

DISSERTATION

Belastung und Erholung im Ausdauersport



Laura Hottenrott

2023

Belastung und Erholung im Ausdauersport

Eine psychophysische Betrachtung unter besonderer Berücksichtigung von Alter und Geschlecht

Stress and recovery in endurance sports - A psychophysical review with respect to age and sex

Kumulative Dissertationsschrift

Zur Erlangung des Doktorgrades der Philosophie (Dr. phil.)

vorgelegt

der Philosophischen Fakultät II
Philologien, Kommunikations- und Musikwissenschaften
der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

von

Laura Hottenrott

geb. am 14.05.1992 in Kassel

1. Gutachter: Prof. Dr. Oliver Stoll
2. Gutachter: Prof. Dr. Henning Wackerhage
3. Gutachter: Prof. Dr. Lars Donath

Datum der Verteidigung: 20.01.2023

Halle (Saale)

Inhaltsverzeichnis

I Zusammenfassung	I
Summary	II
II Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	III
III Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund	3
2.1 Theorien und Modelle zur Beanspruchung und Erholung.....	3
2.2 Physische Beanspruchung und Erholung.....	8
2.3 Psychisch-mentale Beanspruchung und Erholung.....	10
2.4 Monitoring der psychophysischen Beanspruchung und Erholung.....	14
3 Aktueller Forschungsstand	17
3.1 Altersbedingte Veränderungen im Kontext Leistung und Erholung.....	17
3.2 Geschlechtsspezifische Veränderungen im Kontext Leistung und Erholung.....	18
3.3 Theorien und Modelle zum Erholungsverlauf nach Ausdauerbelastungen.....	20
3.4 Veränderungen ausgewählter physiologischer Kenngrößen in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht.....	23
3.4.1 Herzfrequenz.....	23
3.4.2 Herzfrequenzvariabilität.....	26
3.4.3 Laktat.....	29
4 Zielsetzung und Forschungsfragen	32
5 Veröffentlichungen	33
5.1 Publikation 1.....	34
5.2 Publikation 2.....	46
5.3 Publikation 3.....	61
5.4 Publikation 4.....	74
5.5 Publikation 5.....	83
6 Diskussion	92
7 Limitationen und Ausblick	105
8 Literaturangaben	107
Anhang	
Erklärung über Autorenanteile innerhalb der Publikationen	123
Eidesstattliche Erklärung	124

I Zusammenfassung

Sportliche Höchstleistungen im Ausdauersport setzen nicht nur eine hohe psychophysische Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit sowie ausgeprägte mentale Leistungsbereitschaft voraus, sondern auch einen sehr guten psychophysischen Erholtheitszustand. Ziel der vorliegenden kumulativen Dissertation ist es, die psychophysische Belastung und Erholung im Ausdauersport unter besonderer Berücksichtigung von Alter und Geschlecht näher zu untersuchen. Dazu wurde in einem ersten Übersichtsartikel der aktuelle Forschungsstand zu „Age- and Sex-Related Differences in Recovery from High-Intensity and Endurance Exercise“ (Publikation 1) aufgearbeitet. Es wurde ersichtlich, dass zwar einige Erkenntnisse zur Frage des Einflusses von Alter und Geschlecht auf den Erholungsverlauf vorliegen, die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Untersuchten bei den bisherigen Studien jedoch unzureichend beachtet und der Erholungsverlauf nicht aus gesamtorganismischer Perspektive betrachtet wurde. Um neue Erkenntnisse zur Thematik zu generieren wurden mehrere Studien durchgeführt. In zwei experimentellen Querschnittsstudien (Publikation 2 und 3) wurden unter standardisierten Laborbedingungen alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede nach hochintensiven Intervallen (HIIT) auf dem Radergometer untersucht. Dazu wurden die Belastungs- und Erholungsdaten von vergleichbar gut trainierten Jüngeren und Älteren erhoben, die drei verschiedene HIIT-Protokolle mit unterschiedlich langer aktiver Erholungsphase in randomisierter Reihenfolge absolvierten. In Studie 1 wurden zwischen den beiden Altersgruppen der 25- und 50-Jährigen keine signifikanten Unterschiede weder in den Parametern der physischen, noch in denen der psychischen Belastung und Erholung gefunden. Dieses Ergebnis wurde erstmalig so gezeigt und spiegelt den Einfluss der Leistungsfähigkeit im Alter auf den Erholungsverlauf wieder. Damit konnten bisherige Annahmen einer physischen und psychischen stärkeren Ermüdung und eines verzögerten Wiederherstellungsprozesses während und nach intermittierenden Belastungen bei trainierten Älteren widerlegt werden. In Studie 2 zeigten sich geschlechtsbezogene Unterschiede. Bei den Wiederholungsbelastungen waren Frauen im Vergleich zu Männern ermüdungsresistenter und hatten eine verbesserte Fähigkeit, sich metabolisch zu erholen, jedoch zeigten sie eine verzögerte Erholungsherzfrequenz und subjektive Erholung. In zwei trainingsbegleitenden Feldstudien wurden die Belastung und Erholung im Trainingsprozess mittels der täglichen Messung der kardialen autonomen Regulation im Lagewechseltest mit sehr gut trainierten Ausdauersportlern untersucht (Publikation 4). Aus den Analysen von Herzfrequenz (HF) und Herzfrequenzvariabilität (HRV) ging hervor, dass die Belastungen in den unterschiedlichen Trainingszyklen mit den Werten des Lagewechseltests korrelierten und sich statistisch voneinander unterschieden. Erstmalig konnte gezeigt werden, dass der Lagewechseltest in allen Trainingsphasen eine signifikant höhere Tag-zu-Tag-Variation der HF und des vagalen HRV-Parameter RMSSD im Stehen im Vergleich zu den Werten im Liegen zeigte und die Stehendmessungen variabler und somit sensibler den Ermüdungs- und Erholungsverlauf widerspiegeln als die Liegendmessungen. Dies bestätigte sich auch in der Fallstudie (Publikation 5), in welcher der Einfluss einer Virusinfektion auf die efferente vagale Aktivität aufgezeigt wurde. Aus den Forschungsarbeiten kann gefolgert werden, dass sich die psychophysische Erholung nach intensiven Ausdauerbelastungen von guttrainierten Jüngeren und Älteren bis zu einem Alter von 50 Jahren nicht unterscheidet, Frauen sich nach Intervallbelastungen metabolisch schneller, subjektiv und kardiovaskulär jedoch langsamer erholen und ein Monitoring der HF und HRV mittels des Lagewechseltests zur Bewertung der Belastbarkeit und zur Steuerung der psychophysischen Erholung bei Ausdauersportlern geeignet ist.

Summary

Peak performance in endurance sports not only requires a high exercise capacity and a pronounced mental readiness to perform but moreover a very good psychophysical state of recovery. This dissertation aims to investigate the psychophysical stress and recovery in endurance sports in the context of age and sex. In a first review article, the current state of research on "Age- and Sex-Related Differences in Recovery from High-Intensity and Endurance Exercise" (publication 1) was summarized. It became apparent that irrespective of a growing body of literature in the field, previous studies often disregarded the participants' differences in performance capacity. Furthermore, the recovery process was often not analysed from a holistic perspective. In order to generate new insight on the subject, several studies were conducted.

In two experimental cross-sectional laboratory studies (publication 2 and 3), age- and sex-specific differences in recovery after high-intensity intervals (HIIT) on the cycle ergometer were investigated. Exercise and recovery data were collected from equally well-trained younger and older endurance athletes completing three different HIIT protocols with different lengths of active recovery periods in a randomized order. As for study 1, no significant differences were found between the two age groups of 25- and 50-years in neither the physical nor the mental stress and recovery parameters. These results are the first to demonstrate the influence of performance capacity during aging on the course of recovery. Consequently, previous assumptions of increased physical and mental fatigue and a delayed recovery during and after intermittent exercise with aging can be rejected. Study 2 assessed sex-related differences during intermittent exercise in men and women. Results demonstrated a higher fatigue resistance and an improved ability to recover metabolically for women. However, women also showed a delayed heart rate recovery and subjective recovery compared to men.

In two in-training field studies with highly trained endurance athletes, stress and recovery were investigated by measuring daily cardiac autonomic regulation during the orthostatic test (position-change-test) throughout the training process (publication 4). Analyses of heart rate (HR) and heart rate variability (HRV) showed that stress and training loads during the different training cycles correlated with the values of the orthostatic test and were statistically different from one another. For the first time, it could be demonstrated that the orthostatic test shows a significantly higher day-to-day variation of HR and the vagal HRV parameter RMSSD in the standing position compared to the values in the supine position throughout all training phases. Furthermore, standing measurements showed a more variable and thus more sensitive response to the fatigue and recovery process than supine measurements. This was also confirmed in the case study (publication 5), which showed the influence of a viral infection on efferent vagal activity.

In conclusion, psychophysical recovery after intense endurance exercise does not differ between well-trained younger and older athletes up to the age of 50 years. Women recover metabolically faster, however, their subjective and cardiovascular recovery was slower during and after HIIT. Monitoring of HR and HRV using the orthostatic test is suitable for assessing exercise capacity and managing psychophysical recovery in endurance athletes.

II Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1.** Überblick über den gesamten Übertrainings- und Erholungsprozess (Kenttä & Hassmén, 1998)
- Abbildung 2.** Modell der Belastung- und Beanspruchungs-Interaktion im Sport (Hottenrott & Neumann, 2010, S. 76).
- Abbildung 3.** Theoretischer Rahmen für die Steuerung des Trainingsprozess (modifiziert nach Impellizzeri et al., 2019).
- Abbildung 4.** Störung und Wiederherstellung des homöostatischen Regulationszustandes des Organismus durch eine Langzeitausdauerbelastung (Neumann, 1988, S. 406).
- Abbildung 5.** Laktatabbaurate nach vier Minuten intensiver Belastung bei aktiver und passiver Erholung (aus Marées, 2003).
- Abbildung 6.** Die RPE-Skala (Borg, 1998) und die TQR-Skala (Kenttä & Hassmén 1998) in Gegenüberstellung.
- Abbildung 7.** Schematische Darstellung der Beziehung zwischen Anstrengungs-empfinden und der Herzfrequenz für Personen unterschiedlichen Alters (Borg, 2004).
- Abbildung 8.** Diagramm zur Veranschaulichung der kardiovaskulären Kontrollmechanismen von Herzfrequenz und Blutdruck sowie des Rückkopplungsmechanismus des Baroreflexes. Dargestellt werden die unabhängigen Aktionen des vagalen, alpha-sympathischen und beta-sympathischen Systems. Ihre Wirkung kann durch Messung der HRV, des Blutdrucks (BPV) und des Baroreflex-Mechanismus (BRS) beurteilt werden (Aubert et al., 2003).
- Abbildung 9.** Theoretisches Modell des Zeitverlaufs der Wiederherstellung nach einem Trainingsimpuls. Die fette Linie skizziert den „normalen“ Verlauf, die gestrichelten Linien zeichnen mögliche Verläufe für ältere Athleten (Fell & Williams, 2008).
- Abbildung 10.** Hypothetisches Modell des Zeitverlaufs der Erholung (Wiederherstellung) bei jungen und älteren Athleten, bei welchem sich der ältere Sportler (Veteran) aufgrund der ungenügenden Erholung, in Richtung eines Übertrainingszustandes entwickelt (Fell & Williams, 2008).
- Abbildung 11.** Theoretisches Modell zu unterschiedlichen Zeitverläufen der Ermüdung und Erholung älterer Sportler (farbige gestrichelte Linien) im Vergleich zu jüngeren Sportlern (schwarze durchgezogene Linie) nach einer intensiven Trainingsbelastung (Hottenrott & Ferrauti, 2020, modifiziert nach Fell & Williams, 2008).
- Abbildung 12.** Regressionsgeraden zur Berechnung der maximalen Herzfrequenz nach Angaben von Fox et al. (1971), nach einer Metaanalyse von Tanaka et al. (2001) und nach einer empirischen Datenerhebung bei Ausdauersportlern von Hottenrott & Neumann (2010).

Abbildung 13. Zusammenhang zwischen Alter, Geschlecht und maximaler Blutlaktatkonzentration nach 400-m-Sprintrennen. Die Laktat-Werte nahmen unabhängig vom Geschlecht signifikant mit dem Alter ab. * $p < 0,05$, *** $p < 0,001$ (Korhonen et al., 2005).

Abbildung 14. Mittelwerte und Standardabweichung der maximalen Blutlaktatkonzentrationen nach 400-m-Sprintrennen von Männern und Frauen mit gleichen Laufzeiten. Die Laktatkonzentrationen unterscheiden sich zwischen den Geschlechtern statistisch nicht (Korhonen et al., 2005).

Abbildung 15. Modell vagaler Tanks und die 3 Rs (Resting, Reactivity, Recovery) der vagalen Kontrolle des Herzens (Laborde et al., 2018).

Abbildung 16. Angepasstes vagales Tankmodell nach Laborde et al. (2018) unter Einbezug des Lagewechseltests für die Anwendung im Ausdauersport. Vagaltank mit vagalen Stimuli (1), mit hohen vagalen Stimuli (2) und sympathischen Stimuli (3). A, B und C zeigen den mögliche Füllzustand als noch vorhandene vagale Ressource nach einem Event und der anschließenden Erholung (Hottenrott et al., 2019).

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Kennzeichen eines mentalen Ermüdungszustandes (nach Loch & Kellmann, 2020).

Tabelle 2. Kategorisierung von psychometrischen Diagnostikverfahren (nach Kellmann et al., 2018, S. 442). Anmerkungen: POMS = Profile of Mood States; RPE = Rating of Perceived Exertion; TQR = Total Quality Recovery; DOMS = Delayed-onset Muscle Soreness (Visuelle Analogskala zum Muskelschmerzempfinden und Muskelkater); EBF-Sport = Erholungs-Belastungs-Fragebogen für Sportler; AEB = Akutmaß Erholung und Beanspruchung; KEB = Kurzskala Erholung und Beanspruchung. Die Bewertung des allgemeinen Erholungs-zustandes erfolgt eindimensional, während die Erfassung verschiedener Erholungsstrategien durchaus mehrdimensional erfolgt.

Tabelle 3. Auswirkungen des Geschlechts auf die 24-Stunden-Herzfrequenzvariabilität und die Herzfrequenz in vier Altersgruppen (Umetani et al., 1998).

III Abkürzungsverzeichnis

ANS	Autonomes Nervensystem
BMI	Body Mass Index
E1-#	Erholungswert nach 1 bis # min
EEG	Elektroenzephalographie
EKG	Elektrokardiographie
EMG	Elektromyographie
FFM	Fettfreie Masse
FFS	Freie Fettsäuren
GLUT-4	Glukosetransporter 4
HF	Herzfrequenz
HIIT	Hochintensives Intervalltraining
HRR	Heart Rate Recovery (Erholungsherzfrequenz)
HRV	Herzfrequenzvariabilität
M1-#	Messzeitpunkt bei 1 bis # min
MVIC	Maximal Voluntary Isometric Contraction
MZP	Messzeitpunkt
P _{max}	Maximale Leistung (z.B. beim Wingate Test)
RMSSD	Root mean square of successive differences
RQ	Respiratorischer Quotient
tHR _{peak}	Zeit bis zum Erreichen der höchsten Herzfrequenz beim Lagewechseltest
TRIMP	Trainingsimpuls
VO ₂	Sauerstoffaufnahme
VO _{2max}	maximale Sauerstoffaufnahme (z.B. beim Rampentest)
VO _{2peak}	höchste Sauerstoffaufnahme (z.B. beim Wingate Test)
WAnT	Wingate Anaerobic Test

1 Einleitung

Um die Leistungsfähigkeit von Spitzen- und Nachwuchssportlern¹ im Trainingsprozess nachhaltig zu verbessern, ist eine optimale Steuerung der Belastung und Erholung unerlässlich. Die Belastungsverträglichkeit und das Erholungsvermögen von Leistungssportlern werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Dabei können Jüngere einen anderen Erholungsverlauf als Ältere haben, Frauen einen anderen als Männer und weniger Trainierte einen anderen als hoch Trainierte. In Ausdauersportarten werden von Frauen und Männern Leistungen auf Weltniveau in einer großen Altersspanne erbracht. Erstplatzierungen bei den olympischen Spielen oder Weltmeisterschaften im Juniorenalter oder im Alter von über 35 Jahren sind in allen Ausdauersportarten keine Seltenheit. So wurde in der Sportart Biathlon Laura Dahlmeier (GER) mit 22 Jahren Olympiasiegerin und Ole Einar Bjordalen (NOR) mit 40 Jahren Olympiasieger. Im Mountainbiking (Cross Country) wurde Jolanda Neff (CH) mit 22 Jahren Weltmeisterin und Sabine Spitz (GER) mit 37 Jahren Olympiasiegerin und vier Jahre später mit 41 Jahren holte sie Silber bei den Olympischen Spielen in London. Im Marathon lief Eliud Kipchoge (KEN) im Alter von 36 Jahren zum Olympiasieg in Sapporo, drei Jahre zuvor Weltrekord (2:01:39 h) und ein Jahr später erstmalig inoffiziellen Weltrekord unter zwei Stunden (1:59:40 h). Bei diesen Leistungen auf Weltniveau, die in einer relativ großen Altersspanne erbracht werden, stellt sich die Frage, ob jüngere Spitzensportler ein anderes Erholungsverhalten zeigen als ältere Spitzensportler? Auch wäre es spannend diese Frage an Ausdauersportlerinnen und -sportler zu stellen, die über mehrere Jahrzehnte Leistungen auf Weltniveau erbrachten wie Mountainbikerin Irina Kalentieva (RUS), die an fünf Olympischen Spielen teilnahm oder Sabrina Mockenhaupt (GER), die 45mal deutsche Meisterin auf den leichtathletischen Langstrecken wurde oder im Triathlon Jan Frodeno (GER), der mit 27 Jahren Olympiasieger über die Olympische Distanz und 11 Jahre später zum dritten Mal Ironman Weltmeister auf Hawaii wurde. Hat sich deren Erholungsvermögen über die Karriere hinweg geändert oder ist es unverändert geblieben?

Im langfristigen Leistungsaufbau von Ausdauertrainierenden sollte der Erholung der gleiche Stellenwert eingeräumt werden wie der Trainingsbelastung, da davon ausgegangen wird, dass Trainingsreize vor allem dann Adaptationen auslösen, wenn nach der Reizsetzung ein erholter organismischer Zustand bzw. ein homöostatischer Zustand wiederhergestellt wird. Erholung im Sport beschränkt sich allerdings nicht allein auf die physische (körperliche) Erholung, sondern ebenso auf die psychische (mentale) Erholung nach einer Trainingsbelastung. Physische und psychische Parameter der Erholung können zwar separat ausgewertet und bewertet werden, jedoch kann der Organismus eines Sportlers nicht isoliert physisch oder psychisch beansprucht werden. Auch wird der Erholungsprozess von der spezifischen Art der Belastung und den

¹ In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten sind dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

individuellen Kapazitäten bzw. Ressourcen des Athleten beeinflusst. Für die Evaluierung des Erholungsverlaufs sind valide und praktikable Testverfahren und Messgrößen erforderlich, welche den gesamtorganismischen Erholtheitszustand erfassen können. Diese gesamtorganismische Perspektive ist in einem von Dynamik und Variabilität gekennzeichneten Trainingsprozess erforderlich, um Veränderungen im Erholungszustand und in der Belastbarkeit frühzeitig zu erkennen. Aus trainingswissenschaftlicher Sicht ist ein systematischer Wechsel zwischen Training und Erholung bzw. Belastung und Entlastung notwendig, um Anpassungen auszulösen und um eine langfristige Leistungsentwicklung sicherzustellen. Es ist wissenschaftlicher Konsens, dass sich mit zunehmender Ausdauerleistungsfähigkeit die Belastbarkeit und die Erholungsfähigkeit verbessern und, dass eine eingeschränkte Belastbarkeit (kardial, respiratorisch, immunologisch und psychisch) sich negativ auf den Erholungsverlauf auswirkt. Inwieweit sich die Erholungsfähigkeit zwischen Frauen und Männern sowie Jüngern und Älteren mit vergleichbarer sportlicher Leistungsfähigkeit unterscheiden, dazu scheint es keine belastbaren Antworten zu geben.

Die vorliegende Dissertationsschrift versucht neue Erkenntnisse zur psychophysischen Belastung und Erholung nach intensiven Ausdauerbelastungen und im Rahmen des Trainingsprozesses von Eliteausdauersportlern unter besonderer Berücksichtigung von Alter und Geschlecht zu generieren. Das dabei zugrunde gelegte Forschungsdesign beinhaltet mehrere methodische Schritte. Im ersten Schritt werden die theoretischen Grundlagen (Kap. 2) und der aktuelle Forschungsstand zur Thematik (Kap. 3 und Publikation 1) aufgearbeitet. Aus den herausgearbeiteten offenen Fragen wurden zunächst zwei experimentelle Studien zum Erholungsverhalten nach hochintensiven Intervallen mit unterschiedlichen Pausenlängen durchgeführt, um mögliche alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede zu erkennen. Die Ergebnisse dieser beiden Studien wurden in zwei Fachartikeln publiziert und werden in Kapitel 5 (Publikation 2 und 3) dargelegt. Um das Belastungs- und Erholungsverhalten im Trainingsprozess zu analysieren und um den Einfluss von eingeschränkter Belastbarkeit auf den Erholungsverlauf zu bewerten, wurden zwei Feldstudien durchgeführt. Im ersten Feldexperiment wurden trainingsbegleitend bei Eliteausdauersportlern über mehrere Wochen die Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität beim Lagewechseltest (Orthostatic Test) bestimmt und analysiert. Dieses methodische Herangehen wurde gewählt, um über die kardiale autonome Kontrolle einen Einblick in die gesamtorganismische Belastbarkeit und Erholung zu bekommen. Im zweiten Feldexperiment wurden Veränderungen im Erholungsverlauf vor, während und nach einer Virusinfektion mittels des Lagewechseltests analysiert. Die Ergebnisse der beiden Feldstudien wurden publiziert und sind in Kapitel 5 (Publikation 4 und 5) eingefügt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den fünf empirischen Studien werden in Kapitel 6 zusammenfassend diskutiert. Zum Schluss werden Limitationen herausgearbeitet und Ableitungen für das Training getroffen (Kap. 7).

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Theorien und Modelle zur Belastung und Beanspruchung

Allgemein kennzeichnet Erholung den Vorgang, wenn sich der menschliche Organismus von einer anstrengenden Belastung, einer Verletzung oder einer Krankheit nach einer Ruhephase wieder regeneriert. Erholung kann somit als Prozess der Wiedererlangung psychischer und physischer Aktiviertheit verstanden werden (Allmer, 1996). Die psychische Beanspruchung wird als unmittelbare Auswirkung der psychischen Belastung im Individuum in Abhängigkeit von seinen jeweiligen überdauernden und augenblicklichen Voraussetzungen, einschließlich der individuellen Bewältigungsstrategien definiert (Hillmert et al., 2020; Schütte, 2021).

Im Sport wird immer wieder gefordert, der Erholung den gleichen Stellenwert einzuräumen wie der Trainingsbelastung, da davon ausgegangen wird, dass Trainingsreize vor allem dann Adaptationen auslösen, wenn nach der Reizsetzung ein erholter organischer Zustand bzw. ein homöostatischer Zustand wiederhergestellt wird (Hauswirth & Mujika, 2013; Kellmann et al., 2018a; Mujika et al., 2018; Neumann, 1988). Erholung im Sport beschränkt sich allerdings nicht allein auf die physische (körperliche) Erholung, sondern beinhaltet ebenso die psychische (mentale) Erholung nach einer Trainingsbelastung sowie weiteren Stressbelastungen wie sozialer oder emotionaler Stress (Kenttä & Hassmen, 1998; Rushall, 1990). Um einen Einblick über das Verhältnis von Stress-(Belastung) und Erholung zu gewinnen wird das Modell (Abb. 1) von Kenttä und Hassmen (1998) herangezogen. Danach bestimmen psychischer und sozialer Stress, in Verbindung mit physiologischem Stress, hervorgerufen durch die Trainingsbelastung, das tatsächliche Ausmaß des Gesamtstresses für den Athleten. Psychischer Stress und sozialer Stress erfordern mehr Aufmerksamkeit für die Bewertung der Körper-Geist-Beziehung. Psychischer Stress wird im Modell als intraindividueller Stress, der durch interne Stressoren entsteht, betrachtet. Dieser kann zum Beispiel aus einem Ungleichgewicht zwischen sportlicher Leistungserwartung und Leistungsvermögen eines Sportlers entstehen. Sozialer Stress wird als das Ergebnis von Interaktionen mit anderen Menschen definiert. Soziale Stressoren können aus dem Privatleben stammen oder in der Interaktion mit Freunden, Arbeitskollegen, Trainern oder Konkurrenten (Rushall, 1990). Die drei dargestellten Faktoren in der obersten Ebene des psychologischen, physiologischen und sozialen Stresses tragen zum Gesamtbelastungsstress des Athleten bei, welcher dann Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit nimmt (Abb. 1). Wie stark sich der Stress auswirkt, hängt von der individuellen Kapazität bzw. den vorhandenen Ressourcen, sowie der kognitiven Bewertung

durch das Individuum ab (Alfermann & Stoll, 2007, S. 66). Nach Fry et al. (1991) ist die physiologische Belastung (Trainingsbelastung) der zentrale Aspekt für die Entwicklung eines Staleness-Syndroms, d.h. eines „Ausgebranntseins“, das mit einer Leistungsstagnation im Übertrainingszustand einhergeht. Die Autoren definierten vier Arten von Symptomen, die mit dem Staleness-Syndrom verbunden sind: physiologische Symptome, psychische Symptome, biochemische Symptome und immunologische Symptome. Diese sind das Ergebnis bzw. die Antwort des Athleten auf die Belastung bzw. den Stress, welcher auf ihn einwirkt, der zur Leistungsstagnation führen kann. Auch die Erholungsprozesse lassen sich in die Kategorien, physiologisch, psychisch und sozial unterteilen und beziehen sich auf verschiedene Arten von Belastungsstress. Das Ziel jeder Erholungsaktivität sollte es nach Fry et al. (1991) sein, die Homöostase in allen Kategorien wiederherzustellen, um die weitere Anpassung des Athleten an die Trainingsbelastungen zu ermöglichen. Auch ist es nach den Modellvorstellungen nicht möglich, eine vollständige Erholung zu erreichen, solange nicht die Homöostase in allen drei Kategorien (physiologisch, psychisch und sozial) erfolgt und Berücksichtigung in der Erholung findet. Das Staleness-Syndrom wurde von weiteren Autoren im Kontext Übertraining, Überlastung und Burnout bei Athleten aufgegriffen (McArdle et al., 2015, S. 485; O'Connor, 1997; Raglin, 2001; Suay, 2012). Zusätzlich wird der Erholungsprozess von der spezifischen Art der Belastung, den individuellen Kapazitäten bzw. Ressourcen des Athleten beeinflusst (Kenttä & Hassmen, 1998; Schlicht, 1992; Stoll & Ziemainz, 2002). Das Ziel des Trainings und der entsprechenden Erholung ist es, eine Zone bzw. einen Bereich der Balance zu finden, in der es zu einer optimalen Leistungssteigerung kommen kann. Kenttä und Hassmen (1998) definieren diesen Bereich als Anpassungsschwelle (Abb. 1). Theoretisch sei die Anpassungsschwelle eine dynamische "Sollbruchstelle", an der die Adaptation plötzlich, d. h. innerhalb eines kurzen Trainingszeitraums, zu einer Fehlanpassung (Maladaptation) führt, wenn die Belastung zu groß ist. Die endgültige Bewertung aller im Modell enthaltenen Faktoren kann nach Aussage der Autoren erst vorgenommen werden, wenn alle verfügbaren Hinweise aus den sozio-psycho-physiologischen Prozessen und der Reaktionen (Symptome und Marker) analysiert sind. Dazu wären individuelle Baselinemessungen für alle betrachteten Übertrainingsmarker für eine korrekte Beurteilung der intra-individuellen Veränderungen notwendig. Die endgültige Bewertung sollte die Frage beantworten, ob die Trainingsbelastung zu einer Anpassung oder einer Fehlanpassung führt. Die individuellen Unterschiede in der einwirkenden Gesamtbelastung, der Gesamtkapazität und der Gesamterholung tragen auch dazu bei, dass Sportler unterschiedlich auf den gleichen Trainingsreiz reagieren und eine Vorhersage zum

Ausmaß der Adaptation im Verlauf des Trainingsprozesses nicht getroffen werden kann (Kenttä & Hassmen, 1998).

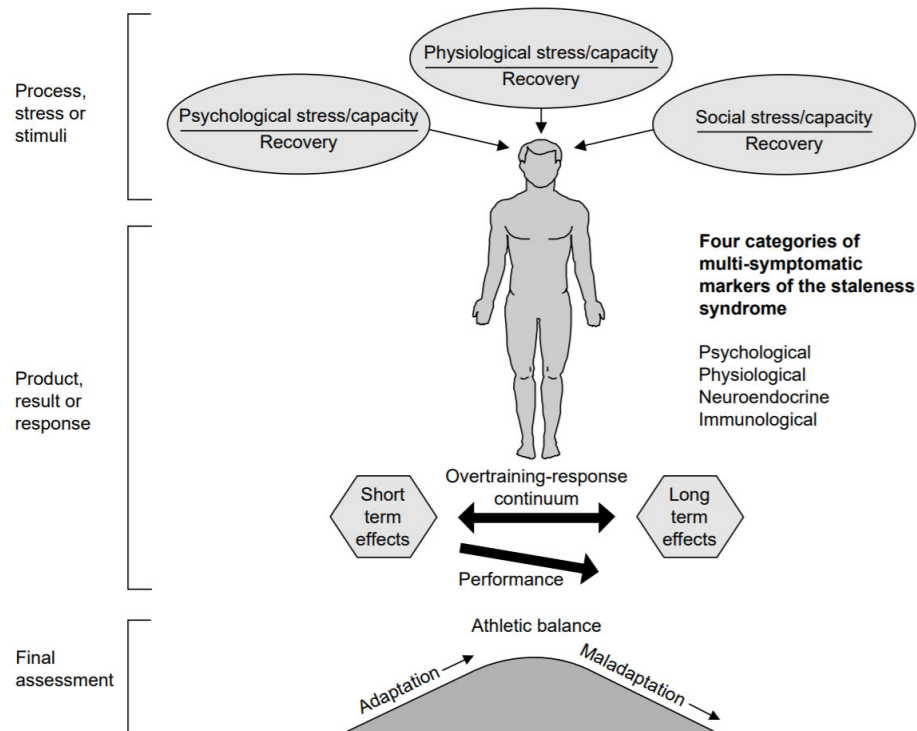


Abbildung 1. Überblick über den gesamten Übertrainings- und Erholungsprozess (Kenttä & Hassmén, 1998).

Zur konkreten Bewertung von Erholungsprozessen muss das Beziehungsgefüge zwischen Belastung (external load) und Beanspruchung (internal load) näher betrachtet werden. Dazu wird als erstes das Modell der Belastungs-Beanspruchungs-Intervention von Hottenrott & Neumann (2010, S.76) und später die erweiterte Modellbetrachtung von Gronwald et al. (2020) herangezogen. Um die Dosis einer körperlichen (sportlichen) Intervention zu bewerten sind demnach drei Schlüsselkomponenten zu berücksichtigen: (1) die externe Belastung (external load), definiert als die von der Person geleistete Arbeit unabhängig von inneren Merkmalen, (2) die Einflussfaktoren, die die Reize einer körperlichen Intervention verstärken oder stören können und (3) die Beanspruchung (internal load), definiert als die individuellen und akuten physiologischen, psychologischen, motorischen und biomechanischen Reaktionen auf die äußere Belastung und die Einflussfaktoren während und/oder nach der Beendigung einer einzelnen körperlicher Betätigung. Nach Hottenrott & Neumann (2010) lässt sich das Beziehungsgefüge zwischen Belastung und Beanspruchung nicht mit einfachen Reiz-Reaktions-

oder Input-Output-Modellen erklären. Die Beanspruchung bei Training und Wettkampf wird von einer Vielzahl weiterer endogener und exogener Faktoren moduliert. Je mehr Variablen in ihrem Einfluss erkennbar sind, desto umfassender und präziser könne die Beanspruchung erfasst und Ableitungen für die weitere Gestaltung des Trainings getroffen werden.

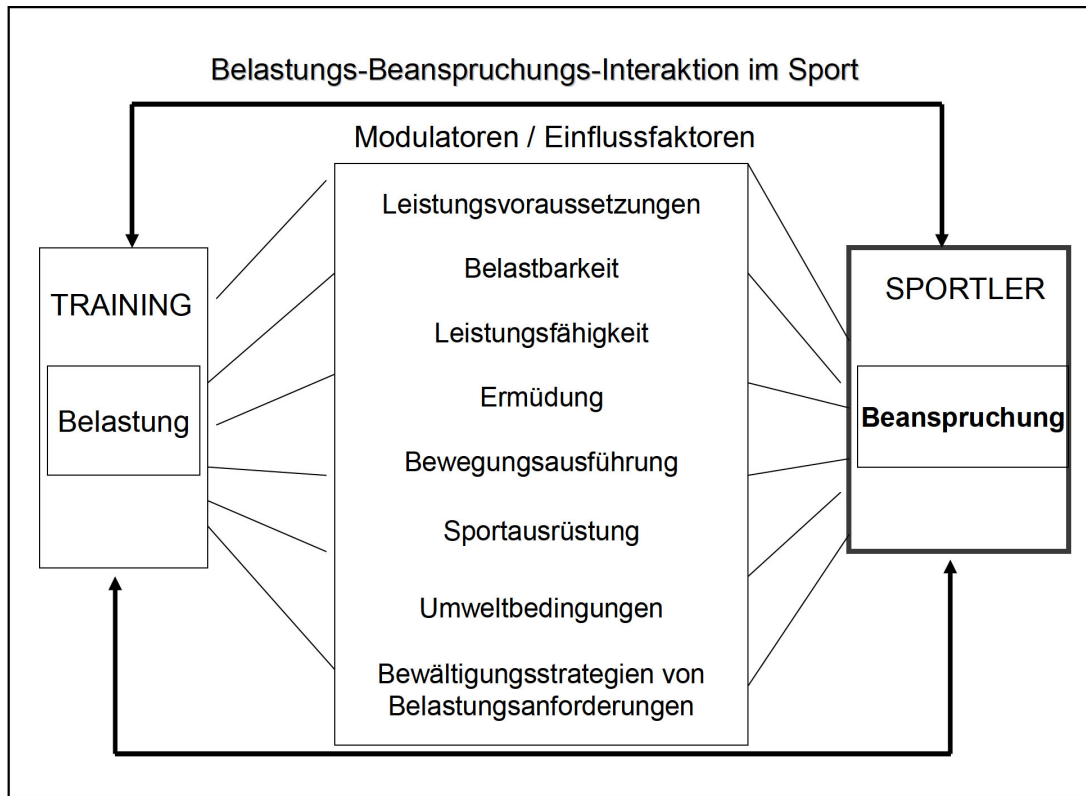


Abbildung 2. Modell der Belastung- und Beanspruchungs-Interaktion im Sport (nach Hottenrott & Neumann, 2010, S. 76).

Die im Modell von Hottenrott & Neumann (2010) dargestellte Interaktion von Belastung und Beanspruchung wird als komplexe Dosis-Wirkungs-Beziehung verstanden, die von einer Vielzahl von endogenen und exogenen Faktoren moduliert wird. Die interindividuelle Reaktion auf körperliche Interventionen und damit auch die interindividuelle Heterogenität des Outcomes werden durch mehrere Einflussgrößen verursacht, darunter veränderbare Faktoren (z. B. Ernährung, soziale oder kognitive Aktivitäten, Alltagsbewegung) und nicht veränderbare Faktoren (z. B. Geschlecht oder Alter). Je mehr Erkenntnisse über die auf den Organismus einwirkenden Variablen und deren Wechselbeziehungen untereinander bekannt sind, desto umfassender und präziser könne die Reaktion auf die Belastung vorhergesagt werden.

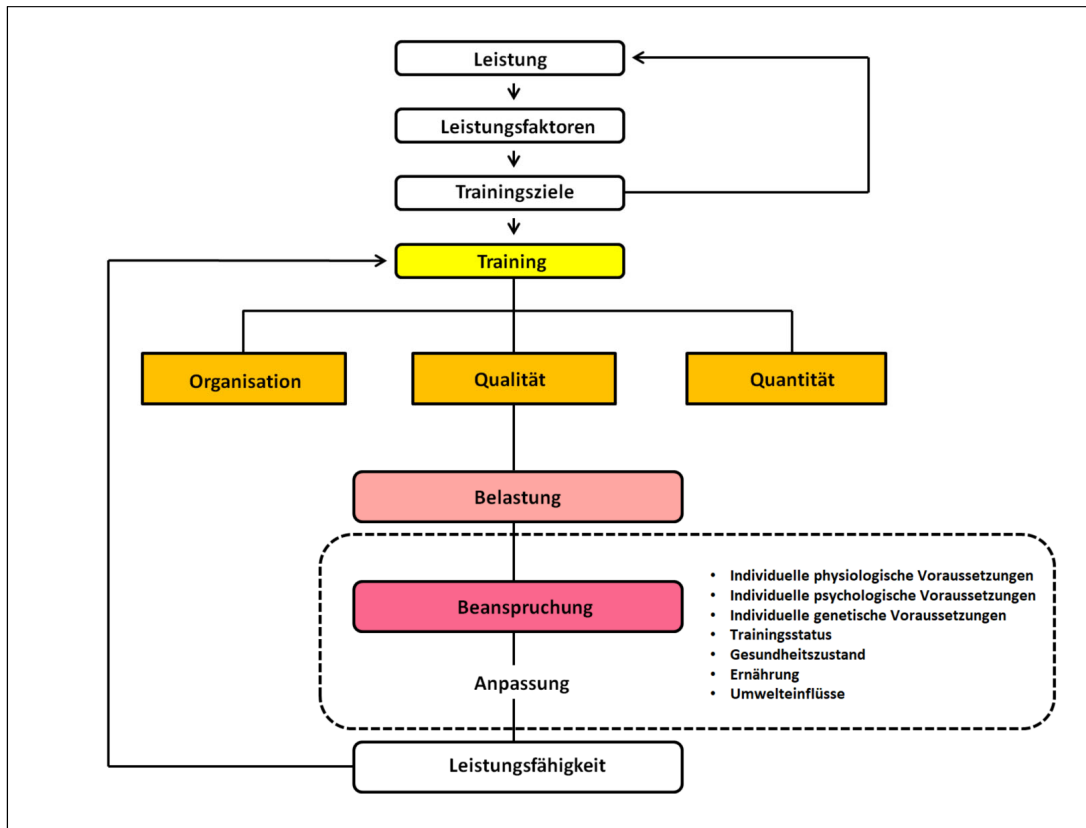


Abbildung 3. Theoretischer Rahmen für die Steuerung des Trainingsprozess (modifiziert nach Impellizzeri et al., 2019).

Gronwald et al. (2020) heben in ihrer Modelldarstellung hervor, dass neben den Dosis-Wirkungs-Beziehungen, vor allem die Dosis-Outcome-Beziehungen im Kontext von Belastung (external load), Einflussfaktoren (influencing factors) und der Beanspruchung (internal load) zu betrachten sind. Impellizzeri et al. (2019) haben das Konstrukt von Belastung und Beanspruchung in einen theoretischen Kontext der Trainingssteuerung verortet. Trainingsanpassungen sind das Ergebnis der Beanspruchung und seinen Einflussfaktoren und führen zu einer Veränderung des Outcomes bzw. der Leistungsfähigkeit. Dieser kann dann wiederum zur Modifikation des Trainingsprogrammes führen (Abb. 3). Neumann et al. (2013, S. 33) weisen in ihrer Modellbetrachtung von Belastung und Beanspruchung darauf hin, dass jede hohe und wiederholte psychophysische Beanspruchung durch Erholungspausen unterbrochen werden muss. Erfolge keine hinreichende Erholung, würden die neuen Trainingsreize auf einen noch ermüdeten Organismus treffen und die erwartete Adaptation mit Leistungszunahme bleibe aus oder verzögere sich. Dabei stellen Belastung und Erholung

ein äußerst komplexes Bedingungsgefüge aufgrund der vielen einfließenden Faktoren wie Schlaf, Regenerationsmaßnahmen, Ernährung auf den Erholungsverlauf dar.

Unbeantwortet bleibt in den dargelegten Modellen die Frage, welchen Einfluss das Geschlecht auf die beschriebenen Prozesse hat und ob es Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Athleten im Erholungsverlauf gibt. Das Modell von Kenttä und Hassmen (1998) ist vermutlich auf den Mann mittleren Alters projiziert, da dieser auch graphisch in der Darstellung gewählt wurde. Jedoch gehen aus der Literatur Hinweise hervor, dass sich die Erholung nach Ausdauerbelastungen bei Männern und Frauen unterscheiden können (vgl. Kap. 3.2). Welche Einflüsse Alter und Geschlecht auf die Beziehung von Belastung und Beanspruchung in Abhängigkeit des psychophysischen Erholungsverhaltens nach Ausdauerbelastungen haben, gehen weder aus den Modellbetrachtungen von Hottenrott & Neumann (2010) noch der von Impellizzeri et al. (2019) hervor. Insofern werden in den folgenden beiden Abschnitten die physische und psychische Erholung nach Ausdauerbelastungen näher betrachtet und Möglichkeiten einer Operationalisierung herausgearbeitet. In Kapitel 3 wird der Forschungsstand dahingehend geprüft, inwieweit sich die psychophysischen Erholungsprozesse nach Ausdauerbelastungen in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht bewerten lassen können.

2.2 Physische Beanspruchung und Erholung

Eine der ersten Arbeiten, die sich mit der organismischen Beanspruchung unterschiedlicher Funktionssysteme bei Ausdauerbelastungen und den anschließenden Erholungsverläufen auseinandersetzen, gehen auf Forschungserkenntnisse von Neumann (1988, S. 406) zurück. Er analysierte während mehrstündiger Ausdauerbelastungen die Störung des homöostatischen Regulationszustandes anhand kardialer, hormoneller und energetischer Parameter und dem anschließenden zeitlichen Verlauf bis zur Wiederherstellung der Homöostase (Abb. 4). Um die Reaktion und Beanspruchung auf eine Trainingsbelastung zu messen gibt es verschiedene Parameter, die für unterschiedliche Fragestellungen und Messzeitpunkte geeignet sind. Die physische Erholung lässt sich nicht in einem Parameter zusammenfassen.

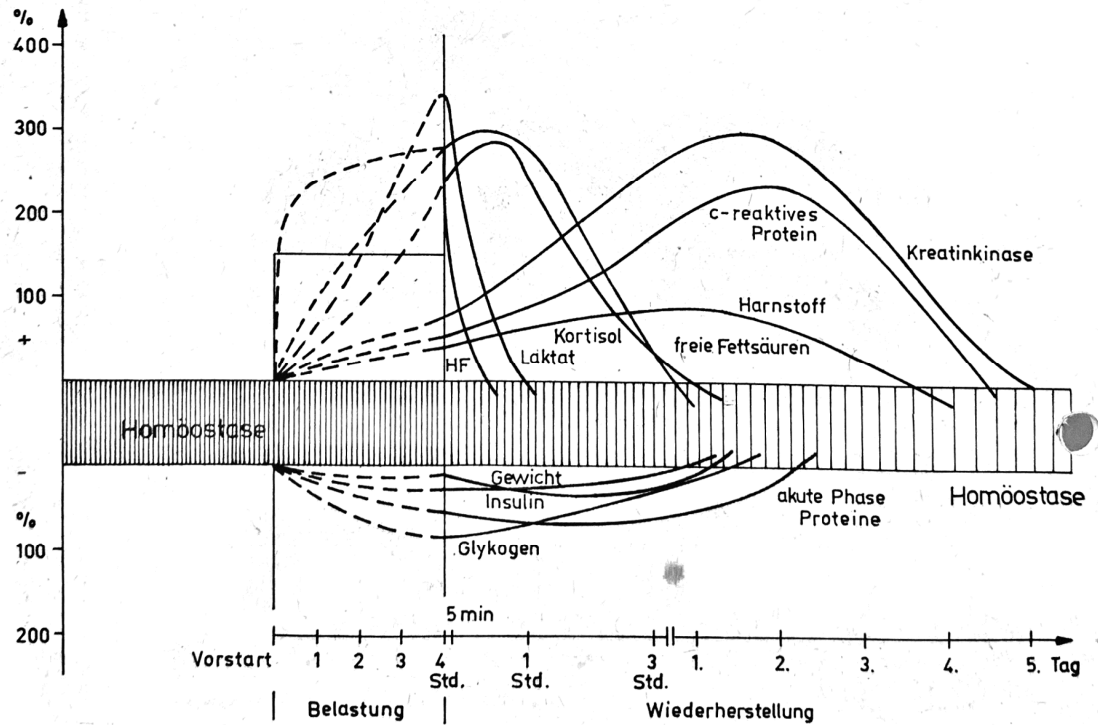


Abbildung 4. Störung und Wiederherstellung des homöostatischen Regulationszustandes des Organismus durch eine Langzeitausdauerbelastung (aus Neumann, 1988, S. 406).

Wie aus der Abbildung 4 hervorgeht, verläuft die Erholung in den einzelnen Funktionssystemen bis zum Erreichen des Ausgangszustandes (Homöostase) unterschiedlich schnell, was als Heterochronizität der Erholung bezeichnet wird. Zur Operationalisierung der Erholungsverläufe können unterschiedliche Parameter zugrunde gelegt werden. Für die schnellen physiologischen Erholungsprozesse (< 60 min) eignen sich die Veränderungen von Herzfrequenz (HF) und Laktat. Dabei ist zu berücksichtigen, ob die Erholung nach einer Belastung passiv oder aktiv gestaltet wird. Während die HF bei passiver Pause schneller sinkt als bei aktiver Pause, ist dies beim Laktatabbau genau umgekehrt. Abbildung 4 verdeutlicht, dass die Halbwertszeit für die Laktatelemination bei aktiver Pause 5 min und bei passiver Pause 15 min beträgt (Marées, 2003, S. 365). Der Frage nach Unterschieden im Laktatabbau von Frauen und Männern sowie Trainierten und Untrainierten wird im Kapitel 3 nachgegangen.

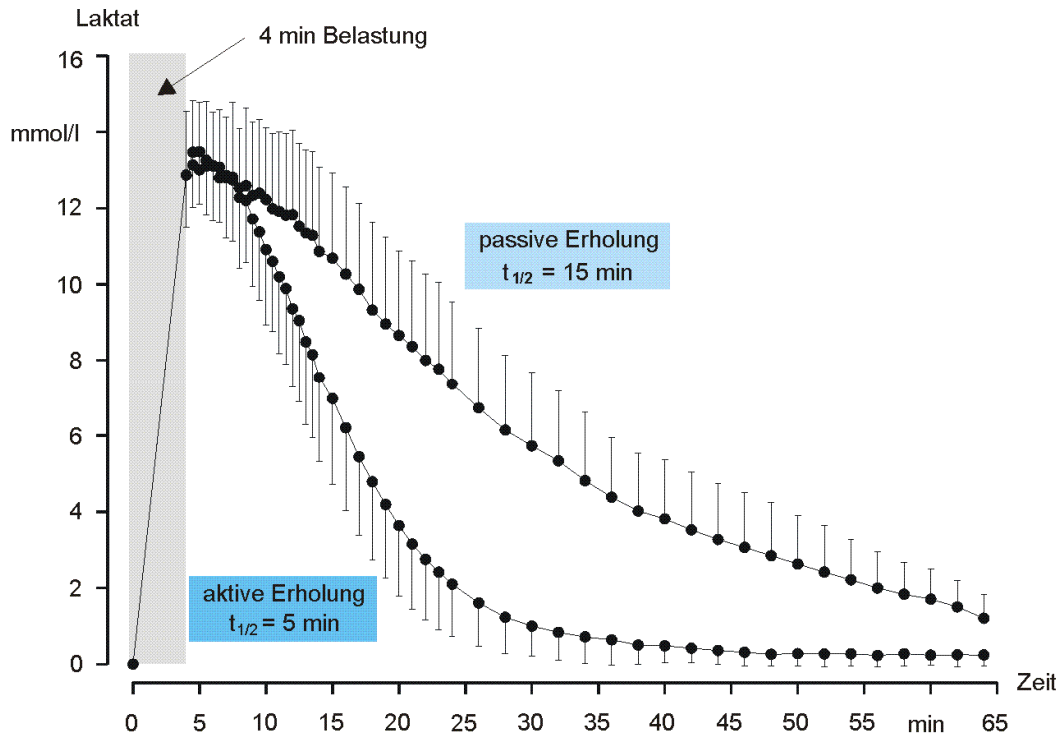


Abbildung 5. Laktatabbaurrate nach vier Minuten intensiver Belastung bei aktiver und passiver Erholung (aus Marées 2003, S. 365).

2.3 Psychisch-mentale Beanspruchung und Erholung

Wie aus dem Modell von Kenttä & Hassmenn (1998) hervorgeht, muss die psychisch-mentale Erholung nach Ausdauerbelastungen ebenfalls betrachtet werden, denn sie nimmt Einfluss auf den Verlauf der Erholung und die Gestaltung von Erholungspausen und Erholungsphasen. Mentale Erholung wird als ein Prozess der Zurückgewinnung von kognitiven Fähigkeiten (z. B. Konzentrationsfähigkeit) sowie der Wiederherstellung mentaler Leistungsfähigkeit während einer ausreichenden Erholungspause beschrieben (Balk et al., 2020). Ein mental ermüdeter Athlet befindet sich in einem biopsychologischen Zustand der mentalen Ermüdung, in welchem seine sportliche Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft eingeschränkt ist (Marcora et al., 2009). Ziel der mentalen Erholung ist es somit die Leistungsfähigkeit und -bereitschaft vor einem Wettkampf, vor intensiven Trainingseinheiten oder während eines hochintensiven Intervalltrainings (HIIT) wiederherstellen. Ein mentaler Ermüdungszustand lässt sich nach Van Cutsem et al. (2017) in drei unterschiedlichen Ebenen erkennen: der psychologisch-subjektiven Ebene, der Verhaltensebene sowie der physiologischen Ebene, wobei Letztere einzig über die Hirnaktivität zu operationalisieren ist. Eine tabellarische

Übersicht über die Ausprägungsebenen mentaler Ermüdung wurde von Loch & Kellmann (2020) erstellt (Tab. 1).

Tabelle 1. Kennzeichen eines mentalen Ermüdungszustandes (nach Loch & Kellmann, 2020).

Subjektiv-psychologische Ebene	Verhaltensebene	Physiologische Ebene
Stimmungs- und Gefühlsveränderungen	Rückgang der Leistungsfähigkeit	Veränderung der Gehirnaktivität
Negativer Gemütszustand	Eingeschränkte Konzentrationsfähigkeit	
Gesteigertes Müdigkeitsempfinden	Eingeschränkte Aufmerksamkeitsfähigkeit	
Aktivierungsmangel	Gedankliche Loslösung von anstehenden Herausforderungen	
Beeinflussung der Widerstandsfähigkeit	Sinkende Motivation	
	Reduzierte Begeisterung	

Meeusen et al. (2013) und Meeusen & De Pauw (2018) heben hervor, dass zu einer frühzeitigen Identifikation von Übermüdungs- und Beanspruchungssignalen die Erfassung der subjektiven Perspektive der Athletinnen und Athleten sehr wichtig sei. Für die Erfassung des mentalen Ermüdungszustandes auf subjektiv-psychologischer Ebene und der Verhaltensebene wurden umfangreiche psychometrische Diagnostikverfahren entwickelt. Eine Kategorisierung dieser Verfahren nach Anwendungsbezug, Konstrukt und Erfassungsgegenstand wurde von Kellmann et al. (2018b) vorgenommen (Tab. 2).

Zwei Skalen, die zur Operationalisierung der subjektiven Beanspruchung und des Erholungsempfinden im Sport vermehrt Anwendung finden, sind die RPE-Skala (rating of perceived exertion, nach Borg, 1998) und die TQR-Skala (total quality recovery, nach Kenttä und Hassmén, 1998). Mit der RPE-Skala wird das subjektive Beanspruchungsempfinden auf einer 15-stufigen Skala von 6 bis 20 (very, very light to very, very hard) bzw. in der modifizierten Kurzform auf einer 11-stufigen Skala von 0 bis 10 erfasst (Borg, 1998; Foster et al., 2021). Die TQR-Skala beschreibt den allgemeinen Erholungszustand der vergangenen 24 Stunden inklusive des Nachtschlafs ebenfalls auf einer 15-stufigen Skala von 6 bis 20 (very, very poor recovery to very, very good recovery) (Abb. 6).

Table 2. Kategorisierung von psychometrischen Diagnostikverfahren (nach Kellmann et al., 2018b, S. 442). Anmerkungen: POMS = Profile of Mood States; RPE = Rating of Perceived Exertion; TQR = Total Quality Recovery; DOMS = Delayed-onset Muscle Soreness (Visuelle Analogskala zum Muskelschmerzempfinden und Muskelkater); EBF-Sport = Erholungs-Belastungs-Fragebogen für Sportler; AEB = Akutmaß Erholung und Beanspruchung; KEB = Kurzskala Erholung und Beanspruchung. Die Bewertung des allgemeinen Erholungszustandes erfolgt eindimensional, während die Erfassung verschiedener Erholungsstrategien durchaus mehrdimensional erfolgt.

	Anwendungskontext		Erfasstes Konstrukt		Erfassungsgegenstand	
	Sport-spezifisch	Allgemein/klinisch	Ein-dimensional	Mehr-dimensional	Stressoren	Symptome
POMS		X		X		X
RPE	X		X		X	
Session-RPE	X		X		X	
TQR	X		X	(X) ⁻¹	(X) ⁻¹	(X) ⁻¹
DOMS	X	X	X			X
EBF-Sport	X		X		X	X
AEB/KEB	X			X		X

Die eindimensionale Skala der TQR wird in Untersuchungen zu Effekten von Trainingsintensität aber auch zur Überprüfung der Wirksamkeit verschiedener Regenerationsmaßnahmen verwendet (Nédélec et al., 2014; Osiecki et al., 2015; Ouergui et al., 2020; Pinar et al., 2012; Suzuki et al., 2006). Abweichend von der ursprünglichen Konzeption, die TQR vor dem Schlafen zu verwenden, wird diese Skala auch für Intervallprogramme herangezogen (Kinugasa & Kilding, 2009). Die TQR-Skala betont sowohl die Wahrnehmung der Erholung durch den Athleten als auch die Bedeutung aktiver Maßnahmen zur Verbesserung des Erholungsprozesses. Beide Skalen RPE und TQR dienen der Lenkung der Aufmerksamkeit auf psychophysiologische Beanspruchungen und können somit dazu beitragen die Selbstwahrnehmung zu steigern (Kellmann et al., 2018b). Die Sensibilisierung der Athleten für psychophysiologische Hinweise (Gemütszustände und Körpersignale wie Schmerzen,

Schweregefühl usw.) dient demselben Zweck wie dem, der RPE-Skala, nämlich der Verbesserung der Selbstwahrnehmung. Da es sich um eine hochindividuelle Messung handelt, sollte sie in erster Linie zur Erfassung intraindividuelle Veränderungen eingesetzt werden (Kenttä & Hassmen, 1998). Die Beziehung zwischen empfundenem Anstrengungsempfinden auf der Borg-Skala (Borg, 1998) und der Belastungsherzfrequenz bei unterschiedlicher Intensität in drei verschiedenen Altersgruppen ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Anstrengungsempfinden (RPE) ist eine individuelle Messgröße, wobei mit zunehmendem Alter

Ratings of perceived exertion (RPE)	Total quality recovery (TQR)
6	6
7 Very, very light	7 Very, very poor recovery
8	8
9 Very light	9 Very poor recovery
10	10
11 Fairly light	11 Poor recovery
12	12
13 Somewhat hard	13 Reasonable recovery
14	14
15 Hard	15 Good recovery
16	16
17 Very hard	17 Very good recovery
18	18
19 Very, very hard	19 Very, very good recovery
20	20

Abbildung 6. Die RPE-Skala (nach Borg, 1998) und die TQR-Skala (nach Kenttä & Hassmén 1998) in Gegenüberstellung.

