



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Auswirkungen einer spezifischen Trainingsbelastung auf
Parameter der Herzfrequenzvariabilität und der
Ausdauerfähigkeit“

verfasst von / submitted by

Michael Bürger, Bakk.rer.nat.

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

Wien, 2016 / Vienna 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt /

degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt /

degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von / Supervisor:

Emer. o. Univ.-Prof. Dr. Norbert Bachl

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst habe, nur die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe. Diese Masterarbeit wurde weder an einer anderen Stelle eingereicht, noch von anderen Personen vorgelegt.

Kurzfassung

Hoch intensives Krafttraining (HIPT) ist eine Trainingsform, der in den letzten Jahren immer mehr Beachtung geschenkt wurde. Untersuchungen lassen vermuten, dass HIPT bei geringem Zeitaufwand zu vielfachen physiologischen Adaptationen führt, die bisher dem klassischen Ausdauer,- und Krafttraining zugeschrieben wurden. Oftmals wurde gezeigt, dass körperliche Aktivität zu Verbesserungen der Herzfrequenzvariabilität (HRV) sowie der kardialen Leistungsfähigkeit und eine Vielzahl von gesundheitsförderlichen Faktoren mit sich bringt. Die HRV kann Aufschluss über den Gesundheitszustand geben, wobei eine Steigerung auf eine verbesserte Anpassungsfähigkeit des autonomen Nervensystems (ANS) deutet.

Ziel dieser Studie ist es die Effekte eines sechsmonatigen HIPT auf leistungs- sowie gesundheitsfördernde Faktoren bei 49 gesunden untrainierten ProbandInnen zu untersuchen. Diese Arbeit befasst sich dabei mit der Gesamtvariabilität (SDNN), der Leistung des hochfrequenten Spektralbereichs (HF), der autonome Gesamtaktivität (TP) sowie mit der Ausdauerleistungsfähigkeit. Die 24 Stunden Messungen der HRV zeigten lediglich bei den Probandinnen während der Schlafphase eine signifikante Änderung der SDNN sowie der TP die sich jeweils um 10.52 % ($P = 0.031$) und um 2.78 % ($P = 0.040$) signifikant reduzierten. Die Fahrradergometrie zeigte für das Gesamtkollektiv ($N=49$) eine signifikante Steigerung von 4.1 % ($P = 0.001$) und für das HRV-Kollektiv ($N=31$) eine signifikante Steigerung von 3.5 % ($P = 0.036$) der ($W_{\max}$). Bei geteilter Betrachtung der ProbandInnen in Gruppen von Frauen und Männer konnte jedoch keine signifikante Steigerung der $W_{\max}$ festgestellt werden. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen die Annahme, dass HIPT positive Auswirkungen auf ausgewählte Parameter der kardialen Leistungsfähigkeit hat. Bezüglich der HRV konnten in der vorliegenden Studie keine signifikanten Verbesserungen der HRV nach sechsmonatiger HIPT Intervention nachgewiesen werden.

Abstract

High intensity power training (HIPT) has gained popularity over the past years. Studies suggest, that HIPT is time efficient and is causing multiple physiological adaptations which are usually related to endurance-, and strength training. Previously it has been shown that physical activity leads to improved heart rate variability (HRV), aerobic fitness and a wide array of health benefits. The HRV itself can be used to assess the state of health. It is assumed that an elevation of HRV is reflecting improved adaptability of the autonomic nervous system (ANS).

The aim of this study is to investigate the effects of six month HIPT on health and performance related factors in 49 healthy untrained subjects. This thesis is focusing on the standard deviation of the NN interval (SDNN), the high frequency power (HF), the total spectral power (TP) and parameters which are related to endurance capacity. The 24 hour HRV measurement only showed significant changes in SDNN and TP for women during sleep by 10.52 % ($P = 0.031$) and 2.78 % ($P = 0.040$) which were significantly reduced. The increment ergometer test showed for the overall collective ($N=49$) a significant improvement of the maximum power output (W_{max}) by 4.1 % ($P = 0.001$) for the group and a significant improvement by 3.5 % ($P = 0.036$) for the HRV-collective ($N=31$). For divided groups of men and women no significant change in W_{max} could be found. The results of this study confirm the suggestion that HIPT has a positive impact on parameters related to aerobic fitness. Otherwise there was no significant improvement found in HRV indices following 6 months of HIPT.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
1.1 Entwicklung der Fragestellung.....	6
1.2 Fragestellung.....	8
1.3 Begründung der Annahmen.....	9
1.4 Methoden.....	19
2 Aktueller Forschungsstand - Literaturrecherche	20
2.1 Herzfrequenzvariabilität.....	20
2.1.2 Herzfrequenzvariabilität und das Autonome Nervensystem.....	21
2.1.3 HRV Messung.....	27
2.1.4 HRV – Geschlechterspezifische Unterschiede.....	33
2.2 Physiologische Adaptionen – Kardiovaskuläre Leistungsfähigkeit.....	34
2.2.1 Ausdauertraining.....	34
2.2.2 Kontinuierliches Ausdauertraining.....	36
2.2.3 Hoch intensives Intervall Training.....	36
2.3 Sportphysiologische Aspekte der HRV.....	39
2.3.1 Kurzfristige Adaptionen des Herzkreislaufsystems.....	39
2.3.2 Langfristige Adaptionen des Herzkreislaufsystems.....	40
2.3.3 Auswirkungen von Training auf die HRV.....	41
2.3.5 Langfristige Auswirkungen von Training auf die HRV.....	46
2.3.6 Negative Auswirkungen von Training auf die HRV.....	49
2.4 Funktionelles Training.....	49
2.4.1 Was ist CrossFit®?.....	52
2.4.2 CrossFit® und HIPT.....	53
3 Empirischer Teil der Arbeit	56
3.1 Beschreibung der Studie.....	56
3.1.1 StudienteilnehmerInnen.....	56
3.1.2 Einschlusskriterien.....	57
3.1.3 Ausschlusskriterien.....	57
3.1.4 Testbatterie.....	58
3.1.5 Trainingsintervention.....	59
3.2 HRV Referenzwerte.....	62
3.3 Analyse der HRV Daten.....	63
4 Statistische Datenanalyse	67
4.1 Hypothesenprüfung ohne Gruppeneinteilung.....	68
4.2 Hypothesenprüfung - Gruppeneinteilung nach Geschlecht.....	74
5 Zusammenfassung	86
6 Literaturverzeichnis	91
Abbildungsverzeichnis	110
Tabellenverzeichnis	111

Abkürzungsverzeichnis

HRV	Herzfrequenzvariabilität
ANS	Autonomes Nervensystem
$W_{\max}$	Maximale mechanische Leistung
BP	Blutdruck
EKG	Elektrokardiogramm
ZI	Zeitbereichs – Indizes
$VO_{2\max}$	Maximale Sauerstoffaufnahme
avDO ₂	Arteriovenöse Sauerstoffdifferenz
VLF	Very low Frequency
ULF	Ultra low Frequency
LF	Low Frequency
HF	High Frequency
SDNN	Standardabweichung aller NN-Intervalle
OT	Overtraining
OR	Overreaching
PSD	Leistungsdichtespektrum
HIIT	Hoch intensives Intervalltraining
HIPT	High intensity power Training
1RM	One Repetition Maximum
HR	Herzrate
$HR_{\max}$	Maximale Herzrate
HICT	High intensity circuit training
RSA	Respirationische Sinusarrhythmie

1 Einleitung

1.1 Entwicklung der Fragestellung

Es liegt eine überwältigende Vielzahl an Fakten vor, die für regelmäßige körperliche Aktivität und ihre weitreichenden positiven Effekte auf die Gesundheit sprechen. Diese reichen von einer reduzierten Gefahr an chronischen Erkrankungen wie Herzkrankheit, Typ-2 Diabetes und einigen Krebsarten zu erkranken, bis hin zu verbesserter Leistungsfähigkeit selbst im hohen Alter (Blair, 2009). Des Weiteren kann körperliche Bewegung positiv zu muskuloskelettaler Gesundheit, zur Kontrolle des Körpergewichts und zur Reduktion von Symptomen einer Depression beitragen (WHO, 2009). Jedoch liegen Daten vor, dass 31 % der Weltbevölkerung die Minimalempfehlungen an körperlicher Aktivität unterschreiten (Hallal et al., 2012). Bewegungsmangel ist somit die viert häufigste Todesursache weltweit, obwohl bereits seit den 50er-Jahren bekannt ist, dass körperliche Inaktivität schädlich für die Gesundheit ist (Kohl et al., 2012). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt eine Mindestdauer an körperlicher Aktivität von zumindest 150 Minuten bei moderater oder 75 Minuten bei hoher Intensität pro Woche, wobei die jeweilige Aktivitätsdauer mindestens 10 Minuten betragen sollte (WHO, 2010).

Demgegenüber steht ein nicht enden wollender Fitnessboom, der vor allem bei kommerziellen Fitnessstudios für großen Zulauf sorgt. Das Sportangebot ist breit gefächert und ständig erscheinen neue Trends auf dem Markt, die klassischen Fitnessstudios Konkurrenz machen. In den letzten Jahren geht der Trend immer mehr in Richtung funktionellem Krafttraining und weg vom klassischen Training an Maschinen (Boyle, 2010). Funktionelles Krafttraining ist traditionellem Krafttraining an Maschinen hinsichtlich der Steigerung von Kraft, Ausdauer, Koordination und Balance überlegen und wird als bessere Alternative angesehen (Weiss et al., 2010). Funktionelles Training setzt sich aus natürlichen Bewegungen, die in mehreren Gelenken und vielen Bewegungsebenen durchgeführt werden, zusammen und ist daher für die Gesundheit sehr förderlich (McGill, Karpowicz, Fenwick, & Brown, 2009). Moderne Trainingskonzepte wie „Freeletics®“, „Bootcamp®“ und „CrossFit®“ setzen auf Prinzipien wie hoch intensives Intervalltraining (HIIT) und hoch intensives funktionelles Krafttraining (HIPT), welches entweder mit dem eigenen Körpergewicht oder mit freien Gewichten durchgeführt wird. Es konnte bereits gezeigt werden, dass ein zehnwöchiges CrossFit®-Training sowohl zu einer signifikanten Steigerungen der VO_{2max} als auch zu einer signifikanten Reduktion der Fettmasse

führt (M. M. Smith, Sommer, Starkoff, & Devor, 2013). Wie sich ein hoch intensives funktionelles Krafttraining auf das autonome Nervensystem und die Herzfrequenzvariabilität (HRV) auswirkt ist bisher hingegen noch nicht bekannt.

Die HRV wird als spontane Fluktuation um die mittlere Herzfrequenz beschrieben. Sie kann durch nicht invasive Verfahren ermittelt werden und spiegelt die Balance des Autonomen Nervensystems (ANS) wieder (Bigger, Fleiss, Rolnitzky, & Steinman, 1993). Erstmalig wurde die HRV im Bereich der pränatalen Diagnostik beschrieben (E. Horn & Lee, 1995), und wurde seither in unterschiedlichen medizinischen Fachrichtungen als diagnostisches Instrument verwendet. Die Anwendungen der HRV zur Risikobestimmung von plötzlichem Herztod und diabetischer Neuropathie sind bekannt (Tereshchenko et al., 2012). Eine Reduktion der HRV wird mit einer erhöhten Gesamtmortalität sowie einem vermehrten Auftreten von kardialen Zwischenfällen in Verbindung gebracht (Bigger et al., 1993). Die Analyse der HRV wird im klinischen Alltag bereits zur Erkennung von Herzerkrankungen angewendet, und gewinnt auch in der Sportwissenschaft sowie in der Sportmedizin stetig an Bedeutung (Hottenrott, 2007). Die Indizes der HRV sind Messparameter welche leistungsdiagnostische Kenngrößen darstellen und zur Trainingsüberwachung und Trainingssteuerung verwendet werden können. Jedoch steckt der Einsatz der HRV in diesem Bereich noch in den Kinderschuhen obwohl die Datenerfassung aus technischer Sicht relativ einfach wäre (Makivić¹, Nikić, Willis, Education, & Parovića, 2013).

Auch wenn die Aussagekraft der HRV noch immer Stoff wissenschaftlicher Diskussionen ist, gewinnt sie in der Sportwissenschaft und der Sportmedizin immer mehr an Bedeutung (Bürklein, Vogt, & Banzer, 2005). Kritisch wird die mangelnde Vergleichbarkeit zwischen Personen und die schwierige Erhebung von Normwerten betrachtet, was beides auf eine hohe intraindividuelle Variabilität (Cardiology & Cardiology, 1996) zurückzuführen ist. Dies ist sowohl durch endogene wie auch durch exogene Einflüsse bedingt (Bürklein et al., 2005). Welchen Einfluss ein CrossFit®-basiertes, hoch intensives funktionelles Krafttraining auf die Gesundheit, das autonome Nervensystem sowie Parameter der Herzfrequenzvariabilität hat, wird im Zuge dieser Arbeit untersucht werden.

1.2 Fragestellung

Diese Arbeit wird sich nun vor dem beschriebenen Hintergrund damit beschäftigen welche Auswirkungen ein hoch intensives funktionelles Krafttraining auf das autonome Nervensystem und die Leistungsfähigkeit hat. Speziell soll auf folgende Fragen eine Antwort gefunden werden:

Welche Auswirkung hat ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining mit einer Dauer von sechs Monaten auf Indizes der Herzfrequenzvariabilität und der kardialen Leistungsfähigkeit?

Folgende Unterfragen sind zur ausführlichen Beantwortung der Forschungsfrage notwendig:

- *Welche Auswirkung hat ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining mit einer Dauer von sechs Monaten auf die Gesamtvariabilität (SDNN), die „Total power“ (TP) und das HF Spektrum?*
- *Welche Auswirkung hat ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining mit einer Dauer von sechs Monaten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit, gemessen anhand einer Fahrradergometrie?*

Daraus ergeben sich die folgenden Annahmen:

A1: *Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der Gesamtvariabilität (SDNN).*

A2: *Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der „Total power“ (TP).*

A3: *Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Verbesserung des HF Spektrums.*

A4: *Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zur Verbesserung der kardialen Leistungsfähigkeit.*

1.3 Begründung der Annahmen

A1: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der Gesamtvariabilität (SDNN).

Die HRV kann durch Indizes des Zeitbereichs und des Frequenzbereichs evaluiert werden, wobei diese Aktivitäten des autonomen Nervensystems widerspiegeln. Einer der am häufigsten verwendeten Indizes ist die Standardabweichung der RR-Intervalle (SDNN), welcher die Gesamtvariabilität der Herzschlagfolge widerspiegelt. (Taskforce, 1996). SDNN ist ein zuverlässiger prognostischer Parameter nach akutem Myokardinfarkt, wobei Patienten mit erhöhtem Mortalitätsrisiko niedrigere SDNN Werte aufweisen. Des Weiteren deutet eine höhere Gesamtvariabilität auf ein geringeres Gesundheitsrisiko hin (Buccelletti et al., 2009). Werte der globalen Variabilität (SDNN) werden mit täglichem Energieverbrauch und Grad der körperlichen Aktivität in Verbindung gebracht. Eine höhere Gesamtvariabilität deutet auf einen höheren täglichen Energieverbrauch und eine höhere körperliche Aktivität hin (Buchheit et al., 2004). Es ist bekannt, dass Ausdauertraining einen modulierenden Effekt auf das autonome Nervensystem sowie die HRV hat (Partanen, 2014).

Aerobes Ausdauertraining über einen Zeitraum von 12 Wochen bei einer Intensität von 40-60 % der individuellen Herzfrequenzreserve führte in einer Studie von (Albinet, Boucard, Bouquet, & Audiffren, 2010) zu einem signifikanten Anstieg von mehreren HRV Indizes (SDNN, RMSSD und HF) bei inaktiven Personen zwischen 65 und 78 Jahren. Der Einfluss von moderatem aerobem Ausdauertraining bei jungen und alten Erwachsenen auf die HRV wurde auch von zahlreichen anderen Autoren bereits dargestellt (S. Boutcher, Meyer, Craig, & Astheimer, 1998; Buchheit et al., 2004).

In einer weiteren Studie konnte gezeigt werden, dass intensives Ausdauertraining über eine Dauer von drei Monaten zu signifikanten Steigerungen der Gesamtvariabilität (SDNN) bei Postinfarktpatienten führt (Tygesen, Wettervik, & Wennerblom, 2001). Im Zuge dieser Studie wurden ein moderates Trainingsprotokoll (M) mit drei Trainingseinheiten pro Woche und ein intensives Trainingsprotokoll (I) mit 6 Trainingseinheiten pro Woche und höherer Intensität (Intervalle bis 80 % der maximalen Leistungsfähigkeit) durchgeführt. Die HRV Daten zeigten nach 3

Monaten eine signifikant höhere SDNN bei Gruppe I im Vergleich mit Gruppe N (17.1 ms vs. 1.7 ms, $P < 0.05$).

Munk, Butt, und Larsen (2010) untersuchten 40 Patienten mit Stent-Implantaten hinsichtlich der Auswirkungen von HIIT auf das autonome Nervensystem. Es konnte gezeigt werden, dass die Standardabweichung des Mittelwertes der NN-Intervalle in allen 5-Minutenabschnitten und über die gesamten Aufzeichnungsdauer (SDANN) der 24-Stundenmessung durch HIIT innerhalb von 6 Monaten signifikant gesteigert werden konnte. Die Steigerung der HRV korrelierte mit der signifikanten Verbesserung der VO_{2max} .

Im Zuge einer Studie von Piras, Persiani, Damiani, Perazzolo, und Raffi (2015) wurden 18 inaktive ProbandInnen (23 ± 3 Jahre, VO_{2max} 32 ± 8 ml/kg/min) einer 12-wöchigen Trainingsintervention mit insgesamt 30 Trainingseinheiten unterzogen. Die TeilnehmerInnen wurden in eine HIIT (Hoch intensives Intervalltraining) Gruppe (N=8), und eine PHA (Peripheral heart action) Gruppe (N=14) die ein Zirkeltraining an Maschinen durchführte, eingeteilt. Beide Gruppen zeigten signifikante Steigerungen der VO_{2max} wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt wurden. Bei beiden Gruppen kam es neben einer signifikanten Reduktion der HR zu signifikanten Steigerungen der gemessenen HRV Indizes (RMSSD, SDNN, LF, HF) sowie der Baroreflexsensitivität. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass Zirkeltraining im Vergleich mit HIIT zu ähnlichen Verbesserungen der VO_{2max} , SDNN, RMSSD, LF, HF, Baroreflexsensitivität führen kann und zusätzlich signifikante Steigerungen der Muskelkraft bewirkt.

A2: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der „Total power“ (TP).

Die Total Power (TP) wird als globales Maß für die Funktionstüchtigkeit des autonomen Nervensystems angesehen, wobei sie aus der Summe von VLF, LF und HF berechnet wird (Bürklein et al., 2005). Sie wird auch als spektrale Gesamtvariabilität betrachtet (Hottenrott, 2007).

Eine reduzierte HRV ist ein zuverlässiger prognostischer Marker im klinischen Bereich für kardiale Arrhythmien und die damit verbundene Mortalität. Eine abgesenkte HRV, in Form einer reduzierten „total power“ wird auch mit Diabetes mellitus in Verbindung gebracht (Cardiology, 1996).

J. B. Carter, Banister, und Blaber (2003) untersuchten Adaptionen des kardiovaskulären Systems durch ein Ausdauertrainingsprogramm. Die aufgenommenen Elektrokardiogramme wurden mittels Frequenzanalyse auf Änderungen der HRV untersucht, welche vor und nach der Trainingsintervention gemessen wurden. Das 12 Wochen dauernde Trainingsprogramm, an dem 24 Hobbyläufer teilnahmen, führte sowohl zu einer signifikanten Reduktion der Herzfrequenz in Ruhe als auch während submaximaler Belastung. Des Weiteren kam es zu einer signifikanten Steigerung der „total power“ sowie der „high-frequency-power“ (HF). Ausdauertraining führt demnach zu Adaptionen des kardiovaskulären Systems die durch HRV Messungen aufgezeigt werden können (J. B. Carter et al., 2003).

Aerobes Ausdauertraining an der aeroben Schwelle an 3 Tagen pro Woche über einen Zeitraum von 12 Wochen führte zu einer signifikanten Verbesserung der Aktivität des sympathischen und parasympathischen Nervensystems bei adipösen Probanden, deren Funktion des ANS deutlich reduziert war. Die Trainingsintervention bewirkte signifikante Steigerungen der „low-frequency“ LF (0.03-0.15 Hz) die mit sympathikovagaler Aktivität assoziiert wird, der „high frequency“ HF (0.15-0.4 Hz) die der vagalen Komponente entspricht und der „total power“ (TP) (Abb.1), welche für die Gesamtvariabilität des ANS steht (Amano, Kanda, Ue, & Moritani, 2001).

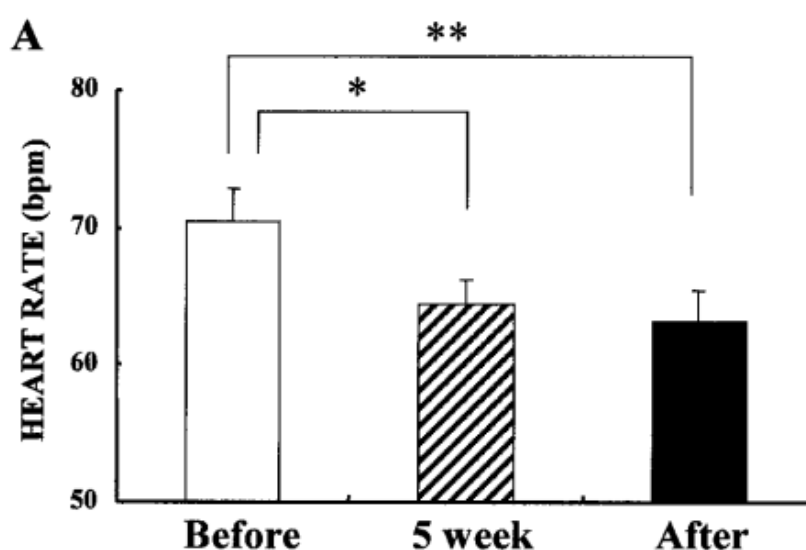


Abb. 1: „Total Power“ vor der Trainingsintervention, während Woche 5 und nach der Trainingsintervention (Amano et al., 2001).

Zahlreiche Studien zeigen, dass Ausdauertraining zu Verbesserungen der TP führen kann. Dies gilt auch für HIIT. Es konnte gezeigt werden, dass HIIT Trainingsinterventionen über einen Zeitraum von 6 Wochen zu signifikanten Steigerungen der VO_{2max} , HF und TP bei gesunden inaktiven Probandinnen führt (Rakobowchuk, Harris, Taylor, Cubbon, & Birch, 2013). Weitere Untersuchungen von HIIT zeigen, dass diese Trainingsform über einen Zeitraum von 6 Monaten zu signifikanten Steigerungen der TP, ULF, SDNN und SDANN führt. Änderungen in der Standardabweichung der gemittelten NN-Intervalle (SDANN) korrelierten signifikant mit Änderungen der VO_{2max} . HIIT über 6 Monate führt zu verbesserten Zeit- und Frequenzbereichsindizes der HRV von Patienten nach Stent-Implantationen (Munk et al., 2010).

Über die Auswirkung von Krafttraining auf das ANS gibt es nur relativ wenige wissenschaftlich fundierte Studienergebnisse. Eine Studie von (Figuroa, Kingsley, McMillan, & Panton, 2008) konnte zeigen, dass zwei Krafttrainingseinheiten pro Woche über einen Zeitraum von 16 Wochen zu signifikanten Steigerungen der TP, HF und RMSSD bei Frauen mit Fibromyalgie führen. Es wurden 9 Übungen zu einem Satz von 8-12 Wiederholungen bei einer Anfangsintensität von 50 % des „one repetition maximum“ (1RM) bis hin zu 80 % des 1RM durchgeführt. Dabei kam es außerdem zu signifikanten Kraftsteigerungen der unteren und oberen Extremitäten.

A3: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Verbesserung des HF Spektrums.

Körperliches Training führt zu Änderungen der vagalen Modulation, welche zu einer Reduktion der Ruheherzfrequenz beiträgt. Eine Metaanalyse von Sandercock, Bromley, und Brodie (2005) zeigte einen signifikanten Effekt von körperlichem Training auf die Ruheherzfrequenz und die Leistung im HF Bereich. Dies unterstützt die Theorie, dass aerobes Ausdauertraining Einfluss auf neurologische Steuerungssysteme des Herzens hat (Sandercock et al., 2005). Diese Daten unterstützen ebenfalls die Annahme, dass Bradykardie in Folge von körperlichem Training teilweise durch die Steigerung der vagalen Modulation bedingt ist (M. L. Smith, Hudson, Graitzer, & Raven, 1989), und sich der Einfluss des N. vagus in gesteigerten Messwerten im HF Spektrum widerspiegelt (Hull et al., 1994). Im Gegensatz zum LF-Leistungsspektrum und der Aktivität des Sympathikus, besteht zwischen dem HF-Leitungsspektrum und der Aktivität des Parasympathikus eine starke Korrelation (Piccirillo et al., 2009). Anzumerken ist jedoch, dass die neuronale

Aktivität des Sympathikus auch Einfluss auf die HF Komponente des Frequenzspektrums hat und diese bis zu 10 % modifiziert (Cohen & Taylor, 2002). Die HF ist der einzige Marker der HRV welcher allgemein als zuverlässiger Indikator für die Aktivität des N. vagus anerkannt wird (Billman, 2013; Borst, Hollander, & Bouman, 1972).

Moderates aerobes Training führt bei Personen ≤ 70 Jahren zu signifikanten Steigerungen der TP sowie der HF und zu einer Reduktion der LF (Ueno & Moritani, 2003). Moderates bis intensives Training führte bei 11 inaktiven Männern (25-40 Jahren) zu signifikanten Steigerungen der HF sowie zu erhöhten Indizes der Zeitbereiche die mit parasympathischer Aktivität assoziiert werden (Melanson & Freedson, 2001). Das LF Spektrum spiegelt sowohl die sympathische als auch parasympathische Modulation des ANS wieder, wobei das HF Spektrum das Resultat vagaler Modulation ist (Armstrong, Ahmad, Seely, & Kenny, 2012).

Die Effekte von kontinuierlichem Ausdauertraining auf die HRV sind bekannt, jedoch ist noch wenig über die Auswirkungen von HIIT auf die neuronale Modulation des Herzens erforscht. Zwanzig gesunde untrainierte ProbandInnen führten 2 unterschiedliche HIIT Protokolle drei Mal pro Woche über einen Zeitraum von 12 Wochen auf einem Fahrradergometer durch. HIIT führte über 12 Wochen zu signifikanten Steigerungen der HF, LF und TP. Diese Studie belegt die positive Wirkung von HIIT auf das ANS, was sich durch Verbesserungen der HF und anderen HRV-Indizes widerspiegelt (Rakobowchuk et al., 2013).

Eine Studie von Kiviniemi et al. (2014) untersuchte den Effekt von HIIT (4-6 x 30 Sekunden bei maximaler Arbeitsleistung, 4 Minuten Pause) im Vergleich zu aerobem Ausdauertraining (40-60 Minuten bei 60 % maximaler Arbeitsleistung). Hierzu wurden 6 Einheiten auf einem Fahrradergometer über einen Zeitraum von 2 Wochen von je 13 erwachsenen inaktiven Männern durchgeführt. Beide Protokolle führten zu signifikanten Steigerungen der VO_{2max} . HIIT führte zu signifikanten Verbesserungen der HF als auch der LF und führte zu größeren Verbesserungen der HF im Vergleich zu aerobem Ausdauertraining. Es ist sehr wahrscheinlich, dass HIIT durch das Hervorrufen einer stärkeren kardiovagalen Aktivität zu einer größeren Steigerung der HRV im Vergleich zu aerobem Ausdauertraining führte. Anzumerken ist, dass die Leistung des HF-Spektrums an Tagen nach HIIT-Trainingseinheiten reduziert war, wobei dies nach aerobem Training nicht der Fall war. HIIT führt

offenbar zu akutem Stress des ANS der jedoch keinen negativen Einfluss auf Adaptionen der HRV dieser Trainingsintervention hatte (Kiviniemi et al., 2014).

Auch wurde die Relation zwischen maximaler Sauerstoffaufnahme und kardio-vagaler Modulation der Herzfrequenz und deren Reaktion auf ein 12 wöchiges HIIT Trainingsprotokoll untersucht (S. H. Boutcher, Park, Dunn, & Boutcher, 2013). An der Studie nahmen 32 gesunde, inaktive Frauen im Alter von 22 ± 4.5 Jahren teil und führten HIIT (8 Sekunden Sprint, 12 Sekunden Pause über einen Zeitraum von 20 Minuten auf einem Fahrradergometer) 3 Mal pro Woche über einen Zeitraum von 12 Wochen durch. Die Trainingsintervention führte zu einer signifikanten Zunahme der HF um 19 ± 1.2 %. Die Änderungen der VO_{2max} korrelierten signifikant mit den Ausgangswerten der HRV des HF-Leistungsspektrums. Folglich wurde vagale Modulation der HR mit aeroben Trainingsadaptationen nach 12 Wochen HIIT assoziiert. (S. H. Boutcher et al., 2013).

Hoch intensives Krafttraining (HIPT) führt durch seine geringe Pausendauer und hohe Intensität höchst wahrscheinlich zu einem hohen Grad an physiologischer Belastung (Albert et al., 2000). Eine Einheit HIPT führt bei 10 körperlich aktiven Männern zu signifikanten Reduktionen der HF und InRMSSD unmittelbar nach Belastung. Das CrossFit®-Workout „Cindy“ wurde als HIPT-Einheit herangezogen. Ziel ist es hierbei so viele Runden von 5 Klimmzügen, 10 Liegestütz und 15 Kniebeugen wie möglich in einem Zeitrahmen von 20 Minuten zu absolvieren. Die durchschnittliche Herzfrequenz während HIPT betrug 85 % der HR_{max} . Im Vergleich zu HIIT führte CrossFit®-basiertes HIPT zu größeren Reduktionen der Aktivität des ANS unmittelbar nach Belastung (Brian et al., 2015). Wie HIIT führt HIPT zu akutem Stress des ANS. Jedoch gibt es bis dato noch keine Langzeitstudien bezüglich der Langzeitwirkungen von HIPT auf die HRV.

A4: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zur Verbesserung der kardialen Leistungsfähigkeit.

Die positiven Effekte von kontinuierlichem Ausdauertraining auf die kardiale Leistungsfähigkeit sind vielfach bestätigt (Daussin et al., 2008; Glaesser & Rich, 1984). Auch die hoch intensive Trainingsform HIIT führt nachgewiesenermaßen zu signifikanten Steigerungen der VO_{2max} (Helgerud et al., 2007; Wisløff, Ellingsen, & Kemi, 2009) sowie des Schlagvolumens (Helgerud et al., 2007) und weist dabei signifikant größere Verbesserungen dieser Parameter der kardialen Leistungs-

fähigkeit im Vergleich zu extensivem Ausdauertraining auf. HIIT führt außerdem zu signifikanten Steigerungen der $W_{\max}$ (Laursen & Jenkins, 2002) sowie zu einer signifikanten Verbesserung (+5.1 %, $P < 0.05$) der mechanischen Leistung an der 4mmol Schwelle (Stoggl & Sperlich, 2014). Wie folgende Studien zeigen ist auch Zirkeltraining, das dem CrossFit®-basierten HIPT Training nahe kommt, eine effektive Trainingsform um die Ausdauerleistungsfähigkeit zu verbessern.

Folgende Studie hat untersucht, welche Auswirkungen kontinuierliches Zirkeltraining mit Gewichten auf das kardiovaskuläre System hat (Gotshalk, Berger, & Kraemer, 2004). Ein Durchgang des Zirkels bestand aus 10 Übungen zu je 10 Wiederholungen bei 40 % des 1RM. Es wurden 4,6 Zirkel in einem Zeitraum von 16.6 Minuten durchgeführt wobei die Herzfrequenz HR mehr als 70 % und während der letzten 12 Minuten über 80 % der ermittelten $HR_{\max}$ betrug. Dieses Trainingsprotokoll zielt auf die Verbesserung der lokalen muskulären Ausdauer während intensiver kardiorespiratorischer Bedingungen ab. Zirkeltraining führt zu einer erhöhten Verträglichkeit des kardiorespiratorischen Systems gegenüber hohen physiologischen Anforderungen und kann dazu beitragen höhere Laktatkonzentrationen zu tolerieren (Gotshalk et al., 2004). Zirkeltraining stellt dieser Studie zufolge sehr hohe Anforderungen an das kardiorespiratorische System, woraus geschlossen werden kann, dass diese Trainingsform zur Steigerung der aeroben und anaeroben Leistungsfähigkeit genutzt werden kann.

Zeiteffizientes aerobes Ganzkörper-Zirkeltraining führt bei 34 gesunden inaktiven Frauen zwischen 18 und 29 Jahren zu signifikanten Steigerungen der aeroben und anaeroben Leistungsfähigkeit sowie zu signifikanten Verbesserungen der Muskelkraft (Myers, Schneider, Schmale, & Hazell, 2015). Das Zirkeltrainingsprotokoll bestand aus Übungen mit dem eigenen Körpergewicht, wobei jeder Zirkel (Abb.2) so oft wie möglich über einen Zeitraum von 30 Minuten durchgeführt wurde. Die Teilnehmerinnen wurden in zwei Gruppen eingeteilt: (a) Aerobes Ganzkörper-Zirkeltraining oder (b) traditionelles Krafttraining kombiniert mit aerobem Ausdauertraining. Trainiert wurde 3 Mal pro Woche über einen Zeitraum von 5 Wochen. Das Zirkeltraining hatte eine Zeitdauer von zwei Drittel des kombinierten Trainingsprogramms und führte zu einer Steigerung der $VO_{2\max}$ (+11 %, $p = 0.015$) und zu signifikanten Steigerungen der Maximalkraft der Ischiocruralen Muskulatur, der Brustmuskulatur, des M. quadrizeps Femoris sowie des M. erector spinae. Die signifikanten Steigerungen der $VO_{2\max}$ durch Zirkeltraining wurden vermutlich auch durch die Tatsache erreicht, dass die Probandinnen teilweise im supramaximalen

Intensitätsbereich trainierten (Myers et al., 2015). Diese Intensitätsbereiche sind dafür bekannt die kardiovaskuläre Leistungsfähigkeit zu verbessern (Gibala & McGee, 2008; Macpherson, Hazell, Olver, Paterson, & Lemon, 2011).

TABLE 1. Exercise protocol for the whole-body aerobic resistance training circuit group (CIRCUIT).*

Week				
1 Exercise (repetitions)	2 Exercise (repetitions)	3 Exercise (repetitions)	4 Exercise (repetitions)	5 Exercise (repetitions)
Squats (15)	Sprint (200 m)	Squats (25)	Mountain climbers (15/leg)	Crossover knee tucks (20)
Push-ups (15)	Step back lunges (10/leg)	Leg lifts from push-up position (10)	Sprint (200 m)	Squat jump lunge combo (10)
Lunges (10/leg)	Squat to calf raise (20)	Push-ups (20)	Speed squats (30)	Speed push-ups (20)
Plank (45 s)	Push-up fly (15)	Clock lunges (5)	Push-ups (15)	Sprint (200 m)
Sprint (200 m)	Sprint (200 m)	Sprint (200 m)	Push-up/plank (10)	Half burpees (10)
Mountain climbers (10/leg)	Push-up planks (10)	Plank with knee tucks (15)	Squat jumps (15)	Side plank hip drops (10/side)
Leg drops (10)	Leg drops (15)	Scissor kicks (30)	Round the world plank (4)	Crossover lunges (10/leg)
			Leg drop with thrust (15)	
			Side plank hip drops (15/side)	

*Participants performed as many cycles as possible in 30 minutes.

Abb. 2 Trainingsprotokoll des aeroben Ganzkörper-Zirkeltrainings (Myers et al., 2015).

Es konnte auch gezeigt werden, dass hoch intensives Zirkeltraining (HICT) bei Übergewichtigen (Körperfett > 26 %) zu einer Senkung der Ruheherzfrequenz (16 %), des Ruheblutdrucks (5.5 %) und zu einer Steigerung der Arbeitskapazität (Miller et al., 2014) führt. Ruheherzfrequenz sowie Ruheblutdruck wurden wöchentlich an trainingsfreien Tagen gemessen. Es wurden 7 unterschiedliche Übungen (Kniebeuge, Bankdrücken, Kreuzheben, Crunches, Burpees, Vorgebeugtes Rudern und Schulterdrücken) der Reihe nach unter Aufsicht durchgeführt, wobei diese Abfolge insgesamt 3 Mal in einem maximalen Zeitrahmen von 30 Minuten absolviert wurde. Ziel war es dabei so wenig Pausen wie möglich zu machen. Die Probanden waren dazu angehalten 8 bis 12 Wiederholungen (ca. 70-80 % 1RM) mit maximal möglichem Bewegungsradius durchzuführen. Wenn 8 technisch korrekte Wiederholungen nicht möglich waren wurde das Gewicht im folgenden Satz reduziert. Wenn Probanden dazu in der Lage waren mehr als 12 korrekte

Wiederholungen zu absolvieren wurde das Gewicht im folgenden Satz erhöht. Die Arbeitskapazität wurde aus dem bewegten Gewicht multipliziert mit der Wiederholungszahl ermittelt, wobei Crunches und Burpees in diesen Wert nicht einbezogen wurden, da hierbei kein externes Gewicht verwendet wurde. Die Arbeitskapazität erhöhte sich signifikant um 50.7 % bis 53.8 % von der ersten bis zur letzten Trainingseinheit. Die durchschnittliche Herzfrequenz während der Trainingseinheiten betrug 85 ± 3.6 % der HR_{max} . Die Messungen der HR und des subjektiven Belastungsempfindens, das durchschnittlich 16-17 auf der Borg-Skala (Borg, 1982) betrug, zeigen die hohe Intensität während HICT auf (Miller et al., 2014).

Die Studien von Gotshalk et al. (2004) und Myers et al. (2015) zeigen, dass Zirkeltraining durch seine hohe Intensität beträchtliche Ansprüche an das kardiorespiratorische System stellt. Zirkeltraining führt zu signifikanten Adaptationen des kardiovaskulären Systems, sowie zu Steigerungen der VO_{2max} (Myers et al., 2015) als auch zur Reduktion der Ruheherzfrequenz (Miller et al., 2014). Zirkeltraining ist eine Trainingsform die dem Trainingskonzept von CrossFit® sehr ähnlich ist. Aus diesem Grund geben diese Studien einen guten Überblick darüber welche Effekte durch ein CrossFit® basiertes Training zu erwarten sind.

Das Training mit „Kettlebells“ hat in den letzten Jahren sehr viel an Bekanntheit gewonnen und findet auf im CrossFit®-Training Anwendung. Eine Studie von (Beltz et al., 2013) untersuchte den Effekt eines Kettlebell-Trainingsprogramms auf die aerobe Kapazität. Neun weibliche „National Collegiate Athletic Association Division I“ Fußballspielerinnen trainierten 3 Mal pro Woche über einen Zeitraum von 4 Wochen. Die Interventionsgruppe führte die Übung „Kettlebell-Snatch“ 20 Minuten lang in einem Modus von 15 Sekunden Belastung und 15 Sekunden Pause durch. Die durchschnittliche Steigerung der VO_{2max} betrug 6 %. Das Training mit Kettlebells scheint demnach eine geeignete Methode dafür zu sein kardiovaskuläre Fitness zu erhalten oder zu steigern (Beltz et al., 2013).

CrossFit®-basiertes „high-intensity-power-training“ (HIPT) führte bei 43 Probanden (20 Frauen, 23 Männer) mit sehr unterschiedlichen aeroben Leistungsniveaus zu signifikanten Verbesserungen der VO_{2max} und der Körperzusammensetzung (M. M. Smith et al., 2013). HIPT beinhaltet sowohl Übungen mit dem eigenen Körpergewicht als auch Übungen mit Langhanteln, Kurzhanteln, Medizinbällen, Kettlebells und viele mehr. Bei dieser Trainingsmethode werden im Gegensatz zu

HIIT üblicherweise keine Pausen vorgegeben, da der Fokus darauf gerichtet ist, ein möglichst hohes Leistungsniveau zu halten. Die Probanden führten das sich ständig ändernde Trainingsprotokoll 5 Mal Pro Woche über einen Zeitraum von 10 Wochen durch. Die Verbesserungen der $\dot{V}O_{2\max}$ sowie der Körperzusammensetzung waren in allen Leistungsniveaus signifikant (Abb.3). Signifikante Zusammenhänge zwischen absoluter Sauerstoffaufnahme und relativer Sauerstoffaufnahme bezogen auf das Körpergewicht wurden bei Männern ($r=0,83$; $p < 0.001$) und Frauen ($r= 0.94$; $p < 0,001$) festgestellt, was darauf hindeutet das HITP die relative $\dot{V}O_{2\max}$, unabhängig von Änderungen der Körperzusammensetzung, verbessert.

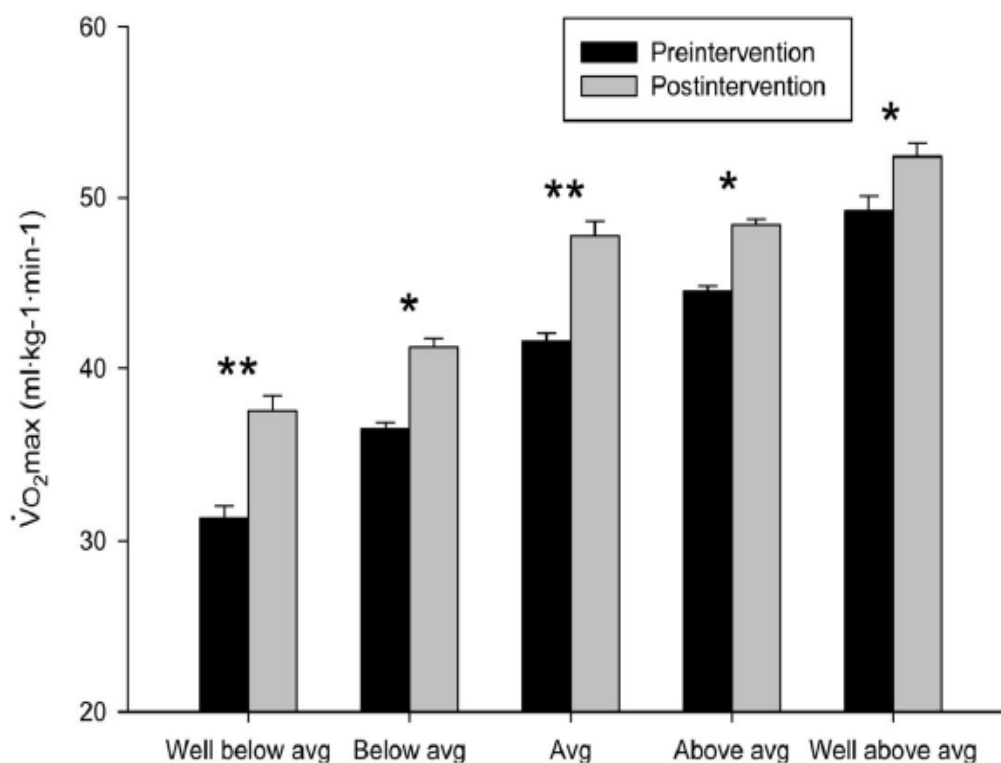


Abb. 3: Änderungen der relativen $\dot{V}O_{2\max}$ nach 10 Wochen HIPT. Eine Unterteilung in Gruppen des Ausgangsniveaus der aeroben Fitness bezogen auf das Körpergewicht, zeigt signifikante Steigerungen der relativen $\dot{V}O_{2\max}$ in allen Gruppen. ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$ (M. M. Smith et al., 2013).

1.4 Methoden

Einleitend wurden die Annahmen, die zur Beantwortung der Forschungsfragen formuliert wurden, begründet. Im zweiten Teil dieser Arbeit wird der aktuelle Forschungsstand mittels Literaturrecherche erläutert. In Zuge dessen werden folgende Themengebiete und Begriffe beschrieben, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind.

- HRV
- HRV und das Autonome Nervensystem
- Messung der HRV
- HRV - Geschlechterspezifische Unterschiede
- Physiologische Adaptionen und Kardiovaskuläre Leistungsfähigkeit
- Kontinuierliches Ausdauertraining
- HIIT
- Kurz- und langfristige Auswirkungen von Training auf die HRV
- Funktionelles Training
- CrossFit®
- HIPT

Der empirische Forschungsteil der Arbeit wird auf Basis dieser theoretischen Grundlage dargestellt. Im Zuge dieses Abschnitts wird das Forschungsprojekt beschrieben und die statistischen Methoden die zur Beantwortung der Forschungsfragen verwendet werden sowie die Methodik der Auswertung beleuchtet. Als Grundlage dienen die Daten einer Studie des österreichischen Institut für Sportmedizin (ÖISM) in Zusammenarbeit mit der Versicherung für öffentliche Bedienstete (BVA) mit dem Namen: *„Bewegung Verändert Alltag - Einfluss von funktionellem Krafttraining auf funktionelle- und gesundheitsbezogene Parameter zur betrieblichen Vorsorge“*.

Im letzten Teil der Arbeit werden die Forschungsfragen auf Basis der empirischen Forschungsarbeit beantwortet und mit Hilfe von Literaturrecherche interpretiert. Folglich werden Limitationen der Studie diskutiert und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen der Forschung im Bereich HRV und CrossFit® – basiertem Training gegeben.

2 Aktueller Forschungsstand - Literaturrecherche

2.1 Herzfrequenzvariabilität

Eine nicht invasive diagnostische Methode, die in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen hat ist die Analyse der HRV. Im Bereich der Sportmedizin und der Trainingswissenschaft herrscht auf Grund der bestehenden Annahme, dass sich diese Methode zur Trainingskontrolle und Trainingssteuerung eignet, großes Interesse an der Analyse der HRV (Hottenrott, 2007). Im Sportbereich entwickeln sich neue Möglichkeiten bezüglich der Trainingssteuerung der Belastbarkeitsdiagnostik sowie der Analyse von Reaktionen des Autonomen Nervensystems auf körperliche Belastung.

Detaillierte Analysen der Änderung des Herzschlages können dazu verwendet werden die autonomen Kontrollmechanismen des Herzens indirekt zu untersuchen (Malik & Camm, 1990). Die HRV ist die Variation der Zeitperiode zwischen aufeinanderfolgende Herzschläge über einen gewissen Zeitraum und ist vor allem von der extrinsischen Regulation der Herzfrequenz abhängig. Die HRV spiegelt die Eigenschaft des Herzens wider, unvorhersehbare Umstände schnell zu erkennen und adäquat darauf zu reagieren (Acharya, Joseph, Kannathal, Lim, & Suri, 2006).

Änderungen der HRV können frühe und genaue Indikatoren für mangelnde Gesundheit sein (Dekker et al., 1997; Liao et al., 1997). Eine hohe HRV deutet auf eine gute Anpassungsfähigkeit des Organismus hin, sich an äußere Umstände anzupassen, was auf Gesundheit und auf gut funktionierende autonome Kontrollmechanismen hinweist. Eine niedrige HRV ist hingegen ein Indikator für eine mangelnde Anpassungsfähigkeit des autonomen Nervensystems und deutet auf eine physiologische Fehlfunktion des Individuums hin, bei weiteren Untersuchungen erforderlich sind um eine spezifische Diagnose zu stellen (E. Horn & Lee, 1995). Ende der 70er Jahre wurde erstmals eine Korrelation zwischen reduzierter HRV und erhöhter Mortalitätsrate sowie vermehrter arrhythmischer Ereignisse bei Postinfarktpatienten festgestellt (Wolf, Varigos, Hunt, & Sloman, 1978). Eine reduzierte HRV gilt als zuverlässiger Indikator für die Anbahnung von gesundheitsgefährdenden Ereignissen bei gesunden Personen (Dekker et al., 1997) und bei Patienten mit einer großen Bandbreite an Krankheitsbildern (Malliani, Lombardi, Pagani, & Cerutti, 1994). Dies spiegelt die unverzichtbare Rolle des autonomen Nervensystems wieder, das für die Gesundheit des Organismus entscheidend ist (Pumprla, Howorka, Groves, Chester, & Nolan, 2002).

2.1.2 Herzfrequenzvariabilität und das Autonome Nervensystem

Das kardiovaskuläre System spiegelt Eigenschaften eines sich selbst organisierenden Systems wider, das dazu geschaffen ist dynamische Stabilität zu erreichen (Nicolis & Prigogine, 1977). Im Fall des kardiovaskulären Systems wird die Stabilität durch das autonome Nervensystem, dem Barorezeptor-Reflex sowie anderen Faktoren realisiert, die sehr schnell auf interne und externe Einflüsse reagieren (Pumprla et al., 2002). Wie viele andere Organe wird das Herz dual innerviert (Abb. 4). Eine Vielzahl an physiologischen Faktoren bestimmt die Funktion des Herzens, wobei das ANS dabei die wichtigste Rolle spielt (Thayer, Åhs, Fredrikson, Sollers, & Wager, 2012).

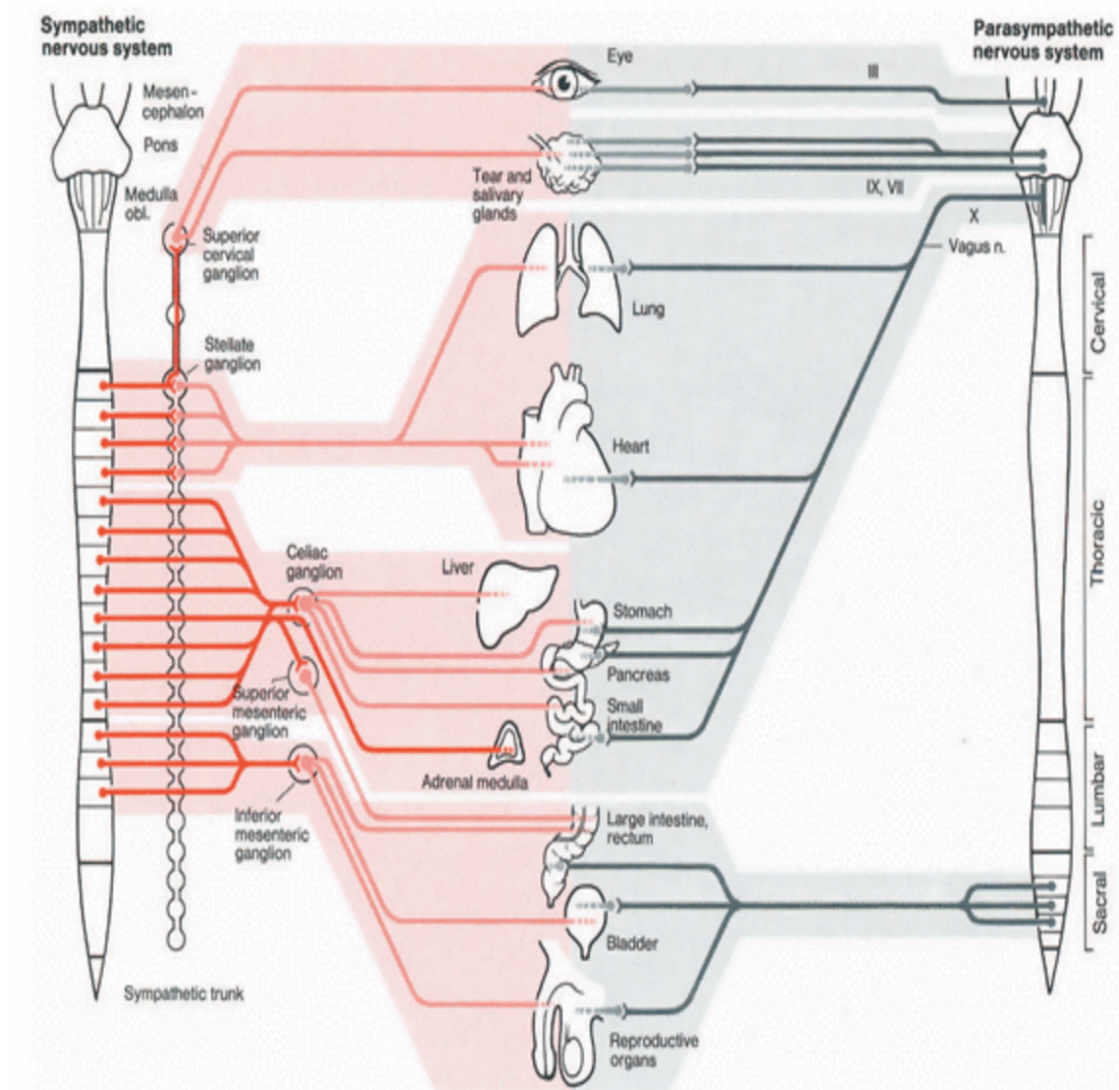


Abb. 4: Der grobe Aufbau des Autonomen Nervensystems veranschaulicht die duale Innervation des Herzens sowie anderer Organe (Jänig, 1989).

Um sich auf die ständig ändernden endogenen und exogenen Einflüsse anpassen zu können, variiert der Herzschlag des menschlichen Organismus um ihn mit der benötigten Menge an Blut zu versorgen. Das kardiovaskuläre System reagiert möglichst rasch auf Ischämie, Stoffwechselentgleisungen (Pumprla et al., 2002) Stress sowie körperliche Belastung (R. H. Fagard, Unit, & Leuven, 1997) um sich den ständig ändernden Anforderungen der Herz- und Arbeitsmuskulatur anpassen zu können. Tatsächlich variiert die Herzfrequenz in Folge dieser Stimuli, die auch in Ruhe auftreten, auf eine komplexe Art und Weise (Pumprla et al., 2002).

Die HRV gibt neben Informationen über den Grad der Beanspruchung des Herzkreislaufsystems auch Aufschluss über die Qualität der Herzkreislaufregulation (Hottenrott, 2007). Das ANS ist für die Steuerung des Herzens verantwortlich und reguliert das Herzkreislaufsystem über das Zusammenspiel von Sympathikus und Parasympathikus (Sammito & Böckelmann, 2015). Diese dynamischen Anpassungen der kardialen und peripheren vaskulären Systeme, die durch das ANS reguliert werden treten in Kombination mit schnellen Änderungen der Herzfrequenz (HR) sowie dem Blutdruck (BP) auf. Das sympathische und parasympathische Nervensystem innerviert das Herz und reguliert die HF. Das Zusammenspiel dieser Systeme beeinflusst die Konsistenz der Zeit zwischen zwei Herzschlägen (Makivić¹ et al., 2013).

Die Analyse von Elektrokardiogrammen (EKG) macht die Überwachung und Analyse der HRV möglich um den Zustand des ANS zu bestimmen (Makivić¹ et al., 2013). Die HRV - Analyse bietet die Möglichkeit den allgemeinen Gesundheitszustand des Herzkreislaufsystems und den Zustand des ANS, das für die Aktivität des Herzens verantwortlich ist, festzustellen (Acharya et al., 2006). Eine einfache Methode die Reaktion des autonomen Nervensystems aufzuzeigen involviert die Untersuchung von aufeinanderfolgenden Zeitintervallen (Abb.5) zwischen Spitzen des QRS Komplex, die R-R Intervalle genannt werden (Cardiology, 1996).

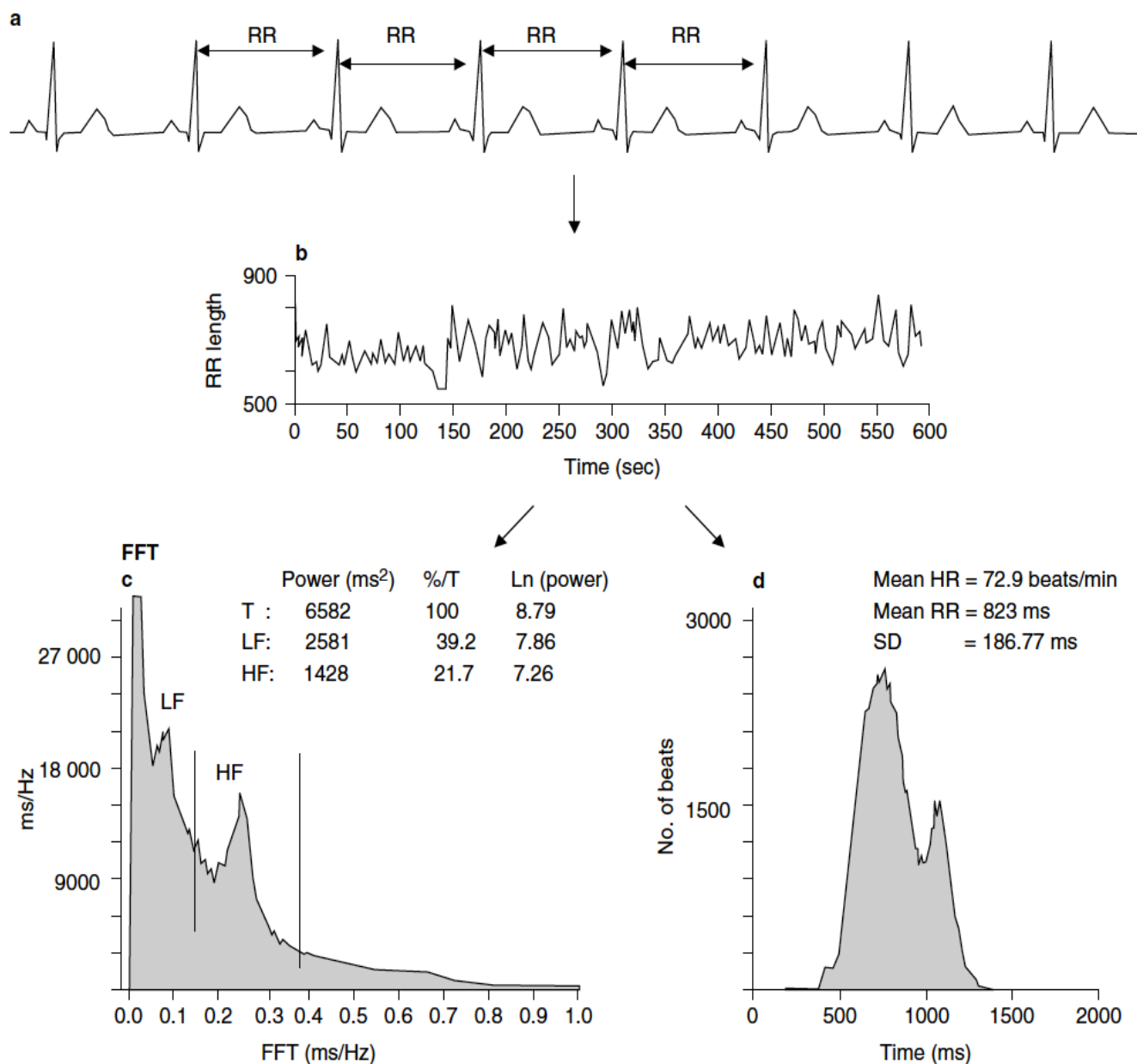


Abb. 5: Analyse der HRV. Ermittlung der aufeinanderfolgenden RR- Intervalle (a) des EKG, resultieren in einem Tachogram (b) das durch die Analyse des Frequenzspektrums (c) und des Zeitbereichs (d) untersucht werden kann (Aubert, Seps, & Beckers, 2003).

Die Aktivität von Parasympathikus und Sympathikus kann durch die Messung der HRV, der Blutdruckvariabilität sowie des Barorezeptor-Reflex beurteilt werden (Makivić¹ et al., 2013). Die HRV ist ein Parameter der verwendet werden kann um den Aktivitätszustand des ANS zu ermitteln (Acharya et al., 2006). Die Aktivität des Parasympathikus ist für die Reduzierung der HF nach Stimulation der Barorezeptoren, sowie für die Steigerung der HF nach Inaktivität der Barorezeptoren verantwortlich, wobei dabei auch das sympathische Nervensystem eine kleine Rolle spielt (Aubert et al., 2003). Barorezeptoren sind keine Druckrezeptoren per se

sondern Deformationsrezeptoren. Die Signale afferenter Fasern von Barorezeptoren werden nicht nur mit der Kontrolle des Blutdrucks sondern auch mit der Steuerung der Pulsamplitude und der Herzfrequenz in Verbindung gebracht (Goldstein, Horwitz, & Keiser, 1982). Barorezeptor-Reflexe können eine starke inhibitorische Wirkung auf die Aktivität des Sympathikus haben und sind eine wichtige Quelle von exzitatorischen postsynaptischen Potentialen, die vagale Motoneuronen stimulieren. Barorezeptor-Reflexe haben besondere Relevanz für die Forschung der HRV da diese Reflexe innerhalb extrem kurzer Zeitfenster der höchsten Herzfrequenzrhythmen phasisch ablaufen können (Berntson et al., 1997). Durch Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Druckänderungen im Sinus caroticus von über 1Hz in den efferenten Bahnen der Barorezeptoren widergespiegelt werden (Kozdi & Geller, 1968). Diese Frequenzen sind deutlich höher als die Frequenzen des ANS zur Innervation des Herzens. Efferente Fasern der Barorezeptoren sind dazu in der Lage arterielle Druckänderungen bis in die höchsten Frequenzbereiche der HRV präzise zu übermitteln (Eckberg, Kifle, & Roberts, 1980) .

Die Effekte des ANS auf die R-R Intervalle sind komplex. Sie resultieren aus der Innervation des Herzens und des Gefäßsystems (Makivić¹ et al., 2013). Die Steuerung des Herzkreislaufsystems wird hauptsächlich über höhere Hirnareale sowie durch kardiovaskuläre Kontrollzentren im Hirnstamm über das ANS gesteuert, welches sich aus sympathischen und parasympathischen Nerven zusammensetzt (Hainsworth, 1998). Die Medulla oblongata ist primär für die Regulierung der efferenten parasympathischen und sympathischen Signale zum Herzen und den Blutgefäßen zuständig. Der Nucleus tractus solitarius empfängt sensorischen Input (emotionaler sowie physischer Stress) und stimuliert kardiovaskuläre Reaktionen.

Der Parasympathikus sowie der Sympathikus innervieren das Herz von der Medulla oblongata aus (Makivić¹ et al., 2013). Der Sinusknoten ist von beiden Strängen des ANS dicht innerviert, wobei die Herzfrequenz den modulierenden Effekt des Sympathikus und Parasympathikus auf die intrinsische Innervationsrate der Schrittmacherzellen widerspiegelt (Pumprla et al., 2002). Der normale Rhythmus des Herzens wird durch den Sinusknoten kontrolliert, der von sympathischen und parasympathischen Zweigen des autonomen Nervensystems innerviert wird (Randall, 1994). Die Vorhöfe werden ebenfalls von efferenten Fasern des Parasympathikus innerviert, wobei die Herzkammern vom Nervus vagus nur spärlich innerviert sind. Die Efferenzen des Sympathikus innervieren den gesamten Bereich

der Vorhöfe, das gesamte Reizleitungssystem, den Sinusknoten sowie die Herzkammern (Makivić¹ et al., 2013). Die Nerven des ANS kontrollieren nicht nur die Herzfrequenz und die Schlagkraft sondern innervieren reflexauslösende Areale in verschiedenen Bereichen des Herzens, die durch mechanische oder chemische Stimulation reflexartig auf das Herz und Blutgefäße wirken (Persson, 1996). Die Nervenbahnen des ANS stehen ebenfalls eng mit dem Barorezeptor-Reflex in Verbindung. Änderungen des Blutdrucks spielen eine entscheidende Rolle bei der Aktivitätskontrolle von Parasympathikus und Sympathikus (Aubert et al., 2003)

Herzschlag und Blutdruck ändern sich einerseits durch die respiratorische Sinusarrhythmie, andererseits durch physische, mentale und andere Umwelteinflüsse. Die Herzfrequenz wie seine Modulation werden jedoch hauptsächlich von der Aktivität des ANS bestimmt. Generell sind die Effekte von Parasympathikus und Sympathikus gegensätzlich. Die Stimulation des Sympathikus steigert die Herzfrequenz, die Kontraktionskraft des Herzens, sowie die Reizleitungsgeschwindigkeit, bedingt Vasokonstriktion und verlangsamt die Verdauung, wohingegen der Parasympathikus den gegenteiligen Effekt bewirkt. Der Effekt des sympathischen Nervensystems wird durch Adrenorezeptoren (Alpha und Beta) bedingt (Aubert et al., 2003). Nervenendigungen des sympathischen Nervensystems setzen Epinephrine am Sinusknoten frei und beschleunigen den Rhythmus des Sinusknotens durch eine von $\beta - 1$ Rezeptoren vermittelte Kaskade von intrazellulären Second Messenger-Signalen (Berntson et al., 1997). Die Effekte des Parasympathikus werden über Muscarinrezeptoren übermittelt. Die autonome Kontrolle des Herzkreislaufsystems ist des Weiteren durch Barorezeptoren, Chemorezeptoren, Muskelafferenzen, lokalen Gewebsstoffwechsel und zirkulierende Hormone beeinflusst (Aubert et al., 2003).

In Abbildung 6 wird ein Modell des kardiovaskulären Kontrollmechanismus dargestellt. Sowohl der Parasympathikus als auch der Sympathikus sind in Ruhe aktiv, jedoch setzen die Fasern des Parasympathikus Acetylcholin frei, wodurch die Schrittmacherfunktion des Sinusknoten gebremst wird und sich somit die Herzfrequenz reduziert (Makivić¹ et al., 2013). Acetylcholin wird durch postganglionäre parasympathische Nervenendigungen am Sinusknoten freigesetzt, wodurch die Rate der Sinusknoten-Depolarisation verlangsamt wird, indem es sich an Muscarinrezeptoren bindet und transmembrane Potassiumkanäle aktiviert (Hill, Wallick, Martin, & Levy, 1995). Acetylcholin kann sehr schnell zur Verfügung gestellt werden und hat eine hohe Wiederherstellungsrate, wodurch dieser schnelle

biologische Mechanismus das parasympathische Nervensystem dazu befähigt, die kardiale Funktion von Schlag zu Schlag zu regulieren (Pumpila et al., 2002). Änderungen des kardiovaskulären Systems durch das sympathische Nervensystem die durch Noradrenalin gesteuert werden, gehen langsamer vonstatten, da die Stoffwechselvorgänge zur Wiederherstellung dieses Neurotransmitters relativ langsam ablaufen. Aufgrund dieser Unterschiede der Neurotransmitterfunktion arbeiten die beiden Zweige des ANS auf unterschiedlichen Frequenzen. Bei Variationen der HRV können somit gesteigerte Aktivitäten von Parasympathikus oder Sympathikus identifiziert und quantifiziert werden (Greenwood, Durham, & Nolan, 1998). Das Herz ist ständig unter Kontrolle des Parasympathikus, der eine hemmende Wirkung auf die Herzfrequenz hat. Während Ruhe versucht das ANS möglichst viel Energie zu sparen und steigert daher die Aktivität des Parasympathikus bei gleichzeitiger Hemmung des Sympathikus (Thayer et al., 2012).

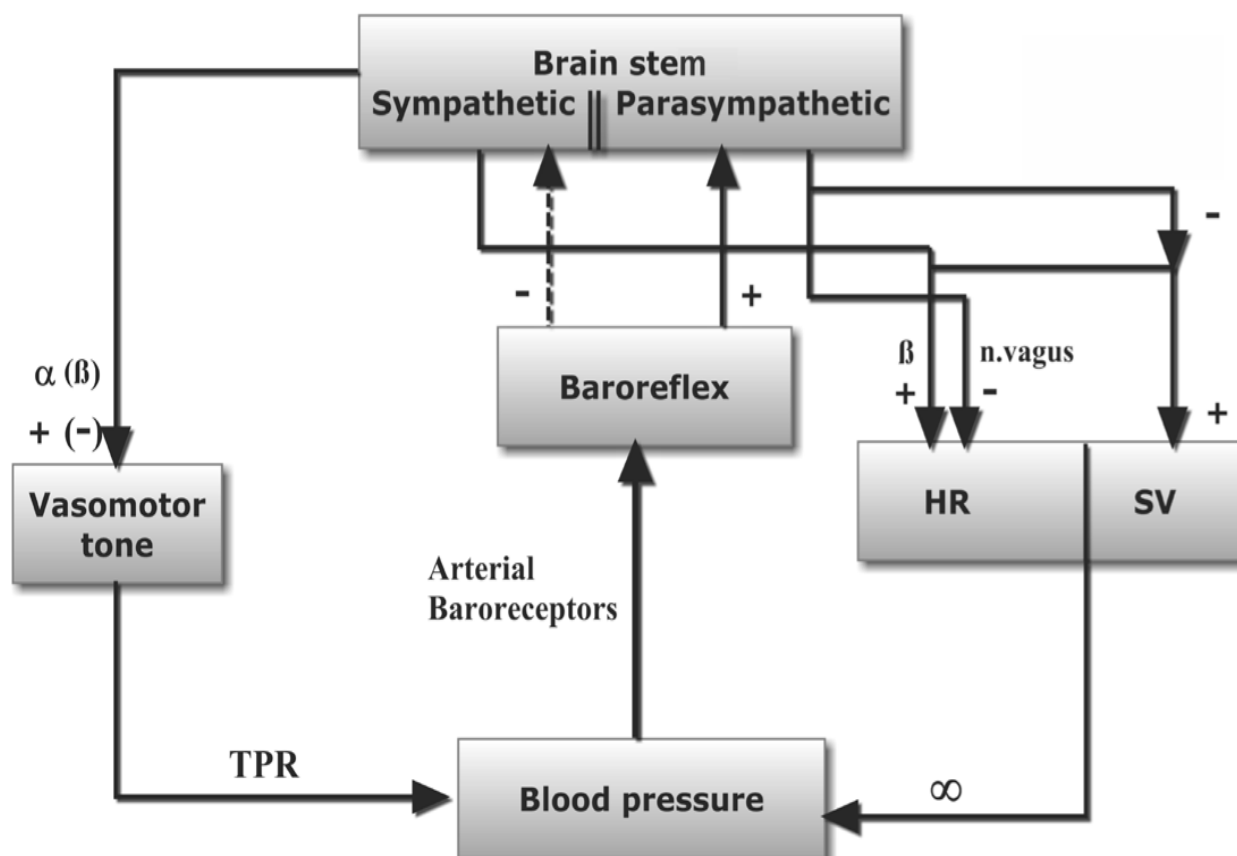


Abb. 6: Ein Modell der kardiovaskulären Kontrollmechanismen (Makivić et al., 2013, S107; mod.n. Aubert et al., 2003, S 892)

2.1.3 HRV Messung

2.1.3.1 Messungen im Zeitbereich

Zeitbereich-Messungen sind die einfachste Methode die HRV abzuleiten (Freeman, Dewey, Hadley, Myers, & Froelicher, 2006). Bei der zeitbezogenen HRV-Analyse wird die HRV als die Änderung von RR-Intervallen über einen gewissen Zeitraum dargestellt. Die Spektralanalyse oder die Frequenzbezogene HRV-Analyse ist eine weitere häufig genutzte Methode um die HRV zu ermitteln (Achten & Jeukendrup, 2003).

Zeitbereich-Messungen werden in statistische und geometrische Methoden unterteilt (Billman, 2011). Die RR-Intervalle werden bei dieser Methode bezüglich ihrer Varianz ausgewertet (Sammito & Böckelmann, 2015). Die geläufigsten Zeitbereich-Indizes sind SDNN (Standardabweichung der RR-Intervalle), RMSSD (die Quadratwurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Differenzen aufeinander folgender RR-Intervalle in ms) und NN50 (Anzahl von sukzessiven Differenzen von RR-Intervallen ≥ 50 ms) (Hottenrott, 2007). Die Aufzeichnungsdauer kann von einigen Minuten (1-20min) bis zu 24 Stunden andauern (Aubert et al., 2003). Die Parameter RMSSD sowie NN50 können der parasympathischen Aktivität zugeschrieben werden. Für den ZI SDNN gibt es keine klare Zuordnung, er wird sowohl dem Sympathikus als auch dem Parasympathikus zugeordnet. (Pumpřla et al., 2002).

Bei der zeitbezogenen HRV Analyse ist auf die Auswahl der Parameter und die Auswahl der Messdauer zu achten. Wenn Vergleiche von Untersuchungsergebnissen durchgeführt werden, muss stets darauf geachtet werden, dass die Datensätze die gleiche Aufzeichnungsdauer der EKG's aufweisen (Sammito & Böckelmann, 2015), da die zeitbezogenen Indizes der HRV Analyse von dieser abhängig sind (A. Horn, 2004). Der SDNN Parameter korreliert bei Ruhemessungen von 5 Minuten beispielsweise gut mit dem SDNN Parameter einer 24 Stundenmessung (Haas, Liebrich, Himmrich, & Treese, 2000). Für eine Risikoabschätzung bei Herzinfarktpatienten ist dieser jedoch nicht geeignet (Klingenheben, Zabel, & Hohnloser, 1998), da hierfür die Berücksichtigung zirkadianer Schwankungen, die aus Langzeitmessungen der HRV ersichtlich werden, notwendig ist (Sammito & Böckelmann, 2015). SDNN und SDNN können aus Kurzaufnahmen eines EKG's nicht für 24 Stunden Aufnahmen

herangezogen werden, da diese Parameter des Zeitbereichs stark von Aktivitätsmustern über den Tagesverlauf hinweg, sowie der Aufzeichnungsdauer abhängen (HC Esperer, Hollenbach, & Esperer, 2006). Die Analyse sowie die Beurteilung der Gesamtvariabilität der Herzfrequenz und der parasympathischen Aktivität sollten durch die Parameter SDNN beziehungsweise RMSSD über eine Dauer von 24 Stunden erfolgen (Sammito & Böckelmann, 2015). SDNN und RMSSD quantifizieren die gesamte Variabilität über die jeweilige Aufzeichnungsdauer und werden durch Änderungen der sympathischen und parasympathischen Aktivität beeinflusst. Es handelt sich dabei um unspezifische Maßeinheiten der sympathovagalen Balance. Es sind nützliche klinische Instrumente um Anomalien der autonomen Aktivität festzustellen, können jedoch nicht dazu genutzt werden um spezifische Änderungen des Sympathikus oder Parasympathikus zu quantifizieren (Pumprla et al., 2002).

2.1.3.2 Messungen im Frequenzbereich

Da genau Daten zur Aussage über Änderungen des ANS mit der Analyse im Zeitbereich nur schwer ermittelbar sind, wurden alternative Techniken entwickelt, um zyklische Änderungen der HRV zu bestimmen. Es handelt sich dabei um Messungen im Frequenzbereich (Pumprla et al., 2002). Die Frequenzbereich Analyse beschreibt sich ständig ändernde, Hochfrequenz- (HF) und Niederfrequenzbänder (LF), die mit der Aktivität von Sympathikus und Parasympathikus korrespondieren. Durch die Einführung dieser Frequenzbereiche ist es Forschern möglich den Aktivitätszustand der Nervenbahnen des ANS zu bestimmen. (Cardiology, 1996). Bevor Analysen im Frequenzbereich durchgeführt werden können, müssen die EKG's ausführlich editiert und begutachtet werden um Messpausen, Artefakte sowie Extrasystolen zu beseitigen oder zu bearbeiten. (Acar, Savlieva, Hemingway, & Malik, 2000). Die bearbeiteten NN Intervallreihen werden dann mittels „Fast Fourier Transformation“ oder „Autoregressiver Analyse“ mathematisch analysiert (Hartikainen, Tahvanainen, & Kuusela, 1998). Der Anteil zyklischer Änderungen unterschiedlicher Frequenzen kann mit dieser Methode erkannt und quantifiziert werden (Malliani, Pagani, Lombardi, & Cerutti, 1991). Die Informationen werden üblicherweise grafisch dargestellt wobei das Leistungsdichtespektrum (PSD) üblicherweise auf der Y-Achse und die Frequenz (Hz) auf der X-Achse dargestellt wird (Abb. 7). Durch Messungen der Bereiche unter der Kurve bei unterschiedlichen Frequenzen können numerische Werte der zyklischen Schwankungen von HF und LF erhoben werden.

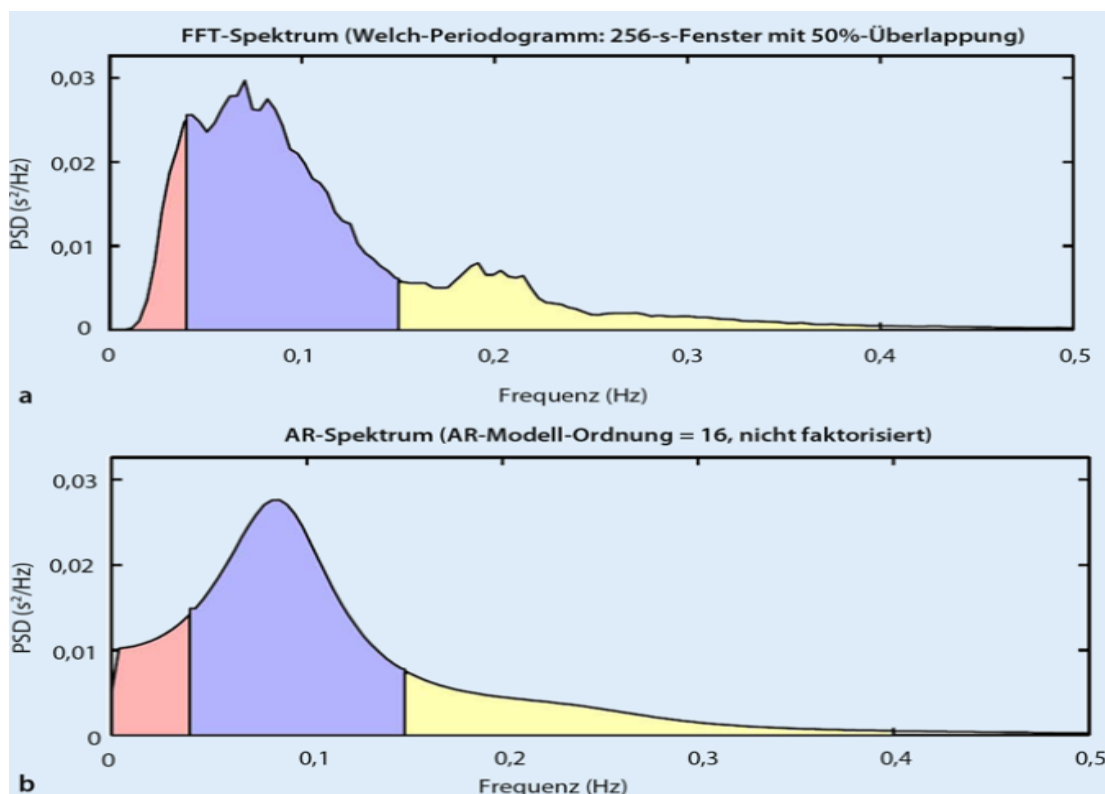


Abb. 7: Spektralanalyse mittels "Fast-Fourier"-Transformation (a) und parametrische Autoregression (b). Die Frequenzbänder eines gesunden Probanden werden getrennt dargestellt (Sammito & Böckelmann, 2015).

Periodische Komponenten der HRV treten in unterschiedlichen Frequenzbändern auf (Berntson et al., 1997). Das niederfrequente LF-Band hat einen Frequenzbereich von 0.04 bis 0.15 Hz und schwingt mit einer Periodendauer von 7 bis 25 Sekunden. Sowohl Sympathikus als auch Parasympathikus korrespondieren mit der Aktivität der LF wobei der Anteil des Sympathikus überwiegt (Sammito & Böckelmann, 2015). Änderungen im LF-Band beschreiben den Einfluss des Baroreflex und die Auswirkungen von arteriellen Blutdruckschwankungen auf das Herzschlagfrequenzverhalten (Billman, 2013). In der Literatur werden auch ULF („ultra low frequency“) mit einem Leistungsdichtespektrum unter 0.003 Hz und VLF („very low frequency“) mit einem Leistungsdichtespektrum von 0.003 bis 0.04 Hz (Sammito & Böckelmann, 2015) beschrieben, deren Schwankungen die vasomotorische Komponente der Thermoregulation und eventuell auch Schwankungen des Renin-Angiotensin-Systems reflektieren (Karas et al., 2005). Des Weiteren wird diskutiert ob Frequenzspektren kleiner 0.04 Hz Einfluss auf zirkadiane Rhythmik, Chemoreflex und vagale Modulation haben (Stein, 2005). Zirkadiane HRV reflektiert eine weite Bandbreite von Determinanten. Dazu gehören Änderungen des Aktivitätszustandes, Haltung, Atmung, autonomer Aktivität,

psychische Erregung und eine Vielzahl von behavioristischen Variablen (Berntson et al., 1997). Das Leistungsdichtespektrum der VLF spiegelt die Aktivität des Sympathikus wieder (Malik, 2008). Änderungen von RR – Intervallen im HF- Bereich (0.14 – 0.4 Hz), werden primär durch das Herz über den parasympathischen Nerv reguliert (Cardiology, 1996). Das HF_{RR} -Band schwingt mit einer Periode von 2,5 bis 7s und spiegelt die respiratorische Sinusarrhythmie wider (RSA) (Sammito & Böckelmann, 2015). Bei jungen gesunden Personen in Ruhe ist das HF_{RR} -Band am auffälligsten. Unter Belastung kann die respiratorische Frequenz bei Kindern und Erwachsenen auf mehr als 1Hz ansteigen (Berntson et al., 1997). Die „total power“ (TP) ist die Gesamtleistung oder das gesamte Leistungsdichtespektrum und reicht von 0.00001 bis 0.4 Hz. Es handelt sich dabei um einen Parameter der Gesamtvariabilität der Herzschlagfolge der für Kurzaufnahmen keine Rolle spielt (Cardiology, 1996). Ein weiterer häufig bestimmter Faktor ist der LF / HF–Quotient, der als Kennzahl für sympathikovagale Modulation verwendet wird (HD Esperer, Esperer, Frommer, & Robra, 2003) und als Wert des Zusammenspiels von Parasympathikus (HF) und Sympathikus (LF) definiert (Sammito & Böckelmann, 2015). Die Dauer der Aufzeichnungen sollte bei der Analyse im Frequenzbereich etwa die 10-fache Dauer der Wellenlänge der beobachteten Frequenz betragen (Berntson et al., 1997).

Die erworbenen HRV Daten einer Frequenzmessung können dazu verwendet werden anschaulich und gut verständlich dargestellt zu werden (Pumprla et al., 2002). Im Zuge einer Studie wurde die HRV abwechselnd während 5 Minuten liegender, 5 Minuten stehender und nochmals 5 Minuten liegender Position gemessen (Acar et al., 2000). Das autonome Nervensystem reagiert auf Änderung der Körperposition mit Hilfe von Barorezeptoren die durch Frequenzanalyse aufgezeigt werden könne. Die Ergebnisse dieses Protokolls sind in einer dreidimensionalen Grafik (Abb. 8) ersichtlich, die Frequenz und Zeit und zeigt. Die deutlich vorherrschende Aktivität des Parasympathikus (HF) während liegender Position und seine Reduktion während stehender Position, bei welcher der Sympathikus (LF) hauptsächlich aktiv ist, wird in dieser Grafik ersichtlich. Die Analyse im Frequenzbereich erlaubt schnelle Identifikation von autonomer Dysfunktion sowie aussagekräftige Analysen des autonomen Nervensystems (Howorka, Pumprla, & Schabmann, 1998).

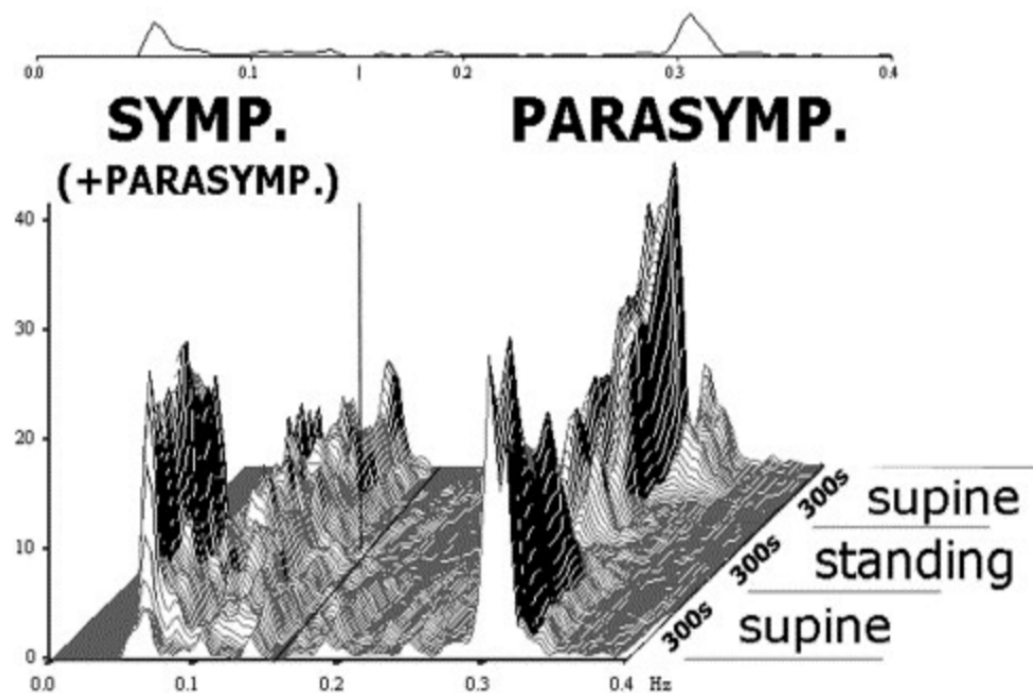


Abb. 8: Kurzzeit – Spektralanalyse während modifizierter orthostatischer Belastung. (Pumprla et al., 2002)

2.1.3.3 Methodologische Aspekte der HRV Messung

Indizes der HRV spiegeln natürliche Schwankungen des menschlichen Organismus wider (Al Haddad, Laursen, Chollet, Ahmaidi, & Buchheit, 2011). Wenn die HRV verwendet wird um positive (Plews, Laursen, Kilding, & Buchheit, 2013) oder negative (Plews, Laursen, Kilding, & Buchheit, 2012) Adaptionen festzustellen, bieten wöchentliche Messungen oder gleitende Mittelwertmessungen über 7 Tage eine bessere Validität als Werte die an einem einzigen Tag gemessen wurden. Es konnte gezeigt werden, dass HRV Daten die über den Verlauf einer Woche ermittelt wurden, eine aussagekräftige Darstellung über den Trainingsstatus bei Athleten mit Übertraining geben können. Signifikante Reduktionen der durchschnittlichen HRV Werte über den Zeitraum einer Woche konnten nur während Perioden mit Übertraining beobachtet werden (Plews et al., 2012). Wenn hingegen HRV Daten die an einem einzigen Tag erhoben wurden zur Analyse des Trainingszustandes herangezogen werden kann dies zu irreführend sein. Signifikante Reduktionen der HRV, die Indikatoren für nicht funktionellen „Overreaching“ (NFOR) sein können, traten auf obwohl Athleten normale Leistungsfähigkeit aufwiesen (Plews et al., 2013). Ruhemessungen die täglich in der Früh durchgeführt werden, scheinen Änderungen des autonomen Nervensystems, die durch Training hervorgerufen

werden, besser zu repräsentieren als einzelne Messungen (Stanley, Peake, & Buchheit, 2013).

Innerhalb der Literatur werden unterschiedliche HRV Indizes zur Beurteilung des autonomen Nervensystems herangezogen. Es konnte gezeigt werden, dass Indizes des Zeitbereichs weniger Standardmessfehler aufwiesen als spektrale Indizes der HRV (Al Haddad et al., 2011). Bei der Evaluierung von Training mit Hilfe von HRV Messungen wird empfohlen nur eine vagal abgeleitete HRV Variable heranzuziehen (Plews et al., 2013). Der In RMSSD ist am besten praktikabel da er sich im Gegensatz zu anderen Spektralindizes nicht signifikant von der Atemfrequenz beeinflussen lässt und deshalb besser für ambulante Maßnahmen geeignet ist (Penttilä et al., 2001). Die unterschiedlichen Ergebnisse von HRV Studien resultieren offenbar aus den täglichen individuellen Schwankungen der HRV, sowie aus der Vielzahl von fehleranfälligen HRV Indizes die zur Messung der Aktivität des ANS herangezogen werden.

2.1.3.4 Messung während Belastung

Während dynamischer körperlicher Belastung kommt es zu einem Anstieg der Herzfrequenz der durch die abgeschwächte Wirkung des Parasympathikus und die verstärkte Wirkung des Sympathikus bedingt wird (Bernardi & Piepoli, 2001; Brenner, Thomas, & Shephard, 1998). Die Messung der HRV ist eine valide Technik um nicht invasive Messungen der parasympathischen Aktivität, aber nicht die der sympathischen Aktivität, während körperlicher Belastung durchzuführen. Anhand von Stufentests auf dem Fahrradergometer konnte gezeigt werden, dass die HF exponentiell mit der Belastung abnimmt (Warren, Jaffe, Wraa, & Stebbins, 1997). Diese Annahme wird auch von der folgenden Studie unterstützt (Cottin, Papelier, & Escourrou, 1999). Spektralanalysen zeigten den Rückgang von parasympathischer Aktivität während steigender Belastung (25 %, 50 % und 75 % der VO_{2max}), als die spektrale Leistungsdichte des HF Bandes mit ansteigender Belastung signifikant absank. Jedoch nahm die Leistungsdichte des LF Bandes mit steigender Belastung ebenfalls ab, was darauf hinweist, dass die HRV Indizes LF und LF/HF keine guten Indikatoren für die kardiovaskuläre Modulation während Belastung darstellen (Cottin et al., 1999). Es wird vermutet, dass Katecholamine eine wichtigere Rolle bei der Aufrechterhaltung der erhöhten Herzfrequenz während Belastung haben als neurogene Faktoren (Kamath, Fallen, & Mckelvie, 1991).

In der Literatur sind jedoch gegensätzliche Ergebnisse zu finden. Im Zuge einer Studie von González-Camarena et al. (2000) wurden 10 Probanden HF- und Blutdruckvariabilität während dynamischer (30 % und 60 % der VO_{2max}) und statischer Belastung gemessen. Es kam während dynamischer Belastung zu einem Rückgang der parasympathischen Aktivität, jedoch auch zu einer Zunahme der sympathischen Aktivität und zu einer Steigerung aller HRV Indizes während statischer Belastung. Dies deutet auf eine Erhöhung der Aktivität beider Zweige des autonomen Nervensystems hin (González-Camarena et al., 2000).

Die Analyse der HRV während Belastung bleibt weiterhin ein Problem. Einerseits ist die Anzahl der bisher zu diesem Thema durchgeführten Studien gering, andererseits wird meistens von technischen Problemen berichtet die auf der Problematik beruhen, dass es sich bei den Messdaten nicht um stationäre Zeitreihen handelt. Ein weiteres Problem ist, dass keine einheitlichen Protokolle verwendet werden, wodurch große Schwierigkeiten beim Vergleich unterschiedlicher Studien bestehen.

2.1.4 HRV – Geschlechterspezifische Unterschiede

Das Geschlecht beeinflusst die HRV, jedoch weisen bisher durchgeführten Studie unterschiedliche Ergebnisse auf (Umetani, Singer, McCraty, & Atkinson, 1998). Die Literatur zeigt, dass HF-Werte bei Frauen im Vergleich zu Männern höher (Huikuri et al., 1996; Umetani et al., 1998) oder gleich (Bigger et al., 1995) sind. Eine Studie von Kuo et al. (1999) zeigte, dass Frauen zwischen 40 und 49 Jahren eine höhere HF aufwiesen als dies bei Männern in der selben Altersgruppe der Fall ist. Es konnte jedoch kein geschlechterspezifischer Unterschied eines HRV Parameters bei über 59 jährigen ProbandInnen festgestellt werden. Auch (Umetani et al., 1998; Voss et al., 2013) konnten bei ProbandInnen über 50 Jahren nur noch marginale Unterschiede von HRV Indizes, die bei jüngeren Altersgruppen noch deutlich waren, zwischen den Geschlechtern feststellen.

Geschlechterspezifische Unterschiede der Aktivität des ANS sind unter anderem auf Östrogen zurückzuführen. Es wurde gezeigt, dass die Aktivität des Parasympathikus durch Östrogen verstärkt wird und dadurch einen positiven Effekt auf die vagale Funktion des Herzens hat (Du, Dart, & Riemersma, 1994). Diese Ergebnisse werden von Kuo et al. (1999) bestätigt, die einen signifikanten Rückgang der parasympathischen Aktivität bei Frauen (über 50 Jahre) nach der Menopause

beobachten konnten. Dies unterstützt die Hypothese des positiven Effekts des weiblichen Sexualhormons auf die parasympathische Aktivität.

Bei Männern wurde hingegen eine höhere Aktivität des sympathischen Nervensystems, höhere sympathische Nervenaktivität der Muskulatur (Ettinger et al., 1996) sowie eine größere Anzahl an sympathischen Ganglien (Beaston-Wimmer & Smolen, 1991) und eine erhöhte LF/HF (Huikuri et al., 1996) gegenüber Frauen festgestellt. Diese Dominanz des sympathischen Nervensystems könnte zu einer erhöhten Mortalitätsrate bei Männern beitragen (Vanoli et al., 1991).

2.2 Physiologische Adaptionen – Kardiovaskuläre Leistungsfähigkeit

2.2.1 Ausdauertraining

Seit Anfang der 60er Jahre wurden viele positive Effekte von Ausdauertraining auf das kardiovaskuläre System dokumentiert. Untersuchungen konnten zeigen, dass regelmäßiges Ausdauertraining im aeroben Bereich zu signifikanten Steigerungen der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}), des Schlagvolumens, der arterio-venösen Sauerstoffdifferenz ($avDO_2$) sowie des Herzminutenvolumens führt (Blomqvist & Saltin, 1983). Mangelnde aerobe Kapazität (VO_{2max}) ist ein wichtiger Indikator für das Auftreten und Bestehen des metabolischen Syndroms (Katzmarzyk et al., 2004). Aerobes Ausdauertraining ist ein wichtiger Bestandteil bei der Rehabilitation von Patienten mit kardialen Zwischenfällen (Balady et al., 2007). Die aerobe Kapazität bei gesunden Personen (Myers, et al., 2002) und bei Patienten mit koronarer Herzkrankheit (Keteyian et al., 2008) ist ein eigenständiger Messwert zur Identifizierung von kardiovaskulärem Risiko.

Viele biochemische und physiologische Adaptionen, die nach Ausdauertraining stattfinden, sind vom Bedarf der Muskelzelle energetisch versorgt zu werden abhängig (Green, 2000). Es gibt unterschiedliche Trainingsmodalitäten die sich in der Praxis, angefangen bei Patienten mit koronaren Herzerkrankungen bis hin zu Profi-Athleten zur Steigerung muskulärer oxidativer Kapazitäten, etabliert haben. Dazu gehört kontinuierliches Ausdauertraining und hoch intensives Intervalltraining (HIIT) (Puhan, Schünemann, Frey, Scharplatz, & Bachmann, 2005). Es konnte gezeigt werden, dass bei Patienten mit dem metabolischen Syndrom hoch intensives Training die VO_{2max} zu einem höheren Grad steigerte, als Training mit

moderater Intensität (Tjønnå et al., 2008). Die Änderung der Belastungsintensität und der Dauer von Belastungs- und Ruheintervallen bestimmt welchen relativen Anteil der aerobe bzw. der anaerobe Stoffwechsel in der Zelle an der Energiebereitstellung hat. Ebenso ist die Menge des benötigten Sauerstoffs von diesen Faktoren abhängig (Laursen & Jenkins, 2002). Interessanterweise wurden bei gleichem Energieverbrauch und identer Trainingszeit unterschiedliche Adaptionen bei verschiedenen Trainingsformen festgestellt. Die Art und Weise wie ein Training gestaltet ist (Intensität, Dauer, Pausengestaltung) hat demzufolge unterschiedliche Auswirkungen auf die unterschiedlichen Stoffwechselsysteme die für die Energiebereitstellung im Muskel verantwortlich sind. Die Mechanismen die diesen Adaptionen zugrunde liegen und ob zentrale oder periphere Faktoren eine Rolle spielen ist bis jetzt noch nicht geklärt worden (Daussin et al., 2008).

Im peripheren Bereich ist die Nutzung von Sauerstoff (O_2) von qualitativen (Größe) und quantitativen (Anzahl) Faktoren der Kapillaren und Mitochondrien abhängig. In der Muskelzelle sind es die Mitochondrien die dafür verantwortlich sind mit Hilfe von O_2 den durch Muskelaktivität benötigten Energiebedarf zu decken (Hoppeler & Flück, 2002). Das vergrößerte Volumen der Mitochondrien bedeutet eine Steigerung der Fettoxidation und geht mit einer Steigerung der Enzyme Citrat-Synthase (CS) und β -hydroxycyl-CoA dehydrogenase (β -HAD) einher (Kiens, 1997). Diese Adaptionen verbessern nicht nur die Fähigkeit der Muskulatur Fette als Energiequelle zu nutzen, sie werden auch damit in Verbindung gebracht die Insulinsensitivität positiv zu beeinflussen (Goodpaster, Katsiaras, & Kelley, 2003). Die Kapillarendichte spielt bei der Bereitstellung von O_2 für die Muskelzelle und deren Mitochondrien eine wichtige Rolle. Die Skelettmuskelzelle ist dazu in der Lage durch Adaptionen der Kapillaren in Folge von Ausdauertraining seinen O_2 Zufluss zu erhöhen (Charifi et al., 2004).

Zentrale Adaptionen durch Ausdauertraining führen zu einem niedrigeren Ruhepuls sowie einem gesteigerten Blut- und Blutplasmavolumen. Diese Veränderungen führen zu einer größeren kardialen Ausstoßmenge und einer verbesserten Durchblutung der Muskulatur während Belastung (Green, Jones, & Painter, 1990). Die Steigerung aerober Leistungsfähigkeit ist abhängig von peripheren und zentralen Adaptionen, die durch Ausdauertraining hervorgerufen werden können. Wie sich diese jedoch genau hinsichtlich der VO_{2max} und der Beschleunigung der Ventilation, der kardialen Ausstoßmenge und der arteriovenösen Sauerstoffdifferenz (AVDO₂) auswirken, ist noch nicht geklärt (Saltin & Calbet, 2006). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Steigerungen der aeroben

Leistungsfähigkeit von der Verfügbarkeit von O₂ abhängen, wobei diese Adaptionen in Folge von Ausdauertraining stattfinden können.

2.2.2 Kontinuierliches Ausdauertraining

Kontinuierliches Ausdauertraining ist durch konstante submaximale Belastungen und gleichbleibender Sauerstoffaufnahme gekennzeichnet (Daussin et al., 2008). Kontinuierliches Ausdauertraining (65-75 % VO_{2max} bzw. ≤ 80 % HF_{max}; 1-2h/d) führt zu unterschiedlichen funktionellen und morphologischen Adaptation (Lausen & Jenkins, 2002). Muskuläre Kontraktionen fordern den aeroben und anaeroben Stoffwechsel zur Produktion von Adenosintriphosphat (ATP), um der Nachfrage entsprechend ausreichend Energie zur Verfügung stellen zu können. Kontinuierliches Ausdauertraining führt zu Steigerungen des muskulären Mitochondrienvolumens sowie der maximalen Kapazität von Kohlenhydrat- sowie Fettoxidation und ermöglicht somit die Aufrechterhaltung absolut höherer Leistungen. Das größere Mitochondrienvolumen führt zu einer verbesserten Sensibilisierung der Mitochondrien. Dies führt dazu, dass der Gehalt des Energieträgers Adenosindiphosphat (ADP) zu Beginn von muskulärer Arbeit schneller zur Verfügung steht. So wird der oxidative Stoffwechsel erhöht und der Bedarf an Substratphosphorylierung durch Spaltung von Phosphokreatin (PCr) und Glycogen gesenkt. Dies hat eine geringere Laktatproduktion zur Folge (LeBlanc, Howarth, Gibala, & Heigenhauser, 2004).

2.2.3 Hoch intensives Intervall Training

HIIT ist durch wiederholte Belastungen mit hoher Intensität für 30s bis einigen Minuten und durch Pausen (aktiv oder passiv) von 1-5 Minuten gekennzeichnet (Gibala & McGee, 2008). Die Schwankungsbreite der in der Literatur angegebenen Belastungs- und Pausenzeiten ist sehr unterschiedlich. Protokolle mit hoch-intensiven Kurzzeit-Intervallen (15 Sekunden Belastung, 15 Sekunden aktive Pause) wurden ebenfalls untersucht (Helgerud et al., 2007).

Hoch intensives Intervalltraining wird mit kurzen Belastungsphasen hoher Intensität, die durch kurze (aktive oder passive) Pausen unterbrochen werden, durchgeführt. Üblicherweise wird HIIT auf einem Laufband (laufen /gehen) oder einem Fahrradergometer durchgeführt (Kessler, Sisson, & Short, 2012). Außerdem wird HIIT als Intervalltraining beschrieben, dass durch hoch intensive Belastungsphasen, die durch aktive Pausen unterbrochen werden, gekennzeichnet ist (Wisløff et al., 2009). Die Variante mit aktiver Pause hat den Vorteil, dass sie den Abtransport von

Laktat aus der Muskelzelle unterstützt (Bangsbo, Graham, Johansen, & Saltin, 1994).

Eine weitere Form des HIIT Trainings ist auch bekannt als Sprint Intervall Training (SIT), das durch kurze (<30s) maximale Sprints gekennzeichnet ist und eine erhöhte aerobe Leistungsfähigkeit in einem kurzen Zeitrahmen bewirkt (Gibala et al., 2006). Erstaunlich ist, dass SIT ähnliche Adaptation der kardiorespiratorischen Fitness und oxidative Kapazität in der Muskulatur bewirkt, die üblicherweise dem kontinuierlichen Ausdauertraining zugeschrieben werden (Burgomaster et al., 2008).

2.2.3.1 Adaptionen durch HIIT

Unmittelbare Reaktionen des Körpers auf HIIT sind Steigerungen von Herzfrequenz, Hormonen (Katecholamine, Cortisol und Wachstumshormone), venösem Blutzucker und dem Blutlaktatspiegel (S. H. Boutcher, 2010).

Zentrale Adaptationen in Folge von Ausdauertraining fördern den Transport von Sauerstoff zur Arbeitsmuskulatur, der bei hoch intensiven Muskelbelastungen eine Steigerung des Schlagvolumens (SV) zugeschrieben werden kann. Diese Erhöhung des SV wird durch einen Anstieg der kontraktilen Kraft des linken Ventrikels und/oder durch einen erhöhten systolischen Druck ausgelöst. Dieser zieht wiederum eine Steigerung des enddiastolischen Volumens nach sich (Laursen & Jenkins, 2002).

Durch HIIT kommt es zu signifikanten Steigerungen die mit einer Erhöhung des SV einhergehen (Helgerud et al., 2007). Ein maßgeblicher Mechanismus der zu Anpassungen der aeroben Fitness durch HIIT führt ist der Abbau von Phosphocreatin (Trump, Heigenhauser, Putman, & Spriet, 1996).

Bei mäßig Trainierten führt HIIT zu einer gesteigerten Kapillarisation der Skelettmuskulatur (Essen, Hagenfeldt, & Kaijser, 1977) sowie zu Anpassungen von Typ 1 (Linossier, Denis, Dormois, Geyssant, & Lacour, 1993) und Typ 2 (Billat, 2001) Muskelfasern. Diese Adaptationen gehen mit einer Steigerung wichtiger aerober Enzyme einher. (Burgomaster et al., 2008) konnte erhöhte Aktivitäten von bedeutenden mitochondrialen Enzymen CS, β -HAD und „Pyruvat-Dehydrogenase“ (PDH) nach einer 6 Wöchigen Trainingsintervention mit HIIT feststellen. Ebenfalls kam es zu einem Anstieg des Proteins „Peroxisome proliferator activated receptor gamma coactivator 1 alpha“ (PGC-1 α). Auch folgende Studie konnte zeigen, dass es

in Folge von SIT zu einer Aktivierung von PGC-1 α kam, dem eine wichtige Rolle in der Regulation der mitochondrialen Biogenese zukommt (Gibala et al., 2009). Es wurde gezeigt, dass HIIT zu einer Aktivierung von „5'-AMP-aktivierte Proteinkinase“ (AMPK) und p38 mitogen-aktivierte Proteinkinase (MAPK) führt. Diese beiden auf Training ansprechenden signalisierenden Kinasen phosphorylieren (anhängen einer Phosphatgruppe) und aktivieren PGC-1 α . Der hohe Anteil an PGC-1 α im Zellkern in Folge von HIIT scheint bei der Koaktivierung von Transkriptionsfaktoren beteiligt zu sein um mitochondriale Gentranskription zu steigern. Dies führt letztendlich zu einem größeren mitochondrialen Proteingehalt, wodurch die Biogenese der Mitochondrien (Neubildung von Mitochondrien) verstärkt wird (Gibala, Little, MacDonald, & Hawley, 2012).

Es scheint, dass die intensiven Kontraktionen während HIIT einen höheren Stimulus, als Trainingsinterventionen mit niedriger Intensität hervorrufen (Perry, Heigenhauser, Bonen, & Spriet, 2008). Die scheinbar gleichen Steigerungen der mitochondrialen oxidativen Kapazität durch HIIT (Burgomaster et al., 2008; Talanian, Galloway, Heigenhauser, Bonen, & Spriet, 2007) und moderatem Ausdauertraining (LeBlanc et al., 2004) weisen darauf hin, dass die stärkeren Veränderungen von metabolischen Signalen den geringeren zeitlichen Stimulus kompensieren (Perry et al., 2008). Die Steigerungen vom Gehalt an Calcium und Adenosinmonophosphat (AMP) im Zytoplasma während muskulärer Kontraktion sind metabolische Signale. Diese aktivieren weitere Signalwege, die zu einer Regulierung der Genexpression (Biosynthese von RNA und Proteinen) von mitochondrialen Proteinen führen (Hood, 2001). Es könnte aber auch sein, dass die sich wiederholenden Intervalle (Stimuli) zu einem pulsierenden Signal führen und somit die mitochondriale Biogenese einleiten. Zukünftige Untersuchungen müssen durchgeführt werden um diese Mechanismen vollständig erklären zu können (Perry et al., 2008). Diese Adaptationen könnten jedenfalls die ausschlaggebenden Mechanismen sein die für die aeroben Adaptationen bei HIIT verantwortlich sind.

Daraus lässt sich schließen, dass Adaptationen, die dem zeitaufwändigeren kontinuierlichem Ausdauertraining zugesprochen werden, auch in wesentlich kürzerer Zeit erreicht werden können (Bayati, Farzad, Gharakhanlou, & Agha-Alinejad, 2011). PGC-1 α führt scheinbar zu Steigerungen der oxidativen Kapazität, verbessert die Glucoseaufnahme sowie die Resistenz vor Sarkopenie (Benton et al., 2008; Wenz, Rossi, Rotundo, Spiegelman, & Moraes, 2009) und scheint dadurch ein

wichtiger Faktor des HIIT zu sein um die Gesundheit positiv zu beeinflussen. Des Weiteren beeinflusst PGC-1 α lokale sowie systemische Entzündungen und scheint auch die Genexpression von Zytokinen und Entzündungswerten wie „tumor necrosis factor α “ (TNF α) und Interleukin-6 (IL-6) zu regulieren (Handschin, 2009).

2.3 Sportphysiologische Aspekte der HRV

2.3.1 Kurzfristige Adaptionen des Herzkreislaufsystems

Kardiovaskuläre Änderungen während Trainings hängen mit neuronalen und chemischen Faktoren zusammen. Das sympathische Nervensystem, Reflexe kontrahierender Muskeln und der Baroreflex stehen hier für die neuronalen Faktoren. Die zerebrokortikale Aktivierung des sympathischen Nervensystems führt zu einer Steigerung der Herzfrequenz, einer erhöhten Kontraktionskraft des Herzens sowie zu peripherer Vasokonstriktion (Aubert et al., 2003). Körperliche Aktivität wird mit hämodynamischen Änderungen assoziiert und beeinflusst die Beanspruchung des Herzens (Rost & Hollmann, 1983). Die Reaktion des Herzkreislaufsystems auf körperliche Aktivität hängt von der Art und der Intensität des Trainings ab. Auf das Herz wirkt Ausdauertraining vor allem durch eine erhöhte Volumenbelastung, wobei der wichtigste Effekt bei Krafttraining die Druckbelastung auf das Herz ist. (Roy, Doyon, Dumesnil, Jobin, & Landry, 1988).

Direkt nach Beginn körperlicher Aktivität werden Barorezeptoren in den Arterien aktiviert die zu einer Reduzierung des Parasympathikus führt. Wenn die Belastung anhält kommt es zu einer ständigen Zunahme der efferenten Aktivität des Sympathikus (C. Orizio et al., 1988). Das Verhältnis der Aktivierung des Sympathikus und der Inhibierung des Parasympathikus hängt jedoch hauptsächlich vom Grad der Belastungsintensität ab und führt nicht immer zu einer HRV Änderung (Aubert et al., 2003).

Bei Abbruch der körperlichen Belastung kommt es zu einem abrupten Abfall der Herzfrequenz und des Herzzeitvolumens, außerdem wird die Aktivität des sympathischen Nervensystems stark reduziert. Der Blutdruck wird durch den Baroreflex stabilisiert und die Aktivität des Parasympathikus nimmt zu (Aubert et al., 2003).

2.3.2 Langfristige Adaptionen des Herzkreislaufsystems

Unterschiedliche Belastungen bewirken unterschiedliche Anpassungen des kardiovaskulären Systems. Durch langfristig durchgeführtes Ausdauertraining vergrößern sich der linksventrikuläre Durchmesser, die Wanddicke sowie die gesamte Herzmasse (R. Fagard et al., 1983). Diese Zunahme der linksventrikulären Muskelmasse wird „Sportherz“ genannt. (Pelliccia & Maron, 1997). In der Literatur werden zwei unterschiedliche Arten des „Sportherz“ beschrieben, ein „Kraftherz“ und ein „Ausdauerherz“. Es wird angenommen, dass es bei Personen die Sport mit einer hohen dynamischen Komponente (z.B. Laufen) betreiben, vorwiegend zu einer Vergrößerung des linken Ventrikels und einer dazu proportionalen Verdickung der Herzwand kommt (Pluim, Zwinderman, van der Laarse, & van der Wall, 2000). Ursache ist die Volumenbelastung bei Ausdauertraining durch hohes Herzzeitvolumen, das bei intensiver Belastung auf bis zu 40L/min ansteigen kann (Ekblom & Hermansen, 1968). Es wird angenommen, dass Ausdauersportler eine exzentrische linksventrikuläre Hypertrophie aufweisen. Diese ist durch ein unverändertes Verhältnis zwischen linksventrikulärer Wanddicke und linksventrikulärem Radius gekennzeichnet. Jedoch muss angemerkt werden, dass es bei Ausdauertraining sehr wohl auch zu einer Steigerung der Druckbelastung (Blutdruckanstieg) kommt, die mit steigender Intensität zunimmt. Dies führt zu einem Anstieg der Wanddicke bei Ausdauersportlern. Ausdauertraining senkt die Herzkreislaufbelastung während Ruhe und submaximaler Belastung. Dies geschieht durch das erhöhte Schlagvolumen und die Senkung der Herzfrequenz, wodurch es zu einem effizienteren Druck-Zeit-Verhältnis kommt. Während körperlicher Belastung ist unter physiologischen Umständen der Anstieg der Herzfrequenz der wichtigste Faktor für den Anstieg des Herzminutenvolumens (Pluim et al., 2000). Tachykardie kann durch neuronale Stimulation oder durch einen gesteigerten Katecholaminspiegel im Blut hervorgerufen werden (Mazzeo & Marshall, 1989). Das vergrößerte Herzvolumen und die gesteigerte Kontraktionsfähigkeit führen sowohl in Ruhe, als auch während submaximaler und maximaler Belastung, zu einem höheren Schlagvolumen und einer Reduktion der Herzfrequenz (Brooks, Fahey, & White, 1996). Die bei Ausdauersportlern beobachtete Ruhebradykardie geht mit erhöhter Aktivität des Parasympathikus und einer verringerten Aktivität des Sympathikus einher (Puig et al., 1993). Die verringerte Herzfrequenz erhöht das Schlagvolumen durch die verlängerten Perioden der Diastole (Brooks et al., 1996). Des Weiteren führt Ausdauertraining zu einer Reduktion des systolischen und diastolischen Blutdrucks während Ruhe und submaximaler Belastung (Huston,

Puffer, & Rodney, 1985). Ausdauertraining hat Einfluss auf die Freisetzung von Katecholaminen. Ausdauertrainingsprogramme führen zu einer geringeren Freisetzung von Katecholaminen während submaximaler Belastung (Claudio Orizio et al., 1988).

Bei Kraftsportlern die hauptsächlich statisches oder isometrisches Training (z.B. Gewichtheben) durchführen, kommt es vorwiegend zu einer Verdickung der linksventrikulären Herzwand, ohne Zunahme der linksventrikulären Kammergröße. Dies ist auf die hohe Druckbelastung, die mit einem hohen systemischen arteriellen Druck einhergeht, zurückzuführen die bei dieser Art von Belastung auftritt (Pluim et al., 2000). Jedoch kommt es bei Krafttraining auch zu einer Steigerung der Herzfrequenz sowie des Herzzeitvolumens (MacDougall, Tuxen, Sale, Moroz, & Sutton, 1985). Es wird angenommen, dass Kraftsportler konzentrische linksventrikuläre Hypertrophie entwickeln, die mit einem erhöhten Verhältnis zwischen Wanddicke und Ventrikelradius charakterisiert wird (Pluim et al., 2000).

2.3.3 Auswirkungen von Training auf die HRV

Hoch ausdauertrainierte Athleten haben eine niedrigere Ruheherzfrequenz als inaktive Personen (R. H. Fagard et al., 1997). Die Antizipation von physischer Aktivität inhibiert die Impulse des Nervus vagus auf das Herz und steigert die Aktivität des Sympathikus (Roure et al., 1998). Die Inhibierung der parasympathischen Kontrollareale und die gemeinsame Aktivierung der sympathischen Kontrollareale in der Medulla oblongata bewirken eine Steigerung der Herzfrequenz und eine verstärkte myokardiale Kontraktilität (Aubert et al., 2003). Die relative Rolle der beiden Systeme des ANS hängt von der Trainingsintensität ab (Roure et al., 1998). Es konnte gezeigt werden, dass Tachykardie, die durch dynamische Belastung auf einem Radergometer hervorgerufen wurde, von einem biphasischen Mechanismus gesteuert wird. Dieser Mechanismus führt zu einer schnellen Senkung der vagalen Aktivität und einer Steigerung der sympathischen Aktivität, wobei die Stärke des Mechanismus mit der Belastungsintensität ansteigt (Brenner et al., 1998).

Die Belastungsintensität hat eine entscheidende Auswirkung auf die HRV. Moderat trainierte Probanden zeigten bei moderater Trainingsbelastung einen Anstieg der aeroben Fitness sowie der HRV. Wenn die Belastung hingegen gegen 100 % der maximalen individuellen Trainingsbelastung geht, kommt es zu einer Reduktion der

HRV Indizes (Manzi et al., 2009). Phasen reduzierter Belastung führen zu einer Normalisierung der HRV. Es konnte gezeigt werden, dass progressive Überlastung über einen Zeitraum von 3 Wochen zu einer Reduktion der HRV von 38 % bei Langstreckenlaufen führte, die sich nach einem Zeitraum von einer Woche bei reduzierter Trainingsbelastung wieder normalisierte (Pichot et al., 2000). Sowohl moderat als auch hoch austrainierte Athleten zeigen Steigerungen sowie Reduktionen der HRV in Folge von moderaten und intensiven Trainingsbelastungen. Die Relation zwischen Trainingsbelastung und HRV (Manzi et al., 2009) sowie zwischen HRV und Fitness (VO_{2max}) (Buchheit, Al Haddad, Mendez-Villanueva, Quod, & Bourdon, 2011) kann generell als glockenförmig angesehen werden.

2.3.4 Kurzfristige Auswirkungen von Training auf die HRV

HRV Messungen unmittelbar nach Beanspruchung können Aufschluss über die Antwort des Körpers auf Training geben, die mit körperlicher Fitness korreliert (Hautala et al., 2001). Die Analyse der HRV nach einem 75km Langlaufrennen, an dem 10 gesunde, männliche (36 ± 11 Jahre) Langläufer teilnahmen, ergab signifikante Reduktionen der HF sowie SDNN am Tag nach der Belastung. Am zweiten Tag nach der Belastung kehrten die Werte jedoch wieder auf ihr Ausgangsniveau zurück. Diese Studie zeigte eine Reduktion der parasympathischen Aktivität nach extensiver Ausdauerbelastung und demonstrierte, dass die Erholungsdauer eine inverse Korrelation mit der VO_{2max} aufweist (Hautala et al., 2001).

Untersuchungen haben gezeigt, dass Messergebnisse der HRV unmittelbar nach Belastung von der Intensität des Trainingsreizes abhängig sind. Eine Studie von (Mourot, Bouhaddi, Tordi, Rouillon, & Regnard, 2004) zeigte bei gleichem Energieaufwand unterschiedliche Reaktionen des ANS in Folge von HIIT und kontinuierlichem Ausdauertraining. Die HF-Werte nach HIIT waren im Vergleich zu kontinuierlichem Ausdauertraining während der ersten Stunde nach Belastung reduziert (Abb.9). Die langsamere Erholung des ANS und die Normalisierung der parasympathischen Aktivität unmittelbar nach Belastung hängen von der Belastungsintensität ab.

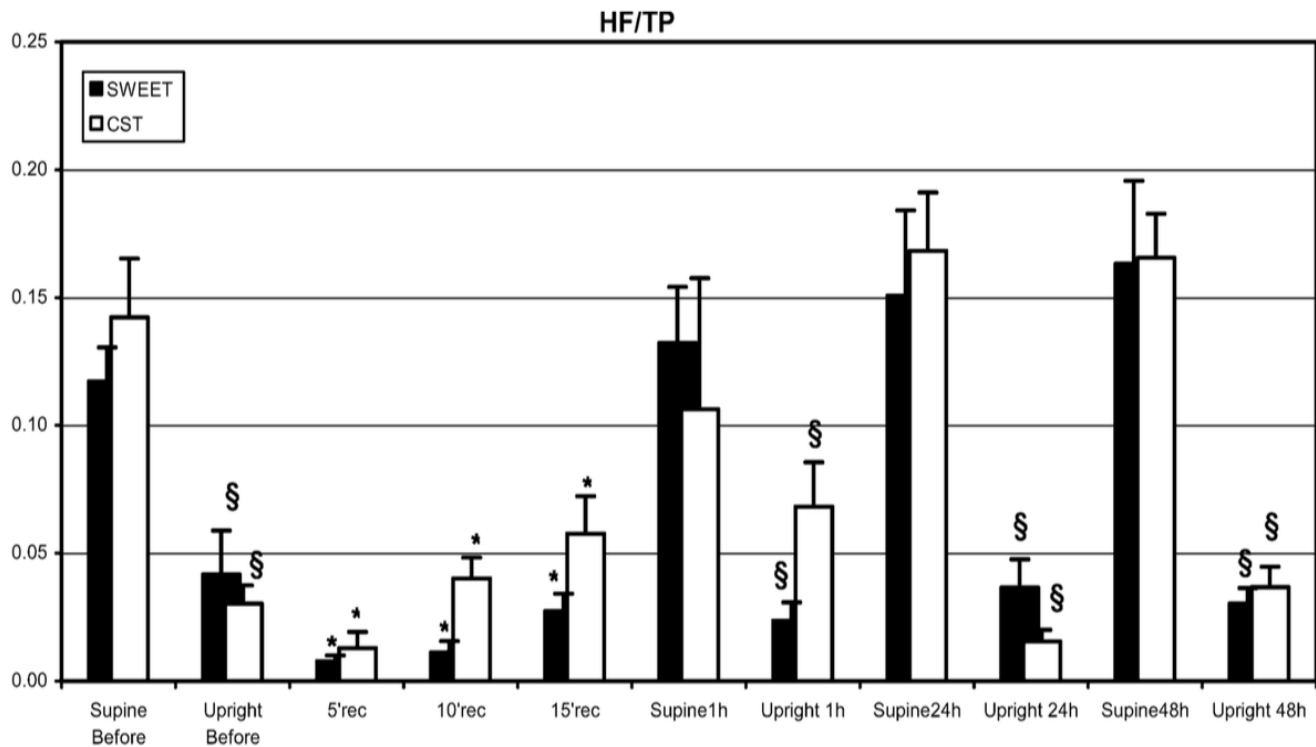


Abb. 9: Evaluation der parasympathischen Nervenaktivität durch Spektralanalyse der HRV vor und nach Belastung (Wenige Sekunden bis 48 Stunden nach Belastung) in stehender und liegender Position in Folge von HIIT (SWEET) und kontinuierlichem Training (CST) (Mourrot et al., 2004).

Dieser Effekt resultiert vermutlich aus der reduzierten Aktivität des Parasympathikus oder aus der verstärkten Aktivität des Sympathikus während hoch intensiver Belastung.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass bessere körperliche Fitness zu schnellerer Regeneration der HRV Indizes führt. Hoch ausdauertrainierte männliche Athleten (VO_{2max} 72 ± 5 ml/kg/min) zeigten gegenüber trainierten männlichen Läufern (VO_{2max} 60 ± 5 ml/kg/min) deutlich schnellere Regenerationszeiten der HRV. Intensitäten über der ventilatorischen Schwelle führte bei beiden Gruppen zu verlängerter Zeitdauer bis die HRV ihren Normalwert erreicht hatte, wobei sich die Werte der hoch ausdauertrainierten Athleten schneller erholten. Diese Studie zeigte, dass die Erholung der HRV vom physiologischen Leistungsstand des Athleten sowie von der Intensität der Belastung abhängt (Seiler, Haugen, & Kuffel, 2007). Auch (Kaikkonen, Nummela, & Rusko, 2007) konnte zeigen, dass die Belastungsintensität für die Erholungsdauer der HF-Leistung sowie der TP entscheidend ist.

Bei der Untersuchung von vier unterschiedlichen Trainingsprotokollen (HIIT mit 85 % und 93 % $\text{VO}_{2\text{max}}$; und kontinuierliches Ausdauertraining mit 80 % und 85 % $\text{VO}_{2\text{max}}$) mit unterschiedlichen Belastungsintensitäten kehrten LF und TP im Verlauf von 30 Minuten zu ihrem Ausgangswert zurück. Die HF steigerte sich ebenfalls über den Verlauf der Zeit, kehrt jedoch nach 30 Minuten nicht auf seinen Ruheausgangswert zurück. Gesteigerte Intensität führte zu einer langsameren Erholung der HF in Folge von HIIT und kontinuierlichem Training (Kaikkonen, Rusko, & Martinmäki, 2008).

Weitere Untersuchungen von (Kaikkonen, Hynynen, Mann, Rusko, & Nummela, 2010) konnten signifikante Verzögerungen der Normalisierung der HRV nach hoch intensivem Training sowie nach Langzeitausdauerbelastungen beobachten. Des Weiteren konnten signifikante Zusammenhänge zwischen HRV Messwerten unmittelbar nach Belastung und der Belastungsintensität (lt. subjektivem Belastungsempfinden und Laktatkonzentration im Blut) aufgezeigt werden.

Unmittelbar nach Belastungsende steigen die HRV Werte wieder an, was auf eine zunehmende Vagusaktivität schließen lässt. Im Verlauf der kurz- bis mittelfristigen Erholungsphase (5 bis 120 Minuten) erreichen die HRV Indizes in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflussgrößen ihr Ausgangsniveau oder übersteigen dieses (Javorka, Zila, Balharek, & Javorka, 2002). Trainingsintensität, Trainingsdauer, Trainingsmethode und der Trainingszustand des Athleten sind die wichtigsten Einflussgrößen auf den Zeitverlauf der Wiederherstellung der Vagusaktivität (Sugawara, Murakami, Maeda, Kuno, & Matsuda, 2001). In Abbildung 10 wird die Reaktion des ANS und dessen kurz- bis mittelfristigen Wiederherstellungsphase in Abhängigkeit der Trainingsintensität dargestellt (Hottenrott, 2007). Während der frühen und mittelfristigen Wiederherstellungsphase (5 Minuten bis 2 Stunden) kommt es bei reduzierter HRV zuerst zu einer Steigerung der LF und in weiterer Folge zu einer starken Zunahme der HF die den Anstieg der LF deutlich übertrifft (Hautala et al., 2001). Während der langfristigen Erholungsphase (24 bis 72 Stunden) kommt es in weiterer Folge zu einer Normalisierung der HRV auf das Anfangsniveau oder die HRV steigt im Zuge eines Rebound-Effekts über das Ausgangsniveau hinaus (Berbalk, Bauer, & Rombach, 2001).

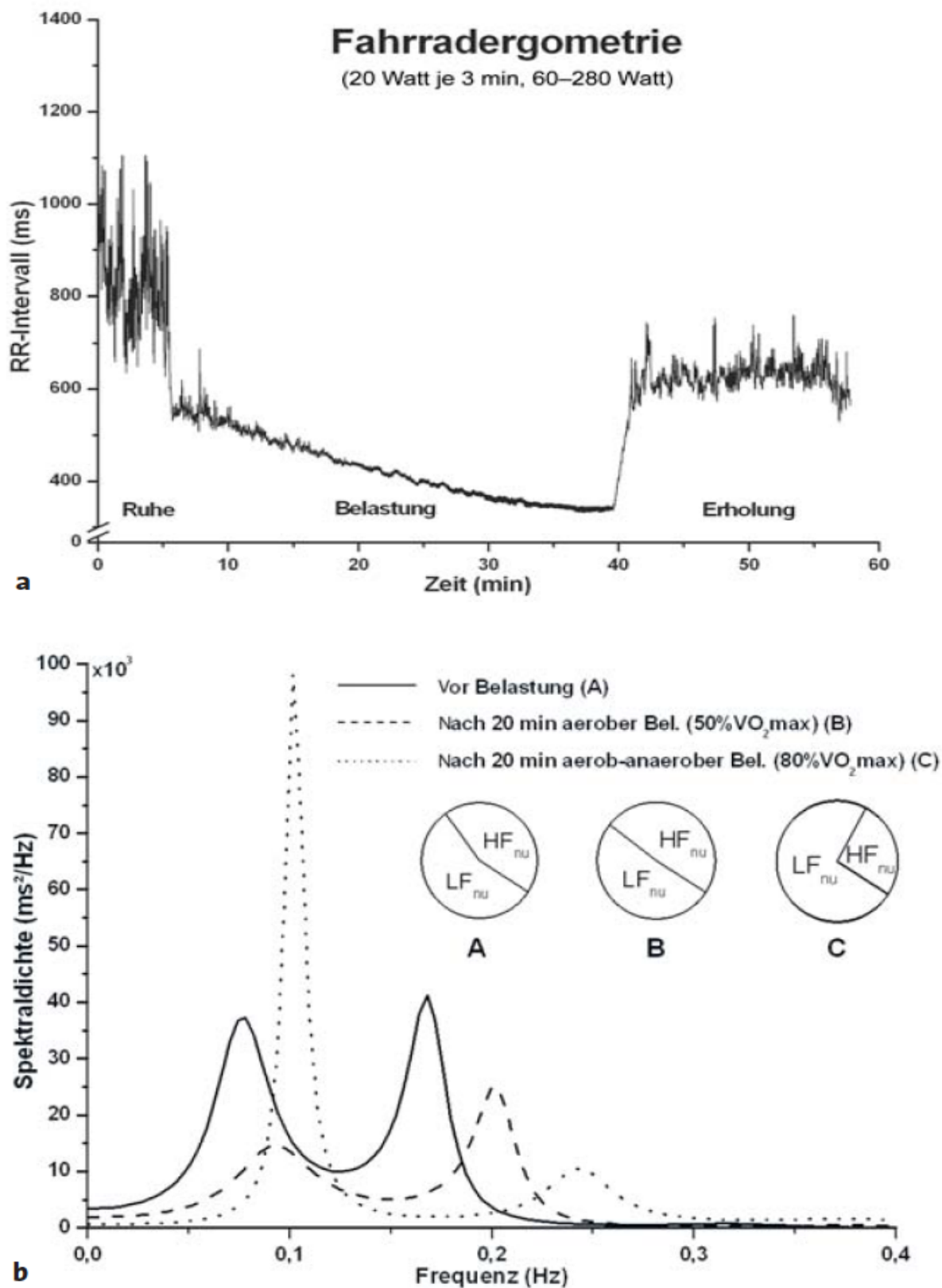


Abb. 10: Ein Tachogramm (a) eines Freizeitsportlers während einer Stufenergometrie (60–280W; alle 3 Min Steigerung des Belastungsininkrements um 20W). Leistungsdichtespektrum (b) vor, während und nach 20 Minuten Dauerbelastung (A= Ruhe; B= aerobe Bel. bei 50 % $\text{VO}_{2\text{max}}$; C= aerobe-anaerobe Bel. bei 80 % $\text{VO}_{2\text{max}}$) (Hottenrott, 2007).

Die Ergebnisse der folgenden Studie weisen darauf hin, dass höhere Trainingsintensität zu größeren unmittelbaren Reduktionen des HF-Spektrums führt, wobei diese jedoch langfristig zu größeren Verbesserungen der HRV führen können.

HIIT führte zu signifikanten Verbesserungen sowohl der HF als auch der LF und führte zu größeren Verbesserungen der HF im Vergleich zu aerobem Ausdauertraining. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die größere Steigerung der HRV in Folge von HIIT durch die größeren Steigerungen der kardialen vagalen Aktivität hervorgerufen wird. Anzumerken ist, dass die Leistung des HF-Spektrums an Tagen nach HIIT-Trainingseinheiten reduziert war, wobei dies nach aerobem Training nicht der Fall war. HIIT führt offenbar zu akutem Stress des ANS der jedoch keinen negativen Einfluss auf Adaptionen der HRV dieser Trainingsintervention hatte (Kiviniemi et al., 2014).

Auch HIPT führt zu signifikanten Reduktionen von HRV Indizes nach Belastung. Eine Studie zeigte signifikanten Reduktionen der HF und lnRMSSD bei 10 körperlich aktiven Männern unmittelbar nach Belastung. Im Vergleich zu HIIT führte CrossFit®-basiertes HIPT zu größeren Reduktionen der Aktivität des ANS unmittelbar nach Belastung (Brian et al., 2015). Ob diese akuten Reduktionen in Folge von HIPT auch zu verbesserter HRV Indizes führen kann muss erst gezeigt werden.

2.3.5 Langfristige Auswirkungen von Training auf die HRV

Positive Effekte von körperlichem Training wurde bei Patienten nach Myokardinfarkt (Malfatto et al., 1998) und bei Patienten nach Herztransplantation (Meyer et al., 1996) berichtet. Es kann also davon ausgegangen werden, dass körperliche Belastung eine effektive Methode ist die Balance des ANS und die körperliche Fitness zu verbessern (Aubert et al., 2003). Folgende Studie untersuchte den Einfluss von körperlichem Training auf HRV Parameter bei 11 jungen inaktiven aber gesunden Männern zwischen 24 und 40 Jahren (Melanson & Freedson, 2001). Die Teilnehmer führten ein moderates bis intensives Ausdauertraining auf einem Fahrradergometer an 3 Tagen pro Woche für 30 Minuten über einen Zeitraum von 12 Wochen durch. Dieses Trainingsprotokoll führte zu einer gesteigerten Aktivität des Parasympathikus. Dies wurde durch signifikante Steigerungen der Leistung im HF-Bereich sowie durch signifikante Steigerungen von Zeitbereichsparametern (pNN50 und rMSSD), die mit der Aktivität des Parasympathikus in Verbindung gebracht werden, belegt.

Eine junge Population (20-22 Jahre) zeigte signifikante Änderungen des HF – Spektrum nach 6 Monaten aerobem Training, wie in (Abb. 11) zu sehen ist (Aubert et al., 2003).

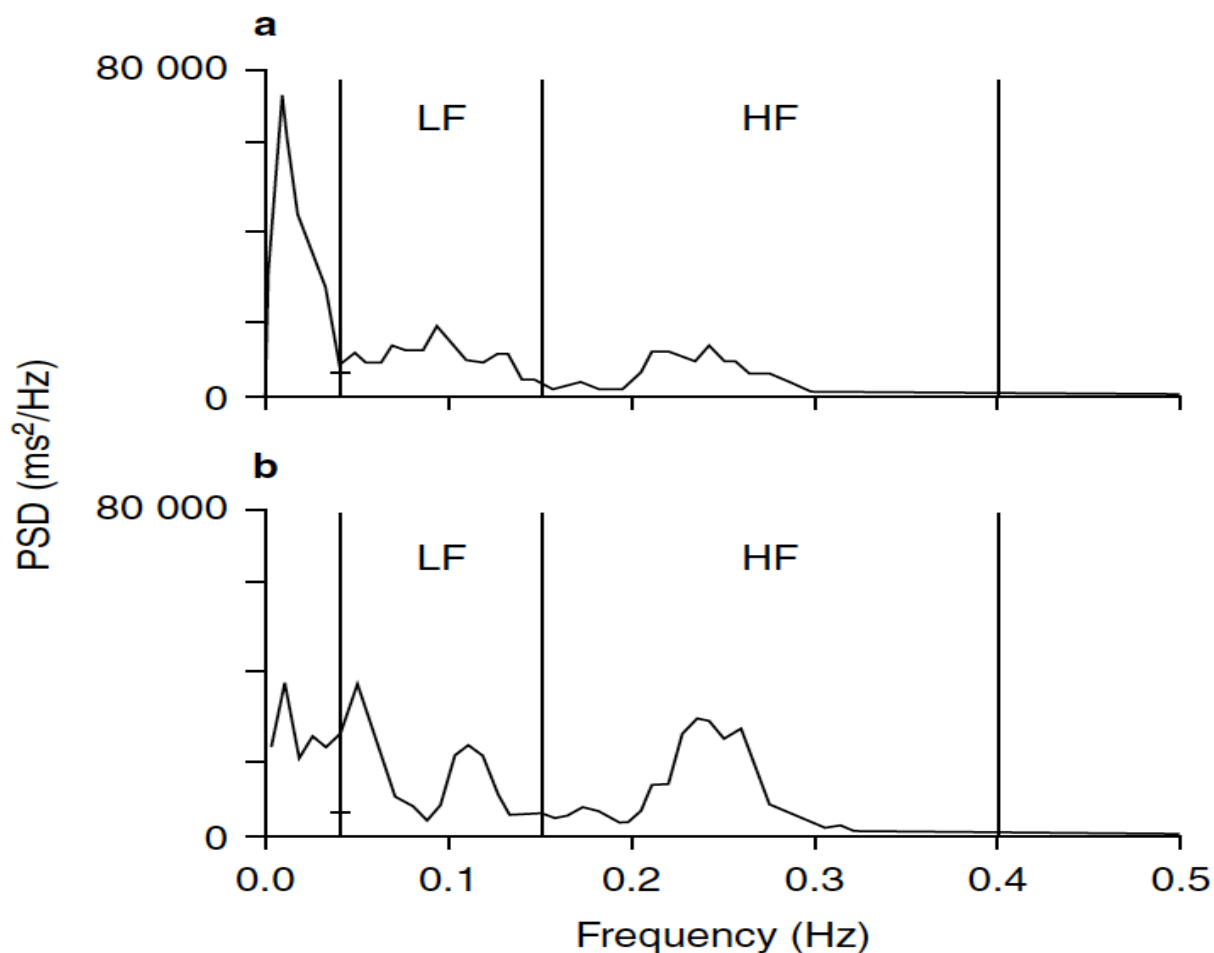


Abb. 11: (a) Ein Tachogramm mit Aufnahmen der Spektralleistungsdichte einer jungen inaktiven Person vor der Trainingsintervention ($\text{HF} = 812.3 \text{ ms}^2$) und (b) die selbe Person nach 6 Monaten aerobem Training ($\text{HF} = 1878.4 \text{ ms}^2$) (Aubert et al., 2003).

Auch J. B. Carter et al. (2003) konnten eine Steigerung von HRV Indizes in Folge von HRV feststellen. Mittels Frequenzanalyse wurden Änderungen der HRV untersucht, die vor und nach der Trainingsintervention gemessen wurde. Das Trainingsprotokoll wurde von 12 jungen Erwachsenen (19-21 Jahren) und 12 Erwachsenen mittleren Alters (40-45 Jahren) mit gemischtem Geschlecht (je 6 weibliche und 6 männliche ProbandInnen) durchgeführt. Alle ProbandInnen waren trainierte Läufer und führten das gleiche Trainingsprotokoll über einen Zeitraum von 12 Wochen durch. Die Trainingsintervention führte zu einer signifikanten Reduktion der Herzfrequenz in Ruhe als auch während submaximaler Belastung. Dabei kam es bei beiden Altersgruppen zu einer signifikanten Steigerung der „total power“ sowie der „high-

frequency-power“ (HF). Die Gruppe der jungen Erwachsenen zeigte jedoch einen größeren Anstieg der TP. Ausdauertraining führt zu Adaptationen des kardiovaskulären Systems die durch HRV Messungen aufgezeigt werden können (J. B. Carter et al., 2003).

Zu gegenteiligen Ergebnissen kamen (S. H. Boutcher & Stein, 1995) die keine Änderungen der HRV bei 19 Männern mittleren Alters (46.2 ± 1.6 Jahre) nach einer Trainingsintervention über einen Zeitraum von 8 Wochen messen konnten. Trotz einer Zunahme der VO_{2max} (+12 %) kam es zu keinen Veränderungen der LF- und HF-Bänder. Zu der selben Schlussfolgerung kamen (Perini, Orizio, Baselli, Cerutti, & Veicsteinas, 1990) die keine Änderungen der HRV Parameter nach 8 Wochen aerobem Training bei 8 Frauen (73.9 ± 3.5 Jahre) fanden.

Viele physiologische Faktoren beeinflussen die Ergebnisse dieser Studien. Einer der wichtigsten Faktoren ist das Alter, das zu den widersprüchlichen Ergebnissen in der Literatur führt (Aubert et al., 2003). Es ist bekannt, dass HRV Parameter mit dem Alter absinken (Ramaekers, Ector, Aubert, Rubens, & Van de Werf, 1998). Körperliches Training führt bei jungen Erwachsenen (Al-Ani, Munir, White, Townend, & Coote, 1996) zu Steigerungen der HRV, dies gilt jedoch nicht für Personen mittleren (S. H. Boutcher & Stein, 1995) oder hohen Alters (Davy, Willis, & Seals, 1997). Des Weiteren schwanken Dauer, Intensität, der Trainingsschwerpunkt sowie das Geschlecht sehr stark zwischen den Studien (Aubert et al., 2003).

In den letzten Jahren wurden auch zahlreiche Studien bezüglich HIIT und Langzeitänderungen der HRV durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass zwei unterschiedliche HIIT Trainingsinterventionen die jeweils 3 Mal pro Woche über einen Zeitraum von 6 Wochen durchgeführt wurden zu signifikanten Steigerungen der VO_{2max} , HF und TP bei gesunden inaktiven Probandinnen führt (Rakobowchuk, Harris, Taylor, Cubbon, & Birch, 2013). In einer weiteren Studie konnte ebenfalls gezeigt werden, dass HIIT über einen Zeitraum von 6 Monaten zu signifikanten Steigerungen von HRV Indizes (TP, ULF, SDNN und SDANN) führt (Munk et al., 2010).

Diese Daten werden von Kiviniemi et al. (2014) unterstützt, die den Effekt von HIIT auf die HRV (4-6 x 30 Sekunden bei maximaler Arbeitsleistung, 4 Minuten Pause) im Vergleich zu aerobem Ausdauertraining (40-60 Minuten bei 60 % maximaler Arbeitsleistung) untersuchten. Beide Protokolle führten bei je 13 inaktiven

Probanden zu signifikanten Steigerungen der VO_{2max} . HIIT führte zu signifikanten Verbesserungen der HF als auch der LF und führte zu größeren Verbesserungen der HF im Vergleich zu aerobem Ausdauertraining (Kiviniemi et al., 2014).

2.3.6 Negative Auswirkungen von Training auf die HRV

Der Begriff „Overtraining“ (OT) wird verwendet um den Prozess von intensivem Training zu beschreiben der ein mögliches „Overreaching“ (OR) hervorruft. OR ist ein kurzzeitiges Ungleichgewicht von Stressfaktoren und der Fähigkeit des Körpers sich zu regenerieren und führt zu Erschöpfung sowie zu Leistungsabfall (Meeusen et al., 2006). Während OR als wichtige Komponente in Trainingszyklen von Leistungssportlern angesehen wird kann anhaltendes OR zu einem Zustand des NFOR führen, der mit Leistungsabfällen in Verbindung gebracht wird, die mehrere Wochen oder Monate andauern können (Meeusen et al., 2013).

Bisherige Studien die durch NFOR oder OR bedingte Änderungen der HRV untersucht haben, kamen jedoch auf sehr unterschiedliche Ergebnisse. Eine Studie von (Hedelin, Wiklund, Bjerle, & Henriksson-Larsén, 2000) die an professionellen Langläufern durchgeführt wurde zeigte, dass OT zu reduzierten Wettkampfleistungen, schlechterer Stimmung und erhöhten HRV Werten führt. Gegensätzliche Ergebnisse zeigte eine Studie mit Ausdauerathleten die OT-Symptome und reduzierte HRV Parameter nach einer intensiven 6 bis 9 wöchigen Trainingsperiode aufwiesen (Uusitalo, Uusitalo, & Rusko, 2000). Die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen HRV und OT/NFOR liegen vermutlich an den unterschiedlichen methodologischen Ansätzen die bei HRV Messungen angewendet werden und der Schwierigkeit zwischen den unterschiedlichen Stadien von OT -Prozessen (z.B. OT, OR, NFOR und OT Syndrom) zu differenzieren (Meeusen et al., 2013). Die mögliche Existenz zwei unterschiedlicher Arten des OT (Parasympathikus oder Sympathikus) kann ein weiterer Grund für gegensätzlichen Forschungsergebnissen sein (Kuipers & Keizer, 1988).

2.4 Funktionelles Training

Der Begriff „Funktionelles Krafttraining“ wurde in den letzten Jahren immer häufiger verwendet und wird als bessere Alternative zu traditionellem Krafttraining angesehen um Kraft, Ausdauer, Koordination und Balance zu verbessern (Weiss et al., 2010). Es handelt sich dabei laut (Boyle, 2010) um Übungen sowie Trainingsprogramme die sowohl die Leistungsfähigkeit von Athleten steigern, als auch Verletzungen

vorbeugen. Funktionelles Krafttraining ist als zweckmäßiges Training anzusehen und bildet die Grundlage für alle Sportarten. Diese Art des Trainings ist als sportartübergreifende Trainingsform zu betrachten und soll Athleten dazu befähigen grundlegende Bewegungsformen wie Sprinten, Springen und Werfen so effektiv und sicher wie möglich durchzuführen (Boyle, 2010). Funktionelles Training zielt darauf ab Alltags- oder Wettkampfsituationen im Training zu simulieren, dabei Trainingsadaptionen zu erzielen um die Leistungsfähigkeit und Effizienz in der jeweiligen Sportart oder im Alltag zu steigern (Weiss et al., 2010). Funktionelles Training wird des Weiteren als förderlich beschrieben, da es, wie alle natürlichen Bewegungen, in mehreren Gelenken und vielen Bewegungsebenen ausgeführt wird (McGill et al., 2009).

Wird der Fokus in Trainingsprogrammen nur auf eine Bewegungsebene gelegt wie es bei Maschinen basiertem Training der Fall ist, kommt es anscheinend zu schlechteren Transfereffekten auf Aktivitäten des echten Lebens als es bei funktionellem Training der Fall ist (Whitehurst, Johnson, Parker, Brown, & Ford, 2005). Funktionelles Krafttraining zielt darauf ab Bewegungen möglichst effizient und stabil ausführen zu können. Aus diesem Grund werden Übungen ausgewählt die von Athleten einen hohen Grad an Stabilität fordern, ohne dabei von Geräten unterstützt zu werden. Kraftübungen mit dem eigenen Körpergewicht sowie mit freien Gewichten verbessern sowohl die propriozeptive Wahrnehmung, körperliche Leistungsfähigkeit als auch segmentale Stabilität und bereiten Athleten auf Wettkampfsituationen vor, in denen sie selbst für Stabilität sorgen müssen (Boyle, 2010).

An folgendem Beispiel soll der Unterschied zwischen freien und geführten Kraftübungen dargestellt werden. Die Kniebeuge sowie die Beinpresse sind Übungen die verwendet werden um die Leistungsfähigkeit in einer Vielzahl von Sportarten zu verbessern. Es handelt sich dabei um mehrgelenkige Bewegungen die der Ausbildung der größten und kräftigsten Muskelgruppen des menschlichen Körpers dienen. Gleichzeitig haben sie aus biomechanischer und neuromuskulären Sicht viele Gemeinsamkeiten mit athletischen Bewegungsformen wie laufen und springen (Escamilla et al., 2001). Beim Vergleich zwischen diesen beiden Kraftübungen konnte gezeigt werden, dass Kniebeugen im Vergleich zur Beinpresse zu signifikant höheren Muskelaktivitäten im M. quadriceps femoris sowie der ischiocruralen Muskulatur führten (Escamilla et al., 2001). Die Kniebeuge fordert einen stabilen Stand in der unteren Position und fordert in der oberen Position volle

Hüftstreckung, wobei die gesamte stabilisierende Muskulatur der unteren Extremitäten sowie der Wirbelsäule sich daran beteiligt diese Bewegung kontrolliert auszuführen (Rogers & Sherman, 2001). Da es sich im Gegensatz dazu bei der Beinpresse um eine geführte Übung handelt wird wesentlich weniger Stabilität gefordert wodurch die Rumpfmuskulatur nicht rekrutiert werden muss um die Wirbelsäule und die Hüfte zu stabilisieren. Des Weiteren kommt es bei den meisten Beinpressen zu keiner vollen Hüftstreckung, die jedoch bei der Entwicklung von Kraft und Schnelligkeit bei athletischen Bewegungsformen entscheidend ist. Laut (Rogers & Sherman, 2001) ermöglicht die Kniebeuge die Entwicklung von sportspezifischer Kraft sowie der Fähigkeit diese in effiziente Bewegungen mit sicherer Ausführung zu transferieren. Bei korrekter Ausführung der Kniebeuge kann die Stabilität des Kniegelenks verbessert werden (Escamilla, 2001). Die Kniebeuge ist eine funktionelle und sichere Übung, die auf viele Bewegungen im Sport sowie im Alltag übertragbar ist (Clark, Lambert, & Hunter, 2012).

Die wichtige Rolle der Rumpfmuskulatur für die Stabilisation des Körpers und der Generierung von Kraft bei athletischen Bewegungen ist anerkannt. Rumpfstabilität ist ein entscheidender Faktor für effiziente biomechanische Funktion um maximale Kraft bei Bewegungsformen wie Laufen, Werfen sowie Springen zu erzeugen und auf Gelenke wirkende Kräfte dabei zu minimieren (Kibler, Press, & Sciascia, 2006). Die Rumpfmuskulatur beinhaltet jene Muskeln des Rumpfes und des Beckengürtels, die für