Zeit der vier Wochen beim ersten Sprint signifikant verringert, siehe Tabelle 1. Es gab aber keine Unterschiede zwischen Interventions- und Kontrollgruppe.

4.2 Veränderungen in der Erholungsphase

Die Analyse stützt sich auf den Messzeitpunkt endbreath (Ende des Cooldown), da der Einfluss des Atemtrainings zu diesem Zeitpunkt erwartet wurde.

RMSSD zeigte als einziger Parameter einen signifikanten Unterschied zwischen Interventions- und Kontrollgruppe. Die Interventionsgruppe wies allerdings niedrigere Werte als die Kontrollgruppe auf, siehe Tabelle 7.

Die LF-Power zeigte zum Zeitpunkt endbreath signifikante Unterschiede über die Messungen der Wochen. LF-Power zeigt signifikant höhere Werte in den letzten beiden Testtagen (W3 und W4) als zu Beginn (W1), siehe Tabelle 14. Allerdings ergab sich kein Unterschied zwischen Interventions- und Kontrollgruppe. Daher konnte davon ausgegangen werden, dass der signifikante Unterschied über die Zeit nicht auf das Atemtraining zurückgeführt werden konnte.

Keine der drei Hypothesen konnten in vollem Umfang bestätigt werden. Hypothese 1, die eine Verbesserung der HRV-Parameter RMSSD, HF und LF in der Interventionsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe erwartete, konnte nur teilweise gestützt werden. Lediglich der Parameter RMSSD zeigte eine signifikante Veränderung, während HF und LF keine signifikanten Verbesserungen aufwiesen. Hypothese 2, die von einem verbesserten Verlauf der HRV-Anfangswerte im Laufe der Trainingswochen in der Interventionsgruppe ausging, wurde nicht bestätigt. Ebenso konnte Hypothese 3, die von einer Abnahme der Herzfrequenz während der Belastungs- und Erholungsphasen ausging, wurde nicht gestützt. Somit mussten alle drei Hypothesen verworfen werden.

4.3 Vergleich mit bestehender Literatur

SPB könnte in verschiedenen Studien bereits signifikante Ergebnisse zeigen.

Der systematische Review von Laborde et al. (2022b) untersuchte insgesamt 223 Studien. Wobei 172 Studien HRV-Werte während der Atmung, 16 Studien unmittelbar nach der Atmung und 49 Studien nach längerer Zeit nach der Atmung erfassten. Der Fokus lag auf HRV-Parametern, insbesondere RMSSD und LF-Power.

Die Ergebnisse zeigen, dass langsames Atmen eine signifikante Zunahme der HRV bewirkt, insbesondere während der Durchführung der Atemtechnik. In diesen Zeitraum wurde für RMSSD eine mittlere durchschnittliche Effektgröße berichtet, und für LF-Power sogar eine große Effektgröße, was für eine starke vagale Aktivierung steht.

Direkt im Anschluss an die Atemübung zeigte sich eine geringe Zunahme von RMSSD. Für den längerfristigen Zeitraum nach der Intervention wurde ein kleiner bis moderater Effekt für RMSSD aufgezeigt. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass SPB eine parasympathische Aktivierung bewirkt, deren Effekte auch nach der Intervention anhalten könnten.

Trotz der positiven Befunde weist die Analyse auf mehrere methodische Schwächen der einbezogenen Studien hin. Ein hohes Risiko für Bias wurde in 215 der eingeschlossenen Studien festgestellt, was vor allem an unvollständiger Berichterstattung, fehlender Randomisierung oder unklarer Methodik lag. Nur eine Studie wurde mit geringem Bias eingestuft. Für künftige Forschung empfehlen die Autor*innen daher eine systematischere Methodik, präzise Berichterstattung und klar definierte Studiendesigns, um die Effekte von SPB auf die autonome Regulation zuverlässiger belegen zu können.

In einer Studie von Perez-Gaido et al. (2021) wurde mit 15 körperlich aktiven Universitätsstudierenden im Alter von 23 bis 35 Jahren submaximale aerobe Belastungstests durchgeführt.

In der ersten Session führten sie zweimal einen submaximalen aeroben Belastungstest am Laufband durch, jeweils mit freier Atmung während der anschließenden Erholung. Vor und nach den Tests wurden HRV-Werte im Sitzen gemessen. Die Belastung bestand aus einem kontinuierlich ansteigenden Lauf bis zur Erreichung von 80 % der individuellen HF_{max} . Die Erholungsphase wurde bis zu einem Rückgang von 50% der HF_{max} definiert.

In der zweiten und dritten Session wurde die individuelle Resonanzfrequenz mittels einer modifizierten Version des Protokolls von Lehrer ermittelt. Die Teilnehmenden atmeten bei

fünf unterschiedlichen Frequenzen (zwischen 5 und 7 Atemzügen pro Minute), um diejenige mit der größten RSA-Amplitude zu bestimmen. Danach folgte ein 10-minütiges Atemtraining bei ihrer Frequenz.

In der vierten Session wurde das gleiche Belastungsprotokoll wie zu Beginn durchgeführt. Der Unterschied bestand darin, dass in den Erholungsphasen eine HRV-Biofeedback-Atmung angewandt wurde. Dabei atmeten die Teilnehmenden zunächst 30 Sekunden lang mit der doppelten Frequenz der Resonanzfrequenz zur besseren Anpassung, anschließend 90 Sekunden bei ihrer Resonanzfrequenz, unterstützt durch visuelle und auditive Signale.

Die Ergebnisse zeigen, dass HR_{mean} sowohl in der Erholungsphase als auch während der Belastungsphase in der SPB signifikant niedriger war im Vergleich zur spontanen Atmung. Auch die Erholungszeit war mit SPB im zweiten Durchgang signifikant kürzer als in der freien Atmung. Besonders deutlich waren die Unterschiede in den Parametern der HRV. Während der Erholung unter SPB wurden höhere Werte in RR_{mean} , SDNN und RMSSD gemessen. Diese Werte waren auch während der Belastungsphasen in der SPB signifikant erhöht im Vergleich zur freien Atmung. Zudem zeigte die Analyse im Frequenzbereich, dass der LF-Power unter SPB während Erholung und Belastung signifikant höher war.

Eine Studie von Choudhary et al. (2016) untersuchte die Auswirkungen eines zehnwöchigen HRV-Biofeedback-Trainings auf die Leistungsfähigkeit von Langstreckenläufern. Insgesamt nahmen 24 Athlet*innen teil, die in eine Experimentalgruppe und eine Kontrollgruppe aufgeteilt wurden. Die Experimentalgruppe absolvierte zusätzlich zum regulären Training ein HRV-Biofeedback-Trainings. Die Kontrollgruppe setzte ausschließlich ihr gewohntes Training fort. Das HRV-Biofeedback-Training umfasste zehn wöchentliche Sitzungen zu je 30–40 Minuten. Zu Beginn wurde die individuelle Resonanzfrequenz mithilfe der HRV bei unterschiedlichen Atemfrequenzen ermittelt. In den folgenden neun Sitzungen führte die Teilnehmer*innen das Biofeedback-Training mit langsamer Atmung bei der individuellen Resonanzfrequenz durch. Zusätzlich wurde zweimal täglich zu Hause für je 20 Minuten bei dieser Frequenz trainiert.

Die Ergebnisse zeigten signifikante Verbesserungen in der Experimentalgruppe. Der LF/HF-Index der HRV stieg in der Experimentalgruppe signifikant an, während dieser in der Kontrollgruppe konstant blieb. Ebenso war eine signifikante Leistungsverbesserung zu erkennen. Die Experimentalgruppe zeigte signifikante Verbesserungen in der durchschnittlichen Laufzeit und in den VO_2max -Werten. Die Ergebnisse belegen insgesamt die Wirksamkeit von HRV-Biofeedback-Training zur Leistungssteigerung bei Ausdauersportlern.

Die Studien verdeutlichen, dass SPB eine wirkungsvolle Methode darstellt, um die HRV in Ruhe und auch nach Ausdauerbelastungen gezielt zu steigern. Dadurch kann SPB zur Verbesserung der autonomen Regulation beitragen. Insbesondere im Kontext aerober Belastung unterstützt SPB zudem eine schnellere Senkung der HF, was als Indikator für eine verbesserte kardiovaskuläre Erholung gewertet werden kann. Insgesamt unterstreichen diese Studien das Potenzial von SPB als einfach umsetzbare und physiologisch wirksame Regenerationsmaßnahme.

Bei einer Studie von Laborde et al. (2019a) nahmen insgesamt 120 sportlich aktive Personen teil, die auf zwei Experimente aufgeteilt wurden. Beide Experimente waren methodisch identisch aufgebaut und unterschieden sich lediglich in der zeitlichen Platzierung der Entspannungsphase: In Experiment 1 erfolgte die Entspannung vor der sportlichen Belastung, in Experiment 2 danach. Als körperliche Belastung diente eine standardisierte fünfminütige Burpee-Einheit. In der anschließenden Entspannungsphase wurde die Stichprobe jeweils zufällig einer von zwei Bedingungen zugeteilt: Entweder führten die Teilnehmenden ein SPB durch oder sie sahen zur passiven Erholung eine neutrale TV-Dokumentation.

Das SPB-Protokoll bestand aus drei Einheiten zu jeweils fünf Minuten mit jeweils einer Minute Pause dazwischen (Gesamtdauer: 17 Minuten). Die Atemfrequenz war auf sechs Atemzüge pro Minute vorgegeben, wobei die Einatmung 5,5 Sekunden und die Ausatmung 4,5 Sekunden dauerte. In beiden Gruppen wurde die HRV, jeweils fünf Minuten vor und nach der körperlichen Belastung im Sitzen erfasst.

Die Ergebnisse zeigten, dass in der SPB-Bedingung der RMSSD-Wert in der Ruhephase vor dem Stroop-Test signifikant höher war als in der Kontrollbedingung. Dies weist auf eine gesteigerte parasympathische Aktivität und somit auf eine verbesserte autonome Regulation durch SPB hin.

Eine Studie von Brown (2020) zeigte allerdings auch, dass bei anaerober Belastung SPB keine Effekte erzielt und somit die Erholung nicht beeinflussen kann.

Zwanzig männliche Radsportler führten über sechs Wochen ein Deep Slow Breathing Programm durch, indem die Ausatmung sowie die Atempausen nach der Ausatmung verlängert wurden. Die Teilnehmer wurden in Trainingsgruppe und Kontrollgruppe geteilt. Jeweils einmal vor und einmal nach dem sechswöchigen Zeitraum führten alle drei wiederholte 30-sekündige Wingate Anaerobic Tests mit jeweils drei Minuten passiver Erholung zwischen den Intervallen durch. Während der beiden Tests wurde die

durchschnittliche Leistung aufgezeichnet, direkt nach der Belastung wurden VCO_2 und HRR gemessen.

Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen bei den gemessenen Variablen festgestellt werden. Beide Gruppen zeigten jedoch eine gesteigerte durchschnittliche Leistung beim zweiten Wingate-Test.

Daher lässt sich festhalten, dass SPB in Abhängigkeit von der Art der körperlichen Belastung unterschiedlich wirksam ist.

4.4 Mögliche Erklärungen für ausbleibende Effekte

Die in dieser Studie beobachteten fehlenden signifikanten Effekte der SPB-Intervention auf die HRV und die HR werfen die Frage nach möglichen Einflussfaktoren auf, die die Wirksamkeit von SPB im Kontext intensiver körperlicher Belastung eingeschränkt haben könnten. Eine zentrale Rolle dürfte dabei die autonome Dominanz nach SIT spielen.

Ein systematischer Review von Chiang et al. (2024) untersuchte die Auswirkungen von körperlicher Belastung auf die HRV und die Aktivität des ANS während und innerhalb einer Stunde nach dem Training. Die Studie zeigt, dass die HRV während körperlicher Belastung signifikant abnimmt, insbesondere bei steigender Intensität. Dies wird hauptsächlich durch einen Rückgang der Aktivität des PNS verursacht, während die sympathische Aktivität zunimmt. Nach dem Training erholt sich die HRV allmählich, wobei die Geschwindigkeit der Erholung von der Trainingsintensität abhängt. Höhere Intensitäten führen zu einer langsameren Rückkehr der HRV zu den Ausgangswerten, was auf eine anhaltende sympathische Aktivierung und verzögerte parasympathische Reaktivierung hinweist.

Im hochintensiven Sprintintervalltraining geht die intensive Belastung mit einer starken Aktivierung des SNS einher, während gleichzeitig die parasympathische Aktivität deutlich zurückgeht. Diese sympathovagale Verschiebung ist besonders in der frühen Erholungsphase nach Belastung deutlich ausgeprägt. Es ist denkbar, dass die anhaltend hohe SNS-Aktivität unmittelbar nach dem SIT die Wirkung parasympathischer Interventionen wie SPB physiologisch limitiert.

Auch die Studie von Buchheit et al. (2007) untersuchte die parasympathische Reaktivierung nach unterschiedlichen Trainingsbelastungen und zeigte deutlich, dass diese maßgeblich von der Art der Belastung beeinflusst wird. Dabei absolvierten fünfzehn moderat trainierte Athlet*innen drei unterschiedliche Belastungsprotokolle. Zunächst wurde die maximale

aerobe Leistungsfähigkeit der Teilnehmenden mit dem 30–15 Intermittent Fitness Test ermittelt. Somit wurde die individuelle Laufgeschwindigkeit bestimmt. Im Anschluss durchliefen die Teilnehmenden die drei verschiedene Belastungsprotokolle.

Zuerst Repeated Sprints die aus 18 wiederholten 15-Meter-Sprints mit 17 Sekunden passiver Pause bestanden, über eine Gesamtdauer von 6 Minuten. Diese Belastung beinhaltete hohe muskuläre und anaerobe Beanspruchung. Weiters ein moderates Ausdauertraining bei einer kontinuierlichen Belastung von 65 % der individuellen Laufgeschwindigkeit, mit einer Dauer von etwa 6–8 Minuten, sodass der Energieverbrauch dem des Repeated Sprint-Protokolls entsprach. Ziel war es, einen aeroben Vergleichswert mit gleichem Energieverbrauch herzustellen. Zuletzt ein hochintensives Intervalltraining, dass aus einer 12-minütigen Einheit mit 30 Sekunden Laufen bei 90 % der individuellen Laufgeschwindigkeit, abwechselnd mit 30 Sekunden passiver Pause. Die Belastung war darauf ausgelegt, den anaeroben Energieanteil des Repeated Sprint-Protokolls zu spiegeln. Nach jedem Belastungsprotokoll wurde die HF und HRV 10 Minuten im Sitzen aufgezeichnet.

Nach der moderaten Belastung stieg RMSSD während der 10-minütigen Erholungsphase kontinuierlich an. Dagegen blieb RMSSD nach den Repeated Sprints und dem hochintensiven Intervalltraining deutlich vermindert. Der Unterschied zum moderaten Ausdauertraining war signifikant. Nur der anaerobe Energieanteil korrelierte mit der reduzierten parasympathischen Reaktivierung.

Ein weiterer kritischer Punkt ist die eingeschränkte Wirksamkeit von SPB unter Bedingungen intensiver Erschöpfung. Während in Ruhebedingungen oder bei moderater Belastung klare HRV-Verbesserungen durch SPB dokumentiert sind. Deutet diese Studien darauf hin, dass diese Effekte unter starker körperlicher Ermüdung ausbleiben. Dies könnte auf eine verminderte Fähigkeit der korrekten Durchführung der Atemübungen zurückzuführen sein. Die Atemfrequenz und -tiefe präzise zu regulieren, wenn gleichzeitig Erschöpfung, hohe Atemnot und kardiovaskuläre Belastung vorliegen, kann sehr herausfordern sein.

Eng damit verbunden ist die Frage nach der Qualität der Atemtechnik. Die Durchführung von SPB erfordert eine bewusste, gleichmäßige Atemkontrolle. Unter starker körperlicher Belastung ist jedoch zu vermuten, dass die Präzision der Ausführung leidet. Sei es durch muskuläre Ermüdung, mangelnde Konzentration oder psychophysiologische Stressfaktoren. In dieser Studie wurden keine objektiven Kontrollmechanismen zur Qualität der Atemtechnik erhoben, was eine potenzielle Einflussgröße darstellt.

Ein weiterer Erklärungsansatz betrifft die Sensitivität der eingesetzten HRV-Parameter sowie die Wahl der Messzeitpunkte. Beispielsweise Quintana und Heathers (2014) betonen, dass kurzfristige HRV-Messungen anfällig für situative Schwankungen und wenig sensitiv gegenüber langsamen Anpassungsprozessen sind. Insbesondere während oder direkt nach dem Training ist die HRV stark durch die akute Erregungslage beeinflusst, wodurch kleinere regenerative Effekte möglicherweise maskiert werden. Es ist denkbar, dass eine Erhebung zu einem späteren Zeitpunkt sensiblere Ergebnisse geliefert hätte.

Zudem sollten interindividuelle Unterschiede beachtet werden. Studien konnten zeigen, dass nicht alle Personen gleichermaßen von Interventionen profitieren. Während sogenannte Responder unter standardisierten Bedingungen deutliche Steigerungen zeigen, bleiben solche Effekte bei Non-Respondern weitgehend aus, trotz korrekter Durchführung der Intervention (Atkinson et al., 2019). Dieses Phänomen wird in der Forschung zunehmend diskutiert.

Die Dauer der Intervention von lediglich vier Wochen sowie der tägliche Umfang waren möglicherweise zu kurz bemessen, um nachhaltige Veränderungen der autonomen Regulation hervorzurufen. Beispielsweise Borges et al. (2021) empfehlen für zukünftige Studien einen Zeitraum von vier bis acht Wochen und eine tägliche Übungsdauer von 15 Minuten, um die physiologischen Effekte von SPB adäquat zu erfassen und zu fördern.

4.5 Implikationen für die Praxis

Während sich die Atemtechnik SPB in vielen Studien als effektive Methode zur Erhöhung der HRV gezeigt hat, ist ihre Eignung im hochintensiven Kontext von SIT differenziert zu betrachten. SIT ist durch extrem kurze, maximale Belastungen gekennzeichnet, die typischerweise zu einer stark erhöhten Atemfrequenz und intensiven sympathischen Aktivierung führen. In dieser physiologischen Lage kann es für die Athlet*innen herausfordernd oder sogar kontraintuitiv sein, bewusst eine verlangsamte Atmung mit verlängerten Exhalationsphasen umsetzen zu können. Zudem erfordert SPB kognitive Ressourcen und eine gewisse Ruhe, um die Atemfrequenz gezielt zu regulieren. Ressourcen, die unmittelbar nach maximaler Anstrengung möglicherweise nicht verfügbar sind. Auch ist noch unklar, ob der Nutzen von SPB in Bezug auf vagale Reaktivierung im engen Zeitfenster kurz nach Sprintintervallen überhaupt voll wirksam werden kann. Zusätzliche Faktoren die beeinflussend wirken können sind die passende Integration hinsichtlich Timing, Intensität und individueller Toleranz.

Vor dem Beginn des Atemtrainings könnte also eine verlängerte Ruhephase sinnvoll sein, um zunächst die Atemfrequenz auf ein stabiles Niveau zu senken. Dies würde es den Teilnehmenden erleichtern, die Atemübung entspannt und mit der nötigen Präzision durchzuführen.

In Abgrenzung zu anderen Erholungsformen stand SPB in einer Studie von Pelka et al., (2017) im Vergleich. Hier nahmen 27 sportwissenschaftliche Masterstudierende im Alter von 23 bis 32 Jahren teil. Die Studie untersuchte die Wirkung verschiedener Entspannungsmethoden auf die sportliche Leistungsfähigkeit bei wiederholten Sprintbelastungen. In einem randomisierten, kontrollierten Cross-Over-Design wurden die Teilnehmer*innen wöchentlich, über fünf Wochen hinweg, jeweils einer von fünf Bedingungen zugeordnet: progressive Muskelrelaxation, systematische Atmung, Powernap, Yoga oder einer Kontrollbedingung ohne Intervention.

Die Sprinttests bestanden aus jeweils sechs 4-sekündigen Sprints mit 20 Sekunden Pause. Zwischen zwei Sprinttest am selben Tag erhielten die Teilnehmenden eine 25-minütige Pause, in der die jeweilige Entspannungsmethode durchgeführt wurde.

Die Atemübung folgte dem Prinzip, dass die Ausatmung doppelt so lange wie die Einatmung dauern sollte. Was in Atemrhythmen von 3 Sekunden einatmen und 6 Sekunden ausatmen oder 4 Sekunden einatmen und 8 Sekunden ausatmen umgesetzt wurde. Die eigentliche Atemübung umfasste eine 10-minütige aktive Praxisphase, der eine etwa 10-minütige Einführungsphase zur Ermittlung des individuell passenden Atemrhythmus vorausging.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigten signifikante Interaktionseffekte zwischen den Entspannungsbedingungen und den Sprintleistungen. Besonders auffällig war die Verbesserung nach der Anwendung von SPB. Hier war die durchschnittliche Maximalgeschwindigkeit über alle Sprints signifikant höher als in den Kontrollbedingungen. Die Studie liefert damit einen Hinweis darauf, dass SPB eine wirksame Strategie zur Leistungssteigerung bei intensiven Belastungen darstellen kann.

Allerdings konnten in der Erholung keine signifikanten Unterschiede in der HR festgestellt werden. Weitere Parameter wie HRV wurden nicht erhoben. Es konnte also zur Erholung keine Entspannungsmethode hervorgehoben werden. Allerdings wurde speziell bei SPB keine individuelle Resonanzfrequenz erhoben und keine längerfristige Intervention eingesetzt.

4.6 Limitationen der Studie

Mögliche Ursachen für das Ausbleiben weiterer signifikanter Interventionseffekte könnte auch die geringe Stichprobengröße sein. Sie reduziert die statistische Power der Analysen und schränkt die Aussagekraft der Ergebnisse ein. Darüber hinaus kam es im Verlauf der Datenerhebung zu einem weiteren Verlust an verwertbaren Daten, da aufgrund auffälliger Ausreißer mehrere Messwerte ausgeschlossen werden mussten. Dies führte zu einer zusätzlichen Reduktion der verfügbaren Datengrundlage. Eine weitere Problematik der begrenzten Stichprobengröße ergibt sich aus der Abbruchquote von rund 20 %. Die überwiegend auf krankheitsbedingte Ausfälle zurückzuführen war, insbesondere Infekte. Die Repräsentativität der Ergebnisse wurde dadurch weiter verringert.

Die Analyse der HRV ist generell anfällig für Messungenauigkeiten und unterliegt zahlreichen Einflussfaktoren. Auch in der vorliegenden Studie zeigen sich zahlreiche Ausreißer in den Daten. Schneider et al. (2019) konnten zudem nachweisen, dass bereits die Körperposition während der Messung einen erheblichen Einfluss auf die HRV-Werte haben kann. So wurden signifikant unterschiedliche Ergebnisse erzielt, je nachdem ob die Teilnehmenden im Stehen oder Liegen gemessen wurden. Zwar wurde in der Studie festgelegt, dass die Erholungsphase im Sitzen erfolgen sollte, jedoch bleibt unklar, ob alle Teilnehmenden tatsächlich dieselbe Sitzhaltung eingenommen haben, beispielsweise mit oder ohne hochgelagerte Beine. Solche scheinbar kleinen Unterschiede könnten die Messergebnisse verzerren.

Die Messung der HRV ist generell sehr sensibel gegenüber zahlreichen Einflussfaktoren. Neben Umwelteinflussfaktoren wie Lärm, Licht, Temperatur oder Tageszeit könnten auch psychologische Zustände wie Stress, Müdigkeit oder Schlafqualität sich deutlich auf die HRV auswirken. Insgesamt macht dies deutlich, wie sensibel HRV-Messungen auf äußere Bedingungen reagieren und wie wichtig eine standardisierte Durchführung ist.

Eine weitere Einschränkung kann die Atemintervention an sich darstellen. Nach intensiver körperlicher Belastung gestaltet sich eine bewusste und gezielte Atemkontrolle als herausfordernd, da die natürliche Atemfrequenz zunächst erhöht bleibt und eine willentliche Steuerung erschwert wird. Zusätzlich bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Durchführung der Atemübungen durch die Interventionsgruppe außerhalb der betreuten Trainingseinheiten. Da keine systematische Kontrolle über die Umsetzung zu Hause erfolgte, bleibt unklar, in welchem Umfang und mit welcher Genauigkeit die Übungen eigenständig praktiziert wurden. Diese Faktoren schränken die Aussagekraft der Ergebnisse zusätzlich ein.

4.7 Forschungsperspektiven

Zukünftige Studien könnten auch eine Kombination von SPB mit anderen etablierten Erholungsstrategien in Betracht ziehen. Es ist denkbar, dass synergistische Effekte entstehen, wenn SPB etwa mit aktiver Regeneration, Kälteanwendungen (Poppendieck et al., 2021) oder anderen Maßnahmen kombiniert wird. Solche multimodalen Ansätze könnten die Wirksamkeit erhöhen und eine breitere Zielsetzung ermöglichen.

Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf hinsichtlich langfristiger Effekte von SPB. Während viele Studien kurzfristige Veränderungen, etwa nach einzelnen Trainingseinheiten oder über wenige Wochen, betrachten, sind die potenziellen Wirkungen über längere Zeiträume bislang kaum untersucht. Dabei könnten alternative Zielparameter wie etwa immunologische Marker zusätzliche Einblicke in den nachhaltigen Nutzen von Atemtechniken liefern. Auch mit dem Hintergrund, dass in der vorliegenden Studie eine hohe Ausfallrate von 20 % infolge von Infekten zu verzeichnen war.

Ein weiterer relevanter Aspekt liegt in der Individualisierung von Erholungsstrategien. Subgruppenanalysen wie etwa basierend auf Geschlecht, Trainingsalter, sportlicher Disziplin oder Stressanfälligkeit könnten helfen zu identifizieren, für wen SPB besonders effektiv ist. Perspektivisch könnten daraus individualisierte Erholungspläne abgeleitet werden, die auf den jeweiligen physiologischen und psychologischen Ausgangszustand abgestimmt sind.

Literaturverzeichnis

- Atakan, M. M., Guzel, Y., Shrestha, N., Kosar, S. N., Grgic, J., Astorino, T. A., Turnagol, H. H., & Pedisic, Z. (2022). Effects of high-intensity interval training (HIIT) and sprint interval training (SIT) on fat oxidation during exercise: a systematic review and meta-analysis. *British journal of sports medicine*, bjsports-2021-105181. Advance online publication. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-105181>
- Atkinson, G., Williamson, P., & Batterham, A. M. (2019). Issues in the determination of 'responders' and 'non-responders' in physiological research. *Experimental physiology*, 104(8), 1215–1225. <https://doi.org/10.1113/EP087712>
- 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>
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016). Monitoring Athletic Training Status Through Autonomic Heart Rate Regulation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(10), 1461–1486. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0484-2>
- Blanca, M. J., Arnau, J., García-Castro, F. J., Alarcón, R., & Bono, R. (2023). Non-normal Data in Repeated Measures ANOVA: Impact on Type I Error and Power. *Psicothema*, 35(1), 21–29. <https://doi.org/10.7334/psicothema2022.292>
- Borges, U., Lobinger, B., Javelle, F., Watson, M., Mosley, E., & Laborde, S. (2021). Using Slow-Paced Breathing to Foster Endurance, Well-Being, and Sleep Quality in Athletes During the COVID-19 Pandemic. *Frontiers in psychology*, 12, 624655. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.624655>

- Brown, A. (2020). Effects of deep slow breath training on performance and recovery during high intensity interval cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 52(7S), 1024. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000686732.53872.3a>
- Buchheit, M., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2007). Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 293(1), H133–H141. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00062.2007>
- Chiang, J. K., Lin, Y. C., Hung, T. Y., Kao, H. H., & Kao, Y. H. (2024). The Impact on Autonomic Nervous System Activity during and Following Exercise in Adults: A Meta-Regression Study and Trial Sequential Analysis. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 60(8), 1223. <https://doi.org/10.3390/medicina60081223>
- Choudhary, R., Trivedi, V., & Choudhary, S. G. (2016). Effect of heart rate variability biofeedback training on the performance of track athlete. *International Journal of Therapies and Rehabilitation Research*, 5(4), 166. <https://doi.org/10.5455/ijtrr.000000159>
- Clark, A., & Mach, N. (2016). Exercise-induced stress behavior, gut-microbiota-brain axis and diet: a systematic review for athletes. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 13, 43. <https://doi.org/10.1186/s12970-016-0155-6>
- 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>
- Fisher, L. R., & Lehrer, P. M. (2022). A Method for More Accurate Determination of Resonance Frequency of the Cardiovascular System, and Evaluation of a Program to Perform It. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 47(1), 17–26. <https://doi.org/10.1007/s10484-021-09524-0>

- Fliege, H., Rose, M., Arck, P., Levenstein, S., & Klapp, B. F. (2009). *PSQ - Perceived Stress Questionnaire*. ZPID (Leibniz Institute for Psychology) – Open Test Archive. <https://doi.org/10.23668/PSYCHARCHIVES.5138>
- Fullagar, H. H., Skorski, S., Duffield, R., Hammes, D., Coutts, A. J., & Meyer, T. (2015). Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(2), 161–186. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0260-0>
- Gilson, N. D., Andersson, D., Papinczak, Z. E., Rutherford, Z., John, J., Coombes, J. S., & Brown, W. J. (2023). High intensity and sprint interval training, and work-related cognitive function in adults: A systematic review. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 33(6), 814–833. <https://doi.org/10.1111/sms.14349>
- Goyal, M., Singh, S., Sibinga, E. M., Gould, N. F., Rowland-Seymour, A., Sharma, R., Berger, Z., Sleicher, D., Maron, D. D., Shihab, H. M., Ranasinghe, P. D., Linn, S., Saha, S., Bass, E. B., & Haythornthwaite, J. A. (2014). Meditation programs for psychological stress and well-being: a systematic review and meta-analysis. *JAMA internal medicine*, 174(3), 357–368. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2013.13018>
- 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. *Journal of strength and conditioning research*, 37(2), 457–481. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004257>
- Halson S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 44 Suppl 2(Suppl 2), S139–S147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>

- Hamasaki H. (2020). Effects of Diaphragmatic Breathing on Health: A Narrative Review. *Medicines* (Basel, Switzerland), 7(10), 65. <https://doi.org/10.3390/medicines7100065>
- 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* (Auckland, N.Z.), 47(2), 353–365. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0578-x>
- Jerath, R., Edry, J. W., Barnes, V. A., & Jerath, V. (2006). Physiology of long pranayamic breathing: neural respiratory elements may provide a mechanism that explains how slow deep breathing shifts the autonomic nervous system. *Medical hypotheses*, 67(3), 566–571. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2006.02.042>
- Kanagasabai, T., & Ardern, C. I. (2015). Inflammation, Oxidative Stress, and Antioxidants Contribute to Selected Sleep Quality and Cardiometabolic Health Relationships: A Cross-Sectional Study. *Mediators of inflammation*, 2015, 824589. <https://doi.org/10.1155/2015/824589>
- Kellmann, M., Kölling, S., Hitzschke, B., & Sportwissenschaft, B. für. (2016). *Das Akutmaß und die Kurzsкала zur Erfassung von Erholung und Beanspruchung im Sport Manual*. Sportverlag Strauß.
- Kemp, A. H., & Quintana, D. S. (2013). The relationship between mental and physical health: insights from the study of heart rate variability. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 89(3), 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.06.018>
- Kim, H. G., Cheon, E. J., Bai, D. S., Lee, Y. H., & Koo, B. H. (2018). Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry investigation*, 15(3), 235–245. <https://doi.org/10.30773/pi.2017.08.17>

- Kromenacker, B. W., Sanova, A. A., Marcus, F. I., Allen, J. J. B., & Lane, R. D. (2018). Vagal Mediation of Low-Frequency Heart Rate Variability During Slow Yogic Breathing. *Psychosomatic medicine*, 80(6), 581–587. <https://doi.org/10.1097/PSY.0000000000000603>
- Laborde, S., Lentes, T., Hosang, T. J., Borges, U., Mosley, E., & Dosseville, F. (2019a). Influence of Slow-Paced Breathing on Inhibition After Physical Exertion. *Frontiers in psychology*, 10, 1923. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01923>
- Laborde, S., Hosang, T., Mosley, E., & Dosseville, F. (2019b). 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), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/jcm8020193>
- Laborde, S., Allen, M. S., Borges, U., Dosseville, F., Hosang, T. J., Iskra, M., Mosley, E., Salvotti, C., Spolverato, L., Zammit, N., & Javelle, F. (2022a). Effects of voluntary slow breathing on heart rate and heart rate variability: A systematic review and a meta-analysis. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 138, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104711>
- Laborde, S., Zammit, N., Iskra, M., Mosley, E., Borges, U., Allen, M. S., & Javelle, F. (2022b). 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. M., & Gevirtz, R. (2014). Heart rate variability biofeedback: how and why does it work?. *Frontiers in psychology*, 5, 756. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00756>
- Liu, Y., Abdullah, B. B., & Abu Saad, H. B. (2024). Effects of high-intensity interval training on strength, speed, and endurance performance among racket sports players: A systematic review. *PloS one*, 19(1), e0295362. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295362>

- Ma, X., Yue, Z. Q., Gong, Z. Q., Zhang, H., Duan, N. Y., Shi, Y. T., Wei, G. X., & Li, Y. F. (2017). The Effect of Diaphragmatic Breathing on Attention, Negative Affect and Stress in Healthy Adults. *Frontiers in psychology*, 8, 874. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00874>
- Manresa-Rocamora, A., Sarabia, J. M., Javaloyes, A., Flatt, A. A., & Moya-Ramón, M. (2021). Heart Rate Variability-Guided Training for Enhancing Cardiac-Vagal Modulation, Aerobic Fitness, and Endurance Performance: A Methodological Systematic Review with Meta-Analysis. *International journal of environmental research and public health*, 18(19), 10299. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910299>
- Merlin, Q., Vacher, P., Mourot, L., Levillain, G., Martinent, G., & Nicolas, M. (2024). Psychophysiological Effects of Slow-Paced Breathing on Adolescent Swimmers' Subjective Performance, Recovery States, and Control Perception. *Journal of functional morphology and kinesiology*, 9(1), 23. <https://doi.org/10.3390/jfmk9010023>
- Milesi, J., Boussuges, A., Habert, P., Bermudez, J., Reynaud-Gaubert, M., Delliaux, S., Bregeon, F., & Coiffard, B. (2023). Ultrasound evaluation of diaphragmatic function in patients with idiopathic pulmonary fibrosis: a retrospective observational study. *Respiratory research*, 24(1), 259. <https://doi.org/10.1186/s12931-023-02577-1>
- Naharudin, M. N., & Yusof, A. (2013). Fatigue index and fatigue rate during an anaerobic performance under hypohydration. *PLoS ONE*, 8(10), e77290. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077290>
- Nikolovski, Z., Vrdoljak, D., Foretić, N., Perić, M., Marić, D., & Fountoulakis, C. (2023). Acute and Long-Lasting Effects of Slow-Paced Breathing on Handball Team Coach's Match Stress. *Healthcare (Basel, Switzerland)*, 11(9), 1242. <https://doi.org/10.3390/healthcare11091242>

- Nilges, P., & Essau, C. (2015). Die Depressions-Angst-Stress-Skalen: Der DASS—ein Screeningverfahren nicht nur für Schmerzpatienten. *Schmerz (Berlin, Germany)*, 29(6), 649–657. <https://doi.org/10.1007/s00482-015-0019-z>
- 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, 43-55.
- Noble, D. J., & Hochman, S. (2019). Hypothesis: Pulmonary Afferent Activity Patterns During Slow, Deep Breathing Contribute to the Neural Induction of Physiological Relaxation. *Frontiers in physiology*, 10, 1176. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01176>
- Peake, J. M., Neubauer, O., Della Gatta, P. A., & Nosaka, K. (2017). Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 122(3), 559–570. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00971.2016>
- 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>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *European journal of applied physiology*, 112(11), 3729–3741. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2354-4>

- Poppendieck, W., Wegmann, M., Hecksteden, A., Darup, A., Schimpchen, J., Skorski, S., Ferrauti, A., Kellmann, M., Pfeiffer, M., & Meyer, T. (2021). Does Cold-Water Immersion After Strength Training Attenuate Training Adaptation?. *International journal of sports physiology and performance*, 16(2), 304–310. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0965>
- Quintana, D. S., & Heathers, J. A. (2014). Considerations in the assessment of heart rate variability in biobehavioral research. *Frontiers in psychology*, 5, 805. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00805>
- Russo, M. A., Santarelli, D. M., & O'Rourke, D. (2017). The physiological effects of slow breathing in the healthy human. *Breathe (Sheffield, England)*, 13(4), 298–309. <https://doi.org/10.1183/20734735.009817>
- Saper C. B. (2002). The central autonomic nervous system: conscious visceral perception and autonomic pattern generation. *Annual review of neuroscience*, 25, 433–469. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.25.032502.111311>
- Schneider, C., Wiewelhove, T., Raeder, C., Flatt, A. A., Hoos, O., Hottenrott, L., Schumbera, O., Kellmann, M., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Ferrauti, A. (2019). Heart Rate Variability Monitoring During Strength and High-Intensity Interval Training Overload Microcycles. *Frontiers in physiology*, 10, 582. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00582>
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in public health*, 5, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- Shaffer, F., & Meehan, Z. M. (2020). A Practical Guide to Resonance Frequency Assessment for Heart Rate Variability Biofeedback. *Frontiers in neuroscience*, 14, 570400. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.570400>

- Segerstrom, S. C., & Miller, G. E. (2004). Psychological stress and the human immune system: a meta-analytic study of 30 years of inquiry. *Psychological bulletin*, 130(4), 601–630. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.4.601>
- Tornero-Aguilera, J. F., Jimenez-Morcillo, J., Rubio-Zarapuz, A., & Clemente-Suárez, V. J. (2022). Central and Peripheral Fatigue in Physical Exercise Explained: A Narrative Review. *International journal of environmental research and public health*, 19(7), 3909. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073909>
- Wecht, J. M., De Meersman, R. E., Weir, J. P., Spungen, A. M., Bauman, W. A., & Grimm, D. R. (2001). The effects of autonomic dysfunction and endurance training on cardiovascular control. *Clinical autonomic research : official journal of the Clinical Autonomic Research Society*, 11(1), 29–34. <https://doi.org/10.1007/BF02317799>
- Weerapong, P., Hume, P. A., & Kolt, G. S. (2005). The mechanisms of massage and effects on performance, muscle recovery and injury prevention. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(3), 235–256. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535030-00004>
- Yaribeygi, H., Panahi, Y., Sahraei, H., Johnston, T. P., & Sahebkar, A. (2017). The impact of stress on body function: A review. *EXCLI journal*, 16, 1057–1072. <https://doi.org/10.17179/excli2017-480>
- 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>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Trainingsinhalte	21
Abbildung 2: Studienprotokoll	22
Abbildung 3: HRmin und HRmax erster und letzter Sprint: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppen	29
Abbildung 4: Tabelle 3: HRmin und HRmax erster und letzter Sprint: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen	30
Abbildung 5: HR in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI für Interventions- und Kontrollgruppe	33
Abbildung 6: HR in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen	34
Abbildung 7: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe transformiert mittels natürlichen Logarithmus	35
Abbildung 8: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen transformiert mittels natürlichen Logarithmus	36
Abbildung 9: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe transformiert mittels natürlichen Logarithmus	38
Abbildung 10: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen transformiert mittels natürlichen Logarithmus	39
Abbildung 11: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe transformiert mittels natürlichen Logarithmus	41
Abbildung 12: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI über die Wochen transformiert mittels natürlichen Logarithmus	42
Abbildung 13: Ergebnisse endbreath: RMSSD, HF-Power, LF-Power und HR: Vergleich zwischen Interventions- und Kontrollgruppe über die Wochen	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: HR _{min} Mittelwerte, 95% CI und Signifikanzen – erster Sprint	28
Tabelle 2: HR _{min} und HR _{max} erster und letzter Sprint: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppen.....	30
Tabelle 3: HR _{min} und HR _{max} erster und letzter Sprint: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen.....	31
Tabelle 4: HR _{min} und HR _{max} erster und letzter Sprint: Signifikanzen und Eta-quadrat.....	31
Tabelle 5: HR in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI für Interventions- und Kontrollgruppe.....	33
Tabelle 6: HR in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen	34
Tabelle 7: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus	36
Tabelle 8: RMSSD in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus	37
Tabelle 10: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus.....	38
Tabelle 11: HF in der Erholungsphase: Mittelwerte und 95% CI über die Wochen als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus	39
Tabelle 12: LF zum Zeitpunkt endbreath: Kontraste	40
Tabelle 13: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI der Interventions- und Kontrollgruppe als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus.....	41
Tabelle 14: LF in der Erholungsphase: Mittelwert und 95% CI über die Wochen als Rohwerte und transformiert mittels natürlichen Logarithmus	42
Tabelle 15: HRV Ergebnisse (HR, RMSSD) Signifikanzen und Eta-quadrat zusammengefasst (1).....	43
Tabelle 16: HRV Ergebnisse (HF, LF) Signifikanzen und Eta-quadrat zusammengefasst (2)	44

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 vorgelegt.