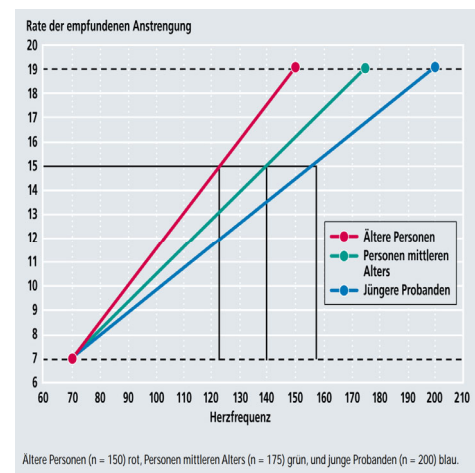


Abbildung 7. Schematische Darstellung der Beziehung zwischen Anstrengungsempfinden und der Herzfrequenz für Personen unterschiedlichen Alters (Borg, 2004).

bei gleicher Herzfrequenz eine höhere Beanspruchung wahrgenommen wird. Hintergrund ist die Abnahme der maximalen Herzfrequenz (HF_{max}) im Alter (Borg, 2004).

Die psychisch-mentalen Komponenten in der Belastung und der Erholung sind in der Trainingssteuerung ebenso zu berücksichtigen, wie die physiologischen Komponenten. Physische und psychische Parameter der Belastung und Erholung können zwar individuell ausgewertet und bewertet werden, jedoch kann sich der Organismus eines Sportlers nicht isoliert physisch oder psychisch beanspruchen bzw. erholen. Ein effektives Coping im Leistungssport bedarf der Wiederherstellung eines psycho-physischen Gleichgewichts (Stoll & Ziemainz, 2002). Dabei ist es erforderlich, parallel Erholungs- und Beanspruchungs-(Stress) Faktoren zu bewerten, da Stresszustände und Erholungsanforderungen miteinander verknüpft sind (Kellmann et al., 2018b). Mentalen Prozessen im Kontext von Belastung und

Beanspruchung räumt auch Schlicht (1989 und 1992) eine große Bedeutung in der Bewältigung von Belastungsreizen ein. Er hebt hervor, dass nicht nur physikalische Reize auf den Organismus einwirken und der Organismus nicht unabhängig physisch oder psychisch beansprucht werden kann. Bewältigung von Belastungsreizen erfolge über einen Bewertungsvorgang, der auf den vorhandenen Ressourcen beruhe und über die Wahrnehmung der Reizanforderungen entscheide (Pickenhain, 1992; Schlicht, 1992). Dies muss sich nicht immer in sichtbarem Verhalten äußern. „Auch über Vorstellungen, Umbewertungen und Neuinterpretationen kann Belastung gemindert werden, obwohl sich die objektive Situation nicht geändert hat“ (Schlicht, 1989, S. 14). Eine Schlüsselrolle bei der Entstehung von Stressreaktionen komme der Wirksamkeit und Angemessenheit von Bewältigungsmaßnahmen zu (Schlicht, 1989, S. 14). Die Wirkungen von Belastungen können zwar analytisch bezüglich physischer und psychischer Reaktionen bzw. Beanspruchungen unterschieden werden, jedoch wäre ein psycho-physischer Globalparameter als Indikator für die gesamtorganismische Beanspruchung und die Belastungssteuerung sehr hilfreich (Schlicht, 1992).

2.4 Monitoring der psychophysischen Beanspruchung und Erholung

Für eine ganzheitliche Betrachtung des Athleten müssen die separat beschriebenen physiologischen (Kap. 2.2) und psychologischen (Kap. 2.3) theoretischen Aspekte, die der Beanspruchung und Erholung zugrunde liegen, gemeinsam als psychophysiologische Prozesse messbar gemacht werden. Ein psychophysiologisches Monitoring, das die Untersuchung dieser Prozesse ermöglicht, besteht in der Bewertung des Aktivierungs- und Funktionsniveaus des Organismus unter Verwendung eines multidimensionalen Ansatzes (Fronso et al., 2017). Zu den am häufigsten verwendeten Methoden zur Erfassung des Beanspruchungs- und Erholungszustandes gehören aus psychologischer Sicht Selbstauskunftsfragebögen (vgl. Kap. 2.3) und aus psychisch-physiologischer Sicht Messtechniken wie die Elektromyographie (EMG), die Elektroenzephalographie (EEG), die Elektrokardiographie (EKG), die Analyse des Atemrhythmus und die Blutlaktatanalyse. Das EKG misst das elektrische Signal des Herzens und liefert Informationen über die Herzfrequenz (HF) bzw. die Herzfrequenzvariabilität (HRV). Die HRV wird verwendet, um das autonome Nervensystem (ANS) zu analysieren, der Teil des Nervensystems, dessen Funktionen weitgehend unbewusst bleiben. Damit spiegelt die HRV nicht nur den Einfluss von körperlicher, sondern auch psychisch-mentaler Beanspruchung auf den Körper wider (Böckelmann & Sammito, 2020). Es verbindet das zentrale Nervensystem mit nahezu allen Körperorganen und kontrolliert im Sinne eines zentralen autonomen Netzwerks

über das sympathische und parasympathische System die Funktionen der inneren Organe wie Herzschlag, Atmung, Verdauung, Blutdruck, Schweißsekretion. Das kardiovaskuläre System wird hauptsächlich von höheren Gehirnzentren (zentrale Steuerung) und kardiovaskulären Kontrollbereichen im Hirnstamm durch die Aktivität von Sympathikus- und Parasympathikusnerven gesteuert (Hainsworth, 1998). Die Kontrolle wird auch durch Barorezeptoren, Chemorezeptoren, muskelafferente Nerven und zirkulierende Hormone beeinflusst (Levy & Martin, 1984, S. 337-354).

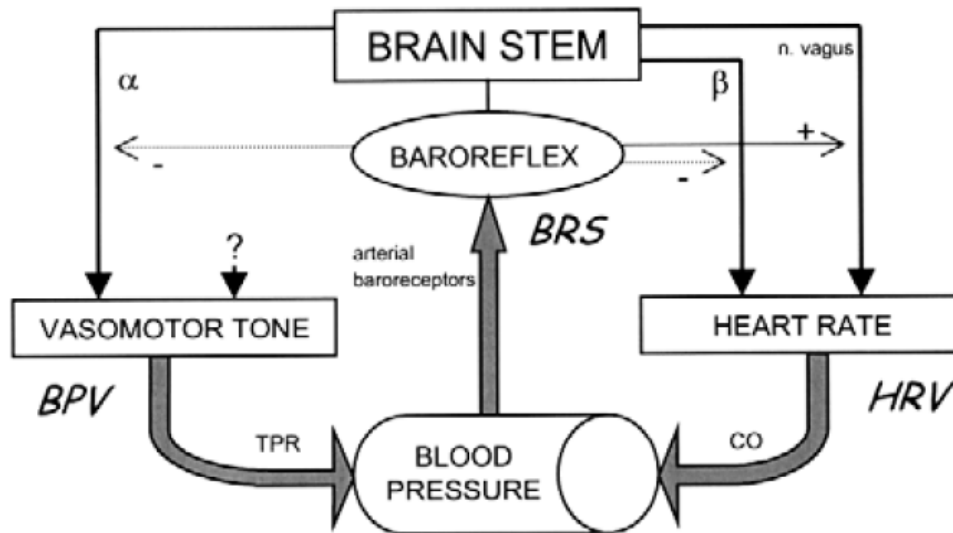


Abbildung 8. Diagramm zur Veranschaulichung der kardiovaskulären Kontrollmechanismen von Herzfrequenz und Blutdruck sowie des Rückkopplungsmechanismus des Baroreflexes. Dargestellt werden die unabhängigen Aktionen des vagalen, alpha-sympathischen und beta-sympathischen Systems. Ihre Wirkung kann durch Messung der HRV, des Blutdrucks (BPV) und des Baroreflex-Mechanismus (BRS) beurteilt werden (aus Aubert et al., 2003).

Die HRV wird als Marker der integrierten Endorganantwort des Herzens auf die komplexe, nicht-lineare Interaktion der sympathiko-vagalen Aktivität und anderer Faktoren gesehen (Billman et al., 2006). Verschiedene Parameter der HRV werden als Messgröße der neurovegetativen Aktivität und autonomen Funktion des Herzens genutzt und charakterisieren die Fähigkeit des Herzens und seiner integrierten Organsysteme, sich wechselnden Anforderungen schnell anzupassen. Die HRV ist damit eine Kenngröße für die Anpassungs- und Erholungsfähigkeit des menschlichen Organismus an exogene und endogene Belastungen und spiegelt zudem die Stärke der Interaktionen zwischen verschiedenen Organsystemen wider. Bei einer regelmäßigen Erfassung der Aktivität des autonomen Nervensystems über die HRV können Anpassungs- und Erholungsprozesse nach Ausdauerbelastungen evaluiert werden. Bisherige Studien belegen, dass sich im sportlichen Trainingsprozess ein guter

Erholungszustand in hohen Werten vagaler HRV-Parameter zeigt (Bellenger et al., 2016a; Buchheit & Gindre, 2006; Hausswirth & Mujika, 2013; Hautala et al., 2003; Hottenrott & Hoos, 2017; Le Meur et al., 2013). Ein Monitoring der psychophysischen Beanspruchung und des Erholungszustandes über die HRV ist ein vielversprechender Ansatz, da viele Faktoren (vgl. Abb. 8), welche die kardial-vagale Kontrolle beeinflussen, als Input für das zentrale autonome Netzwerk dienen. Je nach der Wirkung der einzelnen Faktoren reagiert das zentrale autonome Netzwerk, um den aktuellen Anforderungen gerecht zu werden. Der Einsatz der HRV-Analyse ermöglicht die Bewertung der Ressourcen des autonomen Nervensystems (Stephenson et al., 2021). Die komplexe Beziehungen zwischen dem zentralen autonomen Netzwerk, der kardialen vagalen Kontrolle und der HRV beeinflussen nach Laborde et al. (2018) unser Handeln und führen in einer reziproken Weise zu einer Rückkopplung mit dem vereinheitlichenden konzeptionellen Rahmen von Faktoren, welche die kardiale vagale Kontrolle beeinflussen. Neuronale Netze verbinden den präfrontalen Cortex mit dem Herzen, so dass sozusagen über den rationalen Verstand vegetative Veränderungen der vagalen Tonuslage mit Einfluss auf die Emotionsregulation bewirkt werden können (Steinfurth et al., 2013).

Zusammenfassend zeigen randomisiert kontrollierte Trainingsstudien und systematische Reviews, dass mit einem HRV-Monitoring die Zyklisierung von Belastung und Erholung im Trainingsprozess optimiert werden und damit Einfluss auf die Leistungsentwicklung in Ausdauersportarten genommen werden kann (Bellenger et al., 2016b; Grässler et al., 2021; Kiviniemi et al., 2007; Kiviniemi et al., 2010; Plews et al., 2012; Schneider et al., 2020).

3 Aktueller Forschungsstand

3.1 Altersbedingte Veränderungen im Kontext sportlicher Leistung und Erholung

Zu möglichen altersbedingten physiologischen und morphologischen Veränderungen gibt es verschiedene Theorien. Generell kann Ausdauersport protektiv auf die Alterungsprozesse, durch verschiedene potenzielle Mechanismen, wie eine Steigerung der antioxidativen Abwehr und eine Hemmung des mTOR-Signalweges durch die Aktivierung der AMP-aktivierten Proteinkinase (AMPK), wirken (Wackerhage et al., 2014, S. 239). Zu altersbedingten Veränderung mit negativer Wirkung auf die sportliche Leistungs- und die Erholungsfähigkeit werden vor allem die Abnahme der schnellen Muskelfasern und motorischen Einheiten (Glenmark et al., 1992), eine Verminderung des Muskelquerschnitts und der Anzahl an Satellitenzellen, sowie eine Veränderung der Muskelstruktur beschrieben (Bohm et al., 2018, S. 315; Faulkner et al., 2008; Ferrauti & Hottenrott, 2020, S. 551). Eine Abnahme der Muskelmasse und Muskelfunktion im Alter wird als Sarkopenie bezeichnet (Doherty, 2003; McCormick & Vasilaki, 2018; Narici & Maffulli, 2010; Rosenberg, 1997). Sie geht mit der Abnahme anabol wirkender Hormone (Finkelstein et al., 2013) und weiteren hormonellen und immunologischen Veränderungen, wie die Abnahme von Insulin-like growth factor 1 (IGF-1) und freiem Testosteron (Ratkevicius et al., 2011) einher. Ein Anstieg von Interleukin-6 (IL-6) (Ferrucci et al., 2002; Payette et al., 2003), Tumornekrosefaktor-alpha (TNF- α) und Myostatin (Häkkinen et al., 2000; Toth et al., 2005; Visser et al., 2002) werden diskutiert, jedoch konnten Ratkevicius et al. (2011) keine Veränderungen für Myostatin, IL-6 und TNF- α) feststellen. Es wird davon ausgegangen, dass die Veränderungen für beide Geschlechter zutreffen, obwohl bisher deutlich weniger veröffentlichte Daten über die altersbedingten Veränderungen bei Athletinnen vorliegen (Faulkner et al., 2008; Piasecki et al., 2021). Die Telomerdynamik von Leukozyten ist ein weiterer biologischer Indikator für den Alterungsprozess, welcher durch Training und Bewegung positiv beeinflusst werden kann (Cherkas et al., 2008; Wackerhage et al., 2014, S. 235).

In Bezug auf die Antwortreaktion der Satellitenzellen, haben Dreyer et al. (2006) Untersuchungen bei jüngeren und älteren Sportlern 24 Stunden nach einer Krafttrainingseinheit durchgeführt. Nach dem maximalen exzentrischen Beinkrafttraining kam es sowohl bei den jüngeren (>35 Jahre), als auch bei den älteren Teilnehmern (>60 Jahre) zu einem signifikanten Anstieg der Satellitenzellen und der Muskelfaserquerschnitte, allerdings war der Anstieg bei den Jüngeren signifikant höher, als bei den Älteren. Nach intensiven

muskulären Belastungen nimmt die Proteinsyntheserate im Altersgang ab, was sich bei älteren männlichen Sportlern durch eine individuell unterschiedlich nachlassende Testosteronbildung und bei Frauen durch eine nachlassende Androgenbildung und Abnahme des Östrogens erklären lässt (Häkkinen et al., 2000). Mit der Abnahme anabol wirkender Hormone ist auch eine Abnahme der Muskelkraft vorprogrammiert (Finkelstein et al., 2013). Die maximale Sauerstoffaufnahme nimmt sowohl bei untrainierten als auch bei trainierten Alterssportlern ab (Faulkner et al., 2008; Pollock et al., 1997), wobei bei Letzteren die Abnahme aufgrund der körperlichen Aktivität aus einem höherem Niveau erfolgt und auch nicht die niedrigeren Werte Untrainierter erreicht (Hawkins & Wiswell, 2003). Nach Hall et al. (1994) nehmen auch die Glukosetransporter Typ 4 (GLUT-4-Spiegel) mit zunehmendem Alter ab, wodurch der Glukosetransport verringert werden kann. Dies könnte ebenfalls die Leistungsfähigkeit und Erholung bei älteren Sportlern beeinträchtigen.

Die aktuelle Studienlage zum Einfluss von Alter auf das Erholungsverhalten nach Ausdauerbelastungen liefert wenige, uneinheitliche und zum Teil widersprüchliche Ergebnisse. Während Bieuzen et al. (2010), Easthope et al. (2010) und Sultana et al. (2012) in ihren Studien signifikante Unterschiede in der Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit zwischen jüngeren und älteren Sportlern fanden, kam es in den Studien von Fell et al. (2006), Fell et al. (2008) sowie Mageean et al. (2011) zu keinen Veränderungen. Jedoch konnten Darr et al. (1988) Unterschiede im Erholungsverhalten zwischen Trainierten und Untrainierten unabhängig vom Lebensalter nachweisen. In den meisten der wenigen Studien zu altersbedingten Veränderungen der sportlichen Leistungsfähigkeit und Erholung wurde die unterschiedliche Leistungsfähigkeit zwischen jüngeren und älteren Sportlern als konfundierende Variable unzureichend berücksichtigt, was die Aussagekraft dieser Studien limitiert.

3.2 Geschlechtsspezifische Veränderungen im Kontext sportlicher Leistung und Erholung

Anthropometrische und physiologische Unterschiede zwischen Männern und Frauen haben unmittelbaren Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit. Frauen haben im Vergleich zu Männern meist eine geringere Körpergröße, ein geringeres Körpergewicht, einen geringeren Muskelfaserdurchmesser, eine geringere Muskelmasse (Högler et al., 2008), eine geringere Konzentration von freiem Testosteron, ein kleineres Herz, ein geringeres Blutvolumen, weniger Hämoglobinmasse und damit eine verminderte Sauerstofftransportkapazität und maximale Sauerstoffaufnahme (Platen, 2011, S. 794; Podolsky & Ledl-Kurkowski, 2017). Auch bei Leistungsathleten im Ausdauersport konnten Prommer & Schmidt (2009)

geschlechtsspezifische Unterschiede im Gesamthämoglobin nachweisen. Das Gesamthämoglobin bei Frauen betrug im Mittel 12 g/kg und bei Männern 15 g/kg.

Der geschlechtsbedingte Leistungsunterschied ist zwischen den verschiedenen Sportarten unterschiedlich hoch. In der Leichtathletik ist die Leistungsdifferenz bis ins hohe Lebensalter in den schnellkraftgeprägten Disziplinen (Sprung, Wurf) höher als in den Ausdauer- und Schnelligkeitsdisziplinen (Neumann et al., 2018). Muskelbiopsische Vergleiche von Mittelstreckenläuferinnen und -läufern ergaben, dass der Muskelfaserdurchmesser der Läuferinnen deutlich kleiner ausfiel als der von Läufern (7.040 μm^2 versus 5.440 μm^2). Während das oxidative und glykolytische Potenzial (Citratsynthetase bzw. Phosphoglyceratkinase) der Läufer größer war, wiesen die Läuferinnen größere intramuskuläre Fetteinlagerungen (Triglyzeride) auf (Neumann & Buhl, 1981). Bei Ausdauersportlerinnen wurden während der Belastung eine höhere Fettoxidationsrate und ein niedrigerer Proteinkatabolismus (Leucinoxidation) festgestellt (Venables et al., 2005). Nach Untersuchungen von Hamadeh et al. (2005) führe ein höherer Östrogengehalt zu einer geringeren Kohlenhydratverstoffwechslung bei gleichzeitig höherer Fettoxidationsrate (bei längeren Distanzen). Die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Regulation der Fettoxidation sind noch von weiteren Faktoren abhängig, so vom Niveau der Geschlechtshormone, von den Katecholaminen, von der Muskelfaserverteilung, von der Regulation der Fettsäurefreisetzung sowie der vom Ausdauertraining abhängigen Aktivität der hormonsensitiven Lipase (Venables et al., 2005). Inwieweit sich diese physiologischen und morphologischen Unterschiede auf die Erholung bei Frauen auswirken, wurde bisher nicht systematisch aufgearbeitet. Einzelne Studien geben Hinweise auf geschlechtsspezifische Einflüsse, wobei die unterschiedliche Leistungsfähigkeit nicht hinreichend Berücksichtigung findet. In einer Studie zur Erholung nach Kurzzeit-Sprintintervallen wurde gezeigt, dass die Ermüdung der menschlichen Skelettmuskulatur geschlechtsspezifischen Einflüssen unterliegt. Die Muskulatur der Frau war ermüdungsresistenter und regenerierte schneller. Dies wurde bei der Verwendung verschiedener ermüdender, isometrischer Protokolle bei niedriger bis mittlerer Intensität beobachtet (Billaut & Bishop, 2009). Bei höheren Intensitäten konnten in einer älteren Studie Maughan et al. (1986) allerdings keine geschlechtsspezifischen Unterschiede nachgewiesen werden.

Insgesamt kann konstatiert werden, dass einzelne Erkenntnisse zur Frage des Einflusses von Alter und Geschlecht auf den Erholungsverlauf vorliegen, die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Untersuchten bei den jeweiligen Studien jedoch unzureichend beachtet

wurde. Insbesondere fehlen Erkenntnisse zum Erholungsverlauf nach Ausdauerbelastungen. Die bisher vorliegenden Studien kommen teilweise zu widersprüchlichen Ergebnissen, beschränken sich häufig nur auf muskuläre Veränderungen und betrachten den Erholungsverlauf nicht aus gesamtorganismischer Sicht. Auch kommen aufgrund fehlender Aktualität der Studien neuste Messmethoden zur Diagnose der Gesamtbelastung und Erholung häufig nicht zur Anwendung.

3.3 Theorien und Modelle zum Erholungsverlauf nach Ausdauerbelastungen

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Theorien und Modelle zu altersbezogenen Veränderungen der Erholung nach sportlichen Belastungen aufgegriffen und diskutiert. Besondere Beachtung finden dabei die Überlegungen von Fell & Williams (2008). Die Autoren erklären den verzögerten Erholungsverlauf im Alter durch einen trainingsbelastungsinduzierten höheren Muskelschaden und durch eine mögliche Verschlechterung bzw. Verlangsamung der körpereigenen Reparatur- und Anpassungsmechanismen und veranschaulichen ihre Überlegungen modellhaft (Abb. 9 und 10). Danach müsste bei vergleichbarem Trainingszustand ein älterer Sportler eine längere Erholungsphase einhalten als ein jüngerer Sportler und bei gleicher Trainingsbelastung müsste der ältere Sportler eine größere Muskelschädigung erfahren, wodurch sich wiederum ein längerer Erholungsbedarf ergäbe. Bei älteren Sportlern besteht nach Fell und Williams (2008) die Problematik darin, dass die Reparatur- und Erholungszeit nach einem ermüdenden Training länger sein könnte als bei jüngeren Sportlern, was die Anpassungsreaktion verlangsamen und möglicherweise einschränken könnte. Für ältere Athleten bestehe hierbei ein erhöhtes Risiko für unzureichende Erholung und Übertraining, was einen allmählichen Rückgang der Leistung trotz Aufrechterhaltung der Trainingsbelastung zur Folge haben könnte (Fell & Williams, 2008).

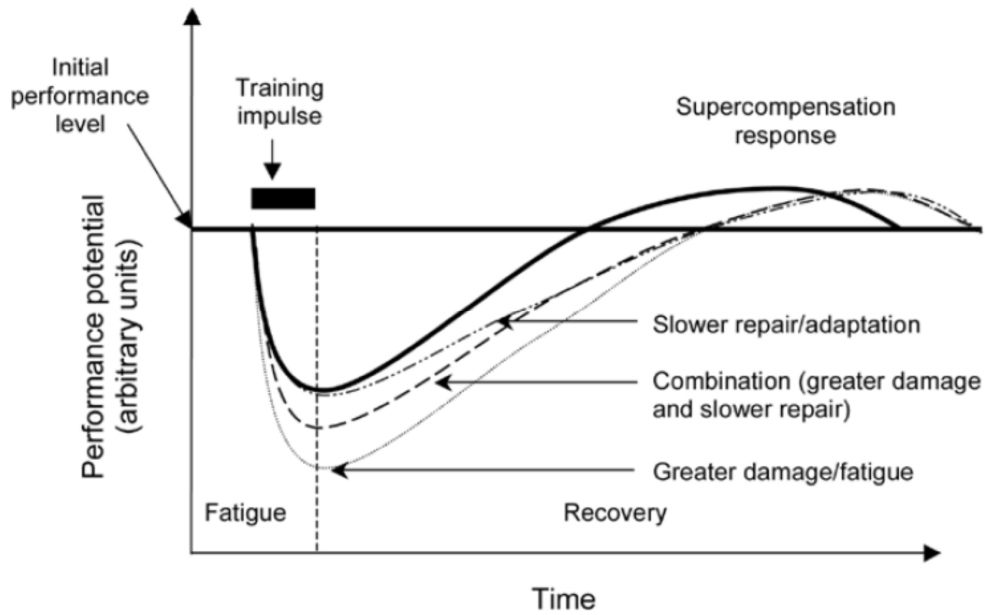


Abbildung 9. Theoretisches Modell des Zeitverlaufs der Wiederherstellung nach einem Trainingsimpuls. Die fette Linie skizziert den „normalen“ Verlauf, die gestrichelten Linien zeichnen mögliche Verläufe für ältere Athleten (Fell & Williams, 2008).

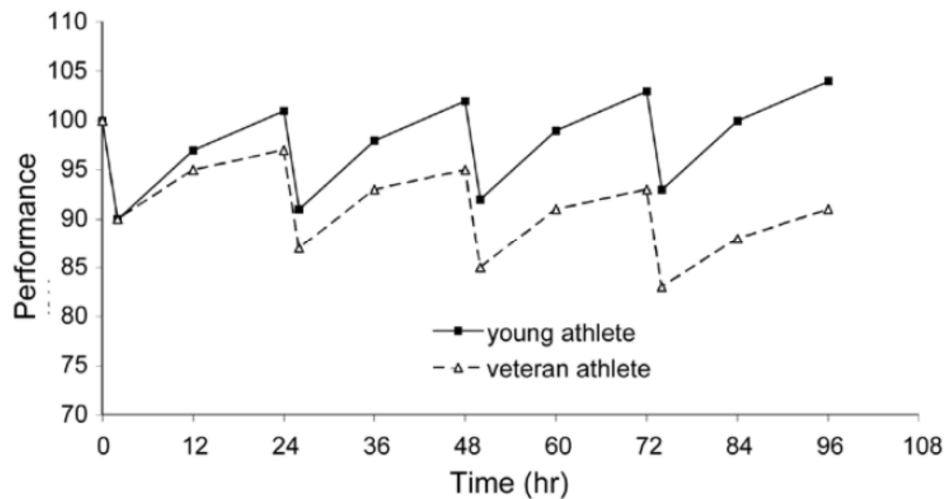


Abbildung 10. Hypothetisches Modell des Zeitverlaufs der Erholung (Wiederherstellung) bei jungen und älteren Athleten, bei welchem sich der ältere Sportler (Veteran) aufgrund der ungenügenden Erholung, in Richtung eines Übertrainingszustandes entwickelt (Fell & Williams, 2008).

Auch wenn es sich in den Abbildungen 9 und 10 um Modellvorstellungen zur Erläuterung der altersbedingten Veränderung im Erholungsverlauf nach einer ermüdenden Trainingsbelastung handelt, ist der Bezug auf das Prinzip der Superkompensation als Reaktion (response) auf einen Trainingsimpuls problematisch. Mit der Theorie zur Superkompensation lassen sich Anpassungsprozesse nicht erklären (Burniston et al., S. 54) und die Erholung bzw. Wiederherstellung nach sportlichen Belastungen verläuft in den einzelnen Funktions- und Organsystemen unterschiedlich schnell und zeigt auch nach vollständiger Erholung in der Regel keine überschießende Kompensation der Leistungsfähigkeit (Hottenrott & Neumann, 2010; Tschiene, 2006). Hinzu kommt, dass die theoretischen Überlegungen von Fell & Williams (2008) nicht durch Studien gesichert und durchaus kritisch zu bewerten sind. Unter Berücksichtigung der Kritik am Modell von Fell und Williams (2008) haben Hottenrott und Ferrauti (2020, S. 137) unterschiedliche Erholungsverläufe im Alter hypothetisch veranschaulicht (Abb. 11). Dabei wird angenommen, dass ältere Sportler nach Trainingsbelastungen einen stärkeren Muskelschaden (rote Linie) oder eine Verlangsamung der Reparatur- und Anpassungsmechanismen (blaue Linie) oder beides (braune Linie) im Vergleich zu jüngeren Sportlern (schwarze Linie) haben. Somit müsste bei vergleichbarem Trainingszustand ein älterer Sportler eine längere Erholungsphase als ein jüngerer Sportler einplanen. Darüber hinaus würde bei gleicher Trainingsbelastung der ältere Sportler eine größere Muskelschädigung erfahren, wodurch sich auch ein längerer Regenerationsbedarf ergäbe. Andererseits könnte die Erholung im Alter auch einen veränderten Verlauf durch eine geringere Ermüdung und verzögerte Regeneration haben (grüne Linie). Diese dargestellten hypothetischen Überlegungen sind jedoch bislang unzureichend durch Studien abgesichert, bei denen die altersbedingt unterschiedliche körperliche Leistungsfähigkeit als eine einfließende Variable angemessen berücksichtigt wurde. Vergleichbare Theorien und Modelle zum geschlechtsbezogenen Verlauf der Erholung sind nicht bekannt.

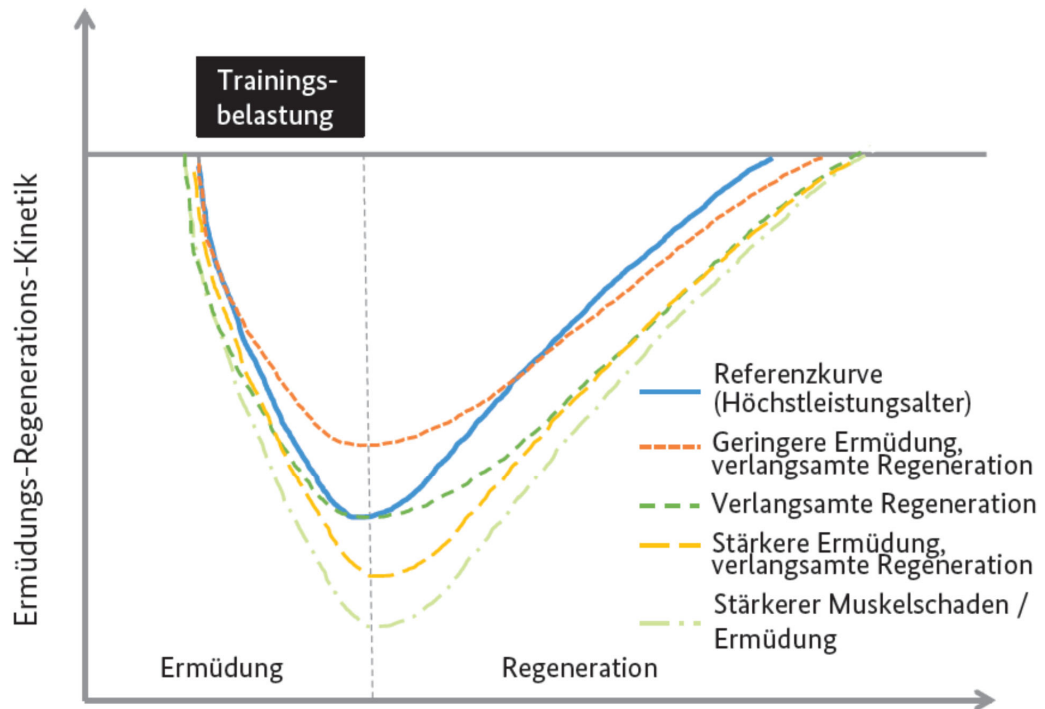


Abbildung 11. Theoretisches Modell zu unterschiedlichen Zeitverläufen der Ermüdung und Erholung älterer Sportler (farbige gestrichelte Linien) im Vergleich zu jüngeren Sportlern (schwarze durchgezogene Linie) nach einer intensiven Trainingsbelastung (Hottenrott & Ferrauti, 2020, S. 137), modifiziert nach Fell & Williams, 2008).

3.4 Veränderungen ausgewählter physiologischer Parameter in Abhängigkeit von Leistungsfähigkeit, Alter und Geschlecht

Im Folgenden wird der bisherige Kenntnisstand zum Erholungsverlauf nach Ausdauerbelastungen für die Parameter Herzfrequenz, Herzfrequenzvariabilität und Laktat in Bezug zu Alter und Geschlecht dargelegt. Die Auswahl dieser drei Parameter begründet sich mit dem hohen Anwendungsbezug in der sportwissenschaftlich begleiteten Erholungs- und Belastungssteuerung der Ausdauersportarten.

3.4.1 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz (HF) bei Ausdauerbelastungen ist eine repräsentative Messgröße und ein zuverlässiger Indikator für die Beurteilung der Beanspruchung des Herzkreislaufsystems, der Trainingswirkung oder des Gesundheitszustandes. Die HF reagiert schnell auf Veränderungen muskulärer Aktivität, d.h. mit zunehmender Intensität steigt die HF an. Die HF wird bei

Ausdauerbelastungen durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Zu den wesentlichen Einflussfaktoren auf die HF-Regulation gehören Lebensalter und Geschlecht, Herzgröße, Leistungsfähigkeit und Gesundheitszustand (Hollmann & Strüder, 2009, S. 519). Im höheren Lebensalter sind die HF-Anstiege bei körperlicher Belastung aufgrund abgeschwächter β -adrenerger Beeinflussbarkeit geringer (Klinke et al. 2005, S. 599). Der Verlauf der maximalen HF (HF_{max}) in Bezug zum Lebensalter wurde umfassend untersucht. Aus der Vielzahl der Arbeiten wird ersichtlich, dass die HF_{max} im interindividuellen Vergleich zum kalendarischen Alter eine hohe Streuung aufweist (Robergs & Landwehr, 2002). Die regressionsanalytisch bestimmten Formeln zur Berechnung der HF_{max} (Tanaka et al., 2001; Hottenrott & Neumann, 2012) unterscheiden sich in Abhängigkeit der untersuchten Population zum Teil erheblich von der vielzitierten Formel " $HF_{max}=220-\text{Lebensalter}$ " (Fox et al., 1971). Die Abnahme der HF_{max} mit dem Alter ist bei Trainierten geringer als bei Untrainierten. Verdeutlicht wird dies im flacheren Verlauf der Regressionsgeraden in der Beziehung HF_{max} und Lebensalter (vgl. Hottenrott & Neumann, 2012, Abb. 12).

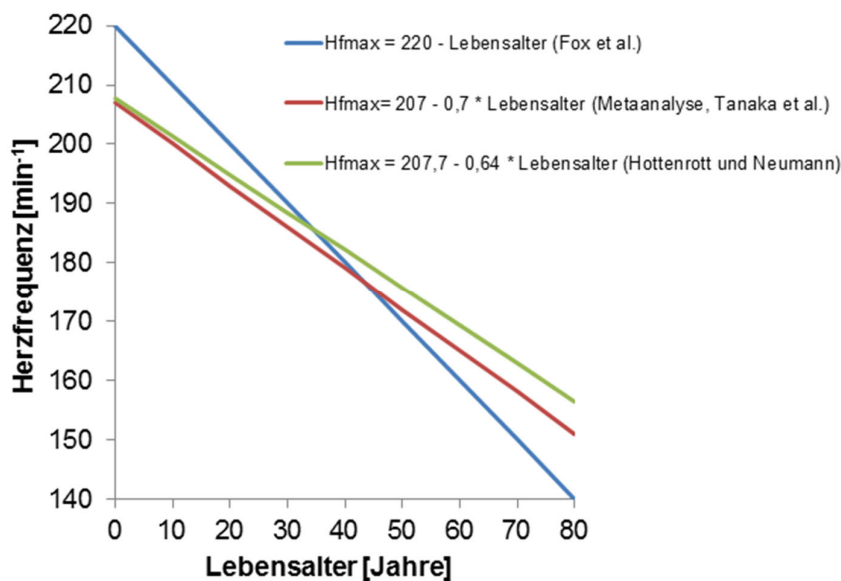


Abbildung 12. Regressionsgeraden zur Berechnung der maximalen Herzfrequenz nach Angaben von Fox et al. (1971), nach einer Metaanalyse von Tanaka et al. (2001) und nach einer empirischen Datenerhebung bei Ausdauersportlern von Hottenrott & Neumann (2010).

Herzfrequenzerholung und Leistungsfähigkeit

Das Herzfrequenzverhalten in der Erholungsphase nach körperlicher Belastung ist ein Maß der kardiovaskulären und allgemeinen Leistungsfähigkeit. Bei höherer Ausdauerleistungsfähigkeit

und bei zunehmender relativer Herzgröße (Sporthertz) ist die Herzfrequenzerholung beschleunigt (Israel, 1982, S. 88-89). Der Frequenzabfall in der ersten Erholungsminute wird durch eine vagale Reaktivierung bestimmt. Ein verzögerter Abfall ist ein Hinweis auf eine autonome Funktionsstörung (Löllgen, 2015). Die Dynamik des Abfalls der Herzfrequenz ist nicht linear, sondern zeigt in ihrer Anfangsphase den Verlauf einer Exponentialfunktion, deren Neigung von verschiedenen Bedingungen wie Leistungsfähigkeit, Ermüdungsgrad sowie Dauer und Intensität der vorausgegangenen Belastung abhängt (Hollmann & Strüder, 2009, S. 131; Israel, 1982, S. 88).

Herzfrequenzerholung und Alter

Der Erholungsverlauf der HF nach Trainingsbelastungen ändert sich mit dem Alter und wird vom Trainingszustand und der Leistungsfähigkeit des Herzkreislaufsystems mitbestimmt, wie dies in einigen Studien gezeigt werden konnte. Birat et al. (2018) untersuchten Erholungs- und Ermüdungsprozesse bei Kindern, untrainierten Erwachsenen und gut trainierten erwachsenen Ausdauersportlern nach einem 30 sec maximal Test auf dem Radergometer (Wingate Test). Der Erholungsverlauf der HF und des Laktats nach der Belastung waren bei Kindern und trainierten Erwachsenen schneller als bei untrainierten Erwachsenen. Darr et al. (1988) untersuchten die Herzfrequenzerholung nach einem maximalen Stufentest auf dem Rad bis zur Erschöpfung. Sie teilten 20 männliche Radfahrer auf der Grundlage ihres Alters und der VO_{2peak} in vier Gruppen ein: junge Trainierte, alte Trainierte, junge Untrainierte und alte Untrainierte. Während sie in den beiden trainierten Altersgruppen keine Unterschiede in der Herzfrequenzerholung feststellten, fanden sie Unterschiede in den untrainierten Altersgruppen. Die Herzfrequenzerholung war verzögert bei den Untrainierten im Vergleich zu trainierten Probanden. Der Herzfrequenzabfall war bei den trainierten Probanden etwa 6 Schläge pro Minute schneller als bei den Untrainierten, während kein Alterseffekt der HF beobachtet wurde. Aus den Studien kann zusammengefasst werden, dass die Herzfrequenzerholung primär vom Trainingszustand und weniger vom Alter abhängt.

Herzfrequenzerholung und Geschlecht

Die Herzfrequenzerholung weist nach Untersuchungen von Israel (1982, S. 117-119) in ihrer Beziehung zur trainingsabhängigen Herzgröße Geschlechtsdifferenzen auf. In der 4. Erholungsminute nach einer Ausbelastung war die HF der trainierten Frauen weniger stark abgefallen als die der trainierten Männer. Arena et al. (2010) untersuchten die Herzfrequenzerholung nach einem maximalen inkrementellen Lauftest bei untrainierten

Frauen mittleren Alters und altersgleichen untrainierten Männern. Die HF_{max} am Ende des Tests unterschied sich nicht zwischen den Geschlechtern, aber der Rückgang der HF in Minute 1 und Minute 2 war bei den Frauen signifikant geringer, d. h. die Herzfrequenz der männlichen Probanden sank schneller. Somit zeigt sich bei Frauen im Vergleich zu Männern eine langsamere kardiale Erholung nach Trainingsbelastungen.

3.4.2 Herzfrequenzvariabilität

Die Herzfrequenzvariabilität (HRV) kennzeichnet die Variation der zeitlichen Abstände von Herzschlag zu Herzschlag und ist eine Messgröße der neurovegetativen Aktivität bzw. der autonomen Funktion des Herzens (Löllgen, 2015). Die Schlag-zu-Schlag-Frequenz (RR-Intervalle) des Herzens ändert sich fortlaufend, um sich den wechselnden Bedingungen anzupassen. Über die Einflußnahme der positiv chronotropen (antreibenden) Wirkung des Sympathikus, sowie der negativ chronotropen (bremsenden) Wirkung des Parasympathikus und deren Neurotransmitter (Adrenalin/Noradrenalin bzw. Acetylcholin) auf die intrinsische Aktivität der Schrittmacherzellen des Sinusknoten, kommt es zur permanenten Veränderung in der Geschwindigkeit des Herzschlags, was im Begriff der HRV zum Ausdruck kommt. Die hochfrequente vagale Innervation des Sinusknoten führt zur Verlangsamung und schnellen Absenkung der HF beispielsweise nach einer starken körperlichen Belastung und ist in der Lage, die chronotropen sympathischen Einflüsse zu inhibieren (Levy & Warner, 1994). Die parasympathischen Aktivierungsprozesse erfolgen sehr schnell und mit geringer Verzögerungszeit von nur etwa 0,5 Sekunden auf den Sinusknoten. Dem gegenüber verlaufen die sympathischen Aktivierungsprozesse relativ träge und mit einer langen Latenzzeit von etwa 4-5 Sekunden. Die Impulse des Sympathikus benötigen etwa 15-20 Herzschläge bis zur vollen Entwicklung (Wittling & Wittling, 2012, S. 121).

HRV in Bezug auf Alter und Geschlecht

Viele Studien mit einer großen Anzahl von Probandengruppen haben sich mit dem Einfluss von Alter und Geschlecht auf den kardialen autonomen Tonus anhand mehrerer HRV-Parameter beschäftigt (Abhishekh et al. 2013; Antelmi, et al. 2004; Reardon, & Malik, 1996; Ryan et al., 1994; Tasaki et al., 2000; Umetani et al., 1998; Voss et al., 2015). Sammito und Böckelmann (2017) haben in einer Untersuchung mit 673 gesunden untrainierten Personen im Alter von 20 bis 60 Jahren bei einer 5-minütigen Ruhemessung zeigen können, dass es sowohl einen altersabhängigen als auch einen geschlechterabhängigen Einfluss auf die HRV gibt. Es zeigt sich im Vergleich der Perzentile, dass Frauen gegenüber Männern und Ältere gegenüber Jüngeren

tendenziell erniedrigte HRV-Parameter aufweisen. Das Fazit aus den Studien ist: 1. das Alter verringert das globale Maß der HRV in Ruhe. Dieser Rückgang könnte eine geringere Reaktionsfähigkeit der autonomen Aktivität im Alter widerspiegeln. 2. Alle HRV-Parameter, mit Ausnahme der High-Frequency-Power, waren bei Männern in den Altersgruppen unter 40-50 Jahren höher. Beispielhaft seien hier die Studienergebnisse von Umetani et al. (1998) dargelegt (Tab. 3).

Tabelle 3. Auswirkungen des Geschlechts auf die 24-Stunden-Herzfrequenzvariabilität und die Herzfrequenz in vier Altersgruppen (Umetani et al., 1998).

Age (yr) and Gender	SDNN (ms)	SDANN (ms)	SDNN Index (ms)	rMSSD (ms)	pNN50 (%)	HR (beats/min)
10-29						
M	*[182 ± 35	*[162 ± 33	*[88 ± 20	*[53 ± 18	*[26 ± 13	*[76 ± 10
F	*[147 ± 43	*[133 ± 42	*[66 ± 18	*[43 ± 18	*[17 ± 12	*[83 ± 8
30-49						
M	*[146 ± 30†	*[131 ± 31†	*[65 ± 14†	34 ± 13†	13 ± 10†	*[76 ± 7
F	*[129 ± 30	*[114 ± 31	*[58 ± 13	31 ± 10†	10 ± 7†	*[79 ± 7
50-69						
M	117 ± 30†‡	104 ± 28†‡	46 ± 18†‡	22 ± 8†‡	4 ± 5†‡	78 ± 11
F	125 ± 29	114 ± 29	49 ± 11†	25 ± 7†	5 ± 4†	74 ± 10†
70-99						
M	123 ± 24†	109 ± 28†	43 ± 12†‡	22 ± 5†‡	3 ± 2†‡	72 ± 11
F	114 ± 23†	102 ± 22†	38 ± 10†‡	22 ± 8†‡	4 ± 4†‡	73 ± 8†‡

*p < 0.05, male (M) versus female (F) in same age range. †p < 0.05, other groups versus age range 10 to 29 years for same gender. ‡p < 0.05, other groups versus age range 30 to 49 years for same gender. Data presented are mean value ± SD. Other abbreviations as in Table 2.

Die Abnahme der HRV mit dem Alter ist aber auch das Ergebnis von Lebensstilfaktoren und nicht nur von Alterungsprozessen wie es u.a. aus den Studien von Yataco et al. (1997) und Buchheit et al. (2004) hervorgeht. Einen geschlechtsspezifischen Unterschied bei Nachwuchssportlern ermittelten Hedelin et al. (2000). Sie verglichen Kurzzeit-HRV-Aufzeichnungen bei 17 Skilangläufern (9 Frauen, 8 Männer, 16-19 Jahre alt) vor und nach der Wettkampfsaison. Nach der intensiven Trainings-/Wettkampfsaison kam es zu einem allgemeinen Anstieg der HRV. Es wurde kein Unterschied in der Ruheherzfrequenz vor und nach der Saison festgestellt. Bei den Frauen wurde jedoch ein höheres Maß an parasympathischer Aktivität festgestellt als bei den Männern, was sich in einer durchweg höheren HF und Gesamtvariabilität widerspiegelte.

HRV in der Erholungsphase

Bisher gibt es zu alters- und geschlechtsspezifischen Unterschieden in Bezug zur HRV in der Erholungsphase nach sportlicher Belastung kaum Studienergebnisse. Kaltsatou et al. (2020) fanden Differenzen in der HRV während eines intermittierenden Trainings mittlerer Intensität in der Hitze bei körperlich aktiven jungen, mittelalten und älteren Männern. Dabei wurde die kardiale autonome Regulation bei intermittierendem Training in der Hitze sowie in der Ruhe- und Erholungsphase vor dem Training signifikant durch das Alter beeinflusst, was sich in einer signifikanten Dysregulation der kardialen autonomen Kontrolle bei dem intermittierenden Training in der Hitze mit moderater Intensität bei älteren Männern im Vergleich zu jungen Männern und Männern mittleren Alters zeigte.

Bestimmungen der Erholungsherzfrequenz und der HRV nach einem maximalen inkrementellen Belastungstest bei untrainierten Frauen und altersgleichen untrainierten Männern wurden von Kappus et al. (2015) durchgeführt. Die Erholungsherzfrequenz in der 1. und 2. Nachbelastungsminute (HRR1 und HRR2) waren bei Männern signifikant schneller als bei Frauen. Dem gegenüber war der vagale HRV-Parameter High Frequency bei den Frauen in der Erholung höher. Höhere HRV-Werte bei Frauen deuten auf eine stärkere vagale Modulation und möglicherweise eine ausgeprägtere vagale Reaktivierung nach maximaler Belastung hin.

HRV bei gesundheitlichen Störungen

Die uneingeschränkte Belastbarkeit des kardio-pulmonalen Systems ist bei Ausdauerbelastungen sicherzustellen. Gesundheitliche Störungen des Atem- und Herzkreislauf-Systems beeinträchtigen nicht nur die Leistungsfähigkeit, sondern können bei Fortsetzung des Trainings negative kurz- und langfristige Auswirkungen auf den Gesundheitszustand des Sportlers haben (Löllgen et al., 2018, S.411-412; Piper, 2013, S. 174-177). Insofern müssen Erkrankungen des kardio-pulmonalen Systems, insbesondere Virusinfektionen im Sport frühzeitig erkannt werden. Im Falle einer Virusinfektion wird von körperlicher Betätigung abgeraten (Roberts, 1986). In Europa sind Virusinfektionen die häufigste Ursache für eine Myokarditis (Linicus et al., 2016) und bei Sportlern kann eine Myokarditis eine Ursache für den plötzlichen Herztod und plötzlichen Herzstillstand sein (Harmon et al., 2016; Nieß et al., 2020, Piper, 2013, S. 125). Für das frühzeitige Erkennen von gesundheitlichen Störungen des kardialen Systems sind sensible Parameter und Messgrößen notwendig, die idealerweise vor dem Auftreten von körperlichen Symptomen bereits Hinweise

auf eine sich anbahnende Erkrankung geben und beispielweise den Verlauf einer Viruserkrankung bis zur vollständigen Genesung abbilden können (Löllgen, 2015; Piper, 2013, S. 59-80.). Es gibt bisher keine Studien, die HF- und HRV-Messungen bei Spitzensportlern untersucht haben, um den Gesundheitszustand während und nach einer Virusinfektion zu überwachen oder den Wiedereinstieg in das Training zu individualisieren.

3.4.3 Laktat

Laktat (Salz der Milchsäure) ist ein Stoffwechselzwischenprodukt, das vor allem bei intensiver muskulärer Arbeit entsteht, in andere Organkompartimente (Herz, Gehirn, Leber) und zur nichtbeanspruchten Muskulatur umverteilt und zum Teil auch während der Belastung per Oxidation oder Glukoneogenese (z.B. im Cori-Zyklus der Leber) wieder abgebaut werden kann (Röcker, 2013). Die Laktatkonzentration beträgt in Körperruhe durchschnittlich 0,8 mmol/l und kann zwischen 0,5-1,5 mmol/l schwanken (Westhoff et al., 2013). Die Laktatbildungsrate unterscheidet sich zwischen schnellen und langsamen Muskelfasern. In den fast twitch (FT) Muskelfasern beträgt die maximale Laktatbildungsrate 0,5 bis 0,9 $\mu\text{mol/g}\cdot\text{min}$ und in den slow twitch (ST) Muskelfasern 0,25 $\mu\text{mol/g}\cdot\text{min}$. Sportler mit einem höheren Anteil an FT-Fasern haben folglich eine stärkere Laktatbildungsfähigkeit (Gollnick et al., 1973; Costill et al., 1976). Der FT-Muskelfaseranteil unterscheidet sich auch zwischen Männern und Frauen. Roepstorff et al. (2006) konnten bei jungen Frauen und Männern gleichen Alters und gleicher $\text{VO}_{2\text{peak}}$ von $65,0 \pm 1,7$ versus $63,4 \pm 0,8 \text{ ml} \cdot (\text{kg LBM})^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ einen hoch signifikant höheren Anteil an ST-Fasern von $67,9 \pm 3,6 \%$ bei den untersuchten Frauen im Vergleich zu den Männern mit $54,6 \pm 2,8 \%$ nachweisen. Darüber hinaus konnte in der Studie gezeigt werden, dass die Fettoxidation während des Trainings signifikant mit dem Anteil der ST-Muskelfasern korreliert, die Laktatkonzentration in Ruhe und bei aerober Belastung (60% $\text{VO}_{2\text{peak}}$) sich zwischen den Geschlechtern nicht unterscheidet.

Um die Auswirkung von Alter und Geschlecht auf die anaerobe glykolytische Kapazität bei älteren Athleten zu untersuchen, bestimmten Korhonen et al. (2005) die maximale Laktatkonzentration im Blut nach einem Sprint-Wettkampf bei männlichen und weiblichen Master-Athleten unterschiedlichen Alters. Untersucht wurden 81 Männer (40 - 88 Jahre) und 75 Frauen (35 - 87 Jahre), die an den Sprintwettbewerben der Leichtathletik-Europameisterschaften teilnahmen. Der maximale Laktatwert nach 400-m-Läufen zeigte sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen erst ab dem höheren Lebensalter einen annähernd linearen Rückgang mit dem Alter (Abb. 13 und Abb. 14). Die altersbedingten

Unterschiede in den maximalen Laktatwerten waren vor dem Alter von 70 Jahren nicht signifikant und es wurden keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede für die 400 m, 100 m und 200 m festgestellt. Die maximalen Laktatwerte korrelierten signifikant mit den Laufzeiten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse von Korhonen et al. (2005) zwar Alters-, nicht aber Geschlechtsunterschiede in den maximalen Laktatwerten bei Sprint-Wettkämpfen bei Master-Athleten nachweisen konnten.

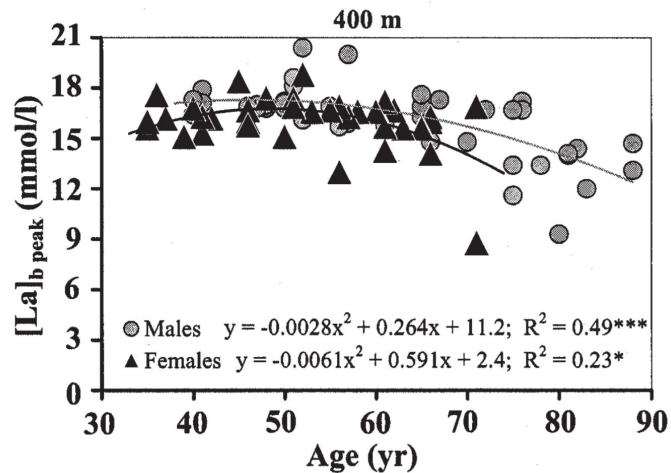


Abbildung 13. Zusammenhang zwischen Alter, Geschlecht und maximaler Blutlaktatkonzentration nach 400-m-Sprintrennen. Die Laktat-Werte nahmen unabhängig vom Geschlecht signifikant mit dem Alter ab. * $p < 0,05$, *** $p < 0,001$ (Korhonen et al., 2005).

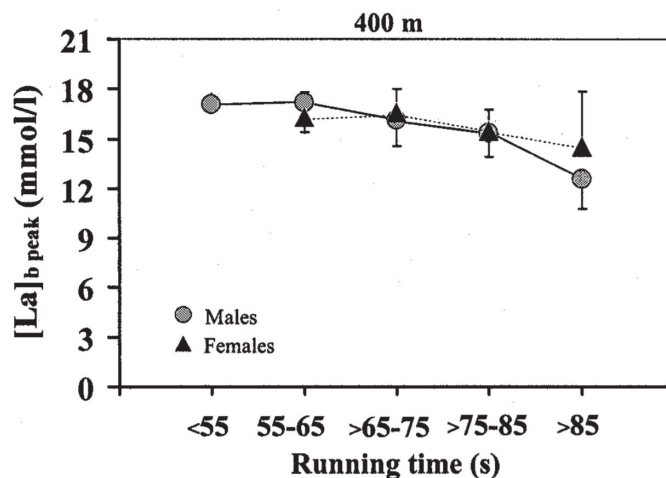


Abbildung 14. Mittelwerte und Standardabweichung der maximalen Blutlaktatkonzentrationen nach 400-m-Sprintrennen von Männern und Frauen mit gleichen Laufzeiten. Die Laktatkonzentrationen unterscheiden sich zwischen den Geschlechtern statistisch nicht (Korhonen et al., 2005).

Laktat in der Erholungsphase

Nach einer maximalen Ausbelastung wie in den Sprintdisziplinen der Leichtathletik, des Schwimmens oder des Radsports steigt in der anschließenden Erholungsphase die Laktatkonzentration im Blut weiter an (Gleeson, 1996). Bei intensiven Kurzzeitbelastungen führen hohe Anstiege der Laktatkonzentration zu einer zeitlich verzögerten Laktatausschwemmung, so dass die maximale Laktat-Konzentration im Blut oft erst nach 10-20 Minuten in der Erholung gemessen werden kann (Neumann & Schüler, 1994). Wie bereits in Kapitel 2.2 dargelegt, ist der Laktatabbau in der Nachbelastungsphase bei aktiver Erholung durch die höhere oxidative Stoffwechselrate schneller als bei passiver Erholung (Belcastro & Bonen, 1975). Die Elimination des Laktats erfolgt vorrangig in der beanspruchten Muskulatur, im Herzmuskel und der Leber. In der arbeitenden Muskulatur wird Laktat vor allem in den weniger beanspruchten Fasern mit hoher oxidativer Leistungsfähigkeit in den aeroben Stoffwechsel eingeschleust. Die Rate der Laktatelemination ist dabei abhängig von der Höhe des aeroben Umsatzes (Steinacker, 2010, S. 222). Somit hat während einer aktiven Erholungspause die Höhe der Intensität zugleich Einfluss auf die Abbaurate des Laktats. Bei wiederholten intensiven Belastungen, wie beim hochintensiven Intervalltraining (HIIT), inhibiert ein erhöhter Laktat-Spiegel die anaerobe Glykolyse und damit die anaerobe Leistungsfähigkeit. Dem kann durch eine aktive Erholungspause und der damit einhergehenden höheren Eliminationsrate entgegengewirkt werden (Wahl et al., 2009). Niedrigere Laktatwerte in der Erholungsphase, ermöglichen eine hohe Laktatbildungsrate (hohe anaerobe Leistungsfähigkeit) in den folgenden intensiven Wiederholungsbelastungen (Baldari et al., 2004).

Insgesamt lässt sich aus dem dargelegten Forschungsstand und der Studienlage konstatieren, dass sich die Forschung bisher unzureichend mit möglichen spezifischen Besonderheiten der Erholungsphase nach Ausdauerbelastungen von Leistungssportlerinnen auseinandergesetzt hat. Auch fehlen Erkenntnisse zum Einfluss des (Trainings-)Alters auf die Erholung.

4 Zielsetzung und Forschungsfragen

Vor dem Hintergrund der im Kapitel 3 dargelegten Forschungsdefizite ist das übergeordnete Ziel dieser kumulativen Dissertation, neue Erkenntnisse zur psychophysischen Belastung und Erholung im Ausdauersport unter besonderer Berücksichtigung von Alter und Geschlecht zu gewinnen. Dabei sollen mögliche alters- und geschlechtsbezogene Unterschiede in der psychophysischen Erholung von Ausdauersportlerinnen und -sportlern operationalisiert werden, um Trainingsbelastungen und Erholungszeiten individueller steuern zu können. Des Weiteren soll die Anwendung der kardialen autonomen Kontrolle für die Bewertung der psychophysischen Erholung und Belastbarkeit aus einer gesamtorganismischen Perspektive in Fallstudien mit Eliteausdauersportlern geprüft werden. Konkret sollen folgende Forschungsfragen mit dieser Arbeit beantwortet werden:

- 1. Inwieweit unterscheidet sich die psychophysische Erholung nach intensiven Intervallbelastungen von ausdauertrainierten Älteren und Jüngeren?*
- 2. Inwieweit unterscheidet sich die psychophysische Erholung nach intensiven Intervallbelastungen von ausdauertrainierten Frauen und Männern?*
- 3. Inwieweit lassen sich die psychophysische Erholung und Belastbarkeit im Ausdauerleistungssport mittels der kardialen autonomen Kontrolle individuell und differenziert bewerten und wie kann diese im Trainingsprozess Anwendung finden?*

Diesen drei Forschungsfragen widmen sich die folgenden fünf wissenschaftlichen Publikationen (Kap. 5), die im Rahmen dieser Dissertation in internationalen peer-review Fachzeitschriften und einem Kongressband veröffentlicht wurden.

5 Veröffentlichungen

In diesem Kapitel werden die veröffentlichten fünf Publikationen, die dieser kumulativen Dissertationsschrift zugrunde liegen, dargelegt. Alle Studienprotokolle wurden gemäß der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Die in den einzelnen Publikationen verwendeten Quellen werden nicht nochmal in das Gesamtverzeichnis dieser Schrift aufgeführt.

Publikation 1

Hottenrott, L., Ketelhut, S., Schneider, C., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A. (2021). Age-and sex-related differences in recovery from high-Intensity and endurance exercise: A brief review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(6), 752-762. <https://doi.org/10.3390/sports10010009>

Publikation 2

Hottenrott, L., Möhle, M., Feichtinger, S., Ketelhut, S., Stoll, O., & Hottenrott, K. (2022). Performance and recovery of well-trained younger and older athletes during different HIIT protocols. *Sports*, 10(1), 9. <https://doi.org/10.3390/sports10010009>

Publikation 3

Hottenrott, L., Möhle, M., Ide, A., Ketelhut, S., Stoll, O., & Hottenrott, K. (2021). Recovery from different high-intensity interval training protocols: Comparing well-trained women and men. *Sports*, 9(3), 34. <https://doi.org/10.3390/sports9030034>

Publikation 4

Hottenrott, L. (2021). HRV-Analysen im Liegen und Stehen (Orthostatic Test) bei Elite-Ausdauersportlern – eine Feldstudie. In K. Hottenrott, I. Böckelmann, & H. Schmidt (Hrsg.), *Herzfrequenzvariabilität: Anwendungen in Forschung und Praxis. Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft*, 292 (S. 152-159). Czwalina.

Publikation 5

Hottenrott, L., Gronwald, T., Hottenrott, K., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A. (2021). Utilizing heart rate variability for coaching athletes during and after viral infection: A case report in an elite endurance athlete. *Frontiers in Sports and Active Living*, 205. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.612782>

5.1 Publikation 1

Hottenrott, L., et al. (2021). Age-and sex-related differences in recovery from high-Intensity and endurance exercise: A brief review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(6), 752-762.

Age- and Sex-Related Differences in Recovery From High-Intensity and Endurance Exercise: A Brief Review

Laura Hottenrott, Sascha Ketelhut, Christoph Schneider, Thimo Wiewelhove, and Alexander Ferrauti

Postexercise recovery is a fundamental component for continuous performance enhancement. Due to physiological and morphological changes in aging and alterations in performance capacity, athletes of different ages may recover at different rates from physical exercise. Differences in body composition, physiological function, and exercise performance between men and women may also have a direct influence on restoration processes. **Purpose:** This brief review examines current research to indicate possible differences in recovery processes between male and female athletes of different age groups. The paper focuses on postexercise recovery following sprint and endurance tests and tries to identify determinants that modulate possible differences in recovery between male and female subjects of different age groups. **Results:** The literature analysis indicates age- and sex-dependent differences in short- and long-term recovery. Short-term recovery differs among children, adults, and masters. Children have shorter lactate half-life and a faster cardiac and respiratory recovery compared to adults. Additionally, children and masters require shorter recovery periods during interval bouts than trained adults. Trained women show a slower cardiac and respiratory recovery compared to trained men. Long-term recovery is strongly determined by the extent of muscle damage. Trained adults tend to have more extensive muscle damage compared to masters and children. **Conclusion:** The influence of age and sex on the recovery process varies among the different functional systems and depends on the time of the recovery processes. Irrespective of age and sex, the performance capacity of the individual determines the recovery process after high-intensity and endurance exercise.

Keywords: aging, endurance, recovery, sex differences, Wingate test

Postexercise recovery is a fundamental component of high-intensity and endurance exercise and is crucial for continuous performance enhancement. An acute bout of endurance exercise modulates different functional systems and leads to an increase in heart rate, lactate, body temperature, blood flow, and oxygen consumption. How fast the functional systems and homeostasis are restored postexercise depends mainly on the intensity, volume, frequency, and duration of the training stimulus.¹ While recovery may refer to short or long-term restoration, a clear categorization based on specific time frames cannot be provided due to the high intra- and interindividual variability of the recovery processes. The required time for recovery from training-induced fatigue and stress differs within and among the different organismic systems of the human body.² Some are fast-recovering systems (eg, cardiovascular and respiratory systems), and some are slower-recovering systems (eg, musculoskeletal system) and processes (eg, glycogen and protein resynthesis). In the process of aging, various changes occur in these systems. Furthermore, the exercise mode, different psychological and environmental factors, and various recovery methods may influence the recovery process.²

In the context of this review, we describe short-term recovery markers as measured in the first 2 hours postexercise (eg, blood lactate, oxygen uptake [VO₂], respiratory exchange ratio, heart-rate recovery [HRR], and heart-rate variability [HRV] indices) and long-term markers as measured 24 to 96 hours postexercise (eg, creatine kinase concentration, muscle soreness and recovery, hormone levels). Recovery processes are specific to the type of

exercise since the internal and external load profiles and exercise-induced fatigue in sports are very diverse. Impact sports like running have higher muscular load and induce greater muscle damage than nonimpact sports like cycling or swimming.

Furthermore, performance capacity and training history seem to have a major influence on the recovery process. It is known that well-trained endurance athletes recover more quickly than untrained athletes following a training session with the same external load. It is often discussed that age and sex may also influence the recovery process. However, the body of literature on this topic is limited and reveals conflicting results.³⁻⁶

It becomes evident that postexercise recovery is a complex process that is modulated and influenced by numerous individual and external determinants. Therefore, different factors must be considered when analyzing and discussing this topic.

This brief review aims to examine the most relevant previous research to outline possible differences in recovery processes between men and women of different ages. It will focus on studies investigating postexercise recovery following high-intensity and endurance exercise and will further review the influence of training status and performance level. Furthermore, it will discuss age- and sex-related physiological differences relevant to practical implications.

For this brief review, different databases (Web of Science, PubMed, Medline, Scopus, and Cochrane Review Databases) have been searched. Inclusion criteria were randomized clinical trials, quasi-experimental trials, and single-group pre-post intervention trials published in peer-reviewed journals (full text) assessing postexercise recovery after high-intensity and endurance exercise in athletes. Exclusion criteria were articles without empirical data, articles assessing nonathletes, and articles published in any language other than English and German. A total of 24 articles met the inclusion criteria.

Hottenrott, Schneider, Wiewelhove, and Ferrauti are with the Faculty of Sport Science, Ruhr-University Bochum, Bochum, Germany. Ketelhut is with the Inst of Sport Science, Martin Luther University of Halle-Wittenberg, Halle, Germany. Hottenrott (laura.hottenrott@rub.de) is corresponding author.

Age-Related Physiological Changes Relevant for Performance and Recovery

Throughout the entire life span (from childhood to adulthood to old age), different physiological and morphological changes lead to alterations not only in performance capacity but, moreover, in postexercise recovery processes.

Age-related physiological and morphological changes in the muscular system include the selective loss of fast muscle fibers and motor units, a decrease in muscle cross-section area and the number of satellite cells, and a change in muscle architecture.^{32,33} Concomitantly, hormonal and immunological changes (decrease of growth hormones, free testosterone, and insulin-like growth factor 1; increase of interleukin-6, tumor necrosis factor- α , and myostatin) are discussed.^{32–34} With aging, the rate of protein synthesis after intensive muscular exertion decreases, which can be explained by reduced testosterone production in older men and by a decrease in androgen production along with lower estrogen levels in older women.^{34,35} This decrease in anabolic hormones (gonadal steroids) results in lower muscle strength.³⁶ Maximum oxygen uptake decreases in both untrained and trained older subjects.³³ However, trained subjects with a higher physical fitness level can maintain this higher level compared to the untrained.³⁷

It is well established that maximal heart rate (HR_{\max}) decreases with age, as expressed in the equation $HR_{\max} = 220 - \text{age}$ or $HR_{\max} = 208 - 0.7 \times \text{age}$. There is substantial variation in HR_{\max} , predicted to a large extent by age and independent of sex.³⁸ The maximum lactic acid production rate, which is determined by the performance capacity or trainability of the fast muscle fibers,³⁹ decreases with aging.⁴⁰ Although the blood lactate peak levels of trained subjects are considerably higher than those reported for untrained subjects, anaerobic energy production from glycolysis declines in later years (>70 y) and might be a factor responsible for the deterioration in sprint performance.⁴¹

The decrease in muscle mass and shift toward a more oxidative muscle profile mediated by the atrophy of fast-twitch fibers during aging³² indicates a reduced creatine phosphate metabolic capacity and a decreased rate of glycolysis and lactic acid formation. It is also possible that the anaerobic energy output decreases with age due to reductions in key glycolytic enzymes, particularly phosphofructokinase.⁴² Furthermore, glucose transporter (GLUT-4) levels decrease with age, reducing glucose transport efficacy, possibly affecting performance and recovery in older athletes.⁴³ Therefore, training adaptation, decline in performance, and recovery in the process of aging vary among different sports (endurance sports vs strength and power disciplines).

According to Fell and Williams,⁵ an older athlete may require a more extended recovery period compared to a younger athlete with a similar performance level. When applying the same training load, the older athlete would experience greater muscle damage, which could result in a longer recovery period. The extent to which these physiological and morphological differences affect recovery in aging athletes has not yet been systematically investigated.

Sex-Related Physiological Differences Relevant for Performance and Recovery

Differences in morphology and bodily functions between men and women have a direct influence on exercise performance. The performance gap between the sexes varies according to the sport. In track and field, the performance gap is more pronounced in fast

power disciplines (jumping and throwing) compared to endurance and speed disciplines.⁴⁴ The higher percentage of muscle mass in men results in higher power production during exercise. While the exercise efficiency of men and women is usually similar, women have a better capacity to metabolize fat.⁴⁴

Compared to men, women have a smaller muscle fiber diameter and muscle mass,⁴⁵ a lower concentration of free testosterone, a smaller heart, lower blood volume, lower hemoglobin mass, and, thus, a reduced oxygen transport capacity and maximum oxygen uptake.^{46,47} Prommer and Schmidt⁴⁸ also found sex-specific differences in total hemoglobin mass in endurance athletes. The average total hemoglobin mass is 12 g/kg in women and 15 g/kg in men.⁴⁸ The average range for hematocrit (measured by the microhematocrit method) is 0.46 (0.40–0.53) for white males and 0.42 (0.36–0.48) for white females.⁴⁹ Comparisons of muscle biopsies and computerized tomographical scanning revealed that the muscle fiber diameter in females was significantly smaller than the diameter in males.^{47,50} While the oxidative and glycolytic potential (citrate synthase and phosphoglycerate kinase) in male athletes was higher, female athletes demonstrated larger intramuscular fat deposits (triglycerides).⁴⁷ In female endurance athletes, higher fat metabolism and lower protein catabolism (leucine oxidation) were observed during exercise.⁵¹ According to Hamadeh et al,⁵² the higher estrogen content in women led to a lower carbohydrate metabolism and a higher fat oxidation rate. Sex-specific differences in the regulation of fat oxidation depend on the level of sex hormones, catecholamines, muscle fiber distribution, regulation of fatty acid release, and endurance training-dependent activity of the hormone-sensitive lipase.^{51,53} The extent to which these physiological and morphological differences affect recovery in women has not been systematically investigated.

Effects of Aging on Recovery

Table 1 summarizes essential outcomes from studies investigating postexercise recovery following repeated sprint and endurance tests in younger and older subjects. This review refers first to children and youth aged 8–18 years, adults 18–40 years, and then masters (ie, seniors) 40–70 years of age. The age of peak performance in elite endurance athletes ranges up to 39 years.⁵⁴ Studies comparing the acute physiological responses between different age groups usually used short intensive bursts of exercise (eg, Wingate tests) or intermittent exercise protocols.

A study comparing children and adults with similar maximal VO_2 ($VO_{2\max}$) was performed by Zanconato et al.¹⁸ They examined the recovery of ventilatory parameters following 1-minute burst-exercise cycling tests at 5 different intensities in 10 children (9.0 [1.3] y) and 13 adults (32.6 [4.8] y). Only the test at the highest intensity (125 % $VO_{2\max}$) showed a delayed VO_2 recovery in older subjects. Hebestreit et al¹⁴ and Ohuchi et al¹⁵ were investigating possible age effects in children and adults with similar training status. Hebestreit et al¹⁴ examined 8 boys (10.3 [1.4] y) and 8 men (21.6 [1.6] y) with similar $VO_{2\max}$ and HR_{\max} following 2 cycling Wingate tests on 3 occasions with 1, 2, or 10 minutes of recovery between tests. Relative peak power output (PPO) during the Wingate tests was higher in adults than in children. Muscle power and total mechanical work recovered faster in children than in adults. Furthermore, the adults displayed a slower heart rate recovery (HRR) and respiratory recovery (respiratory exchange ratio, VCO_2 , VO_2 , and VE) compared to the children. The longer recovery period in adults can be attributed to their higher PPO.

Table 1 Summary of Studies Investigating Postexercise Recovery Following High-Intensity and Endurance Tests Comparing Younger and Older Subjects

Authors	Subjects	Age, y	Training status VO ₂ , mL/kg/min	Exercise-test protocol	Results during recovery (postexercise)
Birat et al ⁷	12 children (M) 12 adults (M) untrained 13 adults (M) trained	10.5 (1.1) 21.2 (1.5) 21.5 (2.7)	VO _{2max} 49.6 (7.9) VO _{2max} 48.1 (7.7) VO _{2max} 67.1 (6.9)	Cycling: WAnT (20-min sitting recovery)	PPO/BM: C < A (UT, T); Fatigue index: C = A(T) < A(UT) RPE: C < A (UT, T) HR _{peak} : C = A (UT, T) Lactate _{peak} : C < A (T) > A(UT) Time to reach lactate _{peak} : C < A(T) = A(UT) VO _{2post45-120s} : C < A(T) < A(UT) HRR1,2: C > A(T) > A(UT) HRR3,4,5: C > A(T) = A(UT)
Buchheit et al ⁸	10 Children (M) 6 Youth (M) 7 Adults (M)	9.6 (0.7) 15.2 (0.8) 20.4 (1.0)	VO _{2peak} 49.4 (7.2) VO _{2peak} 57.5 (6.8) VO _{2peak} 55.5 (5.7)	Cycling: (1) Maximal incremental test until exhaustion (2) 10 × 10-s all-out sprints, with 5-min passive recovery in between	(1) PPO: C < Y < A HR _{max} : C > Y > A Lactate: C < Y = A (2) MPO: C < Y < A MPO/BM: C < Y = A Lactate: C < Y = A H ⁺ : C < Y = A HRR1: C > Y = A (1) VO _{2max} : A > M (2) SBP: A = S VCO ₂ : A > S VE: A > S
Chamari et al ⁹	12 adults (M) 12 seniors (M)	24.8 (1.3) 65.1 (1.2)	Adults and seniors: Running and cycling 6–12 h/wk for at least 5 y	Cycling: (1) Maximal incremental test until exhaustion (2) Force-velocity test (6-s sprints, 5-min rest)	(1) VO _{2max} : A > M (2) SBP: A = S VCO ₂ : A > S VE: A > S
Darr et al ¹⁰	5 adults trained (M) 5 adults untrained (M) 5 seniors trained (M) 5 seniors untrained (M)	24 (2.4) 25 (2.6) 51 (1.8) 57 (4.0)	VO _{2peak} 63.3 (3.2) (T) VO _{2peak} 43.5 (2.4) (UT) VO _{2peak} 57.4 (3.2) (T) VO _{2peak} 35.5 (4.0) (UT)	Cycling: Maximal incremental cycling test until exhaustion	HRR (15–120 s): A = S HRR (15–120 s): T > UT HRR (120–240 s): A = S HRR (120–240 s): T > UT
Easthope et al ¹¹	10 adults (M) 13 seniors (M)	30.5 (7.0) 45.9 (5.9)	Running: 72.1 (25.1) km/wk, VO _{2peak} 58.8 (6.5) PB 03:02 (00:26) h 74.1 (23.6) km/wk, VO _{2peak} 55.0 (5.8) PB 02:58 (00:13) h	Running: 55-km trail competition Adults: 06:42 (00:51) hh:mm Seniors: 06:51 (00:47) hh:mm	MVC decrease pre-post: S > A (post 1, 24 h) Muscular contraction time: S > A (post 24, 48 h) LDH increase pre-post: S > A (post 24 h) CK increase pre-post: S > A (post 24 h)
Fell et al ¹²	8 adults (M) 1 adults (F) 8 seniors (M) 1 seniors (F)	24 (5.0) 45 (6.0)	Cycling 311 (59) km/wk VO _{2peak} 58.7 (5.0) Cycling 301 (96) km/wk VO _{2peak} 57.3 (4.3)	Cycling: 30-min TT on 3 consecutive days Adults: 3.49 (0.38) W/kg Master: 3.50 (0.36) W/kg	Average power: TT1 = TT3 Lactate: A = S Subjective markers: Motivation: A = S Fatigue: S > A Recovery: S < A Soreness: S > A
Fell et al ¹³	8 adults (M) 1 adults (F) 8 seniors (M) 1 seniors (F)	24 (5.0) 45 (6.0)	Cycling 311 (59) km/wk VO _{2peak} 58.7 (5.0) Cycling 301 (96) km/wk VO _{2peak} 57.3 (4.3)	Cycling: 30-min TT on 3 consecutive days Adults: 3.49 (0.38) W/kg Master: 3.5 (0.36) W/kg 10-s sprint test	Average power: TT1 = TT3 Lactate: A = S CK: A > S (trend) CMI: A = S Sprint: A = S MVIC: A = S

(continued)

Table 1 (continued)

Authors	Subjects	Age, y	Training status VO ₂ , mL/kg/min	Exercise-test protocol	Results during recovery (postexercise)
Hebestreit et al ¹⁴	8 children (M) 8 adults (M)	10.3 (1.4) 21.6 (1.6)	VO ₂ peak 49.6 (6.6) Maximal power 3.37 (0.47) W/kg VO ₂ peak 51.5 (6.6) Maximal power 4.04 (0.51) W/kg	Cycling: 2 × 30-s WAnT on 3 days with 1, 2, or 10 min recovery	Peak power: A > C % Fatigue during WAnTs: A > C Recovery rate (0–3 min) HRR: C > A Respiratory exchange ratio: C > A VCO ₂ : C > A VO ₂ : C > A VE: C > A
Ohuchi et al ¹⁵	7 children (M) 2 children (F) 6 adults (M) 2 adults (F)	10.4 (9–12) 19.1 (17–21)	VO ₂ max 41.6 (1.3) VO ₂ max 42.1 (2.2)	Running: (1) incremental treadmill test until exhaustion and (2) 4-min constant running test at anaerobic threshold	(1) HR _{max} : C = A (2) HR _{peak} : C = A HRR1: C > A in both tests HRR2: C > A (trend in (2))
Silverman & Mazzeo ¹⁶	8 adults (M) trained 8 youth (M) untrained 8 seniors 1 (M) trained 8 seniors 1 (M) untrained 8 seniors 2 (M) trained 7 seniors 2 (M) untrained	22.6 (0.8) 22.9 (1.0) 46.5 (0.9) 43.6 (1.1) 63.9 (1.8) 67.0 (2.2)	VO ₂ peak 62.5 (1.2) (T) VO ₂ peak 42.1 (2.6) (UT) VO ₂ peak 51.0 (1.7) (T) VO ₂ peak 35.5 (2.5) (UT) VO ₂ peak 43.5 (2.2) (T) VO ₂ peak 27.2 (1.6) (UT)	Cycling: (1) maximal incremental test until exhaustion (2) 45 min at lactate threshold (individual anaerobic threshold)	(1) HR _{max} : AT = AUT; SIT = SIUT; S2T > S2UT; A > S1 > S2 (T, UT) Lactate: T < UT (A, S1); S2T = S2UT; A = S1 > S2 (T, UT) Cortisol: T < UT (A, S1); S2T = S2UT; A > S1 = S2 (T, UT) Norepinephrine: T < UT (A, S1, and S2); S = S1 = S2 (T, UT) Epinephrine: T < UT (A, S1, and S2); A = S1 = S2 (T, UT) Growth hormone: T < UT (A, S1, and S2); A = S1 = S2 (T, UT) (2) Cortisol: T > UT (A, S1); S2T < S2UT; A > S1 = S2 (UT) Norepinephrine: T > UT (A, S1, and S2); A < S1 < S2 (UT) Epinephrine: T > UT (A, S1, and S2); A < S1 < S2 (UT) Growth hormone: T > UT (A, S1, and S2); A = S1 = S2 (T, UT)
Sultana et al ¹⁷	9 adults (M) 10 seniors (M)	28.4 (6.1) 52.4 (10.0)	Triathlon 15.4 (2.3) h/awk VO ₂ max 67.1 (3.7) Triathlon 13.6 (1.7) h/awk VO ₂ max 57.8 (8.7)	Triathlon competition (OD): Adults: 02:28 (00:10) h Master: 03:00 (00:29) h Strength and running tests 24 h pre and 24 h post	MVIC (pre and post): A = S Δ% decline pre vs post: HR _{max} : A = S VO ₂ max: A = S vVO ₂ max: A = S vVT1: A = S vVT2: A < S
Zaccanato et al ¹⁸	4 children (F) 6 children (M) 3 adults (F) 10 adults (M)	9.0 (1.3) 32.6 (4.8)	VO ₂ max 41.7 (5.8) VO ₂ max 41.5 (8.5)	Cycling: (1) Incremental cycling test until exhaustion (2) 1-min-burst exercise cycling test at 5 different intensities of %VO ₂ max	(2): Recovery rate VO ₂ : C = A (intensity 50%–100% VO ₂ max) VO ₂ : C < A (intensity 12.5% VO ₂ max)

Abbreviations: IRM, 1-repetition maximum; A, adults; BM, body mass; C, children; CK, creatine kinase; CMI, countermovement jump; F, female; FFM, fat-free mass; H+, hydrogen; HR, heart rate; HRR(1,2,3), HR recovery after 1, 2, or 3 min; LDH, lactate dehydrogenase; M, male; MPO, mean power output; MVIC, maximal voluntary isometric contraction; PB, personal best; PPO, peak power output; S, senior; SBP, systolic blood pressure; T, trained; TT, time trial; UT, untrained; VE, ventilatory; VCO₂, carbon dioxide production; VO₂, oxygen uptake; VO₂max, maximal VO₂; VO₂peak, peak VO₂; v, velocity; VT(1,2), ventilatory threshold (1,2); WAnT, Wingate anaerobic test; Y, youth. = indicates $P > .05$; trend indicates $P < .1$.

Birat et al⁷ assessed recovery and fatigue profiles in 12 children (10.5 [1.1] y), 12 untrained adults (21.2 [1.5] y), and 13 well-trained adult endurance athletes (21.5 [2.7] y) following a Wingate test. Postexercise recovery kinetics of VO_2 , HRR, and lactate in children and trained adults were faster than those of untrained adults. The fatigue index was comparable between children and endurance athletes (-35.2% [9.6%] and -41.8% [9.4%]) but lower than untrained adults (-51.8% [4.1%]) despite children taking more time to reach their maximal anaerobic power output. This is in line with the data obtained by Hebestreit et al.¹⁴ The authors concluded that children were metabolically comparable to trained adults and, thus, less fatigable during high-intensity exercise than untrained adults. Similarly, Buchheit et al⁸ observed a more rapid HRR in children, which appears to be related to their lower work rate and inherent lack of anaerobic metabolic capacity. Buchheit et al⁸ examined 10 children (9.6 [0.7] y), 6 youth (15.2 [0.8] y), and 7 adults (20.4 [1.0] y) performing 10 repeated 10-second all-out cycling sprints interspersed with a 5-minute passive recovery. Mean power output (MPO) was measured during each sprint, and HRR, lactate, and acidosis were determined immediately after each sprint. Children displayed a faster HRR than adolescents and men, with no difference between adolescents and adults. The MPO, lactate, and acidosis values were also lower in children compared with the other 2 groups. These findings are in line with the results of lower lactate and acidosis values and shorter lactate half-life in children versus adults following repeated running sprints.⁵⁵ Ohuchi et al¹⁵ examined 9 children (9–12 y) and 8 young adults (17–21 y) with similar $\text{VO}_{2\text{max}}$ and HR_{max} following an incremental treadmill test until exhaustion and a continuous 4-minute running test at the anaerobic threshold. In accordance with the results from Hebestreit et al,¹⁴ Ohuchi et al¹⁵ also demonstrated delayed recovery of HRR in adults compared to children.

The levels of recovery in 9 adult (28 [6.1] y; 67.1 [3.7] mL/min/kg $\text{VO}_{2\text{max}}$) and 10 master (52.4 [10] y; 57.8 [8.7] mL/min/kg $\text{VO}_{2\text{max}}$) triathletes following an Olympic distance triathlon were examined by Sultana et al.¹⁷ The average finishing times of the masters were 32 minutes slower compared to the adults. Athletes performed a strength and a running test 24 hours prior to and 24 hours postcompetition. Only the velocity at ventilatory threshold 2 was significantly lower in masters compared to adult triathletes (-8.3% vs -2.5%) 24 hours postcompetition, while muscular strength was not impaired. Easthope et al¹¹ investigated the rate of recovery after a 55-km trail running competition in 10 adult (30.5 [7.0] y) and 13 master (45.9 [5.9] y) athletes. Marathon personal records and performance (finishing time) in the trail running competition did not differ between the 2 age groups. Muscular strength (maximum voluntary isometric contraction [MVIC]) and biomarkers of muscle damage were assessed pre- and up to 72 hours postcompetition. The results revealed a stronger decrease in muscle strength and greater muscle damage (increase in creatine kinase [CK]) for the master athletes. The master athletes took a significantly longer time for the muscular function (MVIC) to return to pre-race values than the adult athletes. While trail running performance was similar, muscle recovery was delayed in master athletes.

No delay in recovery in 9 master cyclists (45 [6] y) compared to 9 adult (24 [5] y) cyclists in laboratory experiments was observed by Fell et al.^{12,13} Both age groups with similar $\text{VO}_{2\text{max}}$ performed three 30-minute time trials with similar absolute power output on 3 consecutive days. Results for average power, lactate, countermovement jumps, sprint performance, and MVIC showed no statistically significant differences between the 2 age groups. Only perceptual measures for fatigue and soreness were higher and perceptual recovery was lower in masters from the first to the third time trial.

Adults showed no significant change in perceptual measures from the first to the third time trial. These results suggest that master athletes perceive that they take a longer time to recover, even though they are able to physically recover at a similar rate compared to younger athletes of the same performance level. These results are supported by previous findings from Darr et al,¹⁰ who investigated HRR following a maximal incremental cycling test until exhaustion. They divided 20 male cyclists based on their age and $\text{VO}_{2\text{peak}}$ into 4 groups of young trained (24 [2] y; $\text{VO}_{2\text{peak}}$ 63.3 [3.2] mL/min/kg), old trained (51 [2] y; $\text{VO}_{2\text{peak}}$ 57.4 [3.2] mL/min/kg), young untrained (25 [3] y; $\text{VO}_{2\text{peak}}$ 43.5 [2.4] mL/min/kg), and old untrained (57 [4] y; $\text{VO}_{2\text{peak}}$ 35.5 [4.0] mL/min/kg). While they found no differences in HRR in the 2 trained age groups, they found differences in HRR in the untrained age groups. The HRR was delayed in untrained compared to trained subjects. The HRR was about 6 beats per minute faster in trained subjects than in untrained ($\text{VO}_{2\text{peak}}$ 60 vs 40 mL/min/kg), while no age effect of HRR was observed.

A study conducted by Chamari et al⁹ examined ventilatory recovery processes in 12 adults (24.8 [1.3] y) and 12 master endurance athletes (65.1 [1.2] y) following a maximal incremental cycling test and a force-velocity test (6-s sprint). The adults showed a higher VO_2 magnitude of response to the tests than the master athletes. Recovery of ventilatory parameters (VCO_2 and VE) after the force-velocity test was delayed in the master athletes. Silverman and Mazzeo¹⁶ examined 24 trained cyclists and 23 untrained men constituting of young (trained 22.6 [0.8] y, untrained 22.9 [1.0] y), middle-aged (trained 46.5 [0.9] y, untrained 43.6 [1.1] y), and old (trained 63.9 [1.8] y, untrained 67.0 [2.2] y) groups. They performed a maximal incremental cycling test and a 45-minute submaximal exercise test and analyzed plasma lactate, glucose, and hormone levels. Peak oxygen consumption was lower with age; however, all trained groups had higher values for $\text{VO}_{2\text{peak}}$ compared to untrained groups, regardless of age. Trained subjects had increased hormonal responses (cortisol, norepinephrine, epinephrine, and human growth hormone), as determined by plasma concentrations, to both maximal and submaximal exercise across all age groups. Additionally, during 45 minutes of submaximal exercise, older trained individuals were capable of similar responses in all hormones measured as their younger counterparts and showed significantly greater responses than the young and middle-aged untrained groups. Similar findings were observed during the maximal exercise testing such that older trained individuals demonstrated greater hormonal responses than the younger untrained groups. Thus, for a given metabolic stress as imposed in the present investigation, this would suggest that neuroendocrine responses are enhanced with higher fitness levels and that training throughout life may attenuate the decline in neuroendocrine function.

Taken together, HRR is independent of age but dependent on training status.^{7,10} The recovery of ventilatory parameters is faster in children than in adults.^{7,14} Studies with a different level of performance or training status revealed delayed recovery of VO_2 and VCO_2 for masters compared to adults.⁹ Studies matching performance levels ($\text{VO}_{2\text{max}}$) between adults and masters revealed a delayed muscular recovery and higher muscular damage during recovery in masters.¹¹ During the recovery process, the rate of lactate recovery and muscular power is about equal; the perceptual recovery, however, is delayed.^{12,13}

In summary, limited research has examined recovery processes from endurance exercise in younger compared to older athletes. In particular, studies including subjects over the age of

70, with females, and with bigger sample sizes are missing. Taken together, the present studies reveal inconclusive results. This may be due to the variety of performance tests (eg, Wingate test, time trial), measurement points, recovery parameters, pre-fatigue-levels, and statistical methods applied, which should be standardized in future studies according to the relevant outcome.

Effects of Sex on Recovery

Table 2 summarizes relevant parameters from studies investigating postexercise recovery following repeated sprint and endurance tests in male and female subjects. When comparing recovery processes between sexes, some methodological confounds must be considered. Often, males and females are not matched for absolute power output, although performance varies between males and females. For example, during a 30-s, supramaximal cycling test such as the Wingate anaerobic test, males develop much higher absolute PPO than females. These differences are reduced but remain significant when results are expressed relative to body mass or fat-free mass (FFM).

According to Esbjörnsson-Liljedahl et al²² and Weber et al,⁵⁶ women show a greater ability to maintain absolute power output. However, when the power output is expressed per unit of body-weight or FFM, sex-related differences in muscle fatigue were reduced. The results suggest that sex differences in fatigability during 30-second sprints are related to the greater initial power output of males rather than sex-related differences. Esbjörnsson-Liljedahl et al²² examined postexercise recovery following a single Wingate test in 16 females (21–24 y) and 16 males (19–42 y) using muscle biopsies. Ammonia (NH₃) concentration in the muscles was significantly lower in females. Esbjörnsson-Liljedahl et al²³ also examined 8 female (21–24 y) and 7 male (19–42 y) recreational athletes performing 3 times of 30-second Wingate tests. The researchers showed a significantly higher PPO (+30%) and MPO (+28%) in males compared to females during a repeated-sprint protocol consisting of repeated Wingate tests with 20 minutes between tests. Lower lactate levels were reported in women, and a significant decline in MPO from sprint 1 to 3 was reported in males only (–8%). These results with a small sample size suggest that females may have a greater ability to restore power between prolonged sprints separated by sufficient recovery periods (that is, greater maintenance of power). Results from muscle biopsies disclose lower glycogen in type I and lower adenosine triphosphate and inosine monophosphate in type II fibers in females post anaerobic exercise. However, it must be pointed out that the authors compared females and males of different ages, which is a major limitation of the study.

Gratas-Delamarche et al²⁴ examined differences in a small sample of 6 female (18.3 [0.7] y) and 6 male (19.5 [0.7] y) trained sprinters performing a Wingate test. Sex differences were observed to affect the metabolic and sympathetic nervous system response to supramaximal exercise. Females had lower plasma catecholamine (adrenaline) and lactate levels 5-minute post-Wingate test at a similar relative intensity compared to males. These sex differences could be attributed to an inhibitory effect of oestradiol on the sympathetic nervous system in females.⁵⁷ Furthermore, a reduced maximal activation velocity of glycolytic energy and a greater reliance on fat oxidation can contribute to muscle glycogen sparing and lower postexercise lactate concentration in females.^{22,24} Laurent et al²⁶ also examined significantly lower lactate levels postexercise in 8 females (21.8 [1.0] y) compared to 8 males (23.4 [2.5] y). Subjects had to perform 4 trials of a repeated-sprint

protocol consisting of 3 × 8 × 30 m with 24, 48, and 72 hours of recovery in between. They found no differences in HR_{max} and relative perceived exertion (RPE) across all 4 trials; however, the performance decrement across each trial was significantly lower in females, possibly supporting the argument of less initial power in females, which is also in line with the findings from Esbjörnsson-Liljedahl et al.^{22,23}

In contrast, Vincent et al³¹ found no differences in 5, 10, 20, and 30 minutes of post-Wingate tests in lactate and catecholamine levels in 8 physically active females (19.8 [0.7] y, VO₂max 42.5 [2.0] mL/min/kg) and 8 physically active males (22.0 [0.6] y, VO₂max 46.2 [2.4] mL/min/kg). Only glucose levels were significantly higher at 5 minutes post and insulin levels at 10 minutes post-Wingate test in females.

Mageean et al²⁷ had 11 female (19.7 [1.8] y) and 11 male team sport athletes (20.8 [1.1] y) with a matched VO₂max to FFM (58.9 [4.6] mL/min/kg in females vs 58.3 [4.3] mL/min/kg in males) perform a repeated-sprint cycling protocol of 5 × 6-second sprints with 30-second recovery in between. The VO₂ relative to FFM was significantly higher in females during a 5-minute active cooldown following the sprint protocol. In a study using messenger RNA (mRNA) analysis, Skelly et al³⁰ did not find significant sex-related effects in gene expression following repeated-sprint intervals in untrained females and males with a matched VO₂max to FFM (VO₂max to FFM 43.0 [10.0] mL/min/kg vs VO₂max to FFM 45.0 [7.0] mL/min/kg).

Arena et al²⁰ examined HRR following a maximal incremental running test in 126 untrained middle-aged females (47.0 [15.3] y) and 149 age-matched untrained males (48.1 [15.8] y). The HR_{max} at the end of the test did not differ between sexes, but the decline in HR at minute 1 (HRR1) and minute 2 (HRR2) was significantly lower in females—that is, male subjects' heart rate decreased more rapidly. Measurements of HRV and HRR following a maximal incremental exercise test in 40 untrained females (25.0 [1.0] y) and 31 age-matched untrained males (24.0 [1.0] y) were done by Kappus et al.²⁵ The HRR1 and HRR2 were significantly faster in males than females, and the vagal HRV parameter high frequency was higher in females. However, HR_{max} and VO₂max were higher in males and not sex-matched between subjects. Higher HRV values in females suggest stronger vagal modulation and potentially more pronounced vagal reactivation following maximal exercise. Results for HRR with sex-matched HR_{max} values at the end of an incremental cycling test in 17 untrained females (21.4 [1.8] y) and 21 untrained age-matched males (21.3 [2.2] y) are provided by Mendonca et al.²⁹ The results revealed a lower decline in HRR1 and HRR2 for females, yet the results were not significant. These results are in line with the findings by Arena et al²⁰ and Kappus et al.²⁵ Opposing results were found by Antelmi et al¹⁹ in 181 middle-aged untrained females and 204 males (mean age of females and males 42.0 [12.1]) following a maximal incremental running test with 2-minute active recovery (walking). The HRR1, HRR2, and HRR3 were faster in females. However, results for HR_{max} at the end of the running test were missing, and we cannot know if HR_{max} values were sex matched. Different HR_{max} values, no age-matched subjects, and the active recovery in contrast to passive recovery could explain these conflicting results. No significant sex-related differences in recovery in HRV and HRR were observed in untrained subjects (12 females and 13 males) in the first 5 minutes following a Wingate test.²⁸ Another HRV analysis during the first 10 minutes of recovery following a supramaximal judo test in elite judoka (8 females and 16 males) also found no sex differences in the examined HRV parameters.²¹ Zhang⁵⁸

Table 2 Summary of Studies Investigating Postexercise Recovery Following High-Intensity and Endurance Tests in Female and Male Subjects

Authors	Subjects	Age, y	Training status VO₂max, mL/kg/min	Exercise/protocol	Results during recovery (postexercise)
Antelmi et al ¹⁹	181 adults (F) 204 adults (M)	42.0 (12.1)	Untrained VO ₂ max < 44.9	Running Incremental treadmill test until exhaustion, 2-min active recovery (walking)	HR _{max} : M = F ? HRR1: M < F HHR2: M < F HHR3: M < F
Arena et al ²⁰	126 adults (F) 149 adults (M)	47.0 (15.3) 48.1 (15.8)	VO ₂ max: 33.4 (10.0) VO ₂ max: 43.1 (11.7)	Running Incremental treadmill test until exhaustion	HR _{max} : M = F HRR1: M > F HRR2: M > F
Blasco Lafarga et al ²¹	8 adults (F) 16 adults (M)	24.4 (0.97)	Spanish national judo team	Judo Supramaximal specific judo test	0–10 min postexercise HRV indices SDNN: M = F RMSSD: M = F lnHF: M = F lnLF: M = F
Esbjörnsson-Liljedahl et al ²²	16 adults (F) 16 adults (M)	23.0 (20–29) 25.0 (19–42)	Recreational athletes (students)	Cycling 30-s WAnT	Muscle biopsies pre and post NH ₃ : F < M (–35% peak–pre-exercise value)
Esbjörnsson-Liljedahl et al ²³	8 adults (F) 7 adults (M)	23.0 (21–24) 25.0 (19–42)	Recreational athletes (students)	Cycling 3 × 30-s WAnT (20-min rest in between)	Muscle biopsies and blood samples pre and post sprints 1–3 Glycogen in type I: M > F Adenosine triphosphate in type II: M > F Inosine monophosphate in type II: M > F Lactate: M < F
Gratas-Delamarche et al ²⁴	6 adults (F) 6 adults (M)	18.3 (0.7) 19.5 (0.7)	Sprinters (Specialists in 100, 200, and 400 m)	Cycling 30-s WAnT	Blood samples post 5 min Lactate: M > F Adrenaline: M > F Noradrenaline: M = F
Kappus et al ²⁵	40 adults (F) 31 adults (M)	25.0 (1.0) 24.0 (1.0)	VO ₂ peak: 28.8 (1.0) VO ₂ peak: 39.2 (1.3)	Cycling Incremental cycling test until exhaustion	HR _{max} : M > F HRR1: M > F HRR2: M > F HF: F > M
Laurent et al ²⁶	8 adults (F) 8 adults (M)	21.8 (1.0) 23.4 (2.5)	Moderately active athletes Participation in intermittent high-intensity work at least once a week	Running 4 trials: 3 × 8 × 30-m sprints Athletes were assigned variable recovery periods of 24, 48, and 72 h whereupon they repeated the RSE trials	Performance decrement: M > F (across each trial) In all 4 trials: Lactate _{max} : F < M HR _{max} : F = M RPE: F = M
Mageean et al ²⁷	11 adults (F) 11 adults (M)	19.7 (1.8) 20.8 (1.1)	Team sports VO ₂ max: 46.1 (3.3) VO ₂ max (FFM): 58.9 (4.6) Team sports VO ₂ max: 53.1 (5.1) VO ₂ max (FFM): 58.3 (4.3)	Cycling RSE 5 × 6 s (30 s recovery in between)	5 min active recovery VO ₂ (FFM): F > M

(continued)

Table 2 (continued)

Authors	Subjects	Age, y	Training status VO ₂ max, mL/kg/min	Exercise/protocol	Results during recovery (postexercise)
Mendonca et al ²⁸	12 adults (F) 13 adults (M)	20 (33)	Recreational athletes	Cycling 30-s WAnT	0–5 min postexercise HR and HRV indices HRR ₀₋₅ : M = F lnHF: M = F lnLF: M = F HR _{max} : M = F recovery HRR1: M > F (trend) HRR2: M > F (trend)
Mendonca et al ²⁹	17 adults (F) 23 adults (M)	21.4 (1.8) 21.3 (2.2)	VO ₂ max: >38.1 VO ₂ max percentile: 69.7 (1.6) VO ₂ max: >45.0 VO ₂ max percentile: 77.9 (16.5)	Cycling Incremental cycling test until exhaustion	Messenger-RNA expression (3 h post) GLUT4: M < F LPL: M < F Atrogin-1: M > F HKII: M < F FOXO3: M < F PGC 1alpha: M = F
Skelly et al ³⁰	9 adults (F) 10 adults (M)	22.0 (3.0) 22.0 (3.0)	VO ₂ max: 33.0 (8.0) VO ₂ max (FFM): 43.0 (10.0) VO ₂ max: 37.0 (5.0) VO ₂ max (FFM): 45.0 (7.0)	Cycling: 3 × 20-s sprint (2-min recovery)	Recovery 5, 10, 20, 30 min post Lactate: M = F Glucose (5 min): M < F Insulin: (10 min): M < F Catecholamine: M = F
Vincent et al ³¹	8 adults (F) 8 adults (M)	19.8 (0.7) 22.0 (0.6)	VO ₂ max: 42.5 (2.0) VO ₂ max: 46.2 (2.4)	Cycling 30-s WAnT	

Abbreviations: IRM, 1-repetition maximum; BM, body mass; CK, creatine kinase; CMJ, countermovement jump; F, female; FFM, fat-free mass; Hr, hydrogen; HF, high frequency; HR, heart rate; HRR(1,2,3), HR recovery after 1, 2, or 3 min; HRV, HR variability; LDH, lactate dehydrogenase; M, male; MPO, mean power output; MVIC, maximal voluntary isometric contraction; NH₃, ammonia; PPO, peak power output; RMSSD, root mean square of successive differences; RPE, relative perceived exertion; SBP, systolic blood pressure; SDNN, standard deviation of the NN interval; T, trained; TT, time trial; UT, untrained; VE, pulmonary ventilation; VCO₂, carbon dioxide production; VO₂, oxygen uptake; VO₂max, maximal VO₂; VO₂peak, peak VO₂; v, velocity; VT(1,2), ventilatory threshold (1,2); WAnT, Wingate anaerobic test; Y, youth. = indicates $P > .05$; trend indicates $P < .1$.

demonstrated that age had a greater impact on HRV than sex; older subjects tend to have consistently lower HRV than younger subjects. Enhanced parasympathetic input into cardiac regulation appears to be present in women during rest and under cardiac strain.^{28,59}

When attempting to interpret the studies regarding recovery processes between males and females, difficulties arise due to the sex-related differences in performance. It is essential to reduce other sex-related differences that may arise. Ideally, cross-sectional studies should be sex-matched for fitness level, age, and training history. Billaut and Bishop⁶ suggest incorporating the total mechanical work done by each sex during exercise as a covariate rather than taking into account power output capacity only. Furthermore, studies are warranted where males and females are matched for both initial power and activity levels. However, these existing performance and power differences in the discussed literature using protocols of “all-out” sprints, or tests until exhaustion, must be similar in the perceived relative exertion between men and women. “All-out” efforts were instructed in these maximal anaerobic endurance or sprint protocols, and therefore subjective power input between female and male participants should have always been the same, even though only Laurent et al²⁶ measured RPE. Despite RPE levels being ideally similar between males and females, muscular recovery processes were often slower in male subjects. In addition to performance capacity, age, and sex, the fatigue status of the subjects must be taken into account. For example, in the case of high training-related fatigue, heart rate drops faster after training sessions than in a recovered state.⁶⁰

In summary, trained women have lower absolute performance and maximal lactate levels than similarly trained men at the same maximum effort level at maximum exertion. However, they show a slower cardiac and respiratory recovery (longer increased respiratory and heart rate values after maximum exertion) compared to trained men. When reviewing the articles, it became clear that the factor of sex cannot be extracted as a single covariate from the discussed study results. A comparison between females and males with similar maximal performance (eg, PPO, VO₂max) is not suitable. Future studies should focus on investigating females and males of the same age and with a similar maximal performance relative to FFM (eg, VO₂max to FFM).

Conclusion

It became evident that the influence of age and sex on the recovery process varies among the different functional systems. Additionally, the literature shows that the performance capacity of the individual determines the recovery process. At a similar age, trained athletes demonstrate a quicker recovery compared to untrained athletes, regardless of sex. Furthermore, the influence of age and sex differs between short- and long-term recovery, and there are different relevant recovery measures for short- and long-term recovery.

Short-term recovery following repeated sprint and endurance exercise is different in children, adults, and masters. Children have shorter lactate half-life as a result of their lower maximal lactate concentrations, a faster HRR, and a faster respiratory recovery compared to adults.^{7,8,14,15,55} Masters tend to have lower lactate concentrations due to their reduced muscle mass and fast-twitch fibers. This also applies to women compared to men. For measuring short-term recovery, HRR1 is a sensitive parameter for age and sex comparison, considering parasympathetic effects persist during high-intensity exercise and are prominent in the early phases of recovery.⁶¹ The HRR1 can differentiate between trained and

untrained subjects because vagally-mediated HRR after exercise is accelerated in well-trained athletes.⁶²

Long-term recovery following repeated sprint and endurance exercise is strongly determined by the extent of muscle damage. Trained adults tend to have more extensive muscle damage due to the higher exercise intensities they reach compared to masters and children. Children and masters have less muscle mass than trained adults. Cell repair and protein synthesis are faster in children and adults than in seniors. Differences in long-term recovery between men and women are also dependent on the extent of muscle damage, which is greater in men than in women. Consequently, when measuring long-term recovery, the extent of muscle damage should be determined by markers of muscle damage (eg, CK, DOMS), subjective recovery, and muscle soreness markers. Individualized reference ranges seem to be a promising tool to improve the accuracy of monitoring muscle recovery.⁶³

However, one has to consider that the studies included in this review have several limitations that may have biased the results. The total number of studies on age and sex differences in post-exercise recovery is scarce. Additionally, studies with bigger sample sizes that account for specific confounding factors like training status and performance level are missing.

Practical Applications

These differences in short- and long-term recovery must be considered when determining the time of recovery between interval bouts or in between highly intensive training sessions. There is compelling evidence that children and masters require shorter recovery periods during interval bouts than trained adults. In between intensive training sessions, however, masters should extend their recovery periods compared to adults. Also, trained women who reach lower PPO seem to require shorter recovery periods between exercise bouts compared to trained men. However, according to the literature, the recovery duration depends mainly on the individuals' performance capacity. This appears to be the case at any age for both sexes. Furthermore, the recovery status prior to exercise interventions must be considered, given that a chronic pre-fatigue state affects the subsequent recovery process. The course of recovery after a training session should always be considered on an individual level from an overall organismic perspective (that is, in the context of age-related biological changes in the individual functional systems, performance or training status, sex, and pre-fatigue status). In this regard, interindividual comparisons and reference values for individual parameters are not feasible; however, applying recovery monitoring with wearables and questionnaires can help to individualize recovery times and methods to optimize training stimulus and load control.

Acknowledgments

This work was funded by the German Federal Institute of Sport Science and realized within “REGman—Optimization of Training and Competition: Management of Regeneration in Elite Sports” [grant number IIA1-081901/12-20].

References

1. Hausswirth C, Mujika I. *Recovery for Performance in Sport*. Champaign, IL: Human Kinetics; 2013.

2. Kellmann M, Bertollo M, Bosquet L, et al. Recovery and performance in sport: consensus statement. *Int J Sport Physiol Perform.* 2018; 13(2):240–245. doi:10.1123/ijpspp.2017-0759
3. Mujika I. Quantification of training and competition loads in endurance sports: methods and applications. *Int J Sport Physiol Perform.* 2017;12(2):2–9.
4. Borges N, Reaburn P, Driller M, Argus C. Age-related changes in performance and recovery kinetics in masters athletes: a narrative review. *J Aging Phys Act.* 2016;24(1):149–157. PubMed ID: 25880787 doi:10.1123/japa.2015-0021
5. Fell J, Williams AD. The effect of aging on skeletal-muscle recovery from exercise: possible implications for aging athletes. *J Aging Phys Act.* 2008;16(1):97–115. PubMed ID: 18268815 doi:10.1123/japa.16.1.97
6. Billaut F, Bishop D. Muscle fatigue in males and females during multiple-sprint exercise. *Sports Med.* 2009;39(4):257–278. PubMed ID: 19317516 doi:10.2165/00007256-200939040-00001
7. Birat A, Bourdier P, Piponnier E, et al. Metabolic and fatigue profiles are comparable between prepubertal children and well-trained adult endurance athletes. *Front Physiol.* 2018;9:387. PubMed ID: 29740332 doi:10.3389/fphys.2018.00387
8. Buchheit M, Duche P, Laursen PB, Ratel S. Postexercise heart rate recovery in children: relationship with power output, blood pH, and lactate. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2010;35(2):142–150. PubMed ID: 20383224 doi:10.1139/H09-140
9. Chamari K, Ahmaidi S, Ayoub J, et al. Effects of aging on cardiorespiratory responses to brief and intense intermittent exercise in endurance-trained athletes. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2000; 55(11):B537–B544. doi:10.1093/gerona/55.11.B537
10. Darr KC, Bassett DR, Morgan BJ, Thomas DP. Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 1988;254(2):H340–H343. doi:10.1152/ajpheart.1988.254.2.H340
11. Easthope CS, Hausswirth C, Louis J, Lepers R, Vercruyssen F, Brisswalter J. Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2010;110(6):1107–1116. PubMed ID: 20703499 doi:10.1007/s00421-010-1597-1
12. Fell J, Reaburn P, Harrison GJ. Altered perception and report of fatigue and recovery in veteran athletes. *J Sports Med Phys Fitness.* 2008;48(2):272. PubMed ID: 18427425
13. Fell J, Haseler L, Gaffney P, Reaburn P, Harrison G. Performance during consecutive days of laboratory time-trials in young and veteran cyclists. *J Sports Med Phys Fitness.* 2006;46(3):395–402. PubMed ID: 16998443
14. Hebestreit H, Mimura KL, Bar-Or O. Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: comparing boys and men. *J Appl Physiol.* 1993;74(6):2875–2880. PubMed ID: 8365990 doi:10.1152/jappl.1993.74.6.2875
15. Ohuchi H, Suzuki H, Yasuda K, Arakaki Y, Echigo S, Kamiya T. Heart rate recovery after exercise and cardiac autonomic nervous activity in children. *Pediatr Res.* 2000;47(3):329. PubMed ID: 10709731 doi:10.1203/00006450-200003000-00008
16. Silverman HG, Mazzeo RS. Hormonal responses to maximal and submaximal exercise in trained and untrained men of various ages. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 1996;51(1):B30–B37. doi:10.1093/gerona/51A.1.B30
17. Sultana F, Abbiss CR, Louis J, Bernard T, Hausswirth C, Brisswalter J. Age-related changes in cardio-respiratory responses and muscular performance following an Olympic triathlon in well-trained triathletes. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(4):1549–1556. PubMed ID: 21853306 doi:10.1007/s00421-011-2115-9
18. Zancanato S, Cooper DM, Armon Y. Oxygen cost and oxygen uptake dynamics and recovery with 1 min of exercise in children and adults. *J Appl Physiol.* 1991;71(3):993–998. PubMed ID: 1757338 doi:10.1152/jappl.1991.71.3.993
19. Antelmi I, Chuang EY, Grupi CJ, Latorre RM, Mansur AJ. Heart rate recovery after treadmill electrocardiographic exercise stress test and 24-hour heart rate variability in healthy individuals. *Arq Bras Cardiol.* 2008;90(6):380–385. PubMed ID: 18592090 doi:10.1590/S0066-782X2008000600005
20. Arena R, Arrowood JA, Fei D, Shelar S, Helm S, Kraft KA. The influence of sex on the relationship between heart rate recovery and other cardiovascular risk factors in apparently healthy subjects. *Scand J Med Sci Sports.* 2010;20(2):291–297. PubMed ID: 19522754 doi:10.1111/j.1600-0838.2009.00883.x
21. Blasco Lafarga MC, Martínez Navarro I, Mateo March M, Roldán Aliaga A, Cordellat Marzal A, Monteagudo Chiner P. Gender differences in elite athletes heart rate dynamics following a supra maximal complex effort. *MOJ Sports Med.* 2017;1(5):1–8.
22. Esbjörnsson-Liljedahl M, Sundberg CJ, Norman B, Jansson E. Metabolic response in type I and type II muscle fibers during a 30-s cycle sprint in men and women. *J Appl Physiol.* 1999;87(4): 1326–1332. PubMed ID: 10517759
23. Esbjörnsson-Liljedahl M, Bodin K, Jansson E. Smaller muscle ATP reduction in women than in men by repeated bouts of sprint exercise. *J Appl Physiol.* 2002;93(3):1075–1083. PubMed ID: 12183505
24. Gratas-Delamarche A, Le Cam R, Delamarche P, Monnier M, Koubi H. Lactate and catecholamine responses in male and female sprinters during a Wingate test. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1994;68(4):362–366. PubMed ID: 8055897 doi:10.1007/BF00571458
25. Kappus RM, Ranadive SM, Yan H, et al. Sex differences in autonomic function following maximal exercise. *Biol Sex Differ.* 2015; 6(1):28. doi:10.1186/s13293-015-0046-6
26. Laurent CM, Green JM, Bishop PA, et al. Effect of gender on fatigue and recovery following maximal intensity repeated sprint performance. *J Sports Med Phys Fitness.* 2010;50(3):243–53. PubMed ID: 20842083
27. Mageean AL, Alexander RP, Mier CM. Repeated sprint performance in male and female college athletes matched for VO₂max relative to fat free mass. *Int J Exerc Sci.* 2011;4(4):229. PubMed ID: 27182366
28. Mendonca GV, Heffernan KS, Rossow L, Guerra M, Pereira FD, Fernhall B. Sex differences in linear and nonlinear heart rate variability during early recovery from supramaximal exercise. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2010;35(S1):439–446. doi:10.1139/H10-028
29. Mendonca GV, Teodósio C, Bruno PM. Sexual dimorphism in heart rate recovery from peak exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2017;117(7): 1373–1381. PubMed ID: 28470411 doi:10.1007/s00421-017-3627-8
30. Skelly LE, Gillen JB, MacInnis MJ, et al. Effect of sex on the acute skeletal muscle response to sprint interval exercise. *Exp Physiol.* 2017;102(3):354–365. PubMed ID: 28118678 doi:10.1113/EP086118
31. Vincent S, Berthon P, Zouhal H, et al. Plasma glucose, insulin and catecholamine responses to a Wingate test in physically active women and men. *Eur J Appl Physiol.* 2004;91(1):15–21. PubMed ID: 14551777 doi:10.1007/s00421-003-0957-5
32. McCormick R, Vasilaki A. Age-related changes in skeletal muscle: changes to life-style as a therapy. *Biogerontology.* 2018;19(6):519–536. PubMed ID: 30259289 doi:10.1007/s10522-018-9775-3
33. Faulkner JA, Davis CS, Mendias CL, Brooks SV. The aging of elite male athletes: age-related changes in performance and skeletal muscle structure and function. *Clin J Sport Med.* 2008;18(6):501. PubMed ID: 19001883 doi:10.1097/JSM.0b013e3181845f1c



34. Hakkinen K, Pakarinen A, Kraemer WJ, Newton RU, Alen M. Basal concentrations and acute responses of serum hormones and strength development during heavy resistance training in middle-aged and elderly men and women. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2000;55(2): B95–B105. doi:10.1093/gerona/55.2.B95
35. Hansen M. Female hormones: do they influence muscle and tendon protein metabolism? *P Nutr Soc*. 2018;77(1):32–41. doi:10.1017/S0029665117001951
36. Finkelstein JS, Lee H, Burnett-Bowie SAM, et al. Gonadal steroids and body composition, strength, and sexual function in men. *N Engl J Med*. 2013;369(11):1011–1022. PubMed ID: 24024838 doi:10.1056/NEJMoa1206168
37. Bieuzen F, Hausswirth C, Louis J, Brisswalter J. Age-related changes in neuromuscular function and performance following a high-intensity intermittent task in endurance-trained men. *Gerontology*. 2010; 56(1):66–72. PubMed ID: 19940455 doi:10.1159/000262286
38. Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. Age-predicted maximal heart rate revisited. *J Am Coll Cardiol*. 2001;37(1):153–156. PubMed ID: 11153730 doi:10.1016/S0735-1097(00)01054-8
39. Juel C, Klarskov C, Nielsen JJ, Krstrup P, Mohr M, Bangsbo J. Effect of high-intensity intermittent training on lactate and H⁺ release from human skeletal muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2014;286(2):E245–E251. doi:10.1152/ajpendo.00303.2003
40. Berthelot G, Bar-Hen A, Marck A, et al. An integrative modeling approach to the age-performance relationship in mammals at the cellular scale. *Sci Rep*. 2019;9(1):1–10.
41. Korhonen MT, Suominen H, Mero A. Age and sex differences in blood lactate response to sprint running in elite master athletes. *Can J Appl Physiol*. 2005;30(6):647–665. PubMed ID: 16485517 doi:10.1139/h05-146
42. Hunter GR, Newcomer BR, Weinsier RL, et al. Age is independently related to muscle metabolic capacity in premenopausal women. *J Appl Physiol*. 2002;93(1):70–76. PubMed ID: 12070188 doi:10.1152/jappphysiol.01239.2001
43. Hall JL, Mazzeo RS, Podolin DA, Cartee GD, Stanley WC. Exercise training does not compensate for age-related decrease in myocardial GLUT-4 content. *J Appl Physiol*. 1994;76(1):328–332. PubMed ID: 8175525 doi:10.1152/jappl.1994.76.1.328
44. Sandbakk Ø, Solli GS, Holmberg HC. Sex differences in world-record performance: the influence of sport discipline and competition duration. *Int J Sport Physiol Perform*. 2018;13(1):2–8. doi:10.1123/ijssp.2017-0196
45. Högler W, Blimkie CJ, Cowell CT, et al. Sex-specific developmental changes in muscle size and bone geometry at the femoral shaft. *Bone*. 2008;42(5):982–989. PubMed ID: 18337201 doi:10.1016/j.bone.2008.01.008
46. McArdle WD, Katch FI, Katch VL. *Exercise physiology: Energy, Nutrition and Human Performance*. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins; 2001:752–793.
47. Chevront SN, Moffatt RJ, DeRuisseau K, Driskell J, Wolinsky I. Body composition and gender differences in performance. In: Wolinsky I, Driskell JA, eds. *Nutritional Assessment of Athletes*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2002:177–200.
48. Schmidt W, Prommer N. Effects of various training modalities on blood volume. *Scand J Med Sci Sports*. 2008;18:57–69. PubMed ID: 18665953 doi:10.1111/j.1600-0838.2008.00833.x
49. Thirup P. Haematocrit. *Sports Med*. 2003;33(3):231–243. PubMed ID: 12656642 doi:10.2165/00007256-200333030-00005
50. Miller AEJ, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Sale DG. Gender differences in strength and muscle fiber characteristics. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1993;66(3):254–262. PubMed ID: 8477683 doi:10.1007/BF00235103
51. Venables MC, Achten J, Jeukendrup AE. Determinants of fat oxidation during exercise in healthy men and women: a cross-sectional study. *J Appl Physiol*. 2005;98(1):160–167. PubMed ID: 15333616 doi:10.1152/jappphysiol.00662.2003
52. Hamadeh MJ, Devries MC, Tarnopolsky MA. Estrogen supplementation reduces whole body leucine and carbohydrate oxidation and increases lipid oxidation in men during endurance exercise. *J Clin Endocrinol Metab*. 2005;90(6):3592–3599. PubMed ID: 15755861 doi:10.1210/jc.2004-1743
53. Steffensen CH, Roepstorff C, Madsen M, Kiens B. Myocellular triacylglycerol breakdown in females but not in males during exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2002;282(3):E634–E642. doi:10.1152/ajpendo.00078.2001
54. Allen SV, Hopkins WG. Age of peak competitive performance of elite athletes: a systematic review. *Sports Med*. 2015;45(10):1431–1441. PubMed ID: 26088954 doi:10.1007/s40279-015-0354-3
55. Kappenstein J, Fernández-Fernández J, Engel F, Ferrauti A. Effects of active and passive recovery on blood lactate and blood pH after a repeated sprint protocol in children and adults. *Pediatr Exerc Sci*. 2015;27(1):77–84. PubMed ID: 25387324 doi:10.1123/pes.2013-0187
56. Weber CL, Chia M, Inbar O. Gender differences in anaerobic power of the arms and legs—a scaling issue. *Med Sci Sports Exerc*. 2006;38(1):129–137. PubMed ID: 16394965 doi:10.1249/01.mss.0000179902.31527.2c
57. Dar DE, Zinder O. Short-term effect of steroids on catecholamines secretion from bovine adrenal medulla chromaffin cells. *Neuropharmacology*. 1997;36(11/12):1783–1788 doi:10.1016/S0028-3908(97)00150-0
58. Zhang J. Effect of age and sex on heart rate variability in healthy subjects. *J Manipulative Physiol Ther*. 2007;30(5):374–379. PubMed ID: 17574955 doi:10.1016/j.jmpt.2007.04.001
59. Rossy LA, Thayer JF. Fitness and gender-related differences in heart period variability. *Psychosom Med*. 1998;60(6):773–781. PubMed ID: 9847039 doi:10.1097/00006842-199811000-00022
60. Daanen HA, Lamberts RP, Kallen VL, Jin A, Van Meeteren NL. A systematic review on heart-rate recovery to monitor changes in training status in athletes. *Int J Sport Physiol Perform*. 2012;7(3): 251–260. doi:10.1123/ijssp.7.3.251
61. Kannankeril PJ, Le FK, Kadish AH, Goldberger JJ. Parasympathetic effects on heart rate recovery after exercise. *J Investig Med*. 2004; 52(6):394–401. PubMed ID: 15612453 doi:10.1136/jim-52-06-34
62. Imai K, Sato H, Hori M, et al. Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure. *J Am Coll Cardiol*. 1994;24(6):1529–1535. PubMed ID: 7930286 doi:10.1016/0735-1097(94)90150-3
63. Hecksteden A, Pitsch W, Julian R, et al. A new method to individualize monitoring of muscle recovery in athletes. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(9):1137–1142. PubMed ID: 27967274 doi:10.1123/ijssp.2016-0120

5.2 Publikation 2

Hottenrott, L., et al. (2022). Performance and recovery of well-trained younger and older athletes during different HIIT protocols. *Sports*, 10(1), 9.

Article

Performance and Recovery of Well-Trained Younger and Older Athletes during Different HIIT Protocols

Laura Hottenrott ^{1,*}, Martin Möhle ², Sarah Feichtinger ¹, Sascha Ketelhut ², Oliver Stoll ^{1,2}  and Kuno Hottenrott ^{1,2} 

¹ Institute of Performance Diagnostics and Health Promotion (ILUG), Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, 06108 Halle, Germany; sarah.feichtinger@ilug.de (S.F.); oliver.stoll@sport.uni-halle.de (O.S.); kuno.hottenrott@sport.uni-halle.de (K.H.)

² Institute of Sport Science, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, 06108 Halle, Germany; martin.moehle@sport.uni-halle.de (M.M.); sascha.ketelhut@sport.uni-halle.de (S.K.)

* Correspondence: laura.hottenrott@ilug.de

Abstract: Due to physiological and morphological differences, younger and older athletes may recover differently from training loads. High-intensity interval training (HIIT) protocols are useful for studying the progression of recovery. It was the objective of this study to determine age differences in performance and recovery following different HIIT protocols. Methods: 12 younger (24.5 ± 3.7 years) and 12 older (47.3 ± 8.6 years) well-trained cyclists and triathletes took part in this study. Between the age groups there were no significant differences in relative peak power to fat-free mass, maximal heart rate (HR), training volume, and VO_{2max} -percentiles (%). Participants performed different HIIT protocols consisting of 4×30 s Wingate tests with different active rest intervals (1, 3, or 10 min). Peak and average power, lactate, HR, respiratory exchange ratio (RER), subjective rating of perceived exertion (RPE), and recovery (Total Quality Recovery scale, TQR) were assessed. Results: During the different HIIT protocols, metabolic, cardiovascular, and subjective recovery were similar between the two groups. No significant differences were found in average lactate concentration, peak and average power, fatigue (%), $\%HR_{max}$, RER, RPE, and TQR values between the groups ($p > 0.05$). Conclusion: The findings of this study indicate that recovery following HIIT does not differ between the two age groups. Furthermore, older and younger participants displayed similar lactate kinetics after the intermittent exercise protocols.

Keywords: aging; master athletes; endurance exercise Wingate test; HIIT; interval training; cycling; recovery; lactate; heart rate recovery



Citation: Hottenrott, L.; Möhle, M.; Feichtinger, S.; Ketelhut, S.; Stoll, O.; Hottenrott, K. Performance and Recovery of Well-Trained Younger and Older Athletes during Different HIIT Protocols. *Sports* **2022**, *10*, 9. <https://doi.org/10.3390/sports10010009>

Received: 22 November 2021

Accepted: 29 December 2021

Published: 5 January 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Recovery from exercise is essential for continuous performance improvement [1,2]. Due to morphological and physiological changes occurring during aging and age-related alterations in performance capacity, younger and older athletes may recover at different rates from physical exercise and training loads [3–5].

Age-related physiological and morphological changes in the muscular system include the selective loss of fast muscle fibers and motor units, along with a decrease in muscle cross-sectional area and number of satellite cells, and a change in muscle architecture [6,7]. Maximum oxygen uptake decreases in both untrained and trained older subjects [7]. However, trained subjects with a higher physical fitness level are able to maintain this higher level compared with untrained subjects [8].

It is well established that maximal heart rate (HR_{max}) decreases with age and is independent of sex [9]. The maximum lactic acid production rate, which is determined by the performance capacity or trainability of the fast muscle fibers [10], decreases with age [11]. Although peak blood lactate levels of trained subjects are considerably higher than those reported for untrained subjects, anaerobic energy production from glycolysis

declines with older age. This may be a factor responsible for the deterioration in sprint performance [12].

A decrease in muscle mass and shift towards a more oxidative muscle profile mediated by the atrophy of fast-twitch fibers during aging [6] indicates a reduced creatine phosphate metabolic capacity, in addition to a decreased rate lactic acid formation and glycolysis. It may also be possible that the anaerobic energy output decreases with aging due to a reduction in important glycolytic enzymes, particularly phosphofructokinase [13]. Furthermore, glucose transporter (GLUT-4) levels decrease with aging, reducing glucose transport efficacy, possibly affecting performance and recovery in older athletes [14]. Therefore, training adaptation, decline in performance, and recovery in the process of aging varies among different sports and intensities of exercise. According to Fell and Williams [3], an older athlete may require a more extended post-exercise recovery period compared to a younger athlete with a similar performance level when applying the same training load. The extent to which age-related physiological and morphological differences affect recovery in aging athletes during high-intensity interval training (HIIT) sessions with different recovery periods has not yet been investigated.

HIIT sessions are used to improve maximum oxygen uptake (VO_{2max}) and endurance performance in high-performance and recreational sports [15–17]. High-intensity interval training (HIIT) protocols are variable in their design and can be different regarding the number of repetitions, duration of intervals, intensity, and recovery time between interval bouts, thereby pursuing different training goals [18,19]. Postexercise recovery is a multifaceted (e.g., psychological, physiological) restorative process and an essential component of exercise training. Recovery is crucial to allow for continuous performance development [1,2,20]. The length of recovery time does not only influence the maximal performance during each exercise bout, but also the overall organismic stress [21–23]. Due to their intermittent character, HIIT sessions are useful for studying the progression of recovery.

Recovery following repeated sprint and endurance exercise is different in children and adults. Children have a shorter lactate half-life as a result of their lower maximal lactate concentrations, and a faster heart rate recovery (HRR) and respiratory recovery compared to adults [21,24–27].

Most studies on post-exercise recovery have either compared children and adults or younger and older athletes with different performance levels [5]. Studies with a different level of performance or training status revealed delayed recovery of VO_2 and VCO_2 for master athletes compared to adults [28].

Studies on recovery following continuous endurance exercise (running competition) in younger and older athletes (masters) with matching performance levels (VO_{2max}) revealed a delayed muscular recovery and greater muscular damage during recovery in masters (45.9 ± 5.9 years) compared to younger athletes (30.5 ± 7 years) [4]. However, no studies have been conducted on recovery during and after high-intensity intermittent exercise in younger and older adults with matched performance levels.

The Wingate anaerobic test (WAnT) comprising four 30 s maximal efforts on a cycle ergometer allows for continuous measurement and recording of heart rate (HR), oxygen uptake, and power [29–32]. The length of 30 s for short intervals is suitable for the evaluation of anaerobic performance, as shown in many studies on maximal exercise [21,23,31–33]. Furthermore, this allows for a differentiated and comprehensive discussion of the findings of this present investigation with previous findings, and for a derivation of practical applications for athletes and coaches.

HIIT is used in elite sports, fitness sports, and recreational sports in a number of ways, and the training design of HIIT sessions, especially the duration of recovery phases, has a direct impact on performance development. However, to date, no comprehensive evaluation has been conducted on whether younger and older athletes respond and recover in a similar manner. Therefore, this study examined a younger and an older group of athletes whose physical performance was comparable. This has not been taken into account

in previous studies, in which older athletes typically had a lower performance level and, as a result, their recovery was reduced. However, this study compared the recovery of younger and older athletes with matched physical performance levels.

The aim of this study was to examine possible age-specific differences in cardiovascular, metabolic, and subjective recovery during HIIT with active recovery times of different durations between intervals. Moreover, the study investigated whether different recovery times influence the performance of younger and older athletes during HIIT.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

Two groups consisting of 12 younger (mean age: 24.5 ± 3.7 years; 8 men, 4 women) and 12 older athletes (mean age: 47.3 ± 8.6 years; 8 men, 4 women) took part in this study. For at least six months prior to taking part in the study, all athletes were required to cycle for at least 6 h/week and have a VO_{2max} above the 80th percentile [34]. The baseline values of the 24 athletes are shown in Table 1. There were no significant differences in height, body mass, and fat-free mass (FFM), or in the performance-related parameters HR_{max} , relative peak power output to FFM, and weekly training volume between younger and older athletes.

Younger and older athletes had a comparable maximal aerobic performance capacity according to sex and age-specific VO_{2max} percentiles [34]. The bioimpedance values showed age differences for body fat but not for FFM. There were no significant differences in the bioimpedance data of the athletes between the testing days.

Table 1. Anthropometric data, exercise performance parameters, and maximal heart rate (HR_{max}), of the athletes at baseline measurements. Data are means \pm SD.

Parameter	Younger Athletes (<i>n</i> = 12)	Older Athletes (<i>n</i> = 12)	<i>p</i> -Values
Age (years)	24.5 \pm 3.7	47.3 \pm 8.6	<0.001
Height (m)	1.76 \pm 0.11	1.72 \pm 0.11	0.423
Body mass (kg)	65.9 \pm 10.9	70.8 \pm 11.0	0.281
BMI (kg/m ²)	21.1 \pm 1.8	23.7 \pm 2.2	0.004
Body fat (%)	9.8 \pm 6.3	14.9 \pm 6.1	0.011
FFM (kg)	59.8 \pm 12.0	59.3 \pm 9.5	0.901
VO_{2max} (mL/min/kg)	56.7 \pm 7.0	49.2 \pm 6.4	0.011
HR_{max} (min ⁻¹)	179.2 \pm 11.1	174.9 \pm 11.7	0.371
Peak Power (W/kg)	5.24 \pm 0.58	4.66 \pm 0.43	0.011
Peak Power (W/kg _{FFM})	5.79 \pm 0.47	5.60 \pm 0.71	0.122
VO_{2max} -percentile (%)	95.4 \pm 5.2	93.1 \pm 5.8	0.326
Training (h/week)	8.73 \pm 3.62	8.37 \pm 2.28	0.627

This investigation was approved by the Martin-Luther-University Halle-Wittenberg Ethics Committee (Reference code: 2019-094) and conducted in accordance with the Declaration of Helsinki.

2.2. Test Protocol

Each test took place under standardized conditions of a 20 °C lab temperature and 55% relative humidity. Subjects reported to the laboratory on four occasions. They had to be in a recovered and hydrated state after having fasted for at least two hours. Additionally, they had to abstain from strenuous exercise for 48 h prior to all tests. Every athlete was tested again at the same time of day, and all cycling tests were conducted on the same cycling

ergometer during each visit. During the entire course of the study, all athletes agreed to maintain their usual dietary habits and to document their daily training load.

On the first of four visits, baseline assessments took place. Subjects completed a medical questionnaire and indicated they had not taken any supplements or medication that could influence the results. Body composition (body mass, FFM and body fat) was determined after 20 min in the supine resting position using a Bio Impedance Analyzer (Data Input GmbH, Pöcking, Germany). Then, a Metalyzer 3B (Cortex, Leipzig, Germany) was applied in an incremental step test until voluntary exhaustion on an elite bicycle ergometer (E 2000s, FES, Berlin, Germany) to determine the athlete's aerobic fitness in terms of oxygen uptake. This test started with a warm-up over eight minutes at 70 W for female athletes and at 100 W for male athletes on the cycling ergometer. After the warm-up, athletes completed the $\text{VO}_{2\text{max}}$ test [35,36]. Thereby, all athletes started with a resistance of 70 W and, each minute, the power increased by 30 W. For all athletes, the cadence was set at 80–90 rpm throughout the entire test.

One week following the baseline test, athletes completed the first of three HIIT sessions. Thereby, a 30 s WAnT was performed four times, separated by different active recovery periods at each visit (1, 3, or 10 min) as displayed in Figure 1. The athletes performed the three different HIIT protocols under standardized conditions in a randomized order regarding the three recovery times (1, 3, or 10 min). Each test was separated by one week of recovery. The power for the warm-up, active recovery periods, and cool-down was set at 70 W for female athletes and at 100 W for male athletes, with a cadence of 80–90 rpm. Using 10 μL of blood taken from the ear lobe, lactate levels were measured with the enzymatic-amperometric method (Mueller, model Super GL ambulance, Freital, Germany). Throughout all tests, beat-to-beat (RR) intervals and the HR using an HR monitor (RS800 CX and Polar WearLink W.I.N.D., Polar Electro GmbH, Büttelborn, Germany) and gas exchange using a Metalyzer 3B (Cortex, Leipzig, Germany) were continuously recorded. The subjective rating of exertion and state of recovery were determined using the Rating of Perceived Exertion (RPE) scale [37] and the Total Quality Recovery scale (TQR) [38]. The RPE value of the athletes was assessed after each of the four WAnT intervals, and the TQR value after every active recovery period and every three minutes during the 15 min cool-down.

The testing protocol with the measurement points is shown in Figure 1. The testing protocol was used in an extensive investigation on sex and age differences with different subject groups during HIIT using a consistent study design. The results regarding sex differences have already been published [23]. For lactate determination, capillary blood was taken before the start of the HIIT protocol after a standardized warm-up and at the measurement points M2, M4, M6, and M8 (Figure 1). The standardized warm-up consisted of 8 min cycling at 70 W for females and 100 W for males, and the cadence was set at 80–90 rpm. The RPE values [35] were recorded at the measuring points M2, M4, M6, and M8. The TQR values [36] were recorded at M3, M5, and M7. Throughout the 10 min active recovery period, blood for lactate determination was also taken. During the 15 min active cool-down, lactate concentration and the TQR rating were determined at 3, 6, 9, 12, and 15 min. Continuous recording of power, ventilatory parameters (breath by breath), and HR (beat to beat interval) took place throughout the entire test period. Intraindividual fatigue, as the respective performance decline within each of the WAnTs over the 30 s duration, was calculated using the formula: $\% \text{fatigue} = (\text{peak powerWAnT} - \text{average powerWAnT}) / \text{peak powerWAnT} \times 100$ [39].

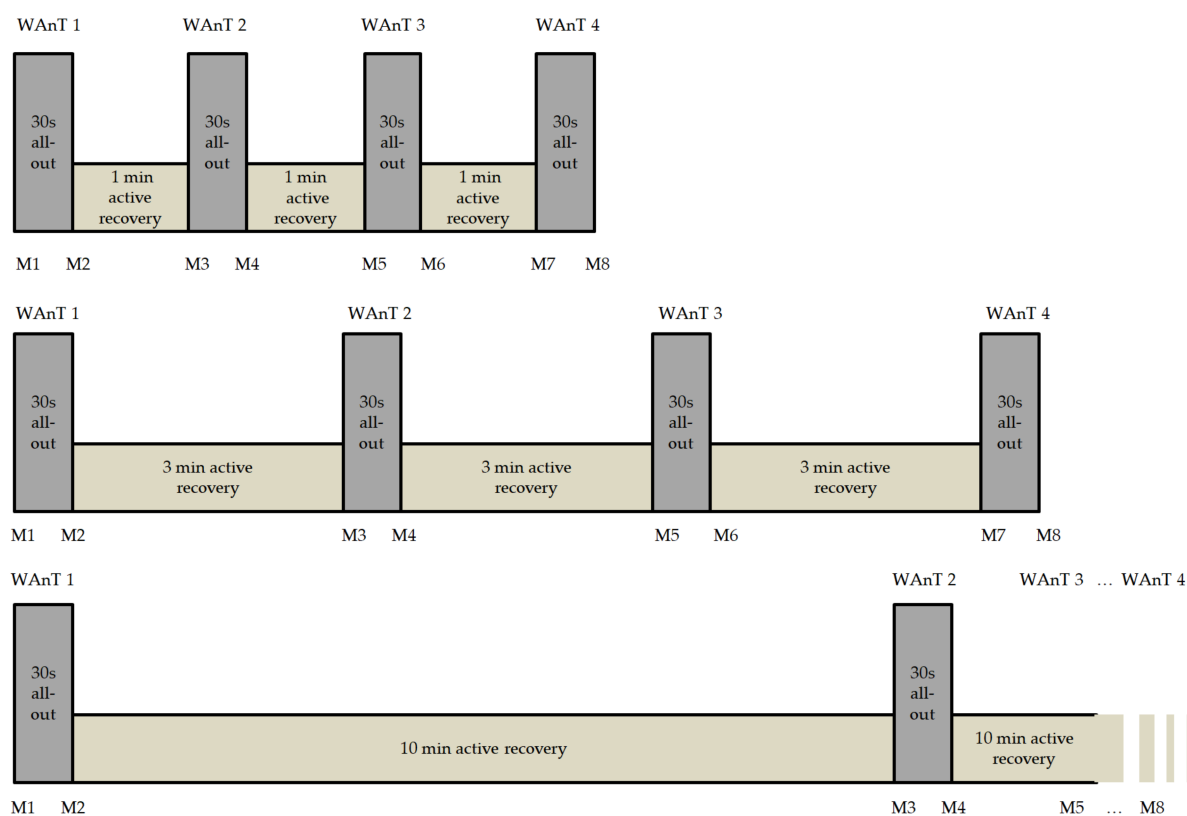


Figure 1. Testing protocol of the Wingate anaerobic tests (WAnT) during high-intensity interval training (HIIT). The three different protocols with four Wingate tests each, regarding the three active recovery times at 70 W for females and 100 W for males (1, 3, or 10 min active recovery) were performed in a randomized order with one week recovery between (M1–M8: measurement points).

2.3. Statistical Analysis

Descriptive statistics of the data are presented as mean \pm standard deviation (SD). Statistical analysis was conducted with IBM SPSS Statistics (version 25, International Business Machines Corporation, Armonk, NY, USA) and a published spreadsheet [40]. A repeated measures two-way ANOVA with Bonferroni corrections for multiple comparisons was used to detect interaction effects if warranted. Univariate post hoc analyses, including one-way ANOVA or two-tailed paired t-tests, were performed with Bonferroni's correction where appropriate. The level of significance was set at $p < 0.05$.

3. Results

3.1. Power

The two age groups showed significant differences in the peak power output relative to body mass at baseline (younger: 5.24 ± 0.58 W/kg, older: 4.66 ± 0.43 W/kg ($p = 0.01$)) (Table 1). Considering peak power output relative to FFM, there were no significant differences between the age groups (younger: 5.79 ± 0.47 W/kgFFM, older: 5.60 ± 0.71 W/kgFFM ($p = 0.44$)). Table 2 shows the mean and standard deviation of peak power output (PP), average power output (AP), and percentage of fatigue during the different WAnT protocols for the younger and older groups. In PP, significant differences were found between WAnTs one and WAnTs four for both groups in the one-, three-, and ten-minute recovery protocols. AP also declined significantly between WAnTs one and four in both groups throughout the one- and three-minute protocols. In the ten-minute protocol, AP decreased significantly in the younger group only. Fatigue (%) decreased significantly from WAnTs one to four in the HIIT protocol with one minute recovery in the older group and in the ten-minute recovery protocol in the younger groups. The three-minute recov-

ery protocol showed no significant differences in fatigue (%). No significant differences were found between the groups in PP, AP, and fatigue (%) throughout the different HIIT protocols (Table 2).

Table 2. Mean and standard deviation of peak power, average power, and fatigue during Wingate tests (WAnTs) with different recovery times for younger (Y) and older (O) athletes * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ between T1–T2, T2–T3, and T3–T4).

Parameter	Recovery	Age	WAnT 1	WAnT 2	WAnT 3	WAnT 4	T1–T4
Peak Power (W)	1 min	Y	734.8 ± 225.4	583.5 ± 157.3 ***	554.4 ± 140.3 *	530.5 ± 131.7	$p < 0.001$
		O	724.1 ± 181.2	579.8 ± 145.4 ***	550.3 ± 135.3	533.7 ± 145.5	$p < 0.001$
Y		535.8 ± 192.3	454.8 ± 157.5 ***	422.4 ± 141.3 ***	410.1 ± 135.3 *	$p < 0.001$	
O		485.8 ± 126.3	418.4 ± 110.2 ***	402.3 ± 109.5 *	395.3 ± 119.0	$p < 0.001$	
Y		27.3 ± 12.1	23.3 ± 9.8 *	25.1 ± 9.0	23.6 ± 10.9	$p = 0.11$	
O		32.7 ± 9.0	27.7 ± 9.6 *	26.8 ± 12.0	26.4 ± 8.2	$p = 0.01$	
Peak Power (W)	3 min	Y	739.4 ± 218.5	663.8 ± 183.4 **	637.3 ± 188.8 *	608.8 ± 160.7 *	$p < 0.001$
		O	731.0 ± 130.5	671.8 ± 151.0 **	629.1 ± 137.7 *	617.6 ± 129.5	$p < 0.001$
Y		537.7 ± 202.6	498.4 ± 180.7 **	476.8 ± 172.0 ***	465.3 ± 166.2 **	$p < 0.001$	
O		499.8 ± 134.4	471.2 ± 125.7 ***	447.3 ± 117.4 **	445.8 ± 115.3	$p < 0.001$	
Y		28.4 ± 11.1	26.0 ± 11.9	26.3 ± 9.7	25.0 ± 11.0	$p = 0.09$	
O		32.4 ± 10.7	29.9 ± 11.7	29.4 ± 8.8	28.1 ± 10.6	$p = 0.06$	
Peak Power (W)	10 min	Y	749.8 ± 217.3	692.0 ± 207.0 **	682.1 ± 216.9	678.2 ± 194.4	$p < 0.001$
		O	728.8 ± 187.6	709.6 ± 156.9	691.1 ± 149.7	672.8 ± 150.3	$p = 0.04$
Y		536.2 ± 202.1	526.0 ± 193.2	523.2 ± 193.3	520.1 ± 188.9	$p = 0.03$	
O		500.4 ± 141.4	504.0 ± 131.8	499.3 ± 130.7	493.3 ± 129.5	$p = 0.43$	
Y		29.7 ± 10.6	25.1 ± 9.6 **	24.3 ± 8.3	24.7 ± 9.5	$p < 0.001$	
O		31.3 ± 10.1	29.2 ± 9.6	28.1 ± 9.1	26.6 ± 11.8	$p = 0.07$	

The performance decline (%) for both age groups for the HIIT protocols with one-, three-, and ten-minute recovery is displayed in Figure 2. For both age groups, the overall performance decline was most significant in the one-minute HIIT protocol. The ANOVA neither revealed an interaction effect for performance decline (%) × age ($F(2,44) = 0.04$, $p = 0.096$) nor a main effect for the between-subjects factor ($F(1,22) = 0.99$, $p = 0.33$). There was only a main effect for the within-subject factor ($F(2,44) = 63.59$, $p < 0.001$).

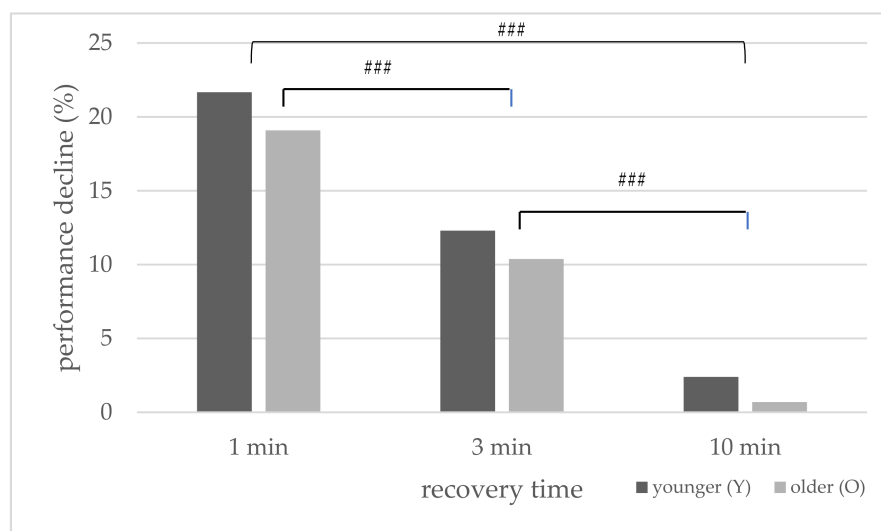


Figure 2. Mean values of performance decline (%) during the three Wingate test (WAnT) protocols with different recovery periods for the younger and older groups ### ($p < 0.001$).

Figures 3–6 show the data following the second, third, and fourth WAnTs in the three different HIIT protocols.

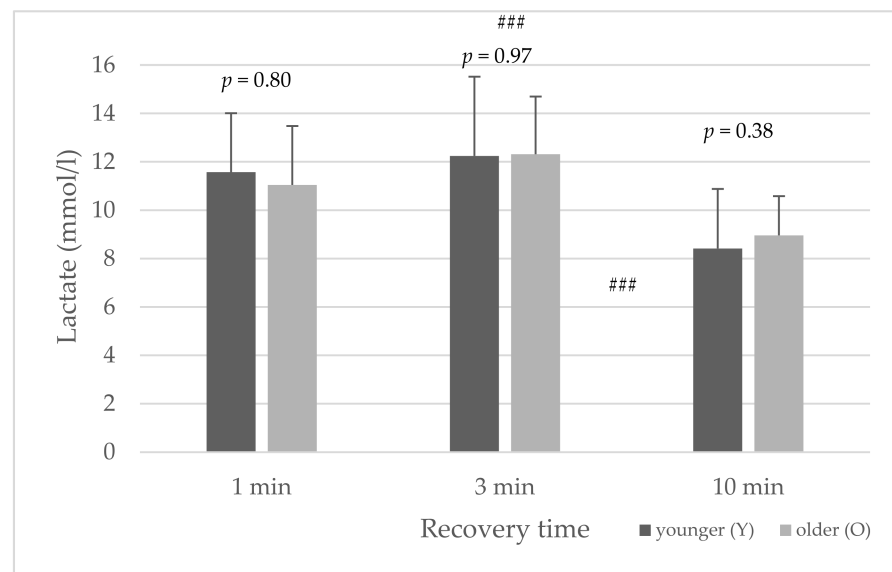


Figure 3. Mean and standard deviation of average lactate concentration (mmol/L) for the younger and older groups ### ($p < 0.001$) between the different protocols (3 to 10, and 1 to 10 min).

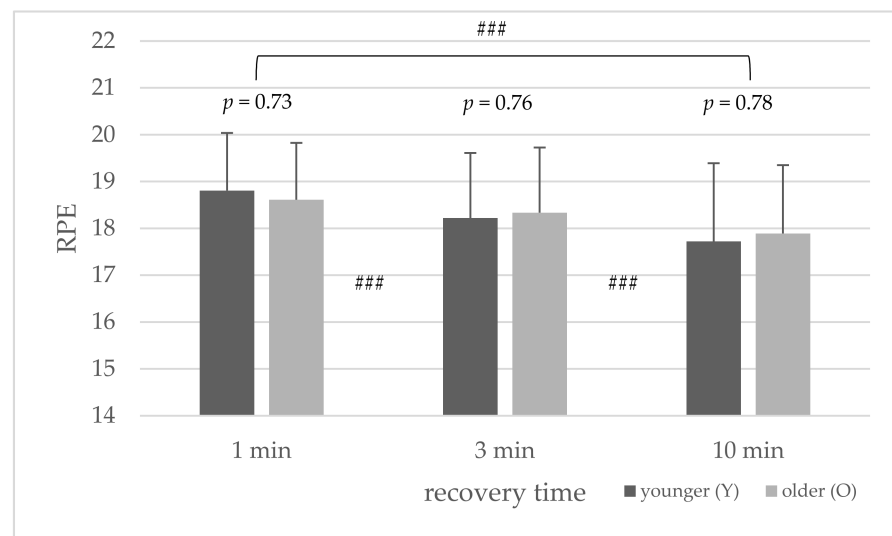


Figure 4. Mean and standard deviation of average rating of perceived exertion (RPE) for the younger and older groups ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

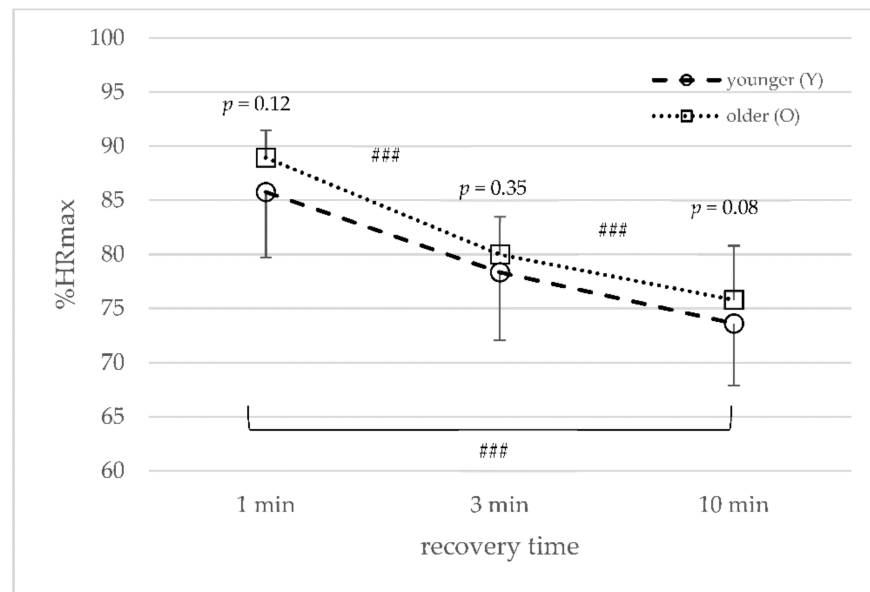


Figure 5. Mean and standard deviation of average percentage of heart rate recovery for the younger and older groups ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

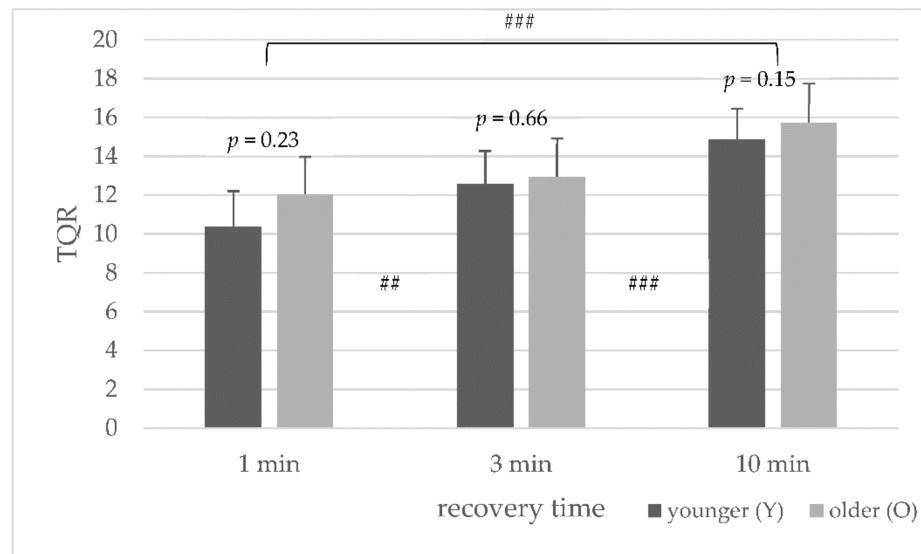


Figure 6. Mean and standard deviation of average perceived recovery (TQR scale) for the younger and older groups ## ($p < 0.01$) and ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

3.2. Lactate

The average lactate concentration in the three HIIT protocols showed no significant age differences (Figure 3). For both age groups, the average lactate concentration was highest at a recovery time of three minutes between the WAnTs. The average lactate concentration significantly differed between the recovery time of one to ten minutes ($p = 0.005$) and three to ten minutes ($p < 0.001$) for both age groups, respectively, but not for one to three minutes ($p = 0.36$).

3.3. Heart Rate

The average recovery rate for %HRmax at the end of the second, third, and fourth recovery phases were not significant between the younger and older groups, or between the different HIIT protocols (Figure 4). However, the younger group showed a slightly but

not significantly higher HR recovery throughout the different HIIT protocols. For both age groups, the %HR_{max} declined with an increase in recovery time for one to three ($p < 0.001$), three to ten ($p < 0.001$), and one to ten minutes ($p < 0.001$) (Figure 4).

3.4. Subjective Rating of Perceived Exertion (RPE Scale)

The average RPE values did not differ significantly between the younger and older group in the HIIT protocols (Figure 5). Overall, the RPE values decreased with the increase in recovery time between the WAnTs. Both age groups showed significantly lowered RPE values from one to three minutes ($p < 0.001$), three to ten minutes ($p < 0.001$) and one to ten minutes ($p < 0.001$), respectively.

3.5. Subjective Rating of Perceived Recovery (TQR Scale)

No significant age differences in the average TQR values in the HIIT protocols (1, 3, and 10 min recovery) were found (Figure 6). With an increase in recovery time, there was an increase in TQR values. The average TQR values differed significantly for both age groups between one and three minutes ($p = 0.006$), and one and ten minutes ($p < 0.001$), and three and ten minutes of recovery time ($p < 0.001$).

3.6. Ventilatory Parameter during Recovery

No significant differences were found in the average respiratory exchange ratio (RER) between the age groups for all measurement points at the end of the recovery periods during all three HIIT protocols (1 min recovery: younger 1.17 ± 0.11 , older 1.17 ± 0.08 ; 3 min recovery: younger 1.05 ± 0.05 , older 1.07 ± 0.05 ; 10 min recovery: younger 0.88 ± 0.02 , older 0.87 ± 0.01). There was a significant decrease in RER from one to three minutes of recovery time ($p = 0.002$), and one to ten ($p < 0.001$) and three to ten ($p < 0.001$) minutes of recovery time in both age groups.

4. Discussion

There were no statistically significant differences in performance-related parameters VO_{2max} percentile [34] and power (relative PP (W/kg_{FFM})), or HR_{max}, attained during the VO_{2max} test between the group of younger and older athletes (Table 1). Thus, both groups displayed comparable relative aerobic performance levels. Furthermore, both groups showed no significant differences in PP, AP, and fatigue (%) throughout the WAnTs in the different HIIT protocols (Table 2).

The main findings of this study were that, during HIIT with repeated 30 s of all-out cycling exercise (WAnT), metabolic, cardiovascular, and subjective recovery was similar between the younger and older athletes. No significant differences were found in the average lactate concentration, peak power, average power, fatigue (%), %HR_{max}, RER, RPE, and TQR values between the age groups during the HIIT protocols with 1, 3, and 10 min recovery periods between WAnTs (Table 2 and Figures 3–6) ($p > 0.05$).

No significant differences in average lactate values during HIIT between younger and older subjects were detected. This is unexpected considering possible physiological and morphological changes associated with aging, such as a decreased maximum lactic acid production rate [11]. Furthermore, a decrease in muscle mass and shift towards a more oxidative muscle profile mediated by the atrophy of fast-twitch fibers is supposed to occur during aging [6], and indicates a reduced creatine phosphate metabolic capacity and a decreased rate of lactic acid formation and glycolysis. A variation in the response to HIIT using the Wingate test between subjects with a high rate of slow-twitch muscle fibers and subjects with a high rate of fast-twitch muscle fibers was examined by Lievens et al. [41]. Power recovered significantly faster in the “slow-twitch” group than in the “fast-twitch” group.

Because muscle biopsies were not taken in this study, we cannot present results for muscle fiber profiles in relation to recovery and performance during HIIT. However, the presented results, showing no age differences in physiological recovery, are in line with Fell

et al. [42,43]. Here, too, no differences were found in physiological recovery for a group of nine master cyclists (mean age: 45 years) compared to nine adult cyclists (mean age: 24 years) with similar VO_{2max} . Results from three 30 min time trials with similar absolute power output on three consecutive days showed no statistically significant differences for average power, lactate, countermovement jump height, sprint performance, and MVIC between the two age groups. Only perceptual measures for fatigue and soreness were higher, and perceptive recovery was lower in masters from the first to the third time trial. Adults showed no significant change in perceptual measures from the first to the third time trial. These results by Fell et al. [42,43] may suggest that master athletes perceived that they take a longer time to recover, even though they were able to physically recover at a similar rate compared to younger athletes of the same performance level. In the present study, we found no differences in RPE with our focus being on recovery during HIIT and not on the recovery on three consecutive days. In the absence of any published studies with the same or similar study design, and athletes with a similar performance level but different ages, no direct comparisons can be made.

However, results by Silverman and Mazzeo [44] for plasma lactate, glucose, and hormone levels in 24 trained cyclists and 23 untrained men constituting groups of young (trained 22.6 ± 0.8 years, untrained 22.9 ± 1.0 years), middle-aged (trained 46.5 ± 0.9 years, untrained 43.6 ± 1.1 years), and old (trained 63.9 ± 1.8 years, untrained 67.0 ± 2.2 years) subjects are of particular interest in the context of the present findings. Silverman and Mazzeo [44] had subjects perform a maximal incremental cycling test and a 45 min submaximal exercise test in which peak oxygen consumption was lower with older age. However, the trained groups with higher values for VO_{2peak} compared to the untrained groups had increased hormonal responses (cortisol, norepinephrine, epinephrine, and human growth hormone), as determined by plasma concentrations, to submaximal and maximal exercise in every age group. Furthermore, during 45 min of submaximal exercise, older trained individuals achieved results for all assessed hormone levels that were comparable to those of their younger counterparts, and showed significantly greater results compared to the untrained groups (both young and middle-aged groups). Comparable results were found during the maximal exercise testing in which older trained individuals demonstrated greater hormonal responses than the younger untrained group. Thus, this would suggest that, for a particular metabolic stress as induced in the study of Silverman and Mazzeo [44], neuroendocrine responses are enhanced with higher fitness levels and training throughout life may attenuate the decline in neuroendocrine function, which is in support of the present findings during HIIT.

Regarding $\%HR_{max}$, the present results found a similar response in the two age groups, even though the values were lower, and the changes between the 1, 3, and 10 min recovery time HIIT protocols were identical (Figure 4). It is well established that HR_{max} decreases with age [9], which is supported by the present results (Table 1). Accordingly, the HR was lower during the HIIT protocols; however, the course of change during each HIIT protocol and between the different HIIT protocols was similar. These results are supported by Darr et al. [45], who investigated HRR following a maximal incremental cycling test until exhaustion in trained and untrained groups of different ages. Darr et al. [45] divided 20 male cyclists based on their age and VO_{2peak} into four groups of young trained, old trained, young untrained, and old untrained. Although they found no differences in HRR in the trained age groups, they found differences in HRR in the untrained age groups. HRR was delayed in untrained compared to trained subjects. HRR was about 6 beats per minute faster in trained subjects compared to the untrained (VO_{2peak} 60 vs. 40 mL/min/kg), while no age effect of HRR was observed. Taken together with the present findings, the course of the $\%HR_{max}$ and HRR during intensive cycling exercise seems to be independent of age but dependent on training status.

When comparing the three different HIIT protocols, the measured parameters differed depending on the length of the recovery time between the 30 s sprints. For both age groups,

the overall performance decline was greatest in the HIIT protocol with the shortest recovery time and decreased with the increase in recovery time (Figure 2).

In both age groups, AP also declined between WAnTs one and four for the one- and three-minute protocols (Table 2). However, in the ten-minute protocol, AP decreased significantly in the younger group only. The fatigue (%) decreased significantly from WAnTs one to four in the HIIT protocol with one minute recovery time for the older and ten-minute recovery for the younger group. It is difficult to find a possible explanation and draw conclusions for these differences because no previous studies with a comparable study design have been conducted, and except for the power data, no age differences between the different HIIT protocols have been found. With increasing age, there is a decrease in muscle mass and atrophy of fast-twitch muscle fibers, which, in turn, results in a shift to a more oxidative muscle profile [6,7]. Due to these altered muscle properties, there may be a decreased metabolic capacity of creatine phosphate, which may lead to negative effects on maximal power output after a short recovery time (1 min) during high-intensity exercise. Furthermore, anaerobic energy output may have decreased with ageing, due to a reduction in glycolytic enzymes, particularly phosphofructokinase [6,7,13].

For both age groups, the average lactate concentration was highest in the HIIT protocol with the recovery time of three minutes between the WAnTs. The subjective recovery (Figure 6) increases with the length of the recovery time, and the decrease in power is lower at 3 min than at 1 min (Figure 2), and the power (peak power) is higher at 3 min (Table 2). Thus, more fast muscle fibers could be utilized, and the lactate concentration increased at 3 min, and during the 3 min recovery period, the lactate concentration could not be completely dissipated as during the 10 min recovery period.

5. Limitations

Some limitations must be considered when interpreting the results of this study. Although the performance level was similar in both groups, evaluating men and women together in terms of metabolic and cardiovascular effects of HIIT protocols is a limitation. Moreover, females were not tested during a standardized phase during their menstrual cycle. Future studies should further investigate age differences in male- and female-only groups. Additionally, the age gap between the two groups was 22.8 years. Future studies should try to find two age groups with a comparable performance level but an older master athletes group. Furthermore, it is a general limitation that a clear definition for the age of master athletes across different sports is missing. This study investigated HIIT with active recovery phases between exercise bouts. It would be interesting to replicate this study design with passive recovery phases between intervals.

6. Conclusions

The present study is the first to show how recovery during and after HIIT of younger and older athletes with similar performance levels compares. This study is particularly unique due to the fact that the data were obtained in well-trained athletes following three HIIT protocols with different recovery times in a randomized order.

The present study revealed novel findings in regards to lactate, heart rate, and subjective recovery during short high-intensity intervals (HIIT) with rest intervals of different durations in young and older well-trained cyclists with comparable aerobic performance levels ($VO_{2max} > 80$ th percentile [34], and relative power). This study indicates that recovery at the metabolic level following HIIT does not differ between the two age groups. Instead, it seems that the trainability of the organism is maintained. With respect to lactate, trainability at older age further ensures that metabolic processes occur in the same manner as in younger subjects. Although a direct comparison with other studies is difficult due to the limited amount of comparable study designs, parallels can be drawn from previous results [5,21,23,42–45].

The present results are particularly valuable as studies on HIIT are mostly conducted on young athletes, and it is purely speculative to assume that training recommendations

apply equally to all age groups. However, based on the current results, HIIT can achieve similar training goals in younger and older athletes, considering that the athletes' performance levels are comparable. These findings also show that an active recovery of well over 3 to 10 min is recommendable for both younger and older athletes in order to achieve high power output in each interval and to minimize fatigue-induced power loss. According to the group of subjects investigated, these statements are applicable to athletes up to about 50 years of age. Above this range, the extent to which the trainability during HIIT identified in this study is maintained at an even older age, for example, up to the age of 75, should be further examined. The results of the present investigation were obtained using HIIT sessions consisting of four all-out sprints of 30 s. How the current findings relate to long HIIT intervals of 2–5 min [46] remains to be investigated.

Author Contributions: Conceptualization, L.H., M.M. and K.H.; methodology, L.H., M.M. and K.H.; software, L.H. and M.M.; validation, L.H., M.M. and K.H.; formal analysis, L.H., M.M. and K.H.; investigation, L.H., M.M., S.F. and S.K.; resources, O.S. and K.H.; data curation, L.H. and S.F.; writing—original draft preparation, L.H.; writing—review and editing, L.H., M.M., S.K., S.F. and K.H.; visualization, L.H.; supervision, O.S. and K.H.; project administration, K.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: We acknowledge the financial support within the funding programme Open Access Publishing by the German Research Foundation (DFG).

Institutional Review Board Statement: The study was approved by the Martin-Luther-University Halle-Wittenberg Ethics Committee (Reference code: 2019-094) and conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki.

Informed Consent Statement: All subjects have given their informed consent.

Acknowledgments: The authors would like to thank all athletes for their participation in this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Hausswirth, C.; Mujika, I. *Recovery for Performance in Sport*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2013.
2. Kellmann, M.; Bertollo, M.; Bosquet, L.; Brink, M.; Coutts, A.J.; Duffield, R.; Erlacher, D.; Halson, S.L.; Hecksteden, A.; Heidari, J.; et al. Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2018**, *13*, 240–245. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Fell, J.; Williams, A.D. The effect of aging on skeletal-muscle recovery from exercise: Possible implications for aging athletes. *J. Aging Phys. Act.* **2008**, *16*, 97–115. [[CrossRef](#)]
4. Easthope, C.S.; Hausswirth, C.; Louis, J.; Lepers, R.; Vercruyssen, F.; Brisswalter, J. Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2010**, *110*, 1107–1116. [[CrossRef](#)]
5. Hottenrott, L.; Ketelhut, S.; Schneider, C.; Wiewelhove, T.; Ferrauti, A. Age- and Sex-Related Differences in Recovery From High-Intensity and Endurance Exercise: A Brief Review. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2021**, *16*, 752–762. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. McCormick, R.; Vasilaki, A. Age-related changes in skeletal muscle: Changes to life-style as a therapy. *Biogerontology* **2018**, *19*, 519–536. [[CrossRef](#)]
7. Faulkner, J.A.; Davis, C.S.; Mendias, C.L.; Brooks, S.V. The aging of elite male athletes: Age-related changes in performance and skeletal muscle structure and function. *Clin. J. Sport Med.* **2008**, *18*, 501. [[CrossRef](#)]
8. Bieuzen, F.; Hausswirth, C.; Louis, J.; Brisswalter, J. Age-related changes in neuromuscular function and performance following a high-intensity intermittent task in endurance-trained men. *Gerontology* **2010**, *56*, 66–72. [[CrossRef](#)]
9. Tanaka, H.; Monahan, K.D.; Seals, D.R. Age-Predicted Maximal Heart Rate Revisited. *J. Am. Coll. Cardiol.* **2001**, *37*, 153–156. [[CrossRef](#)]
10. Juel, C.; Klarskov, C.; Nielsen, J.J.; Krstrup, P.; Mohr, M.; Bangsbo, J. Effect of high-intensity intermittent training on lactate and H⁺ release from human skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* **2014**, *286*, E245–E251. [[CrossRef](#)]
11. Berthelot, G.; Bar-Hen, A.; Marck, A.; Foulonneau, V.; Douady, S.; Noirez, P.; Toussaint, J.F. An integrative modeling approach to the age-performance relationship in mammals at the cellular scale. *Sci Rep.* **2019**, *9*, 1–10. [[CrossRef](#)]
12. Korhonen, M.T.; Suominen, H.; Mero, A. Age and sex differences in blood lactate response to sprint running in elite master athletes. *Can. J. Appl. Physiol.* **2005**, *30*, 647–665. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

13. Hunter, G.R.; Newcomer, B.R.; Weinsier, R.L.; Karapondo, D.L.; Larson-Meyer, D.E.; Joannise, D.R.; Bamman, M.M. Age is independently related to muscle metabolic capacity in premenopausal women. *J. Appl. Physiol.* **2002**, *93*, 70–76. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Hall, J.L.; Mazzeo, R.S.; Podolin, D.A.; Cartee, G.D.; Stanley, W.C. Exercise training does not compensate for age-related decrease in myocardial GLUT-4 content. *J. Appl. Physiol.* **1994**, *76*, 328–332. [[CrossRef](#)]
15. Cicioni-Kolsky, D.; Lorenzen, C.; Williams, M.D.; Kemp, J.G. Endurance and sprint benefits of high-intensity and supramaximal interval training. *Eur. J. Sport Sci.* **2013**, *13*, 304–311. [[CrossRef](#)]
16. Milanović, Z.; Sporiš, G.; Weston, M. Effectiveness of High-Intensity Interval Training (HIT) and Continuous Endurance Training for VO₂max Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Trials. *Sports Med.* **2015**, *45*, 1469–1481. [[CrossRef](#)]
17. Sloth, M.; Sloth, D.; Overgaard, K.; Dalgas, U. Effects of Sprint Interval Training on VO₂max and Aerobic Exercise Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Scand J. Med. Sci. Sports* **2013**, *23*, e341–e352. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Buchheit, M.; Laursen, P.B. High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle: Part I: Cardiopulmonary Emphasis. *Sports Med.* **2013**, *43*, 313–338. [[CrossRef](#)]
19. Buchheit, M.; Laursen, P. Science and application of high-intensity interval training: Solutions to the programming puzzle. In *Physiological Targets of HIIT*; Laursen, P., Buchheit, M., Eds.; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2018; pp. 33–50.
20. Mujika, I. Quantification of Training and Competition Loads in Endurance Sports: Methods and Applications. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2017**, *12*, S2–S9. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
21. Hebestreit, H.; Mimura, K.; Bar-Or, O. Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: Comparing boys and men. *J. Appl. Physiol.* **1993**, *74*, 2875–2880. [[CrossRef](#)]
22. Laursen, P.; Buchheit, M.; Vollmer, J.C. Science and application of high-intensity interval training: Solutions to the programming puzzle. In *Genesis and Evolution of High-Intensity Interval Training*; Laursen, P., Buchheit, M., Eds.; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2018; pp. 3–15.
23. Hottenrott, L.; Möhle, M.; Ide, A.; Ketelhut, S.; Stoll, O.; Hottenrott, K. Recovery from Different High-Intensity Interval Training Protocols: Comparing Well-Trained Women and Men. *Sports* **2021**, *9*, 34. [[CrossRef](#)]
24. Ohuchi, H.; Suzuki, H.; Yasuda, K.; Arakaki, Y.; Echigo, S.; Kamiya, T. Heart rate recovery after exercise and cardiac autonomic nervous activity in children. *Pediatr. Res.* **2000**, *47*, 329. [[CrossRef](#)]
25. Birat, A.; Bourdier, P.; Piponnier, E.; Blazeovich, A.J.; Maciejewski, H.; Duché, P.; Ratel, S. Metabolic and fatigue profiles are comparable between prepubertal children and well-trained adult endurance athletes. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 387. [[CrossRef](#)]
26. Buchheit, M.; Duché, P.; Laursen, P.B.; Ratel, S. Postexercise heart rate recovery in children: Relationship with power output, blood pH, and lactate. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2010**, *35*, 142–150. [[CrossRef](#)]
27. Kappenstein, J.; Fernández-Fernández, J.; Engel, F.; Ferrauti, A. Effects of active and passive recovery on blood lactate and blood pH after a repeated sprint protocol in children and adults. *Pediatr. Exerc. Sci.* **2015**, *27*, 77–84. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Chamari, K.; Ahmaidi, S.; Ayoub, J.; Merzouk, A.; Laparidis, C.; Choquet, D.; Mercier, J.; Préfaut, C. Effects of aging on cardiorespiratory responses to brief and intense intermittent exercise in endurance-trained athletes. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* **2000**, *55*, 537–544. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. Vandewalle, H.; Pérès, G.; Monod, H. Standard Anaerobic Exercise Tests. *Sports Med.* **1987**, *4*, 268–289. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Bar-Or, O. The Wingate Anaerobic Test: An Update on Methodology, Reliability and Validity. *Sports Med.* **1987**, *4*, 381–394. [[CrossRef](#)]
31. Inbar, O.; Bar-Or, O.; Skinner, J.S. The Development of the Wingate Anaerobic Test. In *The Wingate Anaerobic Test*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 1996; pp. 1–7.
32. Patton, J.F.; Duggan, A. An evaluation of tests of anaerobic power. *Aviat. Space Environ. Med.* **1987**, *58*, 237–242.
33. Lovell, D.; Mason, D.; Delphinus, E.; Eagles, A.; Shewring, S.; McLellan, C. Does Upper Body Strength and Power Influence Upper Body Wingate Performance in Men and Women? *Int. J. Sports Med.* **2011**, *32*, 771–775. [[CrossRef](#)]
34. Graves, R.S.; Mahnken, J.D.; Perea, R.D.; Billinger, S.A.; Vidoni, E.D. Modeling Percentile Rank of Cardiorespiratory Fitness Across the Lifespan. *Cardiopulm. Phys. Ther. J.* **2015**, *26*, 108–113. [[CrossRef](#)]
35. Midgley, A.W.; Carroll, S.; Marchant, D.; McNaughton, L.R.; Siegler, J. Evaluation of true maximal oxygen uptake based on a novel set of standardized criteria. *Appl. Physiol. Nutr. Metabolism.* **2009**, *34*, 115–123. [[CrossRef](#)]
36. Beltz, N.M.; Gibson, A.L.; Janot, J.M.; Kravitz, L.; Mermier, C.M.; Dalleck, L.C. Graded exercise testing protocols for the determination of VO₂max: Historical perspectives, progress, and future considerations. *J. Sports Med.* **2016**, *2016*, 3968393. [[CrossRef](#)]
37. Borg, G.; Hassmén, P.; Lagerström, M. Perceived exertion related to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1987**, *56*, 679–685. [[CrossRef](#)]
38. Kenttä, G.; Hassmén, P. Overtraining and recovery. A conceptual model. *Sports Med.* **1998**, *26*, 1–16. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Evans, J.A.; Quinney, H.A. Determination of resistance settings for anaerobic power testing. *Can. J. Appl. Sport Sci. J. Can. Sci. Appl. Sport.* **1981**, *6*, 53–56.
40. Hopkins, W.G. Spreadsheets for analysis of controlled trials, with adjustment for a subject characteristic. *Sport Sci.* **2006**, *10*, 46–50.
41. Lievens, E.; Klass, M.; Bex, T.; Derave, W. Muscle Fiber Typology Substantially Influences Time to Recover from High-Intensity Exercise. *J. Appl. Physiol.* **2020**, *128*, 648–659. [[CrossRef](#)]

42. Fell, J.; Haseler, L.; Gaffney, P.; Reaburn, P.; Harrison, G. Performance during consecutive days of laboratory time-trials in young and veteran cyclists. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **2006**, *46*, 395–402.
43. Fell, J.; Reaburn, P.; Harrison, G.J. Altered perception and report of fatigue and recovery in veteran athletes. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **2008**, *48*, 272.
44. Silverman, H.G.; Mazzeo, R.S. Hormonal responses to maximal and submaximal exercise in trained and untrained men of various ages. *J. Gerontol. Ser. A Biol. Sci. Med. Sci.* **1996**, *51*, B30–B37. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Darr, K.C.; Bassett, D.R.; Morgan, B.J.; Thomas, D.P. Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. *Am. J. Physiol.* **1988**, *254*, H340–H343. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
46. Laursen, P.; Buchheit, M. *Science and Application of High-Intensity Interval Training*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2019; pp. 68–69.

5.3 Publikation 3

Hottenrott, L., et al. (2021). Recovery from different high-intensity interval training protocols: Comparing well-trained women and men. *Sports*, 9(3), 34.

Article

Recovery from Different High-Intensity Interval Training Protocols: Comparing Well-Trained Women and Men

Laura Hottenrott ^{1,*}, Martin Möhle ², Alexander Ide ², Sascha Ketelhut ², Oliver Stoll ^{1,2}  and Kuno Hottenrott ^{1,2} 

¹ Institute of Performance Diagnostics and Health Promotion, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, 06108 Halle, Germany; oliver.stoll@sport.uni-halle.de (O.S.); kuno.hottenrott@sport.uni-halle.de (K.H.)

² Institute of Sport Science, Martin-Luther University Halle-Wittenberg, 06108 Halle, Germany; martin.moehle@sport.uni-halle.de (M.M.); alexander.ide@sport.uni-halle.de (A.I.); sascha.ketelhut@sport.uni-halle.de (S.K.)

* Correspondence: hottenrott.laura@gmail.com

Abstract: Due to physiological and anatomical sex differences, there are variations in the training response, and the recovery periods following exercise may be different. High-intensity interval training (HIIT) protocols are well-suited to differentially investigate the course of recovery. This study was conducted to determine sex-specific differences in the recovery following HIIT intervals interspersed with recovery phases of different lengths. Methods: Well-trained cyclists and triathletes (n = 11 females, n = 11 males) participated in this study. There were no significant sex differences in maximal heart rate (HR), relative peak power to body mass and fat-free mass, training volume, and VO_{2max}-percentiles (females: 91.8 ± 5.5 %, males: 94.6 ± 5.4 %). A 30 s Wingate test was performed four times, separated by different active recovery periods (1, 3, or 10 min). Lactate, HR, oxygen uptake, and subjective rating of exertion and recovery were determined. Results: For the recovery time of three and ten minutes, men showed significantly higher lactate concentrations ($p = 0.04$, $p = 0.004$). Contrary, HR recovery and subjective recovery were significantly slower in women than in men. Conclusion: During HIIT, women may be more resistant to fatigue and have a greater ability to recover metabolically, but have a slower HR and subjective recovery.

Keywords: wingate test; HIIT; interval training; sex differences; female athletes; cycling; endurance exercise; lactate; heart rate recovery; perceived exertion



Citation: Hottenrott, L.; Möhle, M.; Ide, A.; Ketelhut, S.; Stoll, O.; Hottenrott, K. Recovery from Different High-Intensity Interval Training Protocols: Comparing Well-Trained Women and Men. *Sports* **2021**, *9*, 34. <https://doi.org/10.3390/sports9030034>

Academic Editor: Antonio Tessitore

Received: 31 January 2021

Accepted: 25 February 2021

Published: 2 March 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

High-intensity interval training (HIIT) sessions are increasingly being used in performance and recreational sports to improve endurance performance and maximum oxygen uptake (VO_{2max}) [1–3]. HIIT protocols are infinitely variable and may differ in terms of intensity, duration of intervals, number of repetitions and recovery time between interval bouts, thereby pursuing different training goals [4,5]. Postexercise recovery, as a multifaceted (e.g., physiological, psychological) restorative process, is a fundamental component of exercise training and is crucial for continuous performance development [6,7]. The duration of the recovery time influences the maximal performance during each interval and the overall organismic stress [8,9]. Furthermore, HIIT protocols are well-suited for differentially investigating the course of recovery in women and men.

Previous research has shown that due to physiological and anatomical sex differences, there are variations in the training response between women and men, and the recovery period following exercise may be characterized by different processes [10]. Sprint performance during intermittent exercise on a cycle ergometer is on average higher in men than in women [11]. On the other hand, women appear to have a higher resistance to fatigue [12,13]. Regarding intermittent exercise, this might require sex-specific recovery times during and after exercise to achieve the intended training effects. Currently, there are

no specific recommendations that differentially address the recovery of endurance-trained women and men during and after intensive intermittent endurance exercise. During isometric contractions, Albert et al. [14] were able to show sex-specific differences in the recovery process, whereby women demonstrated a higher fatigue resistance and a higher relative performance than men. This was also confirmed by Wüst et al. [15] for isometric exercises.

Sex-specific differences in the recovery process during repeated cycling ergometer sprints over 30 s (Wingate tests with 20 min rest in between) have been revealed by Esbjörnsson-Liljedahl et al. [16]. They reported a faster Adenosine triphosphate ATP resynthesis in muscle biopsies during the recovery phases in women. Accordingly, there is some evidence that the course of recovery may differ between men and women during and after high levels of physical exertion. However, how sex affects the recovery has not been assessed during HIIT protocols applying different rest periods between the exercise bouts.

Maximal efforts over 30 s on the cycle ergometer (Wingate anaerobic test (WAnT)) are well-suited for the obtention of standardized power and recovery data [17] and to allow for continuous measurement of power, heart rate, and oxygen uptake. The duration of 30 s has been proven to be suitable to evaluate anaerobic performance in numerous experimental studies on maximal exercise [18]. It also allows for a comprehensive and differentiated discussion of the results of this study with previous results from WAnTs and for the derivation of practical conclusions (e.g., for the control of interval training sessions in different endurance sports). So far, there have been no studies assessing sex differences in recovery after different HIIT protocols. Thus, investigating repeated 30-s HIIT periods to examine sex differences in recovery variables addresses a gap in the literature.

This study aims to examine whether there are sex-specific differences in metabolic, cardiovascular, and subjective recovery following 30-s high-intensity intervals interspersed with recovery phases of different lengths. Furthermore, it will be assessed whether the different recovery periods influence the maximal power output of female and male athletes.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

Twenty-four well-trained endurance athletes (cyclists and triathletes), including 12 females (mean age: 32.1 ± 9.7 years) and 12 males (mean age: 33.2 ± 9.9 years), were recruited to take part in this study. Two athletes (one male, one female) dropped out due to injuries that were not related to the study intervention. Participation required a training volume of at least 6 h/week of endurance exercise and cycling training for at least six months prior to the intervention. Additionally, athletes had to meet the following inclusion criteria: very good endurance performance (above the 80th percentile) based on VO_{2max} [19]. The baseline characteristics of the 22 athletes included in the data analysis are shown in Table 1. There were no significant differences between women and men concerning the performance-related parameters maximal heart rate (HR_{max}), relative peak power output to body mass and fat-free mass (FFM), and weekly training volume. According to age and sex-specific VO_{2max} percentiles [19], female and male athletes displayed a comparable maximal aerobic performance capacity. Analysis of the bioimpedance data showed sex differences for body mass, body mass index (BMI), body fat, and FFM. There were no significant changes in bioimpedance data between testing days. This study was carried out in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Martin Luther University Halle Wittenberg Ethics Committee (Reference code: 2019-094). All participants were informed about the risks and benefits of the investigation and provided informed consent before participating in the study.

Table 1. Anthropometric data, maximal heart rate (HR_{max}), and exercise performance parameters of participants at baseline. Data are means ± SD.

Parameter	Women (n = 11)	Men (n = 11)	p-Values
Age (years)	31.7 ± 10.0	33.5 ± 10.2	0.69
Height (m)	1.66 ± 0.06	1.80 ± 0.05	<0.001
Body mass (kg)	57.2 ± 6.3	75.2 ± 4.3	<0.001
BMI (kg/m ²)	21.2 ± 2.3	23.5 ± 2.2	0.03
Body fat (%)	15.6 ± 6.8	10.9 ± 6.6	<0.001
FFM (kg)	45.9 ± 10.0	67.9 ± 4.0	<0.001
VO _{2max} (mL/min/kg)	47.7 ± 5.8	56.0 ± 5.9	<0.001
HR _{max} (min ⁻¹)	180.6 ± 11.5	178.9 ± 12.6	0.75
Peak Power (W/kg)	4.69 ± 0.43	5.07 ± 0.50	0.07
Peak Power (W/kg _{FFM})	5.57 ± 0.56	5.63 ± 0.61	0.63
VO _{2max} -percentile (%)	91.8 ± 5.5	94.6 ± 5.4	0.23
Training (h/week)	9.6 ± 3.3	8.2 ± 1.9	0.87

2.2. Test Protocol

Participants reported to the laboratory on four occasions in a rested and hydrated state after fasting for at least two hours. Furthermore, they were told to avoid strenuous exercise 48 h before all tests. Each athlete was examined at the same time of day, and performance tests were conducted on the same cycling ergometer. Throughout the course of the study, participants were asked to maintain their usual dietary habits and training load was documented. All tests were conducted under standardized conditions (20 °C room temperature and 55% relative humidity).

During the first visit, baseline assessments were conducted. Participants completed a medical questionnaire to ensure they were not taking any medication or supplements that could interfere with the study. Additionally, body composition (body mass, body fat, and FFM) was measured using a bioimpedance device (Bio Impedance Analyzer, Data Input GmbH, Germany) after 20 min supine rest. Afterwards, aerobic fitness in terms of oxygen uptake was assessed using a Metalyzer 3B (Cortex, Leipzig, Germany) during an incremental test until voluntary exhaustion on a high-performance bicycle ergometer (E 2000 s, FES, Berlin, Germany). The test started with an eight-minute warm-up on the cycling ergometer at 100 (male athletes) or 70 W (female athletes). After the warm-up phase, the athletes completed the VO_{2max} test. All participants started with a resistance of 70 W. Every minute, the power was increased by 30 W. The cadence was set at 80–90 rpm.

One week after the baseline test, participants completed the first HIIT session. A 30 s WAnT was performed four times, separated by different resting periods (1, 3, or 10 min) (Figure 1). Participants performed the three different HIIT protocols under standardized conditions in a randomized order regarding the three recovery times (1, 3, or 10 min) with one week recovery in between. The power and cadence for the warm-up, cool-down and the active recovery periods was set at 70 W for female and 100 W for male athletes with a cadence of 80–90 rpm. Lactate levels were measured with the enzymatic-amperometric method (Mueller, model Super GL ambulance, Germany) in 10 µL blood taken from the ear lobe. During all tests, gas exchange using a Metalyzer 3B (Cortex, Leipzig, Germany) and heart rate (HR) and beat-to-beat (RR) intervals using a HR monitor (Polar WearLink W.I.N.D-Sender and RS800 CX, Polar Electro GmbH, Büttelborn, Germany) were recorded continuously. For subjective rating of exertion and state of recovery, the Rating of Perceived Exertion (RPE) scale [20] and the Total Quality Recovery scale (TQR) [21] were utilized. RPE was assessed after each of the four WAnT intervals and TQR after each recovery period.

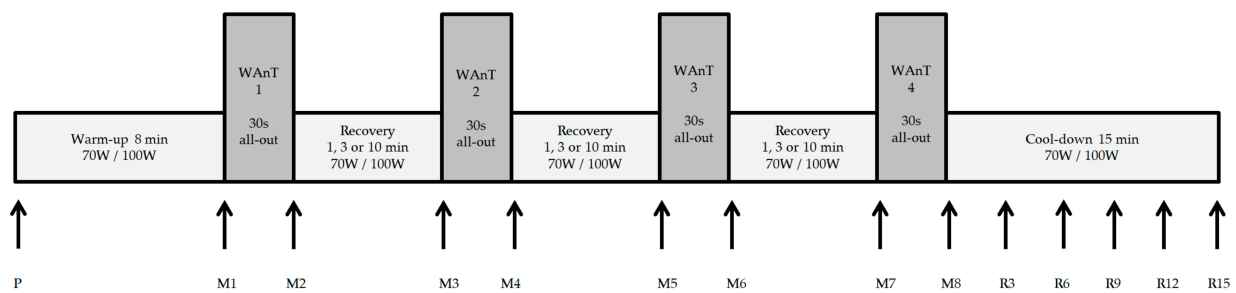


Figure 1. Study procedure of Wingate test protocol with measurement points. WAnT = Wingate anaerobic test, recovery = active recovery at 70 W/100 W. P = Preresting measurement, M1–M8 = measurement points during High-Intensity Interval Training (HIIT) protocol, R3–15 = recovery at minutes 3 to 15. The three different Wingate test protocols were performed in a randomized order regarding the three recovery times (1, 3, or 10 min) with one week recovery in between.

Figure 1 shows the test protocol with the different measurement points. Capillary blood was taken for lactate determination at the first measurement point (P) as well as at the measurement points M2, M4, M6, and M8. Subjective ratings of the perceived exertion (RPE scale) were recorded at M2, M4, M6, and M8. At the measurement points M3, M5, and M7, the subjective rating of the perceived recovery (TQR scale) was recorded. During the recovery period of 10 min, blood was taken for lactate determination at these measurement points as well. Throughout the fifteen-minute cool-down, lactate concentrations were determined at R3, R6, R9, R12, and R15, and the TQR rating was documented. Power, heart rate, and ventilatory parameters were continuously recorded throughout the test period (from P to E15). Intraindividual fatigue, the respective performance decline within the WAnT over the 30-s test duration, was calculated using the formula: $\% \text{fatigue} = (\text{peak powerWAnT} - \text{average powerWAnT}) / \text{peak powerWAnT} \times 100$.

2.3. Statistical Analysis

Statistical analysis was conducted with IBM SPSS Statistics (version 25, International Business Machines Corporation, Armonk, NY, USA) and a published spreadsheet [22]. Descriptive statistics of the data are presented as mean \pm standard deviation (SD). Repeated measures two-way ANOVA with Bonferroni corrections for multiple comparisons if warranted was used to detect interaction effects. Where appropriate, univariate post hoc analysis including one-way ANOVA or two-tailed paired t-test were performed with Bonferroni's correction. The level of $p < 0.05$ was considered statistically significant.

3. Results

3.1. Power

Participants achieved no significantly different relative peak power outputs— 4.69 ± 0.43 W/kg (females) and 5.07 ± 0.50 W/kg (males)—in the baseline testing ($p = 0.07$). Sex differences were smaller when expressed relative to fat-free mass (FFM): 5.57 ± 0.56 W/kg_{FFM} females, 5.63 ± 0.61 W/kg_{FFM} males ($p = 0.63$) (Table 1).

The mean and standard deviation of Peak Power Output (PP), Average Power Output (AP), and the Percentage Fatigue of the three different Wingate protocols for women and men are displayed in Table 2. Significant differences from WAnT one to WAnT four were found for both PP and AP for women and men in the one-minute recovery protocol. PP also significantly declined from WAnTs one to four for both women and men in the three-minute protocol. However, no significant differences in PP and AP between WAnTs one and four for women and men were found in the three-minute recovery protocol (Table 2). The fatigue (%) decreased from WAnTs one to four in the one-minute and ten-minute recovery protocols for male athletes only.

Table 2. Mean values and standard deviations of peak power output (PP), average power (AP) and %fatigue during Wingate Tests (WAnTs) with one-, three- and ten-min recovery times for women and men. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ between T1–T2, T2–T3, and T3–T4.

Parameter	Recovery	Sex	WAnT 1	WAnT 2	WAnT 3	WAnT 4	T1–T4	
Peak Power (W)	1 min	w	532.6 ± 110.9	439.2 ± 67.4 ***	454.8 ± 72.2	426.8 ± 67.7	$p = 0.006$	
		m	843.8 ± 174.2	673.4 ± 78.7 **	625.8 ± 90.7 *	573.7 ± 78.7 ***	$p < 0.001$	
Av. Power (W)		w	345.6 ± 54.9	302.3 ± 46.2 ***	292.9 ± 51.7 *	287.4 ± 49.5	$p < 0.001$	
		m	608.0 ± 93.5	517.7 ± 69.3 **	482.5 ± 63.7 ***	454.0 ± 66.6 ***	$p < 0.001$	
Fatigue (%)		w	33.6 ± 11.7	30.6 ± 10.1	35.4 ± 7.3 *	32.4 ± 8.2 *	$p = 0.67$	
		m	27.6 ± 8.0	22.9 ± 7.7 *	22.6 ± 6.1	20.2 ± 5.9 *	$p = 0.002$	
Peak Power (W)		3 min	w	580.0 ± 98.2	555.3 ± 102.7 *	514.9 ± 97.2	505.8 ± 96.1	$p = 0.026$
			m	840.5 ± 149.5	762.8 ± 88.1 *	700.7 ± 86.5 ***	680.8 ± 83.9	$p = 0.002$
Av. Power (W)			w	347.9 ± 63.5	333.3 ± 53.8 **	319.1 ± 93.5 **	313.5 ± 47.2	$p = 0.64$
	m		622.7 ± 79.7	572.4 ± 73.4 ***	541.8 ± 70.8 **	532.2 ± 71.4 *	$p = 0.02$	
Fatigue (%)	w		39.4 ± 9.3	38.9 ± 10.6	37.3 ± 8.4	37.0 ± 9.6	$p = 0.29$	
	m		24.9 ± 9.2	24.8 ± 7.3	22.6 ± 5.8	21.8 ± 5.2	$p = 0.14$	
Peak Power (W)	10 min		w	565.4 ± 99.8	522.5 ± 88.2 *	517.6 ± 98.2	536.9 ± 103.3	$p = 0.06$
			m	850.6 ± 137.7	824.5 ± 147.7	783.9 ± 124.7	781.9 ± 98.0	$p = 0.09$
Av. Power (W)			w	341.3 ± 59.6	340.2 ± 56.5	342.9 ± 56.4	340.1 ± 56.5	$p = 0.80$
		m	622.1 ± 80.1	617.1 ± 81.5	603.7 ± 76.9 *	605.6 ± 75.1	$p = 0.25$	
Fatigue (%)		w	39.0 ± 9.0	34.2 ± 9.1 ***	33.0 ± 8.7	35.8 ± 8.2	$p = 0.06$	
		m	26.1 ± 7.9	24.2 ± 9.2	22.5 ± 5.1	22.3 ± 5.9	$p = 0.02$	

The decline in performance (in percentages) between the first and last WAnTs during the different test designs was compared between the sexes using a repeated-measures ANOVA. The descriptive statistics showed that females compared to males consistently had a smaller decrease in performance between the first and last WAnTs (Figure 2).

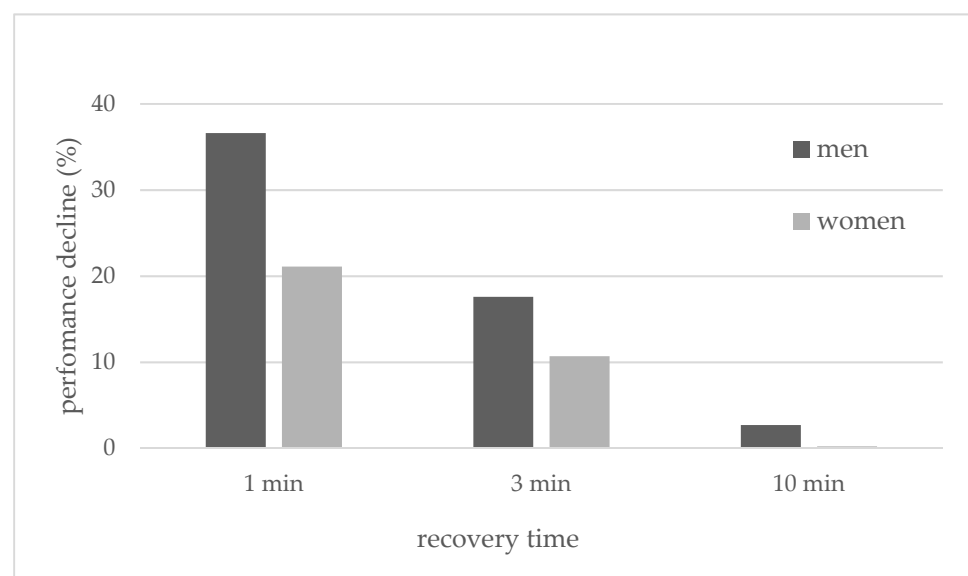


Figure 2. Mean values of the percentage of performance decline (%) during the three different Wingate Test (WAnT) protocols with different recovery periods of one, three and ten minutes for women and men.

For both the female and male subjects, the greatest drop in performance was observed in the 1-min recovery and the smallest drop in the 10-min recovery period. The ANOVA analysis did not reveal an interaction effect for %performance drop \times sex ($F(2, 40) = 0.72$, $p = 0.49$). There was also no main effect for the between-subjects factor ($F(1, 20) = 2.75$,

$p = 0.11$). Only a main effect for the within-subject factor was found ($F(2, 40) = 55.65$, $p < 0.001$).

Figures 3–7 show the data at the measuring points following the second, third, and fourth WAnTs in the three different HIIT protocols with one-, three- or ten-minute active recovery in between the WAnTs.

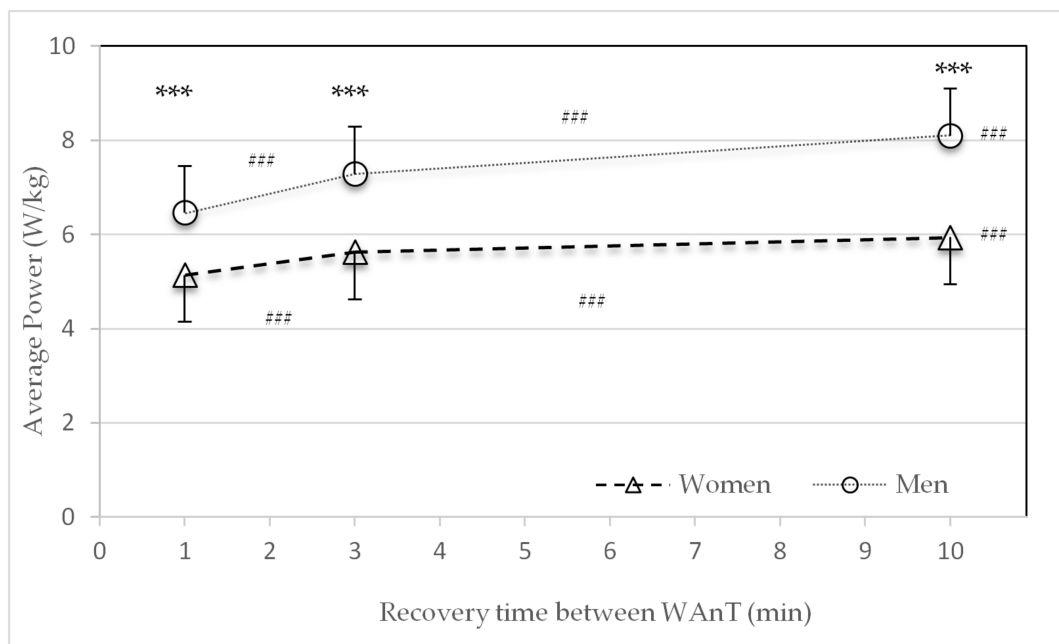


Figure 3. Mean and standard deviation of average power (W/kg) after the second, third, and fourth Wingate tests (WAnTs) in the three different test protocols following the recovery periods of one, three or ten minutes for women and men. *** ($p < 0.001$) between men and women. ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

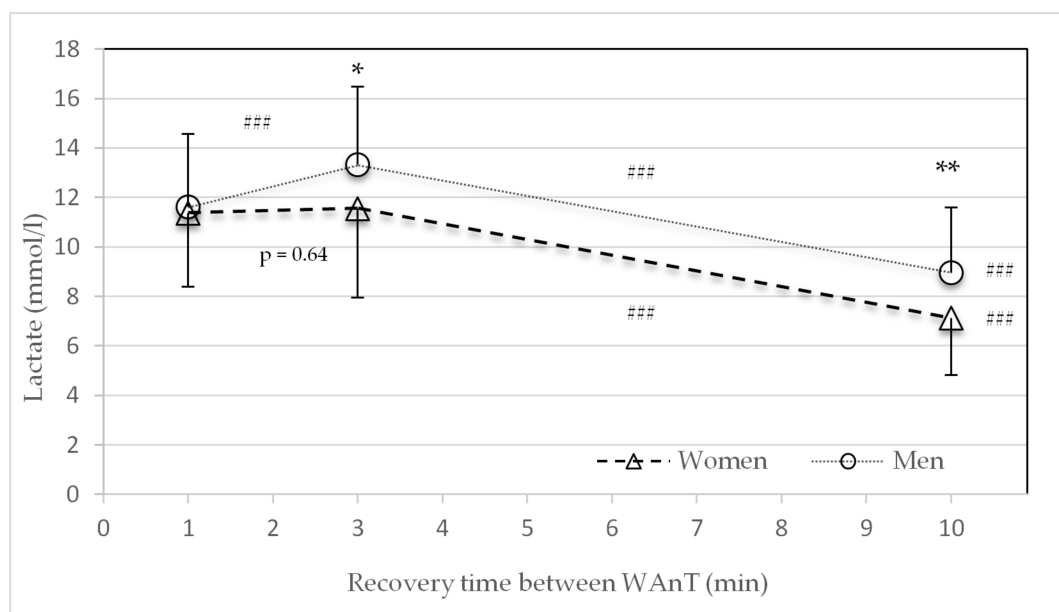


Figure 4. Mean and standard deviation of average lactate concentration (mmol) after the second, third, and fourth Wingate tests (WAnTs) in the three different study protocols following the recovery periods of one, three or ten minutes for women and men. * ($p < 0.05$) and ** ($p < 0.01$) between men and women. ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

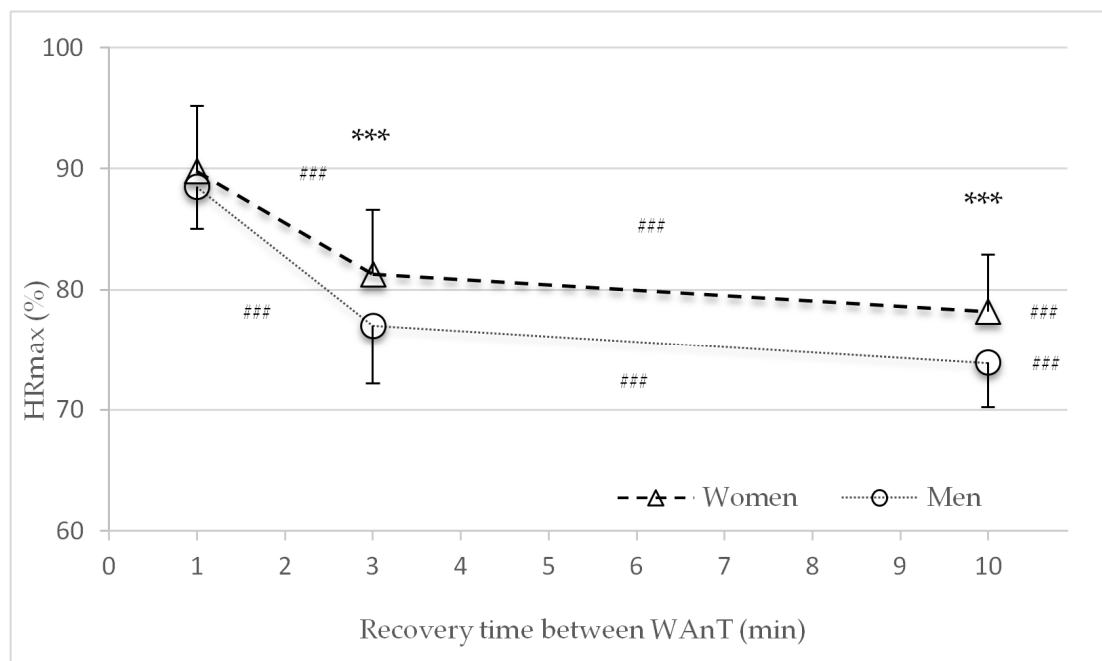


Figure 5. Mean and standard deviation of the average percentage of heart rate recovery (%HRmax) at the end of the second, third, and fourth recovery periods in the three study protocols with different lengths of recovery (one, three, or ten minutes) between Wingate tests (WAnTs) for women and men. *** ($p < 0.001$) between men and women. ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

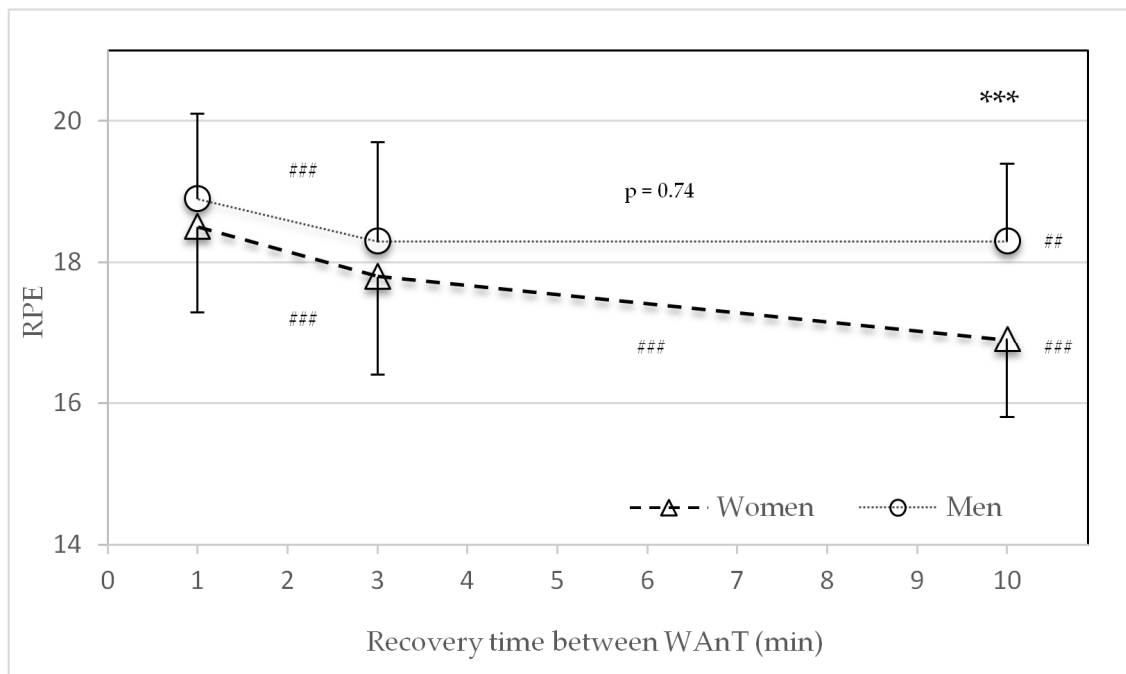


Figure 6. Mean and standard deviation of the average rating of perceived exertion (RPE scale) after the second, third, and fourth Wingate tests (WAnTs) in the three different study protocols with recovery periods of one, three, or ten minutes for women and men. *** ($p < 0.001$) between men and women. ## ($p < 0.01$) and ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

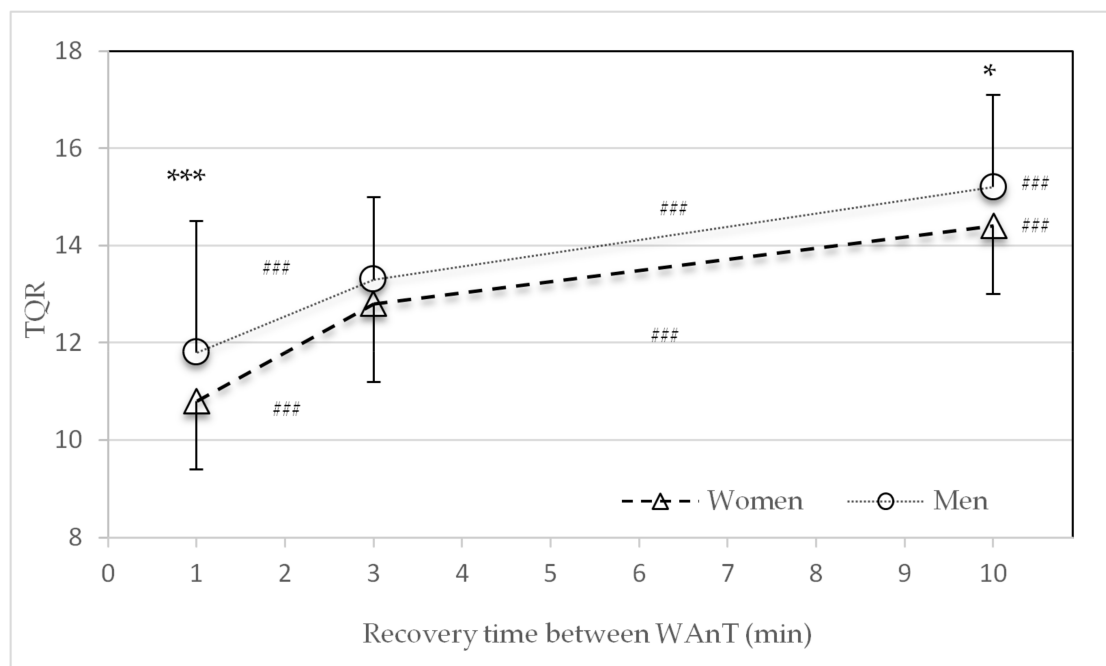


Figure 7. Mean and standard deviation of rating of average perceived recovery (Total Quality Recovery (TQR) scale) at the end of the second, third, and fourth recovery periods in the three different study protocols with different lengths of recovery (one, three, or ten minutes) between Wingate tests (WAnTs) for women and men. * ($p < 0.05$) and *** ($p < 0.001$) between men and women. ### ($p < 0.001$) between the different protocols (1 to 3, 3 to 10, and 1 to 10 min).

The relative average power (W/kg) after the second, third and fourth WAnTs was significantly higher in men than in women for all three protocols ($p < 0.001$) (Figure 3). For both sexes the power significantly increased with an increase in recovery time from one to three, three to ten, and one to ten minutes ($p < 0.001$) (Figure 3).

3.2. Lactate

There were no significant sex differences in the average lactate concentrations in the HIIT protocol for the one-minute recovery period between the four WAnTs (Figure 4). For the recovery times of three minutes ($p = 0.04$) and ten minutes ($p = 0.004$), men showed significantly higher lactate concentrations. For both sexes, the average lactate concentration significantly declined with an increase in recovery time from three to ten and one to ten minutes ($p < 0.001$). However, the average lactate concentration significantly increased with an increase in recovery time from one to three minutes in men only ($p < 0.001$) (Figure 4).

3.3. Heart Rate

Figure 5 shows the percentage of average heart rate recovery ($\%HR_{max}$) at the end of the second, third, and fourth recovery periods with different lengths of recovery (one, three, or ten minutes) between WAnTs. No significant sex differences were found in the $\%HR_{max}$ in the HIIT protocol with the one-minute recovery period between the four WAnTs. Women had significantly higher $\%HR_{max}$ in the recovery times of three minutes ($p < 0.001$) and ten minutes ($p < 0.001$). For both sexes, the $\%HR_{max}$ significantly declined with an increase in recovery time from one to three, three to ten and one to ten minutes ($p < 0.001$) (Figure 5).

3.4. Subjective Rating of Perceived Exertion (RPE Scale)

There were no significant sex differences in the average RPE values in the HIIT protocol with one- and three-minute recovery periods between the four WAnTs. Regarding the recovery time of ten minutes, only men recorded significantly higher RPE values ($p > 0.001$) (Figure 6). Along with the increase from one to three, three to ten, and one to ten min recovery times, women reported significantly lower average RPE values ($p < 0.001$). Men

reported significant lower RPE values from one to three ($p < 0.001$) and one to ten minutes ($p < 0.01$), but not from three to ten minutes ($p = 0.74$) (Figure 6).

3.5. Subjective Recovery of Perceived Recovery (TQR Scale)

Significant sex differences in the average TQR values were found for the one-minute ($p < 0.001$) and ten-minute ($p = 0.03$) recovery periods (Figure 7). The average TQR values significantly increased for both women and men with an increase in recovery time from one to three, three to ten, and one to ten minutes ($p < 0.001$).

3.6. Ventilatory Parameter during Recovery

The average respiratory exchange ratio (RER) showed no differences between women and men at all measurement points at the end of the recovery periods for all three HIIT protocols with the different lengths of active recovery periods (1 min recovery: women 1.11 ± 0.08 , men 1.12 ± 0.10 ; 3 min recovery: women 1.02 ± 0.06 , men 1.03 ± 0.05 ; 10 min: women 0.92 ± 0.06 , men 0.93 ± 0.06) There was a highly significant decrease in the RER with an increase in the recovery period from one to three and to ten min ($p < 0.001$).

4. Discussion

The performance-related parameters VO_{2max} percentile [19] and relative power (W/kg and W/kg_{FFM}) attained during the VO_{2max} test were not statistically different between women and men (Table 1). Age was also not statistically different. Differences in body mass, height, and body fat are due to sex-related differences. Thus, it can be postulated that the results were based on two groups with comparable relative aerobic performance levels.

The main findings of this study were that after 30 s of high-intensity all-out cycling exercise, metabolic recovery was faster in women than in men. Significant differences in the lactate concentration were found in the three- and ten-minute recovery time HIIT protocols (Figure 4). These findings are in line with the decline in performance (power) (Figure 2 and Table 2). Compared to men, women consistently showed a smaller decline in average power between the first and last WAnTs. Contrary to this, heart rate and subjective recovery in the active recovery periods between the four WAnTs were slower in women than in men (Figures 5 and 7). Even though women reached a comparable $\%HR_{max}$ in the interval bouts, recovery between the interval bouts was slower. This was indicated by a higher $\%HR_{max}$ at the end of the three- and ten-minute recovery periods in women. No sex differences in $\%HR_{max}$ as well as in lactate concentrations were found in the one-minute recovery period. Women reporting a lower subjective recovery during the recovery periods (Figure 7) might be explained by the reduced heart rate recovery compared to men (Figure 5).

The instructed intensity of the WAnT protocols was an “all-out” effort. Therefore, subjective power input between female and male participants should have always been the same. However, the RPE results showed lower ratings of perceived exertion in the ten-minute recovery protocol for women and an overall decline in RPE with an increase in recovery time for both sexes (Figure 6). Women’s lower RPE values correspond to the lower lactate values in the three- and ten-min protocols. This is in line with Laurent et al. [23] who found no sex differences in RPE and HR_{max} during repeated 30 s sprints. Previous reports [24,25] have shown a higher reliance on fat metabolism during submaximal exercise. The results found in this investigation showed no sex differences in respiratory exchange ratio (RER) during WAnTs.

The present investigation reveals novel information regarding metabolic, cardiovascular, and subjective recovery during 30 s high-intensity intervals (WAnT) with recovery periods of different lengths in well-trained women and men with sex-matched aerobic performance levels ($VO_{2max} > 80$ th percentile (Graves et al. 2015), and relative power). The underlying mechanisms for these findings could be explained by previous studies reporting that women break down 42% less muscle glycogen in type 1 fibers during a single WAnT sprint compared to men [26]. This is in accordance with the findings of

lower blood lactate accumulation following single and repeated 30 s sprints [16,23,27]. The reduced glycogenolysis rate may be associated with lower basal activities of muscle phosphofructokinase and lactate dehydrogenase reported in women [28], or a lower catecholamine response to repeated sprints [16,27]. Furthermore, Vincent et al. [29] indicate a sex-related difference in postexercise plasma glucose and insulin responses after a supramaximal exercise.

Esbjörnsson-Liljedahl et al. [26] also showed a significantly higher peak power and average power in males compared to females during a repeated-sprint protocol consisting of repeated WAnTs with 20 min of recovery between tests. Lower lactate levels were reported in women, and a significant decline in average power from sprints one to three was reported in males only. These results, as well as the results by Laurent et al. [22], support the present findings (Table 2 and Figure 2) that females may have a greater ability to restore power between repeated sprints separated by recovery periods and therefore might have a greater maintenance of power compared to men. Additionally, Esbjörnsson-Liljedahl et al. [16] and Laurent et al. [22] found less initial power in female athletes, which is in accordance with the present findings. The greater initial power in men might have led to a greater decline of performance among the different recovery protocols (Figure 2). Overall, performance decline between the four sprints is smaller for women than for men. For both the female and male athletes, the greatest drop in performance is seen in the one-minute recovery design and decreases as the recovery duration increases.

Furthermore, Lievens et al. [30] examined the different responses to high-intensity interval training using WAnTs between a group with a predominance of slow-twitch muscle fibers and another group with a predominance of fast-twitch muscle fibers. Power in the “slow-twitch” group recovered significantly faster than in the “fast-twitch” group. Based on the review by Haizlip et al. [31], who postulated a genetic distribution of slow- and fast-twitch muscle fibers with a higher proportion of slow-twitch fibers in females and a higher proportion of fast-twitch fibers in males, the results of Lievens et al. [30] are in agreement with the present results for the recovery of lactate and power. Results for relative power are shown in W/kg (Figure 3) but comparable findings could have also been shown for relative power expressed as W/kg_{FFM}. However, we chose W/kg to reduce limitations in bioimpedance measurements.

Sex differences were also observed to affect the metabolic and sympathetic nervous system responses to supramaximal exercise [27]. Women reported lower plasma catecholamine (adrenaline) and lactate levels 5 min post-WAnTs at similar relative intensities compared to males [27,32]. Thus, this possibly implies an inhibitory effect of oestradiol on the sympathetic nervous system in females [27,32]. Previous research supports the present findings of a slower heart rate recovery in women. While HR_{max} at the end of a maximal running test did not differ between sexes, the decline in heart rate at minute one (HRR1) and minute two (HRR2) was significantly lower in females—i.e., male subjects’ heart rates decreased more rapidly [33]. This is in line with findings by Kappus et al. [34] of HRR1 and HRR2 declining significantly faster in males than in females. Sex differences in autonomic function and vagal reactivation following maximal exercise could explain these findings. Furthermore, Medonca et al. [35] reported that the cardiac autonomic function of women is more affected by supramaximal exercise than that of men.

5. Conclusions

As females are under-represented in sports and exercise medicine research, it is therefore not surprising that sex-specific HIIT protocols are widely lacking. HIIT protocols from studies only performed with men are commonly adapted for women. This might be erroneous as the present results and previous studies have indicated that sex-dependent and anthropometric and physiological differences between females and males might significantly affect recovery following repeated high-intensity exercise and thus can affect training response [36,37]. During repeated bouts of exercise women, may be more resistant to fatigue and have a greater ability to recover metabolically, but they have slower heart

rates and subjective recovery. As we continue to expand our knowledge on the underlying mechanisms of exercise performance, recovery, and adaptation, we recommend that researchers and practitioners consider the potential sex-specific differences involved.

Author Contributions: Conceptualization, L.H., M.M. and K.H.; methodology, L.H., M.M., and K.H.; software, M.M., A.I., and S.K.; validation, L.H., M.M., and K.H.; formal analysis, L.H., M.M., S.K., and K.H.; investigation, L.H., M.M., A.I., and S.K.; resources, O.S. and K.H.; data curation, L.H.; writing—original draft preparation, L.H.; writing—review and editing, L.H., M.M., A.I., S.K., O.S., and K.H.; visualization, L.H.; supervision, O.S. and K.H.; project administration, K.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and was approved by the Martin Luther University Halle Wittenberg Ethics Committee (Reference code: 2019-094).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Acknowledgments: We would like to thank all athletes for participating in the study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Cicioni-Kolsky, D.; Lorenzen, C.; Williams, M.D.; Kemp, J.G. Endurance and sprint benefits of high-intensity and supramaximal interval training. *Eur. J. Sport Sci.* **2013**, *13*, 304–311. [[CrossRef](#)]
- Milanović, Z.; Sporiš, G.; Weston, M. Effectiveness of High-Intensity Interval Training (HIT) and Continuous Endurance Training for VO_{2max} Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Trials. *Sports Med.* **2015**, *45*, 1469–1481. [[CrossRef](#)]
- Sloth, M.; Sloth, D.; Overgaard, K.; Dalgas, U. Effects of Sprint Interval Training on VO_{2max} and Aerobic Exercise Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Scand J. Med. Sci. Sports* **2013**, *23*, e341–e352. [[CrossRef](#)]
- Buchheit, M.; Laursen, P.B. High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle: Part I: Cardiopulmonary Emphasis. *Sports Med.* **2013**, *43*, 313–338. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Buchheit, M.; Laursen, P. Science and application of high-intensity interval training: Solutions to the programming puzzle. In *Physiological Targets of HIIT*; Laursen, P., Buchheit, M., Eds.; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2018; pp. 33–50.
- Kellmann, M.; Bertollo, M.; Bosquet, L.; Brink, M.; Coutts, A.J.; Duffield, R.; Erlacher, D.; Halson, S.L.; Hecksteden, A.; Heidari, J.; et al. Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2018**, *13*, 240–245. [[CrossRef](#)]
- Mujika, I. Quantification of Training and Competition Loads in Endurance Sports: Methods and Applications. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2017**, *12*, S2–S9. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Hebestreit, H.; Mimura, K.; Bar-Or, O. Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: Comparing boys and men. *J. Appl. Physiol.* **1993**, *74*, 2875–2880. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Laursen, P.; Buchheit, M.; Vollmer, J.C. Science and application of high-intensity interval training: Solutions to the programming puzzle. In *Genesis and Evolution of High-Intensity Interval Training*; Laursen, P., Buchheit, M., Eds.; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2018; pp. 3–15.
- Hauswirth, C.; Le Meur, Y. Physiological and nutritional aspects of post-exercise recovery: Specific recommendations for female athletes. *Sports Med.* **2011**, *41*, 861–882. [[CrossRef](#)]
- Perez-Gomez, J.; Rodriguez, G.V.; Ara, I.; Olmedillas, H.; Chavarren, J.; González-Henriquez, J.J.; Dorado, C.; Calbet, J.A.L. Role of Muscle Mass on Sprint Performance: Gender Differences? *Eur. J. Sport Sci.* **2007**, *102*, 685–694. [[CrossRef](#)]
- Billaut, F.; Bishop, D. Muscle fatigue in males and females during multiple-sprint exercise. *Sports Med.* **2009**, *39*, 257–278. [[CrossRef](#)]
- Hunter, S.K. Sex Differences in Human Fatigability: Mechanisms and Insight to Physiological Responses. *Acta Physiol.* **2014**, *210*, 768–789. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Albert, W.J.; Wrigley, A.T.; McLean, R.B.; Sleivert, G.G. Sex differences in the rate of fatigue development and recovery. *Dyn. Med.* **2006**, *5*, 2. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Wüst, R.C.I.; Morse, C.I.; De Haan, A.; Jones, D.A.; Degens, H. Sex Differences in Contractile Properties and Fatigue Resistance of Human Skeletal Muscle. *Exp. Physiol.* **2008**, *93*, 843–850. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Esbjornsson-Liljedahl, M.; Bodin, K.; Jansson, E. Smaller muscle ATP reduction in women than in men by repeated bouts of sprint exercise. *J. Appl. Physiol.* **2002**, *93*, 1075–1083. [[CrossRef](#)]
- Bar-Or, O. The Wingate Anaerobic Test: An Update on Methodology, Reliability and Validity. *Sports Med.* **1987**, *4*, 381–394. [[CrossRef](#)]

18. Inbar, O.; Bar-Or, O.; Skinner, J.S. The Development of the Wingate Anaerobic Test. In *The Wingate Anaerobic Test*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 1996; pp. 1–7.
19. Graves, R.S.; Mahnken, J.D.; Perea, R.D.; Billinger, S.A.; Vidoni, E.D. Modeling Percentile Rank of Cardiorespiratory Fitness Across the Lifespan. *Cardiopulm. Phys. Ther. J.* **2015**, *26*, 108–113. [[CrossRef](#)]
20. Borg, G.; Hassmén, P.; Lagerström, M. Perceived exertion related to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1987**, *56*, 679–685. [[CrossRef](#)]
21. Kenttä, G.; Hassmén, P. Overtraining and recovery. A conceptual model. *Sports Med.* **1998**, *26*, 1–16. [[CrossRef](#)]
22. Hopkins, W.G. Spreadsheets for analysis of controlled trials, with adjustment for a subject characteristic. *Sport Sci.* **2006**, *10*, 46–50.
23. Laurent, C.M.; Green, J.M.; Bishop, P.A.; Sjökvist, J.; Schumacker, R.E.; Richardson, M.T.; Curtner-Smith, M. Effect of gender on fatigue and recovery following maximal intensity repeated sprint performance. *J. Sports Med. Phys. Fit.* **2010**, *50*, 243–253.
24. Venables, M.C.; Achten, J.; Jeukendrup, A.E. Determinants of Fat Oxidation during Exercise in Healthy Men and Women: A Cross-Sectional Study. *J. Appl. Physiol.* **2005**, *98*, 160–167. [[CrossRef](#)]
25. Hamadeh, M.J.; Devries, M.C.; Tarnopolsky, M.A. Estrogen supplementation reduces whole body leucine and carbohydrate oxidation and increases lipid oxidation in men during endurance exercise. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **2005**, *90*, 3592–3599. [[CrossRef](#)]
26. Esbjornsson-Liljedahl, M.; Sundberg, C.J.; Norman, B.; Jansson, E. Metabolic response in type I and type II muscle fibers during a 30-s cycle sprint in men and women. *J. Appl. Physiol.* **1999**, *87*, 1326–1332. [[CrossRef](#)]
27. Gratas-Delamarche, A.; Le Cam, R.; Delamarche, P.; Monnier, M.; Koubi, H. Lactate and catecholamine responses in male and female sprinters during a Wingate test. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1994**, *68*, 362–366. [[CrossRef](#)]
28. Jaworowski, A.; Porter, M.M.; Holmback, A.M.; Downham, D.; Lexell, J. Enzyme Activities in the Tibialis Anterior Muscle of Young Moderately Active Men and Women: Relationship with Body Composition, Muscle Cross-Sectional Area and Fibre Type Composition. *Acta Physiol. Scand.* **2002**, *176*, 215–225. [[CrossRef](#)]
29. Vincent, S.; Berthon, P.; Zouhal, H.; Moussa, E.; Catheline, M.; Bentu-Ferrer, D.; Gratas-Delamarche, A.; Vincent, S.; Berthon, P. Plasma Glucose, Insulin and Catecholamine Responses to a Wingate Test in Physically Active Women and Men. *Eur. J. Sport Sci.* **2004**, *91*, 15–21. [[CrossRef](#)]
30. Lievens, E.; Klass, M.; Bex, T.; Derave, W. Muscle Fiber Typology Substantially Influences Time to Recover from High-Intensity Exercise. *J. Appl. Physiol.* **2020**, *128*, 648–659. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Haizlip, K.M.; Harrison, B.C.; Leinwand, L.A. Sex-Based Differences in Skeletal Muscle Kinetics and Fiber-Type Composition. *Physiology* **2015**, *30*, 30–39. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Dar, D.E.; Zinder, O. Short-term effect of steroids on catecholamines secretion from bovine adrenal medulla chromaffin cells. *Neuropharmacology* **1997**, *36*, 1783–1788. [[CrossRef](#)]
33. Arena, R.; Arrowood, J.A.; Fei, D.; Shelar, S.; Helm, S.; Kraft, K.A. The influence of sex on the relationship between heart rate recovery and other cardiovascular risk factors in apparently healthy subjects. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2010**, *20*, 291–297. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Kappus, R.M.; Ranadive, S.M.; Yan, H.; Lane-Cordova, A.D.; Cook, M.D.; Sun, P.; Fernhall, B. Sex differences in autonomic function following maximal exercise. *Biol. Sex Differ.* **2015**, *6*, 1–8. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Mendonca, G.V.; Heffernan, K.S.; Rossow, L.; Guerra, M.; Pereira, F.D.; Fernhall, B. Sex differences in linear and nonlinear heart rate variability during early recovery from supramaximal exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2010**, *35*, 439–446. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Gibala, M.J.; Gillen, J.B.; Percival, M.E. Physiological and health-related adaptations to low-volume interval training: Influences of nutrition and sex. *Sports Med.* **2014**, *44*, 127–137. [[CrossRef](#)]
37. Schmitz, B.; Niehues, H.; Thorwesten, L.; Klose, A.; Krüger, M.; Brand, S.M. Sex Differences in High-Intensity Interval Training—Are HIIT Protocols Interchangeable Between Females and Males? *Front. Physiol.* **2020**, *11*, 38. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

5.4 Publikation 4

Hottenrott, L. (2021). HRV-Analysen im Liegen und Stehen (Orthostatic Test) bei Elite-Ausdauersportlern – eine Feldstudie. In K. Hottenrott, I. Böckelmann, & H. Schmidt (Hrsg.), *Herzfrequenzvariabilität: Anwendungen in Forschung und Praxis. Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft*, 292 (S. 152-159). Czwalina.

LAURA HOTTENROTT

HRV-Analysen im Liegen und Stehen (Orthostatic Test) bei Elite-Ausdauersportlern – eine Feldstudie

HRV analyses in supine and standing position (Orthostatic Test) in elite endurance athletes – a field study

Summary

In endurance sports, it is essential to objectively assess the overall organismic state of fatigue and recovery with suitable measurement parameters in order to be able to make appropriate adjustments to the subsequent training process. This study was conducted to determine whether the orthostatic test, which is based on beat to beat (RR intervals) measurements of heart rate (HR) in supine and standing position, is suitable to monitor fatigue and recovery during different phases of training and competition in elite endurance athletes. Seven elite endurance athletes (5 male, 2 female) were examined over eight to twelve weeks in different training cycles (overload, tapering, competition, recovery). Every morning, the orthostatic test with continuous beat-to-beat recording of the HR was performed over 3 min lying and 3 min standing and the subjective perceived recovery on the TQR scale was recorded.

The endurance athletes showed a significant higher day-to-day variation of HR and the analysed vagal HRV parameters (root mean square of successive differences, RMSSD) in standing compared to the values in the supine position for all training phases. A significant correlation between the HR and RMSSD parameters and the TQR was found in four athletes for single HR or HRV values only. The RMSSD in standing position showed no correlation to the TQR for any athlete.

The Orthostatic test has shown to be a suitable tool to monitor the varying training loads over the course of the season in elite endurance athletes. Monitoring of fatigue and recovery via perceived subjective recovery and resting HR alone does not seem to be sufficient.

1 Einleitung

Für eine individuelle Trainings- und Belastungsteuerung ist es bedeutsam, den gesamtorganismischen Ermüdungs- und Erholtheitszustand mit geeigneten Messgrößen objektiv zu erfassen, um daraus richtige Ableitungen für den weiteren Trainingsprozess treffen zu können. Zur objektiven Erfassung und Bewertung des Regenerationszustandes scheint das autonome Nervensystem (ANS) als Hauptintegrations-system einer Vielzahl von afferenten Signalen, die vor, während und nach der sportlichen Belastung einfließen, geeignet zu sein. Insofern erscheint es sinnvoll, die

ANS-Aktivität im Trainingsprozess regelmäßig zu kontrollieren, um den Regenerationszustand evaluieren zu können. Bisherige Studien belegen, dass sich ein guter Erholungszustand in hohen vagalen Herzfrequenzvariabilitäts (HRV) – Parametern zeigt (Buchheit & Gindre, 2006; Hautala et al., 2009; Bellenger et al., 2016a; Hottenrott & Hoos, 2017).

Anhand randomisiert kontrollierter Trainingsstudien konnte gezeigt werden, dass mit einem HRV-Monitoring Einfluss auf die Leistungsentwicklung in Ausdauersportarten genommen werden kann (Kiviniemi et al., 2007, Plews et al., 2012). Bisher liegen sehr wenige Daten von Hochleistungssportlern vor, die über mehrere Wochen hohe Trainingsumfänge absolvieren (Plews et al., 2012). In bisherigen Studien lag der Fokus meist auf die Analyse der efferenten vagalen Aktivität in liegender Position, in der sich ein Overreaching aber nicht allein valide abbilden lässt (vgl. Bellenger et al., 2016a; Hottenrott et al., 2019).

Inwieweit der Lagewechseltest bzw. Orthostatic Test, der auf EKG-genauen RR-Messungen der Herzfrequenz (HF) im Liegen und Stehen basiert, geeignet ist im Hochleistungsausdauersport den Ermüdungs- und Regenerationsverlauf während unterschiedlich intensiven und umfangreichen Trainings- und Wettkampfphasen abzubilden und einen Mehrwert zur subjektiven Erfassung des Erholungszustandes bietet, soll mit der vorliegenden Feldstudie überprüft werden.

2 Methode

Sieben Ausdauersportler (Tab. 1) auf nationalem und internationalem Niveau haben über 8 bis 12 Wochen in unterschiedlichen Trainingsphasen (Baseline, Overload, Tapering, Recovery) ein detailliertes Monitoring aller Trainingseinheiten durchgeführt und den Erholungszustand mit der TQR-Skala (Kenttä & Hassmén, 1998) erfasst (Abb. 1). Zusätzlich wurde jeden Morgen der Orthostatic Test über 3 min Liegen und 3 min Stehen mit kontinuierlicher RR-Messung der HF (V800, Polar Electro, Kempele, Finland) angewendet. Die Auswertungsparameter des Orthostatic Tests beinhalten neben der mittleren HF im Liegen und Stehen, den vagalen HRV-Parameter RMSSD, sowie den HF-Peak nach dem Aufstehen.

Tab 1. Beschreibung der untersuchten Ausdauersportler auf nationalem und internationalem Niveau

Sportler	Geschlecht (m/w)	Alter (Jahre)	Hauptsportart
1	m	30	Marathonlauf
2	m	45	Langdistanztriathlon
3	m	23	Mittelstreckenlauf
4	m	40	Marathonlauf
5	m	25	Straßenradsport
6	w	40	Langstreckenlauf
7	w	25	Marathonlauf

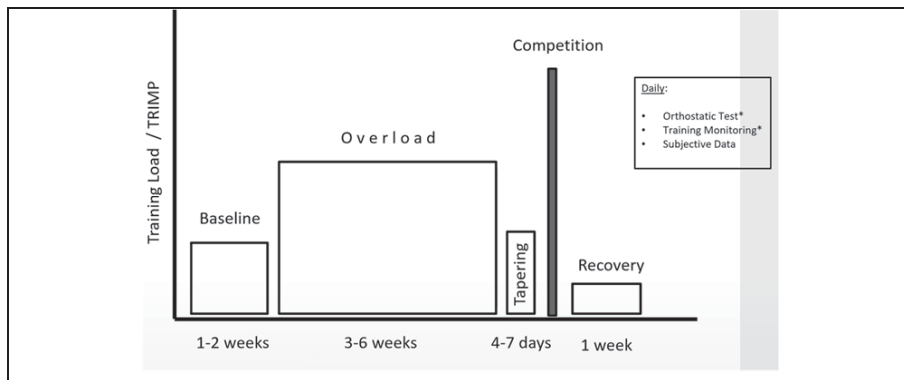


Abb. 1. Studiendesign der unterschiedlichen Trainingsphasen in Beziehung zum Trainingsloads (TRIMP).

Die RR-Daten wurden mit der Software Kubios, Version 3.3.0 (Tarvainen et al., 2014) analysiert (Abb. 2). Zusätzlich wurden für jeden Probanden der Zusammenhang zwischen subjektiver Erholung (TQR) und den jeweiligen HF- und RMSSD-Werten für den gesamten Untersuchungszeitraum und der Trainingsload (TRIMP) nach Banister (1980) berechnet.

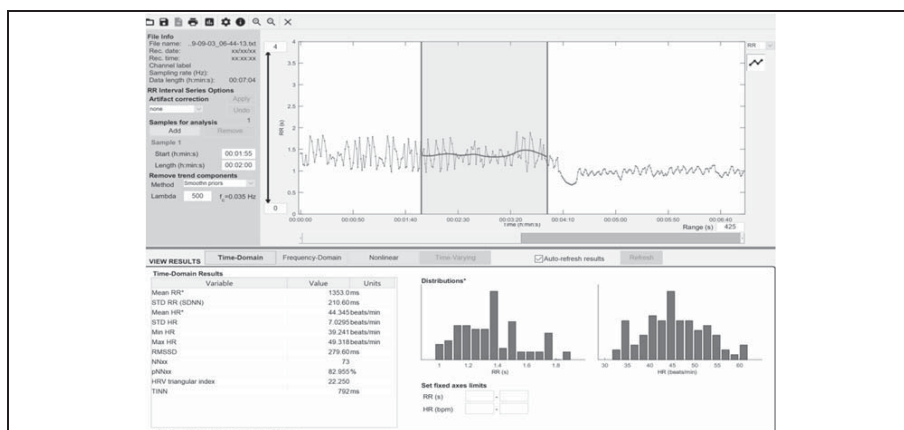


Abb. 2. Datenauswertung mit der Software Kubios Vers. 3.3.0. Aus den 2-minütigen Aufzeichnungen im Liegen und Stehen wurden jeweils die Durchschnittswerte von HF und RMSSD sowie die höchste HF nach dem Aufstehen (HF-Peak) ermittelt.

3 Ergebnisse

Die durchschnittliche Herzfrequenz der sieben Ausdauersportler beträgt im Liegen im Mittel $49,4 \pm 6,5$ Schläge/min, wobei Sportler 2 eine mittlere HF von $43,6 \pm 2,8$ Schläge/min und der jüngste Sportler 3 als Mittelstreckenläufer eine mittlere HF von

62,8 ± 6,4 Schläge/min aufweisen. Deutlich größer streuen die RMSSD-Werte zwischen den Sportlern mit 20,6 ± 14,8 ms (Marathonläufer) und 258,2 ± 94,1 ms (Radsportler). Im Stehen sind die RMSSD-Werte erwartungsgemäß deutlich niedriger, mit Ausnahme von Sportler 1 (Tab. 2).

Tab. 2. Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten HF- und RMSSD-Werte über den gesamten Erhebungszeitraum von den untersuchten Hochleistungsausdauersportlern (fünf Männern und zwei Frauen)

Sportler	HF-Liegen (S/min)	RMSSD-L (ms)	HF-Peak (S/min)	HF-Stehen (S/min)	RMSSD-S (ms)
1	52,6 ± 2,7	20,6 ± 14,8	85,5 ± 3,4	74,7 ± 5,5	25,3 ± 9,8
2	43,6 ± 2,8	59,3 ± 11,5	84,5 ± 5,9	63,6 ± 5,0	19,9 ± 4,2
3	62,8 ± 6,4	70,5 ± 23,7	100,9 ± 8,0	78,7 ± 8,4	36,2 ± 12,8
4	45,8 ± 1,3	58,3 ± 19,7	81,8 ± 4,2	64,4 ± 6,8	26,2 ± 13,4
5	47,2 ± 4,4	258,2 ± 94,1	91,5 ± 5,0	62,0 ± 10,1	95,8 ± 83,6
6 ♀	46,6 ± 2,1	64,7 ± 11,4	81,4 ± 4,4	54,6 ± 5,0	57,6 ± 11,0
7 ♀	47,2 ± 3,1	147,2 ± 26,7	81,2 ± 8,9	67,2 ± 8,5	39,4 ± 19,3
MW	49,40	96,97	86,69	66,46	42,91
SD	6,51	80,63	7,23	8,08	26,42

Bei den Ausdauersportlern zeigt sich in allen Trainingsphasen eine signifikante höhere Tag-zu-Tag-Variation der HF und der analysierten HRV-Parameter (RMSSD) im Stehen im Vergleich zu den Werten im Liegen ($p < 0,01$) (Tab. 3).

Die berechneten Variationskoeffizienten im gesamten Untersuchungszeitraum für die erhobenen Werte sind im Liegen im Mittel bei 6,79% (HF) bzw. 32,03% (RMSSD) und signifikant höher im Stehen mit 11,29% (HF) bzw. 44,57% (RMSSD). Mit Ausnahme von Sportler 1 zeigen alle anderen Sportler höhere Variationskoeffizienten in der Stehend-Messung (Tab. 3).

Für die erhobenen und analysierten Werte konnten bei vier Athleten für einzelne HF- oder RMSSD-Werte signifikante Zusammenhänge zu den TQR-Werten berechnet werden. Für die Sportler 1, 3 und 5 zeigt sich gar kein Zusammenhang zwischen den HF- und RMSSD-Werten zum täglichen subjektiven Erholungswert (TQR). Die RMSSD-Werte im Stehen ergaben für keinen Sportler einen signifikanten Zusammenhang zum TQR (Tab. 4). Auch die Korrelationsanalysen zwischen den TRIMP- und den TQR-Werten sowie den TRIMP- und den RMSSD-Werten des folgenden und darauffolgenden Tages ergaben unter den Sportlern kein einheitliches Bild. Nur vereinzelt konnten schwache Korrelationen bei einigen Sportlern für einzelne HF-, RMSSD- oder TQR-Werte gefunden werden. Mithilfe der Berechnungen des TRIMP

unterschieden sich die Trainingsphasen (Baseline, Overload, Tapering, Recovery) für jeden einzelnen Sportler signifikant ($p < 0,01$) voneinander. Daraufhin wurde geprüft, inwieweit sich unterschiedliche Trainingsphasen in den Werten von TQR, HF und RMSSD widerspiegeln. Auch hier zeigen die Ergebnisse individuelle Profile, wobei die RMSSD-Werte im Stehen hoch signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Trainingsphasen aufweisen und die HF- und RMSSD-Werte im Liegen keine Veränderungen aufzeigen. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen der höheren Variationskoeffizienten im Stehen über den gesamten Untersuchungszeitraum (Tab. 3).

Tab. 3. Berechnete Variationskoeffizienten für die erhobenen HF- und RMSSD-Werte im Liegen (L) und Stehen (S) über den gesamten Untersuchungszeitraum. $VK (\%) = SD \times 100 / MW$, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$ Liegen vs. Stehen

Sportler	HF-Liegen	RMSSD-L	HF-Stehen	RMSSD-S
	%VK	%VK	%VK	%VK
1	7,5	65,1	11,8	44,9
2	6,3	19,5	7,8	21,0
3	10,2	33,6	10,7	35,3
4	2,9	33,7	10,6	51,1
5	9,4	36,4	16,2	91,6
6 ♀	4,5	17,7	9,2	19,1
7 ♀	6,7	18,2	12,7	49
VK-MW	6,79	32,03	11,29**	44,57*
VK-SD	2,57	16,69	2,70	24,37

Tab. 4. Zusammenhang zwischen subjektiver Erholung (TQR) und den jeweiligen HF- und RMSSD-Werten für den gesamten Untersuchungszeitraum (r = Korrelationskoeffizient). * p < 0,05; ** p < 0,01

Sportler	TQR (MW)	r HF-Liegen	r RMSSD-L	r HF-Peak	r HF-Stehen	r RMSSD-S
1	13,6 ± 2,6	-0,12	0,27	0,16	0,10	0,14
2	12,5 ± 3,1	-0,32*	0,09	-0,08	0,13	-0,16
3	14,3 ± 2,3	0,06	-0,08	0,12	0,05	-0,02
4	13,9 ± 1,1	-0,52*	-0,86**	-0,44*	0,12	0,24
5	13,1 ± 1,7	-0,29	0,22	-0,25	-0,28	0,19
6 ♀	14,5 ± 0,8	-0,24	-0,30	-0,53**	0,38*	0,18
7 ♀	14,9 ± 2,0	-0,42**	0,41*	-0,29	-0,38*	0,18
Gesamt						
MW	13,83	-0,26	-0,04	-0,19	0,02	0,11

4 Diskussion

Die Antwortreaktion des autonomen Systems auf die jeweiligen Trainingsbelastungen zeigt individuelle Profile. Mit Ausnahme von Sportler 1 liegt die efferente Vagusaktivität anhand der ermittelten RMSSD-Werte deutlich über den altersbezogenen Normwerten (Nunan et al., 2010; Sammito & Böckelmann, 2016), was durchaus mit der physiologischen Wirkung des Ausdauertrainings auf die efferente autonome Vagusaktivität erklärt werden kann. Extrem hoch sind die RMSSD-Werte des Radsportlers (Nr.5). Bei mehreren Messungen betrug der RMSSD-Wert im Liegen über 350 ms und im Mittel über den gesamten Untersuchungszeitraum bei 258 ± 94 ms. Die Herzgesundheit des Sportlers wurde über eine 72-stündige Langzeit-EKG-Messung bestätigt. Hottenrott et al. (2006) berichten von einem Weltklassetriathleten, der über einen viermonatigen Trainingszeitraum ebenfalls sehr hohe mittlere RMSSD-Werte von $185,3 \pm 44,9$ ms aufwies. Ein hoher korrelativer Zusammenhang zwischen der Höhe des RMSSD-Wertes und der Höhe der Ausdauerleistungsfähigkeit lässt sich dennoch nicht für alle Ausdauersportler bestätigen, wie auch die Befunde dieser Studie zeigen. Bei dem sehr hoch trainierten Sportler 1 (30 Jahre) mit einer Marathonbestzeit von unter 2:20 h wurden demgegenüber relativ niedrige RMSSD-Werte von $20,6 \pm 14,9$ ms über den Messzeitraum diagnostiziert. Referenzwerte für Ausdauersportler lassen sich aus den vorliegenden Daten nicht ableiten.

Das subjektive Erholungsempfinden (TQR-Skala) korreliert signifikant mit den HF- und RMSSD-Werten beim Orthostatic Test bei vier Athleten für einzelne Parametern. Drei Athleten zeigen gar keinen Zusammenhang zwischen den HF- und RMSSD-Werten und dem TQR. Eine Trainingssteuerung über das subjektive Erholungsempfinden scheint danach nur begrenzt möglich zu sein.

Die vorliegenden Ergebnisse haben auch gezeigt, dass eine einzelne Trainingseinheit, quantifiziert mit Hilfe des TRIMP, sich nicht direkt in den, TQR, HF und RMSSD Werten am folgenden und darauffolgenden Morgen widerspiegeln. Erst die Summe der Trainingsbelastung über mindestens 3 Tage führen in der Regel zu einer Veränderung der autonomen Regulation (Hottenrott & Hoos, 2017). Der TRIMP nach Banister (1980) ist geeignet, um die Belastung in den unterschiedlichen Trainingsphasen zu quantifizieren und die Phasen begründet voneinander abzugrenzen. Der Orthostatic Test, jedoch nicht die alleinige Messung der Liegend (Ruhe-) HF, kann diese Variation in der Belastung in den einzelnen Trainingsphasen abbilden. Das bei Ausdauerleistungssportlern eine alleinige Messung der HF und der Bestimmung vagaler HRV-Parameter in einer Körperposition (liegend oder sitzend) nicht ausreicht, wurde auch von Plews et al. (2013) und Bellenger et al. (2016a) gezeigt. Wenn bereits ein Sättigungseffekt der vagalen Aktivität vorliegt, wie z. B. bei gut trainierten Ausdauersportlern (Buchheit et al., 2004) bewirken zusätzliche Trainingsinterventionen möglicherweise keinen weiteren Anstieg der vagalen Aktivität in einer Ruhemessung im Liegen oder im Sitzen (Plews et al., 2013; Bellenger et al., 2016b; Hottenrott & Hoos, 2017). Um bei Ausdauerleistungssportlern Veränderungen und Anpassungsmechanismen zu erkennen, sollte sich somit ein Monitoring im Trainingsprozess nicht auf die Analyse der kardialen vagalen Aktivität in nur einer Körperposition beschränken, sondern eine Bewertung der kardialen vagalen Aktivität in zwei verschiedenen Körperpositionen (z. B. Orthostatic Test) vornehmen (Hottenrott et al., 2019; Le Meur et al., 2013; Bellenger et al., 2016b).

5 Schlussfolgerung

Der morgendliche Orthostatic Test, der auf RR-Messungen der HF im Liegen und Stehen basiert, ist geeignet, um Veränderungen in den unterschiedlichen Trainingsphasen bei den untersuchten Ausdauerleistungssportlern abzubilden und kann zur objektiven Beurteilung des Ermüdungs- und Regenerationsverlaufs im Trainingsalltag eingesetzt werden. Neu ist die Erkenntnis, dass die Werte des Orthostatic Tests im Stehen im Vergleich zur Liegendmessung eine größere Variabilität aufweisen. Unterschiedliche Trainingsbelastungen äußern sich danach sensibler in der Stehendmessung, sodass eine Belastungssteuerung nicht allein über die HRV-Analyse der Liegend-Ruhemessungen erfolgen sollte.

6 Literatur

- Banister, E. W., & Calvert, T. W. (1980). Planning for future performance: implications for long term training. *Canadian journal of applied sport sciences. Journal canadien des sciences appliquees au sport*, 5(3), 170-176.
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016a). Monitoring athletic training status through autonomic heart rate regulation: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med.*, 46(10), 1461–1486.

- Bellenger, C. R., Karavirta, L., Thomson, R. L., Robertson, E. Y., Davison, K., & Buckley, J. D. (2016b). Contextualizing parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with perceptions of training tolerance. *Int. J. Sport Physiol. Perform.*, *11*, 685–692. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2015-0495>
- Buchheit, M., & Gindre, C. (2006). Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, *291*(1), 451-458.
- Buchheit, M., Simon, C., Piquard, F., Ehrhart, J., & Brandenberger, G. (2004). Effects of increased training load on vagal-related indexes of heart rate variability: a novel sleep approach. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* *287*, H2813–H2818. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00490.2004>
- Hautala, A. J., Kiviniemi, A. M., & Tulppo, M. P. (2009). Individual responses to aerobic exercise: the role of the autonomic nervous system. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *33*(2), 107-115.
- Hottenrott, K., & Hoos, O. (2017). Heart Rate Variability Analysis in Exercise Physiology. In H. F. Jelinek, D. J. Cornforth, & A. H. Khandoker (Eds.), *ECG Time Series Variability Analysis: Engineering and Medicine* (pp. 245-273). CRC Press.
- Hottenrott, L., Hottenrott, K., & Ketelhut, S. (2019). Commentary: Vagal Tank Theory: The Three Rs of Cardiac Vagal Control Functioning—Resting, Reactivity, and Recovery. *Frontiers in Neuroscience*, *13*, 1300. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01300>
- Kenttä, G., & Hassmén, P. (1998). Overtraining and recovery. *Sports Medicine*, *26*(1), 1-16.
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., & Tulppo, M. P. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European journal of applied physiology*, *101*(6), 743-751. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0552-2>
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueneron, J., & Hauswirth C. (2013). Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, *45*, 2061–2071. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3182980125>
- Nunan, D., Sandercock, G. R., & Brodie, D. A. (2010). A quantitative systematic review of normal values for short term heart rate variability in healthy adults. *Pacing and clinical electrophysiology*, *33*(11), 1407-1417. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2010.02841.x>
- 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.
- Sammito, S., & Böckelmann, I. (2016). Reference values for time-and frequency-domain heart rate variability measures. *Heart Rhythm*, *13*(6), 1309-1316.
- Tarvainen, M. P., Niskanen, J. P., Lipponen, J. A., Ranta-Aho, P. O., & Karjalainen, P. A. (2014). Kubios HRV—heart rate variability analysis software. *Comp Meth Progr Biomed*, *113*(1), 210-220.

5.5 Publikation 5

Hottenrott, L., et al. (2021). Utilizing heart rate variability for coaching athletes during and after viral infection: A case report in an elite endurance athlete. *Frontiers in Sports and Active Living*, 205.



Utilizing Heart Rate Variability for Coaching Athletes During and After Viral Infection: A Case Report in an Elite Endurance Athlete

Laura Hottenrott^{1*}, Thomas Gronwald², Kuno Hottenrott³, Thimo Wiewelhove¹ and Alexander Ferrauti¹

¹ Department of Training and Exercise Science, Faculty of Sports Science, Ruhr University Bochum, Bochum, Germany,

² Department of Performance, Neuroscience, Therapy and Health, Faculty of Health Sciences, Medical School Hamburg, Hamburg, Germany, ³ Institute of Sports Science, Department of Training Science and Sports Medicine, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Halle, Germany

OPEN ACCESS

Edited by:

Sylvain Laborde,
German Sport University
Cologne, Germany

Reviewed by:

Fábio Yuzo Nakamura,
Instituto Universitário da Maia
(ISMAI), Portugal
Ross Sherman,
Grand Valley State University,
United States

*Correspondence:

Laura Hottenrott
laura.hottenrott@rub.de

Specialty section:

This article was submitted to
Elite Sports and Performance
Enhancement,
a section of the journal
Frontiers in Sports and Active Living

Received: 30 September 2020

Accepted: 28 June 2021

Published: 03 September 2021

Citation:

Hottenrott L, Gronwald T,
Hottenrott K, Wiewelhove T and
Ferrauti A (2021) Utilizing Heart Rate
Variability for Coaching Athletes During
and After Viral Infection: A Case
Report in an Elite Endurance Athlete.
Front. Sports Act. Living 3:612782.
doi: 10.3389/fspor.2021.612782

Background: Viral diseases have different individual progressions and can lead to considerable risks/long-term consequences. Therefore, it is not suitable to give general recommendations on a time off from training for athletes. This case report aims to investigate the relevance of detecting heart rate (HR) and HR variability (HRV) during an orthostatic test (OT) to monitor the progression and recovery process during and after a viral disease in an elite endurance athlete.

Methods: A 30-year-old elite marathon runner contracted a viral infection (upper respiratory tract infection) 4 weeks after a marathon race. RR intervals in HR time series in supine and standing positions were monitored daily in the morning. Analyzed parameters included HR, the time-domain HRV parameter root mean square of successive difference (RMSSD), peak HR (HRpeak) in a standing position, and the time to HR peak (tHRpeak).

Results: During the 6-day viral infection period, HR increased significantly by an average of 11 bpm in the supine position and by 22 bpm in the standing position. In addition, the RMSSD decreased from 20.8 to 4.2 ms, the HRpeak decreased by 13 bpm, and the tHRpeak increased by 18 s in the standing position significantly. There were no significant changes in the pre-viral infection RMSSD values in the supine position. The viral infection led to a significant change in HR and HRV parameters. The cardiac autonomic system reacted more sensitively in the standing position compared to the supine position after a viral infection in the present case study.

Conclusion: These data have provided supportive rationale as to why the OT with a change from supine to standing body position and the detection of different indicators based on HR and a vagal driven time-domain HRV parameter (RMSSD) is likely to be useful to detect viral diseases early on when implemented in daily routine. Given the case study nature of the findings, future research has to be conducted to investigate whether the use of the OT might be able to offer an innovative, non-invasive, and time-efficient possibility to detect and evaluate the health status of (elite endurance) athletes.

Keywords: orthostatic test, athlete monitoring, heart rate variability, viral infection, return to sport, endurance sport, cardiac autonomic control, marathon

INTRODUCTION

With the pandemic spread of the novel coronavirus (SARS-CoV-2) that causes coronavirus disease 2019 (COVID-19; World Health Organization, 2020), healthcare professionals and coaches are faced with an increasing number of athletes seeking advice on when and how to restart training after recovery from viral diseases. This is challenging, as practical and evidence-based recommendations for a return to sports after infectious episodes are limited and heterogeneous. Preliminary approaches regarding COVID-19 provide symptom-based decision schemes to make recommendations for additional assessment and intervention measures (Nieß et al., 2020; Schnellhorn et al., 2020). It is the aim of this case report to investigate the relevance of detecting heart rate (HR) and HR variability (HRV) during an orthostatic test (OT) to monitor the progression and recovery process during and after a viral disease in an elite endurance athlete.

Due to the negative effects on health status and performance capacity, viral infections in sports must be detected early and physical exercise is not recommended in the case of a viral infection (Roberts, 1986). Especially, myocarditis is a significant cause of sudden cardiac death and sudden cardiac arrest (SCD/SCA) in athletes (Harmon et al., 2016) with case series reporting myocarditis as a potential source of SCD/SCA in up to 8% (Halle et al., 2020). In this regard, it is important to find very early indicators and sensitive markers (ideally before the onset of symptoms) that are practicable and can map the course of viral disease and recovery for detailed control diagnostics. According to Friman and Wesslén (2000), fever ($>38^{\circ}\text{C}$ or $0.5\text{--}1^{\circ}$ higher than usual) and an increased resting heart rate (>10 bpm higher than normal) are contraindications for physical training. Therefore, deciding on the right time to restart training is essential (Dores and Cardim, 2020). Long breaks in physical training are critical for performance development in elite athletes; too short breaks in the case of viral infection can cause a relapse and incomplete curing of an infection can lead to severe health risks (Verwoert et al., 2020).

The scientific community is working on the topic of how to optimize the time to return to sports after a viral infection and which diagnostic indicators could support decision making (Dores and Cardim, 2020; Nieß et al., 2020; Schnellhorn et al., 2020; Verwoert et al., 2020). Viral infections affect the cardiovascular system and lead to an increased resting heart rate (HR) in the presence of fever (Karjalainen and Viitasalo, 1986). Acute upper respiratory tract infections (URTIs), including influenza, respiratory syncytial virus, and bacterial pneumonias, are well-recognized triggers for cardiovascular diseases (Cowan et al., 2018). The emergence of SARS-CoV-2 has rapidly grown into a pandemic and practical parameters for daily health monitoring are necessary. A large proportion of affected patients have been reported to have underlying cardiovascular diseases, and myocardial infarctions were noted to occur after an infection (Madjid et al., 2020). A recent case study on cardiovascular changes occurring during an infection with COVID-19 shows that heart rate variability (HRV) decreases but HR does not increase at rest (Buchhorn et al., 2020). Thus, it is not sufficient

to only examine resting HR, but further parameters are required for a differential analysis.

For athletes and coaches, it is essential to perform detailed health monitoring in conjunction with performance monitoring to ensure a very early detection of a viral infection and to guarantee a safe return to training (Hagen et al., 2020). For the control of physical load, athletes often use HR and HRV measurements to individualize the training load and to detect symptoms of overtraining at an early stage (Uusitalo et al., 2000; Buchheit, 2014; Plews et al., 2014; Hottenrott and Hoos, 2017). To the best of our knowledge, no study has examined HR and HRV measurements in elite athletes to monitor health status during and after a viral infection and to individualize return to training.

Cardiac vagal control reflects the activity of the vagus nerve regulating cardiac functioning and can be inferred via HRV measurements (Laborde et al., 2018; Schneider et al., 2018). Most often, HRV analysis is derived from resting data in a single supine or sitting position. However, some studies show that RR measurements in a single resting position are not sufficient to detect training-induced fatigue in athletes (Buchheit, 2014; Plews et al., 2014; Bellenger et al., 2016a,b). A passive head-up tilt test in supine and upright positions results in specific changes in the spectral characteristics of HRV as a result of reduced vagal and enhanced sympathetic outflow and gives valuable indications that a change of body position can lead to additional information about regulation patterns of the cardiac autonomic system (Tulppo et al., 2001). An active switching from the supine to the upright position imposes stress by gravitational pooling of the blood in the splanchnic venous reservoir and leg veins (Stewart et al., 2006). Consequently, the autonomic nervous system is required to maintain the hemodynamic to avoid cerebral hypoperfusion. From supine to standing, HR increases (RR intervals become shorter) and high frequency power (parasympathetic) is depressed compared to supine, whereas low frequency power (partially sympathetic) increases (Aubert et al., 2003).

An orthostatic test (OT) provides a practical method for the detection of overload and overtraining in athletes and can be used to assess the autonomic nervous system's response to physical exercise and training (Le Meur et al., 2013; Buchheit, 2014; Plews et al., 2014; Schneider et al., 2019; Barrero et al., 2020). In addition, changes in body position can provoke specific responses in HR dynamics and could therefore provide more specific information about autonomic nervous system regulation patterns (Tulppo et al., 2001). During orthostatic tolerance assessment, HRV patterns in both supine and standing positions are affected by the different involvement of cardiopulmonary receptors, i.e., cardiac preload, and hence, tuned changes in plasma volume and/or peripheral vasomotor tone. Among other factors, these parameters likely support changes in autonomic patterns and HRV also during different training loads and phases (Schmitt et al., 2015). For precise analysis, monitoring in athletes should not be limited to the measurement of cardiac autonomic function in just one body position but should consider assessing the response in two different body positions (e.g., supine and standing) (Buchheit, 2014; Schmitt et al., 2015; Ravé and Fortrat, 2016; Hottenrott and Hoos, 2017; Hottenrott et al., 2019).

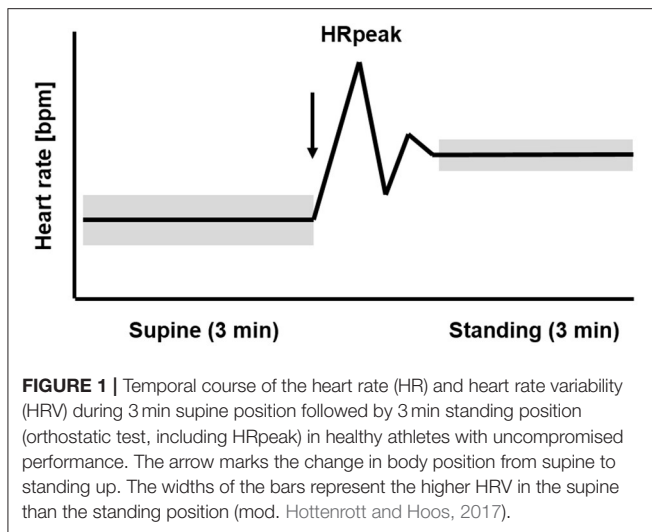


Figure 1 displays the temporal course of the heart rate in healthy athletes with uncompromised performance during the OT. The HR is low in the supine position and rises rapidly during active standing-up. In the supine position, the efferent vagal activity often calculated with the parameter root mean square of successive differences (RMSSD) is much higher than in the standing position (Bellenger et al., 2016a). After active standing-up, the HR will reach the first peak (HRpeak) after 15–20 s (Flachenecker, 2000; Rooke and Sparks, 2003). The rate of heart rate increase from rest to exercise or supine to standing is another parameter providing information about the cardiac autonomic system to detect training-induced fatigue (Nelson et al., 2014; Bellenger et al., 2016a,c). Thereafter, a counter-regulation with a rapid decrease of the HR occurs, before the HR rises again and stabilizes in the standing position. When there is high circulation stability, HR in the standing position remains higher than the HR in the supine position. The average HR in the standing position of healthy and non-fatigued athletes is on average 10–20 bpm higher than the HR at rest in the supine position (Aubert et al., 2003; Hottenrott and Hoos, 2017). Standing also induces a three- to four-fold decrease of vagal HRV indices compared to the supine position (Aubert et al., 2003; Hottenrott and Hoos, 2017).

Viral diseases (e.g., influenza, Epstein-Barr virus, coronavirus) have different individual progressions (Polak et al., 2020) and can lead to considerable risks/long-term consequences. Therefore, it is not suitable to give general recommendations on time off from training for athletes. The severity of the disease and the course of the recovery process can be very individual. In athletes, viral diseases are usually mild and are often not taken seriously, although considerable risks/long-term consequences can nevertheless occur if training is continued during the infection (Roberts, 1986). Regarding daily monitoring with the OT, it is expected that a viral infection with the presence of fever will lead to an increase in supine resting heart rate and affect the overall cardiac autonomic system (Karjalainen and Viitasalo, 1986; Polak et al., 2020).

It is the aim of the present case report to display how the OT, which is based on the detection of RR intervals in heart rate time series in supine and standing positions, can monitor the progression and recovery process before, during, and after a viral disease in a high-performance endurance athlete providing immediate day-to-day feedback about autonomic nervous system recovery status.

METHODS

Participant

The participant is a 30-year-old male elite marathon runner with a personal best time in the marathon of 2:18 h. He has competed in the sport of running since he was 13 years. He has a resting HR of 47 bpm, a maximal HR of 188 bpm, and a VO_2 max of 71 ml/kg/min and receives medical clearance in a sports medical check-up annually. The athlete's training is monitored routinely throughout the entire year and he performs an OT daily (**Figure 1**). The participant contracted an upper respiratory tract infection (URTI, diagnosed by a physician) 4 weeks after running a marathon race in 2:21 h. He had intense flu symptoms for 6 days and fever between 38.5° and 39.3°C for 3 days on days 13, 14, and 15; he did not take any fever-lowering medication. Clinical diagnostics were not accompanied by laboratory diagnostics.

The participant provided informed consent in accordance with the institutional review board and the guidelines of the Helsinki World Medical Association Declaration.

Measurements

Ten days before (pre), during, and 10 days after (post) the viral infection, a daily (after a night's sleep) orthostatic test (OT) and a position change test with 3 min in the supine and 3 min in the standing position were performed (Bourdillon et al., 2017; Hottenrott and Hoos, 2017). The recordings were taken in the supine position without a given breathing rhythm after the morning visit to the restroom. The OT was performed with continuous beat-to-beat recording of the heart rate (RR measurement with V800 and H10 sensor, Polar Electro GmbH, Finland, Gilgen-Ammann et al., 2019). The calculated parameters of the OT included HR and the vagal time-domain HRV parameter RMSSD in supine and standing positions as well as the peak HR (HRpeak) and time to HR peak (tHRpeak) in the standing position. Daily the athlete recorded his training and recorded information about his state of health, especially about symptoms of illness.

Data Analysis and Statistics

The calculation of the RR data from the OT was performed with the Kubios HRV Premium Software (Version 3.4.1, Tarvainen et al., 2014). The RMSSD was calculated for 2 min in the supine and 2 min in standing position. The first of the 3 min in the supine position was not used for data analysis but served for physiological stabilization (Bourdillon et al., 2017; Hottenrott and Hoos, 2017). The smallest worthwhile change (SWC) in standing RMSSD from baseline was deemed as 0.5 of the individual baseline coefficient variation (CV) (Plews et al., 2013; Buchheit, 2014) from the baseline during average training load

at sea level in a healthy state over 3 month prior to the viral infection (as a fixed reference point). Differences in HR, RMSSD, HRpeak, and tHRpeak between the measure points (days) were evaluated. Statistical analysis was performed with the software SPSS 25.0 (IBM Statistics, USA) for Windows. Prior to the analysis of the differences between 10 days before, during, and 10 days after the upper respiratory tract infection (URTI), Gaussian distribution of the data was verified by the Shapiro–Wilk test. A single factor repeated measures ANOVA was used to test whether there were statistical differences between the mean values of the respective parameters over the three measurement points (pre, URTI, post). For statistical analysis, ANOVA with *post-hoc* multiple comparisons and Bonferroni correction was applied. The sphericity was determined in advance using the Mauchly test. The data are presented as mean \pm standard deviation. The level of significance was set at 0.05 ($p < 0.05$).

RESULTS

The athlete maintained his average training load of 14–21 km of easy to moderate running per day on days 1–11. He had 1 day of rest on day 9. The athlete was absent from training on day 12–20 and restarted training on day 21 with an easy 10 km run (aerobic) followed by 2 days of easy running training of 8–12 km, on day 24, he completed 20 km of easy running, and on day 25, he did no running but did 3 h of biking. The ANOVA analysis shows significant main time effects for HR supine [$F_{(2,10)} = 21.913$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.814$], HR standing [$F_{(2,10)} = 47.253$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.904$], HRpeak [$F_{(2,10)} = 22.586$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.819$], tHRpeak [$F_{(2,10)} = 38.261$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.819$], RMSSD supine [$F_{(2,10)} = 5.625$, $p = 0.023$, partial $\eta^2 = 0.529$], and RMSSD standing [$F_{(2,10)} = 21.761$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.813$]. *Post-hoc* comparisons showed that during the 6-day viral infection period, all values, except the RMSSD value in the supine position, changed significantly from the previous 10-day pre-measurement (Table 1). The HR increased by an average of 11 bpm in the supine position and by 22 bpm in the standing position, the HRpeak by 13 bpm, and the tHRpeak increased by 18 s. The RMSSD in the standing position decreased from 20.8 ms to 4.2 ms and showed the largest changes over the course of the viral infection days (Table 1; Figure 2).

The 10-day post-measurements differed significantly in all parameters on average from the 6-day viral infection period. The

HR in the supine position decreased by 14 bpm, the HR in the standing position by 19 bpm, and the HRpeak by 18 bpm. The RMSSD values increased by 20 ms (supine) and 17 ms (standing), and the HR ascended faster again. The 10-day post RMSSD values in the supine and standing positions and the tHRpeak did not differ from the 10-day pre-measurements (Figure 2).

The graph in Figure 2 displays that the RMSSD values were already decreasing days before the viral infection symptoms were felt. Training was then stopped when the viral infection symptoms (sore throat) appeared (day 12). Upon relief of the viral infection symptoms, RMSSD levels immediately increased. The athlete restarted his training (day 21) after the RMSSD values had approximately reached the initial values before the illness.

Figure 3 shows the HR curves from OT for the 6-day viral infection period and a typical curve before and after the viral infection period. An increase in HR values in supine and standing positions as well as 2 days with extremely slow tHRpeaks (52 s and 59 s) were apparent, and counter-regulation was missing. On the days of the slow tHRpeak (days 4 and 5 of the viral infection), the HRpeak reached the highest values (122 bpm and 111 bpm).

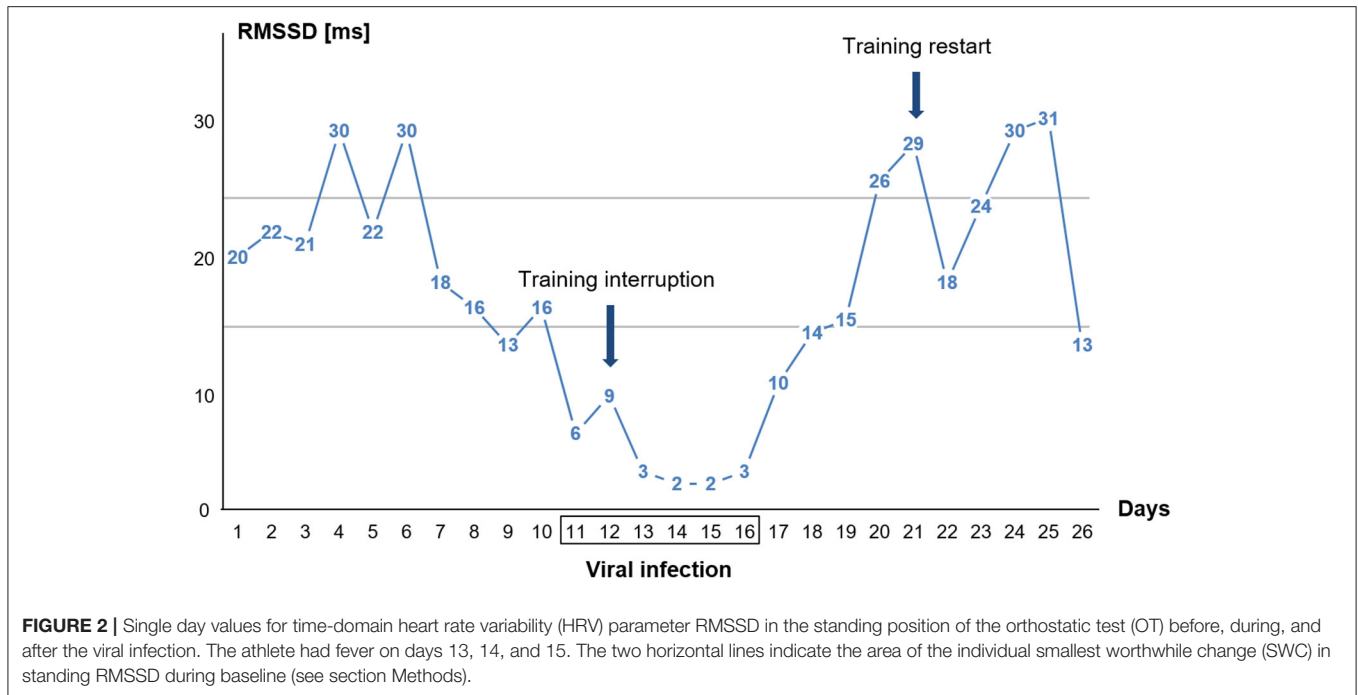
DISCUSSION

The present case study is the first to show the interaction between a viral infection and the daily monitoring of the cardiac autonomic control in an elite athlete. The case study is particularly unique due to the fact that the data are ecologically valid (not lab-based), and obtained from an elite endurance athlete.

The main finding is that a viral infection had a direct influence on HR and HRV. An increase in HR was accompanied by a decrease in RMSSD in the OT in the standing position. It seems that cardiac vagal activity is suppressed in the presence of a viral infection, which is also the case in patients with fever (Lin et al., 2006; Carter et al., 2014). An increase in resting HR and a decrease in RMSSD suggests a suppression of parasympathetic activity (Buchheit, 2014; Laborde et al., 2018). The kinetics of HR from supine to standing was significantly different in the HR increase (tHRpeak) from a typical course in a healthy condition. With the onset of the viral infection symptoms, there was a slower increase, which was particularly pronounced after 3 days of the 6-day period. The state of research according to changes in cardiac autonomic regulation during viral infection

TABLE 1 | Values (mean \pm SD) of HR, RMSSD, HRpeak, and tHRpeak (time from HR in the supine position until HRpeak in the standing position) in the orthostatic test (OT) 10 days before, during, and 10 days after the upper respiratory tract infection (URTI) from a 30-year-old elite marathon runner.

Position	Parameter	Pre	URTI	Post	Pre-URTI	URTI-post	Pre-post
		days 1–10	days 11–16	days 17–26	<i>p</i> -value	<i>p</i> -value	<i>p</i> -value
2 min supine	HR [bpm]	55.5 \pm 2.8	66.0 \pm 7.2	52.1 \pm 3.2	0.013	0.013	0.070
	RMSSD [ms]	18.0 \pm 9.2	11.5 \pm 7.6	31.4 \pm 20.3	0.595	0.005	0.65
2 min standing	HR [bpm]	86.0 \pm 4.6	107.7 \pm 9.2	79.0 \pm 6.0	0.001	0.002	0.178
	RMSSD [ms]	20.8 \pm 5.7	4.2 \pm 2.8	21.0 \pm 7.9	0.002	0.041	0.307
Supine-standing	HRpeak [bpm]	93.4 \pm 4.5	106.3 \pm 9.4	88.4 \pm 4.7	0.012	0.010	0.184
	tHRpeak [s]	16.8 \pm 2.2	35.0 \pm 16.2	18.9 \pm 3.5	0.003	0.008	0.124



strengthen the evidence that specific measures of HRV are valid indicators of cardiac autonomic responsiveness (Malik et al., 2019). Bellenger et al. (2016c) found a slower HR acceleration at the onset of exercise in athletes suffering from exercise-induced fatigue (overload training). A reduced performance capacity of the athletes and altered cardiac autonomic control due to fatigue may also apply to a viral infection. In the context of viral diseases, HR increase in regard to a change in body position has not been investigated so far. A small number of studies conducted with endurance athletes demonstrated a decrease in HR acceleration following overload training, indicating it may be a potential indicator of training-induced fatigue (Nelson et al., 2014; Bellenger et al., 2016a).

The second main result is that HR and HRV values changed more substantially in the standing position than in the supine position during viral infection. This was particularly pronounced in the RMSSD values, which decreased from 20 ms before to 4 ms during viral infection. The cardiac autonomic system reacted more sensitively in the standing position compared to the supine position in the present data. The RMSSD changed significantly from pre to viral infection values in the standing position only (Table 1). The analysis of the single day values for the RMSSD in the standing position shows that the athlete stopped training when the flu symptoms appeared. However, according to the HRV analysis, a training suspension 2–3 days earlier might have been preferable to avoid weakening the immune system further (Figure 2). The return to training was reasonably chosen after the HRV values had returned to the initial level and were elevated for several days. The further fluctuations of the post-values of the 6-day viral infection period are related to the training process. Moderate aerobic training (low-intensity training) leads to better values in RMSSD compared to pre-values due to positive effects

on vagal activity (increases in parasympathetic activity) (Stanley et al., 2013). The reason for the strong decrease in RMSSD values on day 26 could be the more intensive training the day before (training phases with increased time spent at high intensity suppress parasympathetic activity) (Buchheit and Gindre, 2006; Plews et al., 2014; Schneider et al., 2019). This might indicate that the performance capacity and health status level for high training stimuli was not yet given.

LIMITATIONS

We chose morning resting HRV recordings due to the practicality of the measurement and with a focus on the vagal HRV parameter RMSSD because this parameter provides valid results in longitudinal analysis without a given breathing rate in the context of training and health status, which cannot be guaranteed using frequency-domain analysis of HRV (e.g., low frequency and high frequency power) without a given breathing control (Nakamura et al., 2015).

Furthermore, it could be shown that RMSSD determined in a short period of already 1 min (calculation of 1 min after 1 min stabilization period) is sensitive to training-induced changes in athletes, and can be used to track cardiac autonomic adaptations (Nakamura et al., 2015). In regard to OT, Schäfer et al. (2015) found no differences using 2 min intervals compared to 4 min intervals in both supine and standing positions for monitoring training and recovery processes. Therefore, the chosen procedure of a 3-min recording time in supine and standing positions with analyzed intervals of 2 min respectively should provide representative values of HR and RMSSD.



CONCLUSION

The findings of this case report have some implications for sports practitioners and coaches looking to both ensure the health of their athletes, and for using HRV as a tool to monitor training process and the return to sport after a viral infection. For endurance athletes, a control by means of resting HR in one body position does not seem to be sufficient. Accordingly, the data have provided supportive rationale as to why the OT with a change from supine to standing body position and the detection of different indicators based on HR and a vagal driven time-domain HRV parameter (RMSSD) is likely to be useful to detect viral diseases early on when implemented in a daily routine. Given the case study nature of the findings, future research has to be conducted to investigate whether the use of the OT might be able to offer an innovative, non-invasive, and time-efficient possibility to detect and evaluate the health status of (elite endurance) athletes.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The original contributions presented in the study are included in the article/supplementary material, further inquiries can be directed to the corresponding author/s.

REFERENCES

- Aubert, A. E., Seps, B., and Beckers, F. (2003). Heart rate variability in athletes. *Sports Med.* 33, 889–919. doi: 10.2165/00007256-200333120-00003
- Barrero, A., Le Cunuder, A., Carrault, G., Carré, F., Schnell, F., and Le Douairon Lahaye, S. (2020). Modeling stress-recovery status through heart rate changes along a cycling grand tour. *Front. Neurosci.* 14:576308. doi: 10.3389/fnins.2020.576308
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., and Buckley, J. D. (2016a). Monitoring athletic training status through autonomic heart rate regulation: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.* 46, 1461–1486. doi: 10.1007/s40279-016-0484-2
- Bellenger, C. R., Karavirta, L., Thomson, R. L., Robertson, E. Y., Davison, K., and Buckley, J. D. (2016b). Contextualizing parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with perceptions of training tolerance. *Int. J. Sport Physiol. Perform.* 11, 685–692. doi: 10.1123/ijssp.2015-0495
- Bellenger, C. R., Thomson, R. L., Howe, P. R., Karavirta, L., and Buckley, J. D. (2016c). Monitoring athletic training status using the maximal rate of heart rate increase. *J. Sci. Med. Sport* 19, 590–595. doi: 10.1016/j.jsams.2015.07.006
- Bourdillon, N., Schmitt, L., Yazdani, S., Vesin, J. M., and Millet, G. P. (2017). Minimal window duration for accurate HRV recording in athletes. *Front. Neurosci.* 11:456. doi: 10.3389/fnins.2017.00456
- Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Front Physiol.* 5:73. doi: 10.3389/fphys.2014.00073
- Buchheit, M., and Gindre, C. (2006). Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 291, 451–458. doi: 10.1152/ajpheart.00008.2006
- Buchhorn, R., Baumann, C., and Willaschek, C. (2020). Heart rate variability in a patient with coronavirus disease 2019. *Int. Cardiovasc. Forum J.* 20:2020052029. doi: 10.20944/preprints202005.0209.v1
- Carter, I. I. R., Hinojosa-Laborde, C., and Convertino, V. A. (2014). Heart rate variability in patients being treated for dengue viral infection: new insights from mathematical correction of heart rate. *Front. Physiol.* 5:46. doi: 10.3389/fphys.2014.00046
- Cowan, L. T., Lutsey, P. L., Pankow, J. S., Matsushita, K., Ishigami, J., and Lakshminarayan, K. (2018). Inpatient and outpatient infection as a trigger

ETHICS STATEMENT

Ethical review and approval was not required for the study on human participants in accordance with the local legislation and institutional requirements. The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study. Written informed consent was obtained from the individual(s) for the publication of any potentially identifiable images or data included in this article.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

LH: conceptualization, methodology, investigation, writing—original draft preparation, and project administration. LH, KH, and TG: validation. LH and KH: data curation and visualization. LH, KH, TG, TW, and AF: writing—review and editing. AF: supervision. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

FUNDING

We acknowledge support by the DFG Open Access Publication Funds of the Ruhr-Universität Bochum.

- of cardiovascular disease: the ARIC study. *J. Am. Heart Assoc.* 7:e009683. doi: 10.1161/JAHA.118.009683
- Dores, H., and Cardim, N. (2020). Return to play after COVID-19: a sport cardiologist's view. *Br. J. Sports Med.* 54, 1132–1133. doi: 10.1136/bjsports-2020-102482
- Flachenecker, P. (2000). *Klinische Standarduntersuchungen autonomer Funktionen-Parasympathikusfunktionen. Jörg J: Autonome Diagnostik und Schlafpolygraphie in Klinik und Praxis.* Darmstadt: Steinkopff.
- Friman, G., and Wesslén, L. (2000). Infections and exercise in high-performance athletes. *Immunol. Cell Biol.* 78, 510–522. doi: 10.1111/j.1440-1711.2000.t01-12-.x
- Gilgen-Ammann, R., Schweizer, T., and Wyss, T. (2019). RR interval signal quality of a heart rate monitor and an ECG Holter at rest and during exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 119, 1525–1532. doi: 10.1007/s00421-019-04142-5
- Hagen, J., Stone, J. D., Hornsby, W. G., Stephenson, M., Mangine, R., Joseph, M., et al. (2020). COVID-19 surveillance and competition in sport: utilizing sport science to protect athletes and staff during and after the pandemic. *J. Funct. Morphol. Kinesiol.* 5:69. doi: 10.3390/jfkm5030069
- Halle, M., Binzenhofer, L., Mahrholdt, H., Schindler, J. M., Esefeld, K., and Tschope, C. (2020). Myocarditis in athletes: a clinical perspective. *Eur. J. Prev. Cardiol.* 28, 1050–1057. doi: 10.1177/2047487320909670
- Harmon, K. G., Asif, I. M., Maleszewski, J. J., Owens, D. S., Prutkin, J. M., Salerno, J. C., et al. (2016). Incidence and etiology of sudden cardiac arrest and death in high school athletes in the United States. *Mayo Clin. Proc.* 91, 1493–1502. doi: 10.1016/j.mayocp.2016.07.021
- Hottenrott, K., and Hoos, O. (2017). “Heart rate variability analysis in exercise physiology,” in *ECG Time Series Variability Analysis: Engineering and Medicine*, eds H. F. Jelinek, D. J. Cornforth, and A. H. Khandoker (Boca Raton, FL: CRC Press), 249–279.
- Hottenrott, L., Hottenrott, K., and Ketelhut, S. (2019). Commentary: vagal tank theory: the three rs of cardiac vagal control functioning—resting, reactivity, and recovery. *Front. Neurosci.* 13:1300. doi: 10.3389/fnins.2019.01300
- Karjalainen, J., and Viitasalo, M. (1986). Fever and cardiac rhythm. *Arch. Intern. Med.* 146, 1169–1171. doi: 10.1001/archinte.1986.00360180179026

- Laborde, S., Mosley, E., and Mertgen, A. (2018). A unifying conceptual framework of factors associated to cardiac vagal control. *Heliyon* 4:e01002. doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e01002
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueron, J., et al. (2013). Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 45, 2061–2071. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182980125
- Lin, M. T., Wang, J. K., Lu, F. L., Wu, E. T., Yeh, S. J., Lee, W. L., et al. (2006). Heart rate variability monitoring in the detection of central nervous system complications in children with enterovirus infection. *J. Crit. Care* 21, 280–286. doi: 10.1016/j.jcrc.2006.02.005
- Madjid, M., Safavi-Naeini, P., Solomon, S. D., and Vardeny, O. (2020). Potential effects of coronaviruses on the cardiovascular system: a review. *JAMA Cardiol.* 5, 831–840. doi: 10.1001/jamacardio.2020.1286
- Malik, M., Hnatkova, K., Huikuri, H. V., Lombardi, F., Schmidt, G., and Zabel, M. (2019). CrossTalk proposal: heart rate variability is a valid measure of cardiac autonomic responsiveness. *J. Physiol.* 597:2595. doi: 10.1113/JP277500
- Nakamura, F. Y., Flatt, A. A., Pereira, L. A., Ramirez-Campillo, R., Loturco, I., and Esco, M. R. (2015). Ultra-short-term heart rate variability is sensitive to training effects in team sports players. *J. Sci. Med. Sport.* 14:602.
- Nelson, M. J., Thomson, R. L., Rogers, D. K., et al. (2014). Maximal rate of increase in heart rate during the rest-exercise transition tracks reductions in exercise performance when training load is increased. *J. Sci. Med. Sport.* 17, 129–133. doi: 10.1016/j.jsams.2013.02.016
- Nieß, A. M., Bloch, W., Friedmann-Bette, B., Grim, C., Halle, M., Hirschmüller, A., et al. (2020). Position stand: return to sport in the current coronavirus pandemic. *Ger. J. Sport Med.* 71, 1–4. doi: 10.5960/dzsm.2020.437
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., and Buchheit, M. (2014). Heart-rate variability and training-intensity distribution in elite rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 9, 1026–1032. doi: 10.1123/ijsp.2013-0497
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilding, A. E., and Buchheit, M. (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Med.* 43, 773–781. doi: 10.1007/s40279-013-0071-8
- Polak, S. B., Van Gool, I. C., Cohen, D., Jan, H., and van Paassen, J. (2020). A systematic review of pathological findings in COVID-19: a pathophysiological timeline and possible mechanisms of disease progression. *Modern Pathol.* 33, 2128–2138. doi: 10.1038/s41379-020-0603-3
- Ravé, G., and Fortrat, J. O. (2016). Heart rate variability in the standing position reflects training adaptation in professional soccer players. *Eur. J. Appl. Physiol.* 116, 1575–1582. doi: 10.1007/s00421-016-3416-9
- Roberts, J. A. (1986). Viral illnesses and sports performance. *Sports Med.* 3, 296–303. doi: 10.2165/00007256-198603040-00006
- Rooke, T. W., and Sparks, H. V. (2003). “Control mechanisms in circulatory function,” in *George AT: Medical physiology*, ed A. R. Rodney (Philadelphia, PA: Lippincott Williams and Wilkins), 290–308.
- Schäfer, D., Olstad, B. H., and Wilhelm, M. (2015). Can heart rate variability segment length during orthostatic test be reduced to 2 min?: 227 Board# 78 May 27, 1100 AM-1230 PM. *Med. Sci. Sports Exerc.* 47:48. doi: 10.1249/01.mss.0000476531.84848.dd
- Schmitt, L., Regnard, J., and Millet, G. P. (2015). Monitoring fatigue status with HRV measures in elite athletes: an avenue beyond RMSSD? *Front. Physiol.* 6:343. doi: 10.3389/fphys.2015.00343
- Schneider, C., Hanakam, F., Wiewelhoe, T., Döweling, A., Kellmann, M., Meyer, T., et al. (2018). Heart rate monitoring in team sports—a conceptual framework for contextualizing heart rate measures for training and recovery prescription. *Front. Physiol.* 9:639. doi: 10.3389/fphys.2018.00639
- Schneider, C., Wiewelhoe, T., Raeder, C., Flatt, A. A., Hoos, O., Hottenrott, L., et al. (2019). Heart rate variability monitoring during strength and high-intensity interval training overload microcycles. *Front. Physiol.* 10:582. doi: 10.3389/fphys.2019.00582
- Schnellhorn, P., Klingel, K., and Burgstahler, C. (2020). Return to sports after COVID-19 infection. Do we have to worry about myocarditis? *Eur. Heart J.* 41, 4382–4384. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa448
- Stanley, J., Peake, J. M., and Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Med.* 43, 1259–1277. doi: 10.1007/s40279-013-0083-4
- Stewart, J. M., Medow, M. S., Glover, J. L., and Montgomery, L. D. (2006). Persistent splanchnic hyperemia during upright tilt in postural tachycardia syndrome. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 290, H665–H673. doi: 10.1152/ajpheart.00784.2005
- Tarvainen, M. P., Niskanen, J. P., Lipponen, J. A., Ranta-Aho, P. O., and Karjalainen, P. A. (2014). Kubios HRV—heart rate variability analysis software. *Comput. Meth. Prog. Bio.* 113, 210–220. doi: 10.1016/j.cmpb.2013.07.024
- Tulppo, M. P., Hughson, R. L., Mäkikallio, T. H., Airaksinen, K. J., Seppänen, T., and Huikuri, H. V. (2001). Effects of exercise and passive head-up tilt on fractal and complexity properties of heart rate dynamics. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 280, H1081–H1087. doi: 10.1152/ajpheart.2001.280.3.H1081
- Uusitalo, A. L., Uusitalo, A. J., and Rusko, H. K. (2000). Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *Int. J. Sports Med.* 21, 45–53. doi: 10.1055/s-2000-8853
- Verwoert, G. C., de Vries, S. T., Bijsterveld, N., Willems, A. R., vd Borgh, R., Jongman, J. K., et al. (2020). Return to sports after COVID-19: a position paper from the Dutch Sports Cardiology Section of the Netherlands Society of Cardiology. *Neth. Heart J.* 28, 391–395. doi: 10.1007/s12471-020-01469-z
- World Health Organization (2020). *Coronavirus Disease (COVID-19) Pandemic*. Available online at: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> (accessed September 25, 2020).

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher’s Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Copyright © 2021 Hottenrott, Gronwald, Hottenrott, Wiewelhoe and Ferrauti. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

6 Diskussion

Im Folgenden werden die in Kapitel 4 aufgestellten Forschungsfragen nacheinander in Bezug auf die gewonnenen Erkenntnisse (Publikationen 1 - 5) diskutiert.

Forschungsfrage 1:

Inwieweit unterscheidet sich die psychophysische Erholung nach intensiven Intervallbelastungen von ausdauertrainierten Älteren im Vergleich zu Jüngeren?

Dieser Forschungsfrage wurde mit der in Publikation 2 dargestellten experimentellen Studie nachgegangen. Untersucht wurden mögliche altersspezifische Unterschiede in der Erholung während und nach HIIT-Programmen (4 x 30 sec) mit unterschiedlich langen Erholungsphasen. Es wurde angenommen, dass sich Regenerationsverläufe differenziert im Rahmen von hochintensiven Intervallen auf einem Hochleistungsradergometer untersuchen lassen. Wiederholte maximale Belastungen über 30 s wie beim Wingate Test (WAnT) wurden in vielen bisherigen Studien eingesetzt (vgl. Publikation 1) und bieten ein hohes Maß an Vergleichbarkeit. Das besondere methodische Vorgehen dieser Studie zeigt sich darin, dass Daten von vergleichbar gut trainierten jüngeren und älteren Sportlern gewonnen wurden, die drei verschiedene HIIT-Protokolle (mit 1, 3 oder 10 min aktiver Pause zwischen den 4 Intervallen) in randomisierter Reihenfolge absolvierten. Dieses Studiendesign hat sich auf der Grundlage des Forschungsstandes (vgl. Kap. 2 und Publikation 1) als sinnvoll für die Bearbeitung der Forschungsfragen 1 und 2 ergeben. In der ersten experimentellen Studie (Publikation 2) wurden in zwei Gruppen jeweils 12 Ausdauersportler mit gleicher hoher Ausdauerleistungsfähigkeit aber unterschiedlichen Alters ($24,5 \pm 3,7$ Jahren versus $47,3 \pm 8,6$ Jahren) in die Studie eingeschlossen. Sowohl bei der Körpergröße, dem Körpergewicht und der fettfreien Massen (FFM) als auch bei den leistungsbezogenen Parametern maximale Herzfrequenz (HF_{max}), relativer Leistung (Peak Power) zur FFM und dem wöchentlichem Trainingsumfang gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den jüngeren und älteren Athleten der beiden Untersuchungsgruppen. Die vergleichbare maximale aerobe Leistungskapazität der beiden Versuchsgruppen wurde gemäß alters- und geschlechtsspezifischen VO_{2max} -Perzentilen (Graves et al., 2015) bestimmt. Während der vier 30 sec Intervalle (4 x WAnT) in den verschiedenen HIIT-Protokollen zeigten beide Gruppen keine signifikanten Unterschiede bei der maximalen Leistung. Beim Vergleich der drei verschiedenen HIIT-Protokolle unterschieden sich die gemessenen Parameter in Abhängigkeit von der Länge der Erholungszeit zwischen den 30-s-Sprints. Bei beiden Altersgruppen war wie zu erwarten, der allgemeine Leistungsabfall bei dem HIIT-Protokoll mit der kürzesten

Erholungszeit am größten und nahm mit zunehmender Erholungszeit ab. Auch nahm in beiden Altersgruppen die durchschnittliche Leistung vom ersten zum vierten Intervall für das 1- und 3-minütige Pausenprotokoll ab. Im Zehn-Minuten-Protokoll sank die durchschnittliche Leistung jedoch nur in der jüngeren Gruppe signifikant. Die relative Ermüdung (%) nahm von Intervall eins bis vier im HIIT-Protokoll mit 1-minütiger Erholungszeit bei der älteren Gruppe und 10-minütiger Erholungszeit bei der jüngeren Gruppe signifikant ab. Es ist nicht trivial, eine mögliche Erklärung für diese Unterschiede zu finden, da keine früheren Studien mit einem vergleichbaren Studiendesign durchgeführt wurden und außer bei den Leistungsdaten keine Altersunterschiede zwischen den verschiedenen HIIT-Protokollen festgestellt wurden. Ein möglicher Erklärungsansatz ist, dass es, wie ausführlich in Publikation 1 beschrieben, mit zunehmendem Alter zu einer Abnahme der Muskelmasse sowie zu einer Atrophie der schnell zuckenden Muskelfasern kommt, was wiederum zu einer Verschiebung hin zu einem stärker oxidativen Muskelprofil führen kann (McCormick et al., 2018; Faulkner et al., 2008). Aufgrund dieser veränderten Muskeleigenschaften könnte es zu einer verminderten Stoffwechselkapazität von Kreatinphosphat kommen, was sich negativ auf die maximale Leistung nach einer kurzen Erholungszeit (1 Minute) bei hochintensiven Belastungen auswirken kann. Darüber hinaus könnte die anaerobe Energieleistung mit zunehmendem Alter abgenommen haben, was auf eine Verringerung der glykolytischen Enzyme, insbesondere der Phosphofruktokinase, zurückzuführen wäre (Faulkner et al., 2008; Hunter et al., 2002; McCormick et al., 2018).

Die Ergebnisse aus Publikation 2 bezüglich der erhobenen Parameter zur physiologischen Erholung zeigten, dass sich die Erholung auf metabolischer Ebene nach HIIT nicht zwischen den beiden Altersgruppen unterscheidet. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in der durchschnittlichen Laktatkonzentration, der $\%HF_{max}$ und dem Respiratorischen Quotienten (RQ) zwischen den Altersgruppen während der untersuchten drei HIIT-Protokolle mit 1, 3 und 10 Minuten Erholungszeit gefunden. Bei beiden Altersgruppen war die durchschnittliche Laktatkonzentration beim HIIT-Protokoll mit einer Erholungszeit von drei Minuten zwischen den HIIT-Protokollen am höchsten, da während der 3-minütigen Erholungsphase die Laktatkonzentration weniger eliminiert werden konnte als während der längeren 10-minütigen Erholungsphase. Die geringere Leistung während der Intervalle beim Protokoll mit der 1-minütigen Erholungsphase im Vergleich zur 3-minütigen Erholungsphase deuten darauf hin, dass weniger schnelle Muskelfasern bei Wiederholungsintervallen mit zu kurzer Pause rekrutiert werden können.

Hinsichtlich der $\%HF_{\max}$ ergaben die vorliegenden Ergebnisse eine ähnliche Reaktion in den beiden Altersgruppen, auch wenn die Werte der Jüngeren tendenziell niedriger waren, waren die Veränderungen im Verlauf zwischen dem HIIT-Protokoll mit 1, 3 und 10 Minuten Erholungszeit identisch. Dementsprechend war die HF während der HIIT-Protokolle tendenziell niedriger, jedoch war der Verlauf der Veränderung während jedes HIIT-Protokolls und zwischen den verschiedenen HIIT-Protokollen ähnlich (vgl. Publikation 2). Diese Ergebnisse werden von Darr et al. (1988) unterstützt, die die HF nach einem maximalen Stufenergometertest bis zur Erschöpfung bei trainierten und untrainierten Gruppen unterschiedlichen Alters untersuchten. Darr et al. (1988) teilten 20 männliche Radfahrer auf der Grundlage ihres Alters und der $VO_{2\text{peak}}$ in vier Gruppen ein: jung trainiert, alt trainiert, jung untrainiert und alt untrainiert. Während Sie in den trainierten Altersgruppen keine Unterschiede in der Erholungsherzfrequenz (HRR) fanden, stellten sie in den untrainierten Altersgruppen Unterschiede in der HRR fest. Die HRR war bei untrainierten Probanden um etwa 6 Schläge pro Minute im Vergleich zu den Trainierten verzögert, während kein Alterseffekt der HRR beobachtet wurde. Zusammen mit den Ergebnissen aus Publikation 2 scheint der Verlauf der $\%HF_{\max}$ und der HRR bei intensiven Radbelastungen unabhängig vom Alter, aber abhängig vom Trainingszustand zu sein.

Unerwartet waren die in Publikation 2 dargestellten Ergebnisse hinsichtlich gleicher Laktatwerte in den beiden Altersgruppen. Angesichts möglicher physiologischer und morphologischer Veränderungen, die mit dem Älterwerden einhergehen, wäre eine verringerte Produktionsrate des maximalen Laktats zu erwarten (Berthelot et al., 2019). Darüber hinaus wird mit zunehmendem Alter eine Abnahme der Muskelmasse und eine Verschiebung hin zu einem stärker oxidativen Muskelprofil beschrieben, das durch die Atrophie der schnell zuckenden Fasern bedingt wird (McCormick & Vasilaki, 2018). Dies würde auf eine reduzierte Kreatinphosphat-Stoffwechselkapazität und eine verringerte Glykolyse- und Laktatbildungsrate hindeuten.

Die vorliegenden Ergebnisse aus Publikation 2, dass es keine Altersunterschiede in der physiologischen Erholung gibt, stimmen jedoch mit Ergebnissen von Fell et al. (2006) und (2008) überein. Auch hier zeigten sich keine Unterschiede in der physiologischen Erholung bei einer Gruppe von 9 Master-Radsportlern (Durchschnittsalter: 45 Jahre) im Vergleich zu 9 erwachsenen Radsportlern (Durchschnittsalter: 24 Jahre) mit vergleichbarer $VO_{2\max}$. Die Ergebnisse von drei 30-minütigen Einzelzeitfahren (Timetrials) mit gleicher absoluter Leistung an drei aufeinanderfolgenden Tagen zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede

zwischen den beiden Altersgruppen in Bezug auf die durchschnittliche Leistung, das Laktat, die Sprunghöhe beim CMJ, die Sprintleistung und den MVIC (vgl. Publikation 1). Somit deuten die Ergebnisse von Fell während Dauerbelastungen, wie auch die Ergebnisse aus Publikation 2 darauf hin, dass die Trainingsfähigkeit des Organismus in der Altersspanne von 20 bis 45 Jahren erhalten bleibt. In Bezug auf das Laktat ist somit die Trainierbarkeit im mittleren bis höheren Alter auch weiterhin gewährleistet und die Stoffwechselprozesse während und nach HIIT verlaufen vermutlich in der gleichen Weise wie bei jüngeren Athleten.

Diese Bedeutung der Trainierbarkeit im Alter wird auch als Ergebnis des Übersichtsartikels in Publikation 1 hervorgehoben und insbesondere auch in den Ergebnissen von Silverman und Mazzeo (1996) während eines Stufentests und einer Dauerbelastung ersichtlich. Die Autoren untersuchten den Plasmalaktat-, Glukose- und Hormonspiegel bei 24 trainierten Radfahrern und 23 untrainierten Männern, die sich in junge (trainiert $22,6 \pm 0,8$ Jahre, untrainiert $22,9 \pm 1,0$ Jahre), mittelalte (trainiert $46,5 \pm 0,9$ Jahre, untrainiert $43,6 \pm 1,1$ Jahre) und alte (trainiert $63,9 \pm 1,8$ Jahre, untrainiert $67,0 \pm 2,2$ Jahre) Gruppen aufteilten. Silverman und Mazzeo (1996) ließen Probanden einen maximalen Stufentest auf dem Fahrrad und einen 45-minütigen submaximalen Ausdauertest durchführen. Die maximale Sauerstoffaufnahme war mit zunehmendem Alter niedriger. Allerdings wiesen die Trainierten mit höheren VO_{2peak} -Werten im Vergleich zu den Untrainierten in jeder Altersgruppe erhöhte Hormonreaktionen (Cortisol, Noradrenalin, Adrenalin und menschliches Wachstumshormon) auf, die anhand der Plasmakonzentrationen sowohl bei submaximaler als auch bei maximaler Belastung bestimmt wurden. Darüber hinaus erzielten ältere trainierte Sportler während der 45-minütigen submaximalen Belastung bei allen untersuchten Hormonwerten vergleichbare Ergebnisse wie die mittelalten und jüngeren Trainierten und erzielten im Vergleich zu den untrainierten Gruppen (sowohl bei den jungen als auch bei den mittleren Altersgruppen) signifikant höhere Werte. Ein vergleichbares Ergebnis wurde bei dem maximalen Ausbelastungstest festgestellt. Ältere trainierte Personen zeigten größere hormonelle Reaktionen als jüngere untrainierte. Dies deutet darauf hin, dass bei einer solchen Stoffwechselbelastung, wie sie in der Studie von Silverman und Mazzeo (1996) untersucht wurde, die neuroendokrinen Reaktionen bei höherem Fitnessniveau größer sind und dass lebenslanges Training den Rückgang der neuroendokrinen Funktion deutlich verringern kann.

In Bezug auf die psychische Erholung konnten keine Altersunterschiede bei der erhobenen subjektiven Beanspruchung und Erholung mittels RPE- und TQR-Skala zwischen jüngeren und älteren Sportlern nachgewiesen werden. Die subjektive Erholung nahm jedoch mit der Länge

der Erholungszeit vom 1- bis 10-minütigen Protokoll zu (vgl. Publikation 2). In der oben beschriebenen Studie von Fell et al. (2006) mit einer Gruppe von 9 Master-Radfahrern (Durchschnittsalter: 45 Jahre) im Vergleich zu 9 erwachsenen Radfahrern (Durchschnittsalter: 24 Jahre) mit ähnlicher VO_{2max} waren keine physiologischen, sondern nur subjektive Messwerte für Ermüdung und Muskelkater höher. Auch die subjektive Erholungsfähigkeit war bei den Mastern vom ersten bis zum dritten Timetrial geringer. Bei den Erwachsenen gab es keine signifikante Veränderung der subjektiven Messwerte zwischen dem ersten und dem dritten Timetrial. Die Ergebnisse von Fell et al. (2006) und Fell et al. (2008) könnten darauf hindeuten, dass ältere Sportler subjektiv eine längere Erholungszeit wahrnehmen, obwohl sie sich physiologisch ähnlich schnell erholen können wie jüngere Sportler auf demselben Leistungsniveau. In der vorliegenden Studie fanden wir keine Unterschiede im RPE, da wir uns auf die Erholung während des HIIT konzentrierten und nicht auf die Erholung an drei aufeinanderfolgenden Tagen. Da es keine veröffentlichten Studien mit gleichem oder ähnlichem Studiendesign und Athleten mit ähnlichem Leistungsniveau, aber unterschiedlichem Alter gibt, können keine direkten Vergleiche der Ergebnisse aus Publikation mit anderen Studien vorgenommen werden. Jedoch kann das in Kapitel 3.3 vorgestellte hypothetische Modell von Fell und Williams (2008) basierend auf den bisherig gewonnenen Erkenntnissen nicht bestätigt werden. Die von den Autoren postulierte stärkere Ermüdung und verstärkte Wahrnehmung von Ermüdung mit einem einhergehenden verzögerten Wiederherstellungsprozesses bzw. einer verlangsamten Erholung bei älteren Sportlern, kann mit dem in dieser Untersuchung verwendeten Studiendesign (Publikation 2) so nicht bestätigt werden.

Forschungsfrage 2:

Inwieweit unterscheidet sich die psychophysische Erholung nach intensiven Intervallbelastungen von ausdauertrainierten Frauen und Männern?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurde, die in Publikation 3 dargestellte Studie durchgeführt. Ziel war es geschlechtsspezifische Unterschiede in der Erholung während und nach HIIT mit unterschiedlich langen Erholungsphasen zu ermitteln. Für das methodische Vorgehen wurde das gleiche Studiendesign wie in Publikation 1 verwendet allerdings mit einem vollständig neuen Probandenkollektiv. Rekrutiert wurden ausdauertrainierte Frauen und Männern mit vergleichbarem relativem aeroben Ausdauerleistungsniveau. Die leistungsbezogenen Parameter VO_{2max} -Perzentile und relative Leistung, die während des

VO_{2max}-Tests erreicht wurden, unterschieden sich statistisch nicht zwischen den untersuchten 11 Frauen und 11 Männern. Auch hinsichtlich des Alters gab es keine signifikanten Unterschiede. Die bestehenden Unterschiede hinsichtlich des Körpergewichts, der Körpergröße und des Körperfetts sind auf geschlechtsbezogene anthropometrische Unterschiede zurückzuführen. Die Studie hat in Bezug auf die physiologische Erholung gezeigt, dass die metabolische Erholung nach hochintensivem Radintervallen (4 x 30 sec) bei Frauen schneller erfolgte als bei Männern. Bei den HIIT-Protokollen mit 3- und 10-minütiger Erholungszeit wurden signifikante Unterschiede in der Laktatkonzentration festgestellt. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit dem Rückgang der Leistung. Im Vergleich zu den Männern zeigten Frauen durchweg einen geringeren Rückgang der durchschnittlichen Leistung zwischen dem ersten und dem letzten Wingate-Intervall (WAnT). Im Gegensatz dazu waren die Erholungsherzfrequenz (HRR) und die psychophysische (subjektive) Erholung in den aktiven Erholungsphasen zwischen den vier WAnTs bei den Frauen langsamer als bei den untersuchten Männern. Obwohl die Frauen in den Intervallen eine vergleichbare %HF_{max} erreichten, war die kardiale Erholung zwischen den Intervallen langsamer. Dies wurde durch eine höhere %HF_{max} am Ende der 3- und 10-minütigen Erholungsphasen bei der Gruppe der Frauen angezeigt. In der 1-minütigen Erholungsphase wurden keine geschlechtsspezifischen Unterschiede in der %HF_{max} und in den Laktatkonzentrationen festgestellt. Die Tatsache, dass die untersuchten Frauen während der Erholungsphasen eine geringere subjektive Erholung angaben, könnte auf die geringere Erholung der Herzfrequenz im Vergleich zu den Männern zurückzuführen sein. Die vorgegebene Intensität der WAnT-Protokolle aus Publikation 3 war eine "All-Out"-Belastung. Daher sollte die subjektive Anstrengung zwischen weiblichen und männlichen Teilnehmern immer gleich sein. Die Ergebnisse der RPE-Werte zeigten jedoch, dass die Frauen im 10-minütigen Erholungsprotokoll eine geringere empfundene Anstrengung angegeben hatten und dass der RPE-Wert mit zunehmender Erholungszeit bei beiden Geschlechtern insgesamt abgenommen hatte. Die niedrigeren RPE-Werte der Frauen korrespondieren mit den niedrigeren Laktatwerten in den Drei- und Zehn-Minuten-Protokollen.

Die Ergebnisse aus Publikation 3 liefern neue Erkenntnisse über die psychophysische Erholung während und nach hochintensiver 30-Sekunden-Intervalle mit unterschiedlich langen Erholungsphasen bei gut trainierten Frauen und Männern mit gleichem aerobem Leistungsniveau. Die zugrundeliegenden Mechanismen für diese Ergebnisse lassen sich mit den in Publikation 1 herausgearbeiteten Mechanismen und durch frühere Forschungsergebnisse erklären, in denen nachgewiesen wurde, dass Frauen während eines einzelnen WAnT-Sprints im Vergleich zu Männern 42 % weniger Muskelglykogen in Typ-1-Fasern abbauen

(Esbjornsson-Liljedahl et al., 1999). Dies deckt sich mit Ergebnissen einer geringeren Laktatakkumulation im Blut bei Frauen nach einmaligen und wiederholten 30-Sekunden-Sprints (Gratas-Delamarche et al., 1994, Esbjornsson-Liljedahl et al., 2002, Laurent et al., 2010). Möglicherweise steht eine bei den Frauen verringerte Glykogenolyserate im Zusammenhang mit einer niedrigeren Grundaktivitäten der Muskelphosphofruktokinase und der Laktatdehydrogenase (Jaworowski et al., 2002) oder einer geringeren Katecholaminreaktion auf wiederholte Sprintbelastungen (Gratas-Delamarche et al., 1994; Esbjornsson-Liljedahl et al., 2002).

Wie ausführlich in Publikation 1 dargelegt, weisen Vincent et al. (2004) auf einen geschlechtsspezifischen Unterschied in der Plasmaglukose- und Insulinreaktion nach supramaximaler Belastung hin. Esbjörnsson-Liljedahl et al. (1999) zeigten ebenfalls eine signifikant höhere Leistung und Durchschnittsleistung bei Männern im Vergleich zu Frauen während eines Sprint-Wiederholungsprotokolls, das aus wiederholten WAnTs mit 20 Minuten Erholungszeit zwischen den Tests bestand. Ein signifikanter Rückgang der Durchschnittsleistung zwischen dem 1. und 3. Sprint wurde nur bei den Männern festgestellt. Diese Ergebnisse unterstützen die in Publikation 3 gewonnenen Erkenntnisse, wonach Frauen möglicherweise besser in der Lage sind, die Leistung zwischen wiederholten Sprints, die durch Erholungsphasen getrennt sind, wiederherzustellen, und daher im Vergleich zu Männern die Leistung besser aufrechterhalten können. Darüber hinaus fanden Esbjörnsson-Liljedahl et al. (2002) und Laurent et al. (2010) bei weiblichen Athleten eine geringere initiale Sprintleistung (vgl. Publikation 1), was mit den Ergebnissen aus Publikation 3 übereinstimmt. Die höhere initiale Sprintleistung bei Männern hat vermutlich zu einem stärkeren Leistungsabfall bei den verschiedenen Erholungsprotokollen geführt. Insgesamt ist der Leistungsabfall zwischen den vier Sprints bei den Frauen geringer als bei den Männern. Wie zu erwarten, ist sowohl bei den weiblichen wie auch bei den männlichen Athleten der größte Leistungsabfall bei der 1-minütigen Erholungsvariante und nimmt mit zunehmender Erholungsdauer ab. Vor dem Hintergrund der Übersichtsarbeit von Haizlip et al. (2015), die eine genetische Verteilung von langsam und schnell zuckenden Muskelfasern mit einem höheren Anteil an langsam zuckenden (slow-twitch) Fasern bei Frauen und einem höheren Anteil an schnell zuckenden (fast-twitch) Fasern bei Männern beschrieben (vgl. Publikation 1), stimmen auch die Ergebnisse von Lievens et al. (2020) mit den Ergebnissen aus Publikation 3 für die Erholung von Laktat und Leistung überein. Lievens et al. (2020) untersuchten die unterschiedlichen Reaktionen auf hochintensives Intervalltraining mit Wingate-Sprints zwischen einer Gruppe mit überwiegend slow twitch Muskelfasern und einer anderen Gruppe mit überwiegend fast twitch

Muskelfasern. Die Leistung in der Gruppe der slow-twitch-Muskelfasern erholte sich deutlich schneller als in der Gruppe der fast-twitch-Muskelfasern.

Die in Publikation 3 dargelegten Ergebnisse zu den Geschlechtsunterschieden in der psychophysischen Erholung lassen sich auch mit Hilfe der in Publikation 1 beschriebenen Beobachtungen zu Geschlechtsunterschieden in den Reaktionen des Stoffwechsels und des sympathischen Nervensystems auf supramaximales Training diskutieren. Frauen wiesen 5 Minuten nach Wingate-Sprints bei vergleichbaren relativen Intensitäten niedrigere Plasmakatecholamin- (Adrenalin) und Laktatwerte als Männer auf. Dies könnte auf eine hemmende Wirkung von Östradiol auf das sympathische Nervensystem bei Frauen zurückzuführen sein (Gratas-Delamarche et al., 1994; Dar et al., 1997). Frühere Untersuchungen unterstützen die Ergebnisse aus Publikation 3 einer langsameren Erholung der Herzfrequenz bei Frauen. Während sich die HF_{\max} am Ende eines maximalen Lauftests nicht zwischen den Geschlechtern unterschied, war der Rückgang der Herzfrequenz in der ersten und zweiten Erholungsminute (HRR1 und HRR2) bei Frauen signifikant geringer, d. h. die Herzfrequenz der männlichen Probanden fiel schneller ab (Arena et al., 2010). Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von Kappus et al. (2015), wonach die HRR1 und HRR2 bei Männern signifikant schneller abfallen als bei Frauen. Geschlechtsspezifische Unterschiede in der autonomen Funktion und der vagalen Reaktivierung nach maximaler Belastung könnten diese Beobachtungen erklären. Darüber hinaus berichteten Medonca et al. (2010), dass die kardiale autonome Funktion von Frauen durch supramaximale Belastung stärker beeinträchtigt wird als die von Männern.

Forschungsfrage 3:

Inwieweit lassen sich die psychophysische Erholung und Belastbarkeit im Ausdauerleistungssport mittels der kardialen autonomen Kontrolle individuell und differenziert bewerten und wie kann diese im Trainingsprozess Anwendung finden?

Zur Beantwortung der anwendungsbezogenen Forschungsfrage lassen sich vor allem die Ergebnisse aus Publikation 4 und 5 zur kardialen autonomen Regulation heranziehen. In Veröffentlichung 4 wurde die psychophysische Erholung und Belastbarkeit bei sieben sehr gut ausdauertrainierten Sportlerinnen und Sportlern mittels der kardialen autonomen Kontrolle und einem detaillierten Monitoring aller Trainingseinheiten über einen Zeitraum von 8 bis 12 Wochen in unterschiedlichen Trainingsphasen durchgeführt. Täglich wurde der

Erholungszustand mit der TQR-Skala (Kenttä & Hassmén, 1998) erfasst und jeden Morgen der Lagewechseltest (Orthostatic Test) zur Erfassung der kardialen vagalen Kontrolle angewendet. Die Auswertungsparameter des Lagewechseltests umfassen die mittlere HF im Liegen und Stehen, den vagalen HRV-Parameter RMSSD sowie den HF-Peak nach dem Aufstehen. Bei den untersuchten Sportlerinnen und Sportlern zeigten sich individuelle Profile in der Antwortreaktion des autonomen Systems auf die jeweiligen Trainingsbelastungen. Die psychische Erholung, die als subjektives Erholungsempfinden mittels der TQR-Skala erfasst wurde, korrelierte signifikant mit den HF- und RMSSD-Werten beim Lagewechseltest bei vier von sieben Athleten. Jedoch zeigte sich bei drei Athleten kein signifikanter Zusammenhang zwischen den HF- und RMSSD-Werten und dem TQR. Insoweit scheint nach diesen Ergebnissen eine Trainingssteuerung über das subjektive Erholungsempfinden nur begrenzt möglich zu sein.

Bezüglich der psychophysischen bzw. autonomen Erholung nach einer einzelnen Trainingseinheit zeigten die Ergebnisse, dass sich eine einzelne Trainingseinheit, quantifiziert mit Hilfe des berechneten Trainingloads (TRIMP, Banister, 1980), nicht in den TQR-, HF- und RMSSD-Werten am folgenden und darauffolgenden Morgen widerspiegeln. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, da bei gut trainierten Ausdauersportlerinnen und Ausdauersportlern in der Regel erst die Summe der Trainingsbelastungen über mindestens drei Tage zu einer Veränderung der autonomen Regulation führt (vgl. Hottenrott & Hoos, 2017). Dies wird in der Publikation 4 bestätigt, da sich die unterschiedlichen Trainingsphasen (Overload, Tapering, Competition, Recovery), welche begründet anhand der Trainingsbelastungen mittels des TRIMP zu quantifizieren waren, in den Werten des Lagewechseltest eindeutig widerspiegeln und signifikant voneinander abgrenzen lassen.

Erstmalig konnte in Publikation 4 gezeigt werden, dass die HF- und HRV-Werte des Lagewechseltests im Stehen im Vergleich zur Liegendmessung eine größere Variabilität aufweisen. Unterschiedliche Trainingsbelastungen äußern sich demnach sensibler in der Stehendmessung. Insoweit kann der Lagewechseltest, jedoch nicht die alleinige Liegendmessung, die Variation in der Belastung in den einzelnen Trainingsphasen abbilden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Lagewechseltest geeignet zu sein scheint, belastungsinduzierte Veränderungen in den unterschiedlichen Trainingsphasen abzubilden und somit zur objektiven Beurteilung des psychophysischen Ermüdungs- und Erholungsverlaufs im Trainingsalltag beitragen kann.

Um zu beantworten, inwieweit die kardiale autonome Kontrolle unter gesundheitlichen Störungen im Spitzensport eingesetzt werden kann, wurde der Einzelfall eines Elite-Marathonläufers (McKay et al., 2022) untersucht. Die dazu in Publikation 5 veröffentlichten Ergebnisse zeigen die Auswirkungen einer Virusinfektion auf die tägliche Erfassung kardial autonomer Parameter in liegender und stehender Position mittels des Lagewechseltests, wie dieser auch in Publikation 4 angewendet wurde. Die Haupteckenerkenntnis der Untersuchung ist, dass erste Anzeichen einer Virusinfektion, also bevor der Sportler deutliche Krankheitssymptome spürt, einen unmittelbaren Einfluss auf die Parameter der HF und HRV haben. Ein Anstieg der HF geht mit einer Abnahme der RMSSD im Lagewechseltest in stehender Position einher. Es scheint, dass die efferente vagale Aktivität in Präsenz der viralen Infektion unterdrückt wird, was auch in der Literatur bei Patienten mit Fieber beschrieben wird (Carter et al., 2014; Lin et al., 2006). Ein Anstieg der Ruhe-HF und ein Rückgang des RMSSD deuten somit auf eine Unterdrückung der parasympathischen Aktivität hin (Buchheit, 2014; Laborde et al., 2018). Die Geschwindigkeit, mit der die HF vom Liegen zum Stehen ansteigt (tHRpeak), unterscheidet sich im kranken deutlich von einem typischen Verlauf im gesunden Zustand. Mit Beginn der viralen Infektionssymptome kommt es zu einem langsameren Anstieg, der nach drei Tagen des 6-Tage-Zeitraums besonders ausgeprägt ist (vgl. dazu die Ergebnisse aus Publikation 5).

Der bisherige Forschungsstand zu Veränderungen in der kardialen autonomen Regulation während einer Virusinfektion (bei Nicht-Sportlern) verdeutlicht, dass spezifische Messungen von RR-Intervallen und die Bestimmung vagaler HRV-Parameter valide Indikatoren für die kardiale autonome Reaktionsfähigkeit sein können (Malik et al., 2019). Bellenger et al. (2016a) fanden bei Sportlern mit trainingsinduzierter Ermüdung (Overload) eine langsamere Herzfrequenzbeschleunigung zu Beginn der Belastung. Eine reduzierte Leistungsfähigkeit der Athleten und eine veränderte kardiale autonome Kontrolle aufgrund von Ermüdung können auch für eine Virusinfektion zutreffen. Im Zusammenhang mit viralen Erkrankungen wurde der Anstieg der Herzfrequenz in Abhängigkeit von der Veränderung der Körperposition (liegen und stehen) bisher nicht untersucht. Eine kleine Anzahl von Studien mit Ausdauersportlern zeigte eine Abnahme der HF-Akzeleration nach einem vorangegangenen Overload-Training, was darauf hindeutet, dass dies ein potenzieller Indikator für eine trainingsinduzierte Ermüdung sein könnte (Bellenger et al., 2016a; Bellenger et al., 2016b; Nelson et al., 2014).

Die Fallstudie in Publikation 5 hat gezeigt, dass sich die HF- und HRV-Werte während der Virusinfektion in stehender Position stärker verändern als in liegender Position. Besonders

zeigt sich dies bei den RMSSD-Werten, die von 20 ms vor auf 4 ms während der Virusinfektion sanken. Das kardiale autonome System der Sportler reagiert wie bei den untersuchten Ausdauersportlerinnen und -sportlern in Publikation 4 in stehender Position sensibler als in liegender Position.

Die Wiederaufnahme des Trainings ist ein in der Literatur unter dem Begriff „return to play“ (Wilson et al., 2020) viel diskutiertes Thema, da es im Leistungssport entscheidend ist, einen so kurzen Trainingsausfall wie möglich zu haben. Gleichzeitig muss der Zeitpunkt des Trainingseinstiegs bei guter psychophysischer Gesundheit erfolgen, damit kein Krankheitsrückfall oder Langzeitfolgen eintreten. Ergänzend zu sportmedizinischen Untersuchungen kann die HRV-Analyse, wie in Publikation 5 dargelegt helfen, begründet den richtigen Zeitpunkt zur Trainingswiederaufnahme zu finden. Darüber hinaus ermöglicht die tägliche morgendliche Analyse der HRV-Werte einen möglichst frühen Zeitpunkt der Trainingsunterbrechung zu finden, idealerweise vor dem Auftreten der Krankheitssymptome und somit einer weiteren Immunschwächung durch weitere Trainingsbelastungen entgegen zu wirken. Insoweit haben die Ergebnisse der Fallstudie in Publikation 5 gezeigt, dass der tägliche morgendlich durchgeführte Lagewechseltest mit der Erfassung der Herzfrequenz und des vagalen HRV-Parameters (RMSSD) in der liegenden und in der stehenden Körperposition geeignet ist, um einem Sportler vor, während und nach einer Phase einer eingeschränkten Belastbarkeit (gesundheitliche Störung) begründete (Training-)Empfehlungen geben zu können.

Um aus den gewonnenen Ergebnissen der Publikationen 4 und 5 trainingsmethodische Empfehlungen und Anwendungsbezüge abzuleiten, wurde versucht, diese Erkenntnisse in einem übergeordneten Kontext bzw. einem Modell zu verorten. Dazu wurde die „Vagal Tank Theory“ von Laborde et al. (2018) zugrunde gelegt und erweitert (vgl. Hottenrott et al, 2019). Die Theorie basiert auf der Annahme, dass die vagale Kontrolle des Herzens eine Barometerfunktion hat, die widerspiegeln kann, wie effizient die Ressourcen zur Selbstregulierung mobilisiert werden. Daher verwenden die Autoren die Metapher eines vagalen Tanks, der je nach Situation und Aufgabe geleert und wieder aufgefüllt werden kann (Abb. 15). Für die Analyse der kardialen vagalen Kontrolle schlagen Laborde et al. (2018) drei verschiedene Ebenen vor (Ruhe, Reaktivität, Erholung, „Resting, Reactivity, Recovery“), da sie alle verschiedenen Stufen der Anpassungsfähigkeit darstellen. Ihre Theorie basiert auf der Annahme, dass der Füllungsstatus des vagalen Tanks die Fähigkeit zur Selbstregulierung in den drei Stufen widerspiegelt.

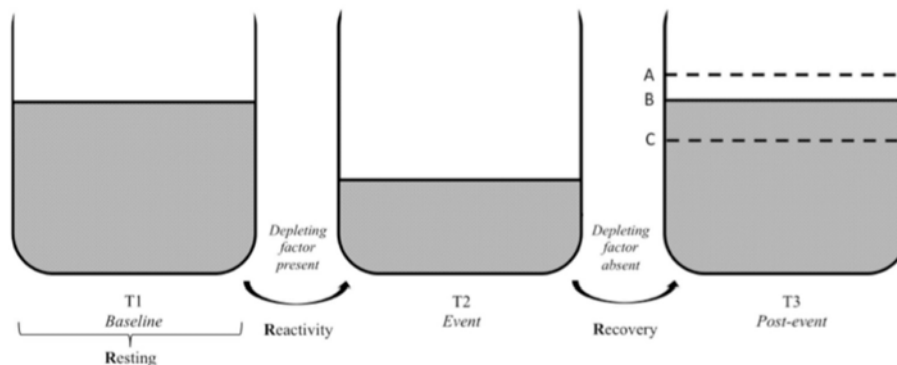


Abbildung 15. Modell vagaler Tanks und die 3 Rs (Resting, Reactivity, Recovery) der vagalen Kontrolle des Herzens (Laborde et al., 2018).

Um die vagale Tank Theorie auf die Anforderungen im Sport hinsichtlich der Erholungssteuerung zu übertragen und die gewonnenen Erkenntnisse aus den Publikationen 4 und 5 zu nutzen, wäre eine zusätzliche Bewertung der kardialen vagalen Aktivität im Stehen vorzunehmen und in das Modell zu integrieren. Das Modell von Laborde et al. beschränkt sich auf eine Position, in der Regel auf die liegende Position. Mit dem zusätzlichen physiologischen Stimulus durch den Lagewechseltest kann die "Vagal Tank Theory" auf Ausdauersportarten angewendet werden. Der Lagewechseltest hat sich in dieser Hinsicht, wie in Publikation 4 und 5 sowie in weiteren vorangegangenen Studien und praktischen Anwendungen als eine hilfreiche Methode der Erholungssteuerung erwiesen (Bellenger et al., 2016b; Hottenrott & Hottenrott, 2018, Hottenrott et al., 2020; Le Meur et al., 2013; Stanley et al., 2013). Bei der Anwendung der im Modell von Hottenrott und Hoos (2017) zusammengefassten Erkenntnisse des Lagewechseltests auf die ursprüngliche "Vagal Tank Theory" von Laborde et al. (2018) haben Hottenrott et al. (2019) das folgende modifizierte Modell entwickelt (Abbildung 16). Dieses Modell ist geeignet, um den komplexen Prozess der Belastung und Erholung im Ausdauersport mit seiner Vielzahl an Einflussfaktoren ganzheitlich zu betrachten. In dem Füllzustand des Tanks spiegeln sich sowohl psychische, wie physische Faktoren der Belastung und Erholung wieder, da die HRV als Surrogatparameter fungiert. Das Modell des angepassten vagalen Tanks kann sowohl im Trainingsprozess kurz- und langfristig (z.B. Overload, Tapering, Competition, Recovery), sowie in Phasen des Trainingsausfalls eingesetzt werden. Dabei zeigt sich ein guter psychophysischer Zustand immer in einer hohen Tankfüllung bzw. in hohen vagalen HRV-Parametern im Liegen und ist Voraussetzung zur Leistungserbringung. Der Ansatz

für die individuelle Steuerung der Belastungs- und Erholungsprozesse basiert auf der Analyse einer individuellen Baseline.

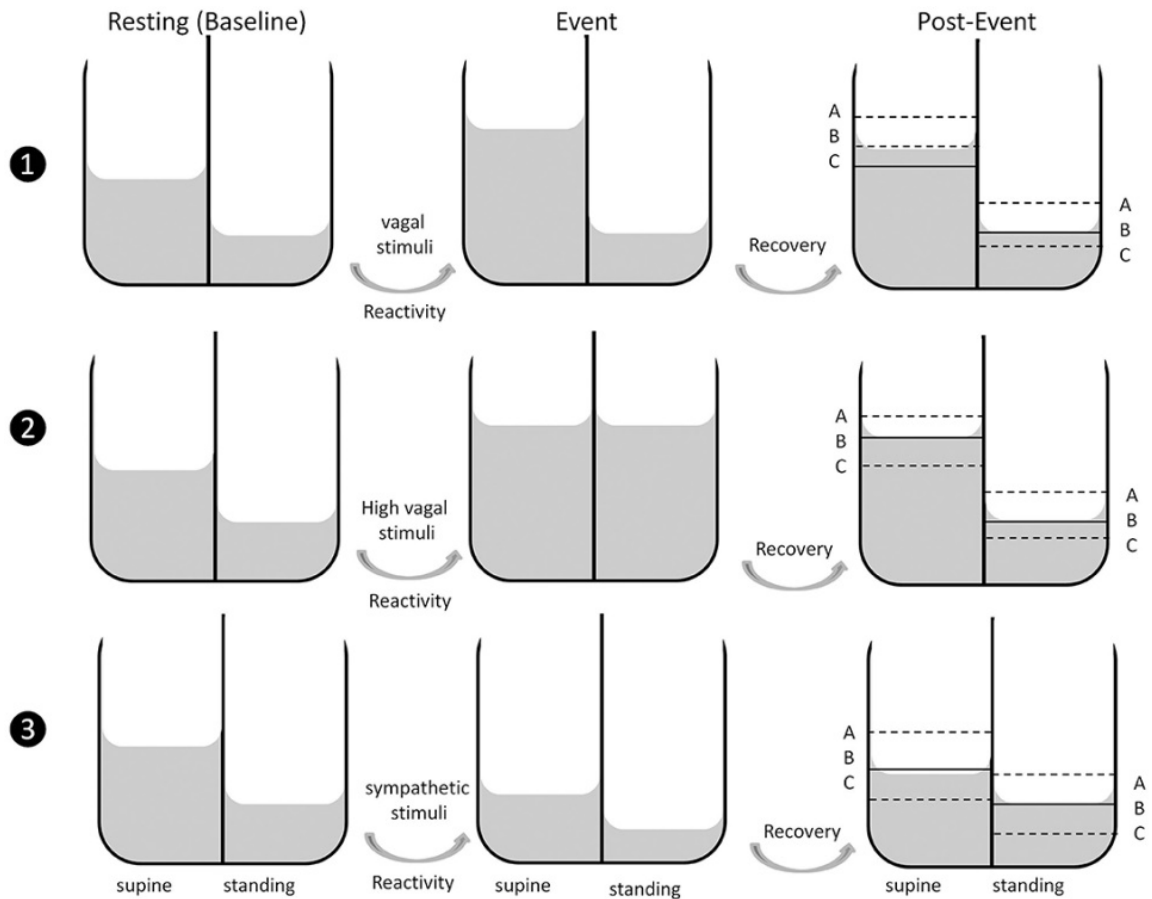


Abbildung 16. *Angepasstes vagales Tankmodell nach Laborde et al. (2018) unter Einbezug des Lagewechseltests für die Anwendung im Ausdauersport. Vagaltank mit vagalen Stimuli (1), mit hohen vagalen Stimuli (2) und sympathischen Stimuli (3). A, B und C zeigen den mögliche Füllzustand als noch vorhandene vagale Ressource nach einem Event und der anschließenden Erholung (Hottenrott et al., 2019).*

Nach dieser Messung der Baseline-Werte im erholten Zustand über 1-2 Wochen, kann der Sportler mit dem geplanten Trainingsprogramm starten. Die regelmäßigen morgendlichen Messungen dienen dann dazu, Veränderungen im Verhältnis zu den Ausgangswerten zu bewerten. Dies ermöglicht es dem Trainer, einzugreifen und den individuellen Trainingsplan anzupassen, um positive Anpassungen zu erzielen. Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz des Modells im Ausdauersport die frühzeitige Erkennung von Funktionseinschränkungen des autonomen Nervensystems und bietet somit ein großes Anwendungspotenzial, auch für die Prävention von Übertraining.

7 Limitationen und Ausblick

Bei den gewonnenen Erkenntnissen zur psychophysischen Erholung und Belastbarkeit im Ausdauersport unter besonderer Berücksichtigung von Alter und Geschlecht (Publikation 1 bis 5) sind einige Limitationen zu beachten.

Die Ergebnisse der Untersuchung zum Erholungsverhalten nach intensiven Ausdauerbelastungen (Publikationen 2) liefern erstmalig Erkenntnisse über die psychophysische Erholung bei älteren und jüngeren Ausdauersportlern mit gleichem aeroben Leistungsniveau. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Altersunterschied zwischen den beiden Gruppen im Mittel nur 23 Jahre beträgt. Trotzdem sind die gewonnenen Ergebnisse sehr aufschlussreich, da die meisten Studien zu HIIT nur an jungen Sportlern durchgeführt wurden und es bisher rein spekulativ war, anzunehmen, dass die Trainingsempfehlungen für alle Altersgruppen gleichermaßen gelten. Basierend auf den Erkenntnissen aus Publikation 2 können mit einem HIIT-Programm bei jüngeren und älteren Athleten ähnliche Trainingsziele erreicht werden, wenn man davon ausgeht, dass das Leistungsniveau der Sportler vergleichbar ist. Die eigenen Ergebnisse zeigen auch, dass eine aktive Erholung von mehr als 3 und bis zu 10 Minuten sowohl für jüngere als auch für ältere Athleten empfehlenswert ist, um in jedem Belastungsintervall eine hohe Leistungsfähigkeit zu erreichen und den ermüdungsbedingten Leistungsabfall zu minimieren. Entsprechend der untersuchten Probandengruppe sind diese Aussagen aber nur auf Sportler bis etwa 50 Jahre zu beziehen. Leistungssportliches Training findet in dieser Altersspanne in besonderem Maße statt, so dass Fragen zur psychophysischen Erholung eine hohe praktische Relevanz für diesen Altersbereich haben. Im verwendeten Studiendesign wurden HIIT-Programme mit aktiven Erholungsphasen zwischen den einzelnen Intervallen durchgeführt. In der Trainingspraxis werden auch HIIT-Protokolle mit passiven Pausen angewendet. Inwieweit die gewonnenen Erkenntnisse hierfür ebenso zutreffen, müsste in weiteren Studien geprüft werden.

In den Untersuchungen zum Geschlechtseinfluss (Publikation 3) ist limitierend anzumerken, dass die Athletinnen nicht während einer standardisierten Phase ihres Menstruationszyklus getestet wurden. Inwieweit dies die Ergebnisse beeinflusst haben kann, ist unklar, da die Studienlage hierzu nicht eindeutig ist. Ein kürzlich veröffentlichtes systematisches Review hat ergeben, dass die körperliche Leistungsfähigkeit während der frühen Follikelphase des Menstruationszyklus, wenn überhaupt, nur geringfügig im Vergleich zu allen anderen Phasen reduziert sein könnte (McNulty et al., 2020). Da die physiologischen Wirkmechanismen bei HIIT-Programmen noch nicht vollständig aufgeklärt sind, ist nicht klar, ob in den beiden Studien alle relevanten Störfaktoren, die zu den physiologischen Veränderungen beigetragen haben, berücksichtigt wurden. Ferner wurden Daten zur psychophysischen Belastungs- und

Beanspruchung nur während und direkt nach dem HIIT-Programm untersucht, so dass daraus keine Schlussfolgerungen zu längerfristigen Effekten gezogen werden können.

Die Fallstudie (Publikation 5) zeigte zwar klare Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses einer Virusinfektion (Influenza) mit starken Krankheitssymptomen (u.a. Fieber) auf die efferente vagale Aktivität, allerdings wäre in weiteren Studien zu prüfen, inwieweit sich andere Virusinfektionen ebenso mit einer Veränderung von Parametern der Herzfrequenzvariabilität diagnostizieren lassen und welcher Parameter besonders sensibel reagiert. Im Rahmen der Fallstudie hat sich der vagale HRV-Parameter RMSSD als geeignet erwiesen.

Aus den HRV-Analysen im Liegen und Stehen während unterschiedlicher Trainingsphasen mit sehr gut trainierten Ausdauersportlern (Publikation 4) ging hervor, dass sich in allen Trainingsphasen eine signifikant höhere Tag-zu-Tag-Variation der Herzfrequenz und des vagalen HRV-Parameter RMSSD im Stehen im Vergleich zu den Werten im Liegen zeigte und die Stehendmessungen variabler und somit sensibler Ermüdungs- und Erholungsverlauf widerspiegelten als die Liegendmessungen. Inwieweit dieser Befund auch auf weniger trainierte Ausdauersportler zutrifft, deren Training sich in der Regel weniger stark von Trainingsphase zu Trainingsphase ändert, müsste in weiteren Studien geklärt werden. Darüber hinaus sollte der Lagewechseltest in wiederholten Trainingszyklen eingesetzt werden, um die Aussagekraft der erhobenen Parameter für eine langfristige Trainingssteuerung zu prüfen. Auch die Möglichkeiten des Einsatzes der neuen, in Publikation 4 und 5 angewendeten Methode zur Berechnung des tHRpeak beim Lagewechseltest sollte in kommenden Studien weiter überprüft werden.

Nach den Studienergebnissen müssen bei der Anwendung von HIIT-Programmen Geschlechtsunterschiede berücksichtigt werden. Bei Wiederholungsbelastungen sind Frauen ermüdungsresistenter und haben eine verbesserte Fähigkeit, sich metabolisch zu erholen, jedoch haben sie eine langsamere Herzfrequenz und subjektive Erholung. Auf Grundlage dieses Ergebnisses müssten sich beispielsweise die klassischen Intervallprogramme in der Leichtathletik (z.B. 2 x 10 x 200 m mit Trabpause) für Frauen und Männer in der Pausenlänge unterscheiden. Frauen könnten hierbei kürzere Pausen einhalten als Männer. Bei der Pausengestaltung ist aber zu beachten, dass die Pausenlänge, wenn sie nach HF gesteuert wird, bei Frauen andere Werte anzeigen wird als bei Männern. Demnach müssen die HF-Zielwerte in der Pause bei Frauen Prozentual höher gewählt werden als bei Männern. Für die Praxis sollten Trainern und Betreuern umfassende Expertise zum HRV-Monitoring vermittelt werden. Die Nutzung des Lagewechseltests kann eine innovative, nicht-invasive und zeitsparende Möglichkeit bieten, den psychophysischen Erholungs- und Gesundheitszustand von Sportlern zu ermitteln und zu bewerten.

8 Literaturangaben

- Abhishekh, H. A., Nisarga, P., Kisan, R., Meghana, A., Chandran, S., Raju, T., & Sathyaprabha, T. N. (2013). Influence of age and gender on autonomic regulation of heart. *Journal of clinical monitoring and computing*, 27(3), 259-264. <https://doi.org/10.1007/s10877-012-9424-3>
- Alfermann, D., & Stoll, O. (2007). *Sportpsychologie: Ein Lehrbuch in 12 Lektionen* (2. Aufl.). Meyer & Meyer Verlag.
- Allmer H. (1996). *Erholung und Gesundheit*. Hogrefe.
- Antelmi, I., De Paula, R. S., Shinzato, A. R., Peres, C. A., Mansur, A. J., & Grupi, C. J. (2004). Influence of age, gender, body mass index, and functional capacity on heart rate variability in a cohort of subjects without heart disease. *The American journal of cardiology*, 93(3), 381-385. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2003.09.065>
- Arena, R., Arrowood, J.A., Fei, D., Shelar, S., Helm, S., Kraft, K.A. (2010). The influence of sex on the relationship between heart rate recovery and other cardiovascular risk factors in apparently healthy subjects. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 20(2), 291-297. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00883.x>
- Baldari, C., Videira, M., Madeira, F., Sergio, J., & Guidetti, L. (2004). Lactate removal during active recovery related to the individual anaerobic and ventilatory thresholds in soccer players. *European journal of applied physiology*, 93(1), 224-230. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1203-5>
- Balk, Y. A., De Jonge, J., Oerlemans, W. G., & Geurts, S. A. (2020). "What a match!": the specific role of resources in the relation between demands and vigour in elite sport. *Applied Psychology*, 69(1), 120-147. <https://doi.org/10.1111/apps.12188>
- Banister, E. W., & Calvert, T. W. (1980). Planning for future performance: implications for long term training. *Canadian journal of applied sport sciences*, 5(3), 170-176.
- Belcastro, A. N., & Bonen, A. (1975). Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *Journal of applied physiology*, 39(6), 932-936. <https://doi.org/10.1152/jappl.1975.39.6.932>
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016a). Monitoring Athletic Training Status Through Autonomic Heart Rate Regulation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 46(10), 1461-1486. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0484-2>
- Bellenger, C. R., Karavirta, L., Thomson, R. L., Robertson, E. Y., Davison, K., & Buckley, J. D. (2016b). Contextualizing parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with perceptions of training tolerance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11, 685-692. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0495>
- Berkoff, D. J., Cairns, C. B., Sanchez, L. D., & Moorman III, C. T. (2007). Heart rate variability in elite American track-and-field athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 21(1), 227. <https://doi.org/10.1519/00124278-200702000-00041>
- Berthelot, G., Bar-Hen, A., Marck, A., Foulonneau, V., Douady, S., Noirez, P., Zablocki-Thomas, P. B., da Silva Antero, J., Carter, P. A., Di Meglio, J. M., & Toussaint, J. F. (2019). An

- integrative modeling approach to the age-performance relationship in mammals at the cellular scale. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36707-3>
- Bieuzen, F., Hausswirth, C., Louis, J., & Brisswalter, J. (2010). Age-related changes in neuromuscular function and performance following a high-intensity intermittent task in endurance-trained men. *Gerontology*, 56(1), 66-72.
<https://doi.org/10.1159/000262286>
- Billat, L. V. (2001). Interval training for performance: A scientific and empirical practice. *Sports Medicine*, 31(1), 13-31. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131010-00002>.
- Billaut, F., & Bishop, D. (2009). Muscle Fatigue in Males and Females during Multiple-Sprint Exercise: *Sports Medicine*, 39(4), 257-278.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200939040-00001>
- Billman, G. E., & Kukielka, M. (2006). Effects of endurance exercise training on heart rate variability and susceptibility to sudden cardiac death: protection is not due to enhanced cardiac vagal regulation. *Journal of Applied Physiology*, 100(3), 896-906.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01328.2005>.
- Birat, A., Bourdier, P., Piponnier, E., Blazejch, A. J., Maciejewski, H., Duché, P., & Ratel, S. (2018). Metabolic and fatigue profiles are comparable between prepubertal children and well-trained adult endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 9, 387.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00387>
- Böckelmann, I., & Sammito, S. (2020). Herzfrequenzvariabilitätsanalyse in der betriebsärztlichen Praxis. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 1-9.
- Bohm, S., Mersmann, F., Karamanidis, K., & Arampatzis, A. (2018). Altersspezifische Veränderungen des aktiven Haltungs- und Bewegungsapparates. In U. Granacher, H. Mechling, & C. Voelcker-Rehage (Hrsg.), *Handbuch Bewegungs- und Sportgerontologie* (S. 313-322). Hofmann
- Borg, G. (1998). *Borg's Perceived Exertion and Pain Scale*. Human Kinetics.
- Borg, G. (2004). Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. *Deutsches Ärzteblatt*, 101(15), 1016-1021.
- Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: Do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*, 5, 73. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>
- Buchheit, M., & Gindre C. (2006). Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 291(1), H451-458.
<https://doi.org/10.1152/ajpheart.00008.2006>.
- Burniston, J.G., Towler, M. & Wackerhage, H. (2014). Signal transduction and adaptation to exercise: background and methods. In Wackerhage H. (Eds). *Muscular Exercise Physiology - An Introduction* (pp. 52-78). Routledge
- Carter, R., Hinojosa-Laborde, C., & Convertino, V. A. (2014). Heart rate variability in patients being treated for dengue viral infection: new insights from mathematical correction of heart rate. *Frontiers in Physiology*, 5, 46. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00046>

- Cherkas, L. F., Hunkin, J. L., Kato, B. S., Richards, J. B., Gardner, J. P., Surdulescu, G. L., Kimura, M. Lu, X., Spector, T. D., & Aviv, A. (2008). The association between physical activity in leisure time and leukocyte telomere length. *Archives of Internal Medicine*, *168*(2), 154-158. <https://doi.org/10.1249/10.1001/archinternmed.2007.39>
- Costill, D. L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G., & Saltin, B. (1976). Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *Journal of Applied Physiology*, *40*(2), 149-154. <https://doi.org/10.1152/jap.1976.40.2.149>
- Dar, D. E., & Zinder, O. (1997). Short term effect of steroids on catecholamine secretion from bovine adrenal medulla chromaffin cells. *Neuropharmacology*, *36*(11-12), 1783-1788. [https://doi.org/10.1016/S0028-3908\(97\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0028-3908(97)00150-0)
- Darr, K. C., Bassett, D. R., Morgan, B. J., & Thomas, D. P. (1988). Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. *The American Journal of Physiology*, *254*(2), H340-343. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1988.254.2.H340>
- Doherty, T. J. (2003). Invited review: aging and sarcopenia. *Journal of Applied Physiology*. <https://doi.org/10.1152/jap.2003.95.3.1003>
- Dreyer, H. C., Blanco, C. E., Sattler, F. R., Schroeder, E. T., & Wiswell, R. A. (2006). Satellite cell numbers in young and older men 24 hours after eccentric exercise. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, *33*(2), 242-253. <https://doi.org/10.1002/mus.20461>
- Easthope, C. S., Hausswirth, C., Louis, J., Lepers, R., Vercruyssen, F., & Brisswalter, J. (2010). Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *European Journal of Applied Physiology*, *110*(6), 1107-1116. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1597-1>
- Esbjornsson-Liljedahl, M., Bodin, K., & Jansson, E. (2002). Smaller muscle ATP reduction in women than in men by repeated bouts of sprint exercise. *Journal of Applied Physiology*, *93*(3), 1075-1083. <https://doi.org/10.1152/jap.2002.93.3.1075>
- Esbjornsson-Liljedahl, M., Sundberg, C. J., Norman, B., & Jansson, E. (1999). Metabolic response in type I and type II muscle fibers during a 30-s cycle sprint in men and women. *Journal of Applied Physiology*, *87*(4), 1326-1332. <https://doi.org/10.1152/jap.1999.87.4.1326>
- Faulkner, J. A., Davis, C. S., Mendias, C. L., & Brooks, S. V. (2008). The aging of elite male athletes: Age-related changes in performance and skeletal muscle structure and function. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *18*(6), 501-507. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3181845f1c>
- Fell, J., & Williams, A. D. (2008). The effect of aging on skeletal-muscle recovery from exercise: Possible implications for aging athletes. *Journal of Aging and Physical Activity*, *16*(1), 97-115. <https://doi.org/10.1123/japa.16.1.97>
- Fell, J., Haseler, L., Gaffney, P., Reaburn, P., & Harrison, G. (2006). Performance during consecutive days of laboratory time-trials in young and veteran cyclists. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *46*(3), 395-402. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.07.012>

- Fell, J., Reaburn, P., & Harrison, G. J. (2008). Altered perception and report of fatigue and recovery in veteran athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 48(2), 272–277.
- Ferrauti, A., & Hottenrott, L. (2020). Training im mittleren und höheren Lebensalter. In A. Ferrauti (Hrsg.), *Trainingswissenschaft für die Sportpraxis* (S. 547-578). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58227-5>
- Ferrucci, L., Penninx, B. W., Volpato, S., Harris, T. B., Bandeen-Roche, K., Balfour, J., Leveille S. G., Fried, L. P., & Guralnik, J. M. (2002). Change in muscle strength explains accelerated decline of physical function in older women with high interleukin-6 serum levels. *Journal of the American Geriatrics Society*, 50(12), 1947-1954. <https://doi.org/10.1046/j.15325415.2002.50605.x>
- Finkelstein, J. S., Lee, H., Burnett-Bowie, S.-A. M., Pallais, J. C., Yu, E. W., Borges, L. F., Jones, B. F., Barry, C. V., Wulczyn, K. E., Thomas, B. J., & Leder, B. Z. (2013). Gonadal steroids and body composition, strength, and sexual function in men. *The New England Journal of Medicine*, 369(11), 1011–1022. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1206168>
- Foster, C., Boulosa, D., McGuigan, M., Fusco, A., Cortis, C., Arney, B. E., Orton, B., Radtke, C. K., van Erp, T., de Koning, J.J., Bok, D., Rodriguez-Marroyo, J., & Porcari, J. P. (2021). 25 years of session rating of perceived exertion: Historical perspective and development. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(5), 612-621. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0599>
- Fox, S. M., Naughton, J. P., & Haskell, W. L. (1971). Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Annals of Clinical Research*, 3(6), 404–432
- Fraga, R., Franco, F. G., Roveda, F., de Matos, L. N. J., Braga, A. M. F. W., Rondon, M. U. P. B., Rotta, D. R., Brum, P. C., Barretto, A. C. P., Middlekauff, H. R., & Negaro, C. E. (2007). Exercise training reduces sympathetic nerve activity in heart failure patients treated with Carvedilol. *European Journal of Heart Failure*, 9, 630-636. <https://doi.org/10.1016/j.ejheart.2007.03.003>
- Fronso, S. D., Robazza, C., Bortoli, L., & Bertollo, M. (2017). Performance optimization in sport: a psychophysiological approach. *Motriz Revista de Educação Física*, 23. <https://doi.org/10.1590/S1980-6574201700040001>
- Fry, R. W., Morton, A. R., & Keast, D. (1991). Overtraining in athletes: an update. *Sports Medicine*, 12, 32-65.
- Fuchs, R., & Gerber, M. (Eds.). (2018). *Handbuch Stressregulation und Sport*. Springer.
- Gleeson, T. T. (1996). Post-exercise lactate metabolism: a comparative review of sites, pathways, and regulation. *Annual Review of Physiology*, 58(1), 565-581. <https://doi.org/10.1146/annurev.ph.58.030196.003025>.
- Glenmark, B., Hedberg, G., & Jansson, E. (1992). Changes in muscle fibre type from adolescence to adulthood in women and men. *Acta Physiologica Scandinavica*, 146(2), 251–259. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1992.tb09414.x>
- Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saltin, B., Saubert 4th, C. W., Sembrowich, W. L., & Shepherd, R. E. (1973). Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human

- skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 34(1), 107-111. <https://doi.org/10.1152/jappl.1973.34.1.107>
- Grässler, B., Thielmann, B., Böckelmann, I., & Hökelmann, A. (2021). Effects of different exercise interventions on heart rate variability and cardiovascular health factors in older adults: a systematic review. *European Review of Aging and Physical Activity*, 18(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s11556-021-00278-6>
- Gratas-Delamarche, A., Le Cam, R., Delamarche, P., Monnier, M., & Koubi, H. (1994). Lactate and catecholamine responses in male and female sprinters during a Wingate test. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68(4), 362-366. <https://doi.org/10.1007/BF00571458>
- Graves, R. S., Mahnken, J. D., Perea, R. D., Billinger, S. A., & Vidoni, E. D. (2015). Modeling percentile rank of cardiorespiratory fitness across the lifespan. *Cardiopulmonary Physical Therapy Journal*, 26(4), 108. <https://doi.org/10.1097/CPT.0000000000000015>
- Gregoire, J., Tuck, S., Hughson, R. L., & Yamamoto, Y. (1996). Heart rate variability at rest and exercise: influence of age, gender, and physical training. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 21, 455-470. <https://doi.org/10.1139/h96-040>
- Gronwald, T., Törpel, A., Herold, F., & Budde, H. (2020). Perspective of dose and response for individualized physical exercise and training prescription. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 5(3), 48. <https://doi.org/10.3390/jfmk5030048>
- Hainsworth, R. (1998). Physiology of the cardiac autonomic system. In Malik M. (Eds.), *Clinical guide to cardiac autonomic tests* (pp. 3-28). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1057-2_1
- Haizlip, K. M., Harrison, B. C., Leinwand, L. A. (2015). Sex-based differences in skeletal muscle kinetics and fiber-type composition. *Physiology*, 30, 30-39, <https://doi.org/10.1152/physiol.00024.2014>.
- Häkkinen, K., Pakarinen, A., Kraemer, W. J., Newton, R. U., & Alen, M. (2000). Basal concentrations and acute responses of serum hormones and strength development during heavy resistance training in middle-aged and elderly men and women. *The Journals of Gerontology. Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(2), B95-105. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.2.b95>
- Hall, J. L., Mazzeo, R. S., Podolin, D. A., Cartee, G. D., & Stanley, W. C. (1994). Exercise training does not compensate for age-related decrease in myocardial GLUT-4 content. *Journal of Applied Physiology*, 76(1), 328-332. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.76.1.328>
- Hamadeh, M. J., Devries, M. C., & Tarnopolsky, M. A. (2005). Estrogen supplementation reduces whole body leucine and carbohydrate oxidation and increases lipid oxidation in men during endurance exercise. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 90(6), 3592-3599. <https://doi.org/10.1210/jc.2004-1743>
- Harmon, K. G., Asif, I. M., Maleszewski, J. J., Owens, D. S., Prutkin, J. M., Salerno, J. C., Zigman, M. L., Ellenbogen, R., Rao, A. L., Ackerman, M. J., & Drezner, J. A. (2016). *Incidence and etiology of sudden cardiac arrest and death in high school athletes in the United States*. In Mayo Clinic Proceedings (pp. 1493-1502). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2016.07.021>
- Hauswirth, C., & Mujika, I. (2013). *Recovery for performance in sport*. Human Kinetics.

- Hautala, A. J., Mäkikallio, T. H., Kiviniemi, A., Laukkanen, R. T., Nissilä, S., Huikuri, H. V., & Tulppo, M. P. (2003). Cardiovascular autonomic function correlates with the response to aerobic training in healthy sedentary subjects. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 285(4), H1747-H1752. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00202.2003>
- Hawkins, S. A., & Wiswell, R. A. (2003). Rate and mechanism of maximal oxygen consumption decline with aging: Implications for exercise training. *Sports Medicine*, 33(12), 877–888. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333120-00002>
- Heck, H. (2013). Physiologische Grundlagen. Ergometrie: Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. Springer.
- Hedelin, R., Wiklund, U., Bjerle, P., & Henriksson-Larsén, K. (2000). Pre-and post-season heart rate variability in adolescent cross-country skiers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 10(5), 298-303. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2000.010005298.x>
- Heidari, J., Kölling, S., Pelka, M., & Kellmann, M. (2018). Monitoring the recovery-stress state in athletes. In M. Kellmann & J. Beckmann (Eds.), *Sport, recovery and performance: Interdisciplinary insights* (pp. 3-18). Routledge.
- Hillmert, M., Bergmüller, A., Minow, A., Raggatz, J., & Böckelmann, I. (2020). *Psychophysiologische Beanspruchungskorrelate während kognitiver Belastung*. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 1-15.
- Hitzschke, B., Kölling, S., Ferrauti, A., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Kellmann, M. (2015). Entwicklung der Kurzskala zur Erfassung von Erholung und Beanspruchung im Sport (KEB). *Zeitschrift für Sportpsychologie*, 22, 146-161. <https://doi.org/10.1026/1612-5010/a000150>
- Hollmann, W., & Strüder, H. K. (2009). *Sportmedizin: Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin*. Schattauer Verlag.
- Hottenrott, K. (2002): Grundlagen zur Herzfrequenzvariabilität und Anwendungsmöglichkeiten im Sport. In K. Hottenrott (Hrsg.), *Herzfrequenzvariabilität im Sport - Prävention, Rehabilitation und Training*. (S. 9-26). Czwalina.
- Hottenrott, K., & Hoos, O. (2017). Heart Rate Variability Analysis in Exercise Physiology. In H.F. Jelinek, D. J. Cornforth, & A. H. Khandoker (Eds.), *ECG Time Series Variability Analysis: Engineering and Medicine* (pp. 245-273). CRC Press.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2010). Ist das Superkompensationsmodell noch aktuell? *Leistungssport*, 40(2), 13-12.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2010). *Methodik des Ausdauertrainings. Band 165. Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport*. Hofmann Verlag.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2012). Geschlechtsspezifische Formel für optimale Trainingsherzfrequenzen. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*. 60(3), 202-205.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2020). *Trainingswissenschaft. Ein Lehrbuch in 14 Lektionen* (4. Aufl.). Meyer & Meyer.

- Hottenrott, K., Hoos, O., & Esperer, H.D. (2006). Herzfrequenzvariabilität und Sport – Aktueller Stand. *Herz*, 31(6), 544-552.
- Hottenrott, L. (2021). HRV-Analysen im Liegen und Stehen (Orthostatic Test) bei Elite-Ausdauersportlern – eine Feldstudie. In K. Hottenrott, I. Böckelmann, & H. Schmidt (Hrsg.), *Herzfrequenzvariabilität: Anwendungen in Forschung und Praxis*. Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft, 292 (S. 152-159). Czwalina.
- Hottenrott, L., & Ferrauti, A. Einfluss des Athletenalters auf das Regenerationsmanagement. (2020). In T. Meyer, A. Ferrauti, M. Kellmann, & M. Pfeiffer (Hrsg.), *Regenerationsmanagement im Spitzensport (Teil 2): REGman – Ergebnisse und Handlungsempfehlungen* (S. 135-142). Bundesinstitut für Sportwissenschaft.
- Hottenrott, L., & Hottenrott, K. (2018). *Die Geheimnisse des individualisierten Trainings. Der Orthostatic Test im Ausdauersport. Wissenschaftliche Erkenntnisse und die Gestaltung des eigenen Trainings*. KDP.
- Hottenrott, L., Gronwald, T., Hottenrott, K., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A. (2021). Utilizing heart rate variability for coaching athletes during and after viral infection: A case report in an elite endurance athlete. *Frontiers in Sports and Active Living*, 205. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.612782>
- Hottenrott, L., Ketelhut, S., & Hottenrott, K. (2019). Commentary: vagal tank theory: the three Rs of cardiac vagal control functioning—resting, reactivity, and recovery. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1300. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.0130>
- Hottenrott, L., Ketelhut, S., Schneider, C., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A. (2021). Age-and sex-related differences in recovery from high-Intensity and endurance exercise: A brief review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(6), 752-762. <https://doi.org/10.3390/sports10010009>
- Hottenrott, L., Möhle, M., Feichtinger, S., Ketelhut, S., Stoll, O., & Hottenrott, K. (2022). Performance and recovery of well-trained younger and older athletes during different HIIT protocols. *Sports*, 10(1), 9. <https://doi.org/10.3390/sports10010009>
- Hottenrott, L., Möhle, M., Ide, A., Ketelhut, S., Stoll, O., & Hottenrott, K. (2021). Recovery from different high-intensity interval training protocols: Comparing well-trained women and men. *Sports*, 9(3), 34. <https://doi.org/10.3390/sports9030034>
- Hunter, G. R., Newcomer, B. R., Weinsier, R. L., Karapondo, D. L., Larson-Meyer, D. E., Joanisse, D. R., & Bamman, M. M. (2002). Age is independently related to muscle metabolic capacity in premenopausal women. *Journal of Applied Physiology*, 93(1), 70-76. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01239.2001>
- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., & Coutts, A. J. (2019). Internal and external training load: 15 years on. *International journal of sports physiology and performance*, 14(2), 270-273. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0935>
- Ishaque, S., Khan, N., & Krishnan, S. (2021). Trends in heart-rate variability signal analysis. *Frontiers in Digital Health*, 3, 13. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2021.639444>
- Israel, S. (1982). *Sport und Herzschlagfrequenz*. Barth.
- Jaworowski, Å., Porter, M. M., Holmbäck, A. M., Downham, D., & Lexell, J. (2002). Enzyme activities in the tibialis anterior muscle of young moderately active men and women: relationship with body composition, muscle cross-sectional area and fibre type

- composition. *Acta Physiologica Scandinavica*, 176(3), 215-225. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.2002.t01-2-01004.x>.
- Kaltsatou, A., Flouris, A. D., Herry, C. L., Notley, S. R., Seely, A. J., Beatty, H. W., & Kenny, G. P. (2020). Age differences in cardiac autonomic regulation during intermittent exercise in the heat. *European journal of applied physiology*, 120(2), 453-465. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04290-8>
- Kappus, R. M., Ranadive, S. M., Yan, H., Lane-Cordova, A. D., Cook, M. D., Sun, P., Harvey, I. S., Wilund, K. R., Woods, A. J., & Fernhall, B. (2015). Sex differences in autonomic function following maximal exercise. *Biology of Sex Differences*, 6(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s13293-015-0046-6>
- Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., Erlacher, D., Halson, S. L., Hecksteden, A., Heidari, J., Kallus, K. W., Meeusen, R., Mujika, I., Robazza, C., Skorski, S., Venter, R., & Beckmann, J. (2018a). Recovery and performance in sport: consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2), 240-245. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0759>
- Kellmann, M., Kölling, S., & Pelka, M. (2018b). Erholung und Belastung im Leistungssport. In R. Fuchs, & M. Gerber (Hrsg.), *Handbuch Stressregulation und Sport*. Springer. *Handbuch Stressregulation und Sport* (S. 435-449). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49322-9>
- Kenttä, G., & Hassmén, P. (1998). Overtraining and recovery. *Sports Medicine*, 26(1), 1-16.
- Kinugasa, T., & Kilding, A. E. (2009). A comparison of post-match recovery strategies in youth soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(5), 1402-1407. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181a0226a>
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., & Tulppo, M.P. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European Journal of Applied Physiology*, 101(6), 743-751. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0552-2>
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., Nissila, J., Virtanen, P., Karjalainen, J., & Tulppo, M. P. (2010). Daily exercise prescription on the basis of HR variability among men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42, 1355-1363. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3181cd5f39>
- Klinke, R., Pape, H. C., Kurtz, A., & Silbernagl, S. (2005). *Physiologie*. Georg Thieme Verlag.
- Korhonen, M. T., Suominen, H., & Mero, A. (2005). Age and sex differences in blood lactate response to sprint running in elite master athletes. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(6), 647-665. <https://doi.org/10.1139/h05-146>
- Laborde, S., Mosley, E., & Mertgen, A. (2018). A unifying conceptual framework of factors associated to cardiac vagal control. *Heliyon*, 4(12), e01002. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01002>
- Laurent, C. M., Green, J. M., Bishop, P. A., Sjøkvist, J., Schumacker, R. E., Richardson, M. T., & Curtner-Smith, M. (2010). Effect of gender on fatigue and recovery following maximal intensity repeated sprint performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 50(3), 243-53.
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueneron, J., Vidal, P. P., & Hauswirth, C. (2013) Evidence of Parasympathetic Hyperactivity in Functionally Overreached

- Athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45, 2061-2071. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182980125>
- Levy, M. N., & Martin, P. J. (1984) Neural Control of the Heart. In N. Sperelakis (Eds.), *Physiology and Pathophysiology of the Heart. Developments in Cardiovascular Medicine*, (Vol. 34, pp. 337-354). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1171-4_15
- Levy, M. N., & Warner, M. R. (1994). Parasympathetic effects on cardiac function. In J. A. Armour, & J. L. Ardell (Eds.), *Basic and Clinical Neurocardiology* (pp. 53-76). Oxford University Press.
- Lievens, E., Klass, M., Bex, T., & Derave, W. (2020). Muscle fiber typology substantially influences time to recover from high-intensity exercise. *Journal of Applied Physiology*, 128(3), 648-659. <https://doi.org/doi.org/10.1152/jappphysiol.00636.2019>.
- Lin, M. T., Wang, J. K., Lu, F. L., Wu, E. T., Yeh, S. J., Lee, W. L., Wu, J., & Wu, M. H. (2006). Heart rate variability monitoring in the detection of central nervous system complications in children with enterovirus infection. *Journal of Critical Care*, 21(3), 280-286. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2006.02.005>
- Linicus, Y., Vukadinovic, A. N., Fries, P., Böhm, M., Klingel, K., & Kindermann, I. (2016). State-of-the-art: Myokarditis–Klinik, Diagnose und therapeutische Optionen. *Therapeutische Umschau*, 73(12), 731-740. <https://doi.org/10.1024/0040-5930/a000857>
- Loch, F., & Kellmann, M. 2020. Mentale Ermüdung & Erholung. In T. Meyer, A. Ferrauti, M. Kellmann, & M. Pfeiffer (Hrsg.), *Regenerationsmanagement im Spitzensport (Teil 2): REGman – Ergebnisse und Handlungsempfehlungen* (S. 55). Bundesinstitut für Sportwissenschaft.
- Löllgen, H. (2015). The ECG of athletes. *Herzschrittmachertherapie & Elektrophysiologie*, 26(3), 274-290. <https://doi.org/10.1007/s00399-015-0388-0>
- Löllgen, H., Schulze-Bahr, E., Löllgen R., Bachl, N. (2018). Körperliche Aktivität, Sport, Genetik und kardiovaskuläre Erkrankungen. In N. Bachl, H. Löllgen, H. Tschan, H. Wackerhage, B. Wessner (Hrsg.), *Molekulare Sport- und Leistungsphysiologie* (S. 391-417). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1591-6_16
- Mageean, A. L., Alexander, R. P., & Mier, C. M. (2011). Repeated sprint performance in male and female college athletes matched for VO_{2max} relative to fat free mass. *International Journal of Exercise Science*, 4(4), 229.
- Malik, M., Hnatkova, K., Huikuri, H. V., Lombardi, F., Schmidt, G., & Zabel, M. (2019). CrossTalk proposal: heart rate variability is a valid measure of cardiac autonomic responsiveness. *The Journal of Physiology*, 597(10), 2595. <https://doi.org/10.1113/JP277500>
- Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of Applied Physiology*, 106, 857-864. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91324.2008>
- Marées, H. D. (2003). *Sportphysiologie* (9. Aufl.). Sportverlag Strauß.

- Maughan, R. J., Harmon, M., Leiper, J. B., Sale, D., & Delman, A. (1986). Endurance capacity of untrained males and females in isometric and dynamic muscular contractions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55(4), 395-400.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015). *Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance* (Eighth edition). Lippincott Williams & Wilkins.
- McCormick, R., & Vasilaki, A. (2018). Age-related changes in skeletal muscle: changes to lifestyle as a therapy. *Biogerontology*, 19(6), 519-536. <https://doi.org/10.1007/s10522-018-9775-3>
- McKay, A. K., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J., & Burke, L. M. (2022). Defining training and performance caliber: A participant classification framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1, 1-15. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0451>
- McNulty, K. L., Elliott-Sale, K. J., Dolan, E., Swinton, P. A., Ansdell, P., Goodall, S., Thomas, K., & Hicks, K. M. (2020). The effects of menstrual cycle phase on exercise performance in eumenorrheic women: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01319-3>
- Meeusen, R., & De Pauw, K. (2018). Overtraining - what do we know? In M. Kellmann & J. Beckmann (Eds.), *Sport, recovery, and performance: Interdisciplinary insights* (pp. 51-62). Routledge.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Glesson, M., Nieman, D., Raglin, J., Rietjens, G., Steinacker, J., & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome. Joint consensus statement of the European College of Sport Science (ECSS) and the American College of Sports Medicine (ACSM). *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45, 186-205. <https://doi.org/10.1080/17461391.2012.730061>
- Mendonca, G. V., Heffernan, K. S., Rossow, L., Guerra, M., Pereira, F. D., & Fernhall, B. (2010). Sex differences in linear and nonlinear heart rate variability during early recovery from supramaximal exercise. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 35(S1), 439-446. <https://doi.org/10.1139/H10-028>
- Mujika, I., Halson, S., Burke, L. M., Balagué, G., & Farrow, D. (2018). An integrated, multifactorial approach to periodization for optimal performance in individual and team sports. *International journal of sports physiology and performance*, 13(5), 538-561. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0093>
- Narici, M. V., & Maffulli, N. (2010). Sarcopenia: characteristics, mechanisms and functional significance. *British medical bulletin*, 95(1), 139-159. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldq008>
- Nedelec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2014). The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(6), 1517-1523. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000293>
- Nelson, M. J., Thomson, R. L., Rogers, D. K., Howe, P. R., & Buckley, J. D. (2014). Maximal rate of increase in heart rate during the rest-exercise transition tracks reductions in

- exercise performance when training load is increased. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(1), 129-133. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.02.016>
- Neumann, G. (1988). Training und Anpassung. *Theorie und Praxis Körperkultur*, 37(6), 401-408.
- Neumann, G., & Buhl, H. (1981). Biologische Leistungsvoraussetzungen und trainingsphysiologische Aspekte bei trainierenden Frauen. *Medizin und Sport*, 21, 154-160.
- Neumann, G., & Schüler, K.-P. (1994). *Sportmedizinische Funktionsdiagnostik*. Barth-Verlag.
- Neumann, G., Hottenrott, L., & Hottenrott, K. (2019). Geschlechtsdimorphe Leistungsunterschiede im Seniorenalter in leichtathletischen Disziplinen. *Leistungssport* 49(1), 20-26.
- Neumann, G., Pfützner, A., & Berbalk, A. (2013). *Optimiertes Ausdauertraining: Trainingsplanung, Leistungsaufbau, Ernährungstipps* (7. Aufl.). Meyer & Meyer.
- Nieß, A. M., Bloch, W., Friedmann-Bette, B., Grim, C., Halle, M., Hirschmüller, A., Kopp, C., Meyer, T., Niebauer, J., Reinsberger, C., Röcker, K., Scharhag, J., Scherr, J., Schneider, C., Steinacker, J. M., Urhausen, A., Wolfarth, B., & Mayer, F. (2020). Positionspapier" Return to Sport" während der aktuellen Coronavirus-Pandemie (SARS-CoV-2/COVID-19). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 71, E1-E4. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2020.437>
- Nunan, D., Sandercock, G. R., & Brodie, D. A. (2010). A quantitative systematic review of normal values for short term heart rate variability in healthy adults. *Pacing and Clinical Electrophysiology*, 33(11), 1407-1417. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2010.02841.x>
- O'Connor, P. J. (1997). Overtraining and staleness. In W. P. Morgan (Eds.), *Physical activity and mental health* (pp. 145-160). Hemisphere.
- Osiecki, R., Rubio, T. B. G., Coelho, R. L., Novack, L. F., Conde, J. H. S., Alves, C. G., & Malfatti, C. R. M. (2015). The total quality recovery scale (TQR) as a proxy for determining athletes' recovery state after a professional soccer match. *Journal of Exercise Physiology*, 18(3), 27-32.
- Ouergui, I., Ardigò, L. P., Selmi, O., Levitt, D. E., Chtourou, H., Bouassida, A., Bouhlel, E., & Franchini, E. (2020). Changes in perceived exertion, well-being, and recovery during specific judo training: Impact of training period and exercise modality. *Frontiers in Physiology*, 11, 931. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00931>
- Payette, H., Roubenoff, R., Jacques, P. F., Dinarello, C. A., Wilson, P. W., Abad, L. W., & Harris, T. (2003). Insulin-like growth factor-1 and interleukin 6 predict sarcopenia in very old community-living men and women: the Framingham Heart Study. *Journal of the American Geriatrics Society*, 51(9), 1237-1243. <https://doi.org/10.1046/j.1532-5415.2003.51407.x>
- Piasecki, J., Inns, T. B., Bass, J. J., Scott, R., Stashuk, D. W., Phillips, B. E., Atherthon, P. J., & Piasecki, M. (2021). Influence of sex on the age-related adaptations of neuromuscular function and motor unit properties in elite masters athletes. *The Journal of Physiology*, 599(1), 193-205. <https://doi.org/10.1113/JP280679>

- Pickenhain, L. (1992). Psychophysiologische Aspekte von Belastung und Beanspruchung. In J.-P. Janssen, W. Schlicht, H. Rieckert & K. Carl (Hrsg.), *Belastung und Beanspruchung* (S. 9-30). Bundesinstitut für Sportwissenschaft.
- Pinar, S., Kaya, F., Bicer, B., Erzeybek, M. S., & Cotuk, H. B. (2012). Different recovery methods and muscle performance after exhausting exercise: comparison of the effects of electrical muscle stimulation and massage. *Biology of Sport*, 29(4), 269. <https://doi.org/10.5604/20831862.1019664>
- Piper, W. (2013). Krankheiten des Herz-Kreislauf-Systems. In: *Innere Medizin* (2. Aufl., S. 1-184). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33108-4_1
- Platen, P. (2011). Frau und Sport. In C. Graf. (Hrsg.), *Lehrbuch der Sportmedizin* (2. Aufl., S. 791-810). Deutscher Ärzteverlag.
- 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, 3729-3741. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2354-4>
- Podolsky, A., & Ledl-Kurkowski, E. (2017). Die Frau im Sport. In R. Pokan, H. Förster, P. Hofmann, H. Hörtnagl, E. Ledl-Kurkowski, & M. Wonisch (Hrsg.), *Kompendium der Sportmedizin* (S. 433-456). Springer.
- Pollock, M. L., Mengelkoch, L. J., Graves, J. E., Lowenthal, D. T., Limacher, M. C., Foster, C., & Wilmore, J. H. (1997). Twenty-year follow-up of aerobic power and body composition of older track athletes. *Journal of Applied Physiology*, 82(5), 1508-1516. <https://doi.org/10.1152/jappl.1997.82.5.1508>
- Prommer, N., & Schmidt, W. (2009). Hämoglobinmenge und Sport. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 60(9), 293-294.
- Raglin, J. S. (2001). Psychological factors in sport performance. *Sports Medicine*, 31(12), 875-890.
- Ramaekers, D., Ector, H., & Aubert, A. E. (1999). The influence of age and gender on heart rate variability (HRV). *Journal of the American College of Cardiology*, 33(3), 900-902. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(98\)00653-6](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(98)00653-6)
- Ratkevicius, A., Joyson, A., Selmer, I., Dhanani, T., Grierson, C., Tommasi, A. M., DeVries, A., Rauchhaus, P., Crowther, D., Alesci, S., Yaworsky, P., Gilbert, F., Redpath, T. W., Brady, J., Fearon, K. C. H., Reid, D. M., Greig, C. A., & Wackerhage, H. (2011). Serum concentrations of myostatin and myostatin-interacting proteins do not differ between young and sarcopenic elderly men. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, 66(6), 620-626. <https://doi.org/10.1093/gerona/glr025>
- Reardon, M., & Malik, M. (1996). Changes in heart rate variability with age. *Pacing and Clinical Electrophysiology*, 19(11), 1863-1866. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.1996.tb03241.x>
- Robergs, R. A., & Landwehr, R. (2002). The surprising history of the "HRmax = 220-age" equation. *Journal of Exercise Physiology*, 5(2), 1-10.

- Roberts, J. A. (1986). Viral illnesses and sports performance. *Sports Medicine*, 3(4), 296-303.
- Röcker, K. (2013). Die sportmedizinische Laktatdiagnostik: Technische Rahmenbedingungen und Einsatzbereiche. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 64(12), 367-371.
- Roepstorff, C., Thiele, M., Hillig, T., Pilegaard, H., Richter, E. A., Wojtaszewski, J. F., & Kiens, B. (2006). Higher skeletal muscle α 2AMPK activation and lower energy charge and fat oxidation in men than in women during submaximal exercise. *The Journal of physiology*, 574(1), 125-138. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.108720>
- Rosenberg, I. H. (1997). Sarcopenia: origins and clinical relevance. *The Journal of Nutrition*, 127(5), 990S-991S. <https://doi.org/10.1093/jn/127.5.990S>
- Rushall, B. S. (1990). A tool for measuring stress tolerance in elite athletes. *Journal of Applied Sport Psychology*, 2(1), 51-66.
- Russell, S., Jenkins, D., Rynne, S., Halson, S. L., & Kelly, V. (2019). What is mental fatigue in elite sport? Perceptions from athletes and staff. *European Journal of Sport Science*, 19, 1367-1376. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1618397>
- Ryan, S. M., Goldberger, A. L., Pincus, S. M., Mietus, J., & Lipsitz, L. A. (1994). Gender-and age-related differences in heart rate dynamics: are women more complex than men? *Journal of the American College of Cardiology*, 24(7), 1700-1707. [https://doi.org/10.1016/0735-1097\(94\)90177-5](https://doi.org/10.1016/0735-1097(94)90177-5)
- Sammito, S., & Böckelmann, I. (2017). Alters-und geschlechterbezogene Referenzwerte für den Einsatz der Herzfrequenzvariabilität in der Bewegungstherapie. *Bewegungstherapie und Gesundheitssport*, 33(6), 268-275. <https://doi.org/10.1055/s-0043-120631>
- Saw, A. E., Kellmann, M., Main, L. C., & Gastin, P. B. (2017). Athlete self-report measures in research and practice: Considerations for the discerning reader and fastidious practitioner. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(S2), 127-135. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0395>
- Schlicht, W. (1989). Belastung, Beanspruchung und Bewältigung: Erster Teil. Theoretische Grundlagen. *Sportpsychologie*, 3(2), 10-17.
- Schlicht, W. (1992). Das sportliche Training: Überlegungen auf dem Wege zu einem integrierten Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In J.-P. Janssen, W. Schlicht, H. Rieckert & K. Carl (Hrsg.), *Belastung und Beanspruchung* (S. 31-44). Bundesinstitut für Sportwissenschaft.
- 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>
- Schütte, M. (2021). *Psychische Belastung und Beanspruchung am Arbeitsplatz: Inklusive DIN EN ISO 10075-1 bis-3*. Beuth Verlag.
- Silverman, H. G., & Mazzeo, R. S. (1996). Hormonal responses to maximal and submaximal exercise in trained and untrained men of various ages. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 51(1), B30-B37. <https://doi.org/10.1093/gerona/51A.1.B30>

- Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Medicine*, *43*(12), 1259-1277. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0083-4>
- Steinacker, J. M. (2010). Energieliefernde Systeme und Laktat in der Ergometrie. In H. Löllgen, E. Erdmann, & A. K. Gitt (Hrsg.), *Ergometrie* (3. Aufl., S. 213-226). Springer.
- Steinfurth, E., Wendt, J., & Hamm, A. (2013). Neurobiologische Grundlagen der Emotionsregulation. *Psychologische Rundschau*. <https://doi.org/10.1026/0033-3042/a000173>
- Stephenson, M. D., Thompson, A. G., Merrigan, J. J., Stone, J. D., & Hagen, J. A. (2021). Applying heart rate variability to monitor health and performance in tactical personnel: A narrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(15), 8143.
- Stoll, O., & Ziemainz, H. (2003). Stress and coping with stress in competitive sport. *Sportwissenschaft*, *33*(3), 280-290.
- Suay, F. (2012). Staleness and the overtraining syndrome Ferran Suay. In F. Suay (Eds.), *Psychoneuroendocrinology of Sport and Exercise* (pp. 195-214). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203133743>
- Sultana, F., Abbiss, C. R., Louis, J., Bernard, T., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2012). Age-related changes in cardio-respiratory responses and muscular performance following an Olympic triathlon in well-trained triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, *112*(4), 1549–1556. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2115-9>
- Suzuki, S., Sato, T., Maeda, A., & Takahashi, Y. (2006). Program design based on a mathematical model using rating of perceived exertion for an elite Japanese sprinter: a case study. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *20*(1), 36. <https://doi.org/10.1519/R-16914.1>
- Tanaka, H., Monahan, K. D., & Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, *37*(1), 153–156. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(00\)01054-8](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)01054-8)
- Tasaki, H., Serita, T., Irita, A., Hano, O., Iliev, I., Ueyama, C., Kitano, K., Seto, S., Hayano, M., & Yano, K. (2000). A 15-year longitudinal follow-up study of heart rate and heart rate variability in healthy elderly persons. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *55*(12), M744-M749. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.12.M744>
- Tschiene, P. (2006). Streit um die Superkompensation. *Leistungssport*, *36*(1), 5-15.
- Thayer, J. F., Yamamoto, S. S., & Brosschot, J. F. (2010). The relationship of autonomic imbalance, heart rate variability and cardiovascular disease risk factors. *International Journal of Cardiology*, *141*(2), 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2009.09.543>
- Toth, M. J., Matthews, D. E., Tracy, R. P., & Previs, M. J. (2005). Age-related differences in skeletal muscle protein synthesis: relation to markers of immune activation. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, *288*(5), E883-E891. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00353.2004>

- Umetani, K., Singer, D. H., McCraty, R., & Atkinson, M. (1998). Twenty-four hour time domain heart rate variability and heart rate: relations to age and gender over nine decades. *Journal of the American College of Cardiology*, 31(3), 593-601. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(97\)00554-8](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(97)00554-8).
- Van Cutsem, J., Marcora, S. M., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R., & Roelands, B. (2017). The effects of mental fatigue on physical performance: A systematic review. *Sports Medicine*, 47(8), 1569-1588. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0>
- Venables, M. C., Achten, J., & Jeukendrup, A. E. (2005). Determinants of fat oxidation during exercise in healthy men and women: a cross-sectional study. *Journal of Applied Physiology*. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00662.2003>
- Vincent, S., Berthon, P., Zouhal, H., Moussa, E., Catheline, M., Bentue-Ferrer, D., & Gratas-Delamarche, A. (2004). Plasma glucose, insulin and catecholamine responses to a Wingate test in physically active women and men. *European Journal of Applied Physiology*, 91(1), 15-21. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0957-5>
- Visser, M., Pahor, M., Taaffe, D. R., Goodpaster, B. H., Simonsick, E. M., Newman, A. B., Nevitt, M., & Harris, T. B. (2002). Relationship of interleukin-6 and tumor necrosis factor- α with muscle mass and muscle strength in elderly men and women: the Health ABC Study. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 57(5), M326-M332. <https://doi.org/10.1093/gerona/57.5.M326>
- Voss, A., Schroeder, R., Heitmann, A., Peters, A., & Perz, S. (2015). Short-term heart rate variability—influence of gender and age in healthy subjects. *PLoS one*, 10(3), e0118308. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118308>
- Wackerhage, H. (2006). Adaptation to endurance training. In N. Spurway & H. Wackerhage (Eds.), *Genetics and Molecular Biology of Muscle Adaptation* (pp. 165-195). Elsevier.
- Wackerhage, H. (2014). Molecules, ageing and exercise. In H. Wackerhage (Eds.). *Muscular Exercise Physiology - An Introduction* (pp. 228-250). Routledge.
- Wahl, P., Bloch, W., & Mester, J. (2009). Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 57(3), 100.
- Westhoff, M., Rühle, K. H., Greiwing, A., Schomaker, R., Eschenbacher, H., Siepmann, M., & Lehnigk, B. (2013). Ventilatorische und metabolische (Laktat-) Schwellen. *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 138(06), 275-280. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1332843>
- Wilson, M. G., Hull, J. H., Rogers, J., Pollock, N., Dodd, M., Haines, J., Harris, S., Loosemore, M., Malhotra, A., Pielas, G., Shah, A., Taylor, L., Vyas, A., Haddad, F. S., & Sharma, S. (2020). Cardiorespiratory considerations for return-to-play in elite athletes after COVID-19 infection: a practical guide for sport and exercise medicine physicians. *British Journal of Sports Medicine*, 54(19), 1157-1161. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-103259>
- Wittling, W., & Wittling, R.A. (2012). *Herzschlagvariabilität: Frühwarnsystem, Stress- und Fitnessindikator*. Eichsfeld Verlag.

Literaturangaben

Yataco, A. R., Fleisher, L. A., & Katzel, L. I. (1997). Heart rate variability and cardiovascular fitness in senior athletes. *American Journal of Cardiology*, *80*(10), 1389-1391. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(97\)00697-8](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(97)00697-8)

Anhang A

Publikationsbeiträge der Autoren

Die vorliegende Doktorarbeit ist als kumulative Dissertation angelegt und beinhaltet als Erstautorin vier wissenschaftliche Artikel in internationalen Fachzeitschriften im peer-review Verfahren und eine wissenschaftliche Publikation im Herausgeberband. Die Beiträge zu den Publikationen wurden unter Mitarbeit folgender Co-Autoren veröffentlicht.

Vorname	Name	Initialen	Institution
Sarah	Feichtinger	SF	Institut für Leistungsdiagnostik und Gesundheitsförderung e.V. (ILUG) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Alexander	Ferrauti	AF	Fakultät für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Trainingswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum
Thomas	Gronwald	GH	Department of Performance, Neuroscience, Therapy and Health, Faculty of Health Sciences, Medical School Hamburg, 20457 Hamburg
Kuno	Hottenrott	KH	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Laura	Hottenrott	LH	Institut für Leistungsdiagnostik und Gesundheitsförderung e.V. (ILUG) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Alexander	Ide	AI	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Sascha	Ketelhut	SK	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Martin	Möhle	MM	Institut für Leistungsdiagnostik und Gesundheitsförderung e.V. (ILUG) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Christoph	Schneider	CS	Fakultät für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Trainingswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum
Oliver	Stoll	OS	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Thimo	Wiewelhove	TW	Fakultät für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Trainingswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum

Publikation	Literaturrecherche Fragestellung	Studiendesign	Datenerhebung und -analyse	Diskussion	Erstfassung Manuskript
1	LH	LH	LH	LH	LH
2	LH, KH, MM	LH, KH, MM	LH, MM, SF, SK	LH	LH
3	LH, KH, MM	LH, KH, MM	LH, MM, AI, SK	LH	LH
4	LH	LH	LH	LH	LH
5	LH	LH, KH	LH	LH	LH

Hinweis: Die finale Fassung des Manuskripts wurde unter Mitwirkung aller Co-Autoren erstellt bzw. alle Co-Autoren haben der finalen Fassung zugestimmt.

Anhang A

Publikationsbeiträge der Autoren

Die vorliegende Doktorarbeit ist als kumulative Dissertation angelegt und beinhaltet als Erstautorin vier wissenschaftliche Artikel in internationalen Fachzeitschriften im peer-review Verfahren und eine wissenschaftliche Publikation im Herausgeberband. Die Beiträge zu den Publikationen wurden unter Mitarbeit folgender Co-Autoren veröffentlicht.

Vorname	Name	Initialen	Institution
Sarah	Feichtinger	SF	Institut für Leistungsdiagnostik und Gesundheitsförderung e.V. (ILUG) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Alexander	Ferrauti	AF	Fakultät für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Trainingswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum
Thomas	Gronwald	GH	Department of Performance, Neuroscience, Therapy and Health, Faculty of Health Sciences, Medical School Hamburg, 20457 Hamburg
Kuno	Hottenrott	KH	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Laura	Hottenrott	LH	Institut für Leistungsdiagnostik und Gesundheitsförderung e.V. (ILUG) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Alexander	Ide	AI	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Sascha	Ketelhut	SK	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Martin	Möhle	MM	Institut für Leistungsdiagnostik und Gesundheitsförderung e.V. (ILUG) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Christoph	Schneider	CS	Fakultät für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Trainingswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum
Oliver	Stoll	OS	Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06108 Halle
Thimo	Wiewelhove	TW	Fakultät für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Trainingswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum

Publikation	Literaturrecherche Fragestellung	Studiendesign	Datenerhebung und -analyse	Diskussion	Erstfassung Manuskript
1	LH	LH	LH	LH	LH
2	LH, KH, MM	LH, KH, MM	LH, MM, SF, SK	LH	LH
3	LH, KH, MM	LH, KH, MM	LH, MM, AI, SK	LH	LH
4	LH	LH	LH	LH	LH
5	LH	LH, KH	LH	LH	LH

Hinweis: Die finale Fassung des Manuskripts wurde unter Mitwirkung aller Co-Autoren erstellt bzw. alle Co-Autoren haben der finalen Fassung zugestimmt.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit wahrheitsgemäß, dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig und nur mit den erlaubten Hilfen angefertigt habe, außer den im Schriftenverzeichnis angegebenen Hilfsmitteln keine weiteren Hilfsmittel benutzt und alle Stellen, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd entnommen sind, als solche kenntlich gemacht und einzeln nach ihrer Herkunft nachgewiesen habe, alle Stellen und Personen genannt habe, welche mich bei der Vorbereitung und Anfertigung der wissenschaftlichen Abschlussarbeit unterstützten, die eingereichte Dissertation noch keiner anderen Prüfungsbehörde in gleicher Form oder auszugsweise zur Prüfung vorgelegt habe und dass dieselbe noch nicht anderen Zwecken – auch nicht teilweise – gedient hat. Ich erkläre des Weiteren, dass ich in keiner Weise versucht habe, weder die Daten in der empirischen Erhebung noch die statistischen Analysen und die Ergebnisse zu beeinflussen oder zu verändern. Vorgenommene Modifizierungen der Rohdaten habe ich nachvollziehbar gekennzeichnet und begründet.

Halle (Saale), den 02.02.2022

(Hottenrott, Laura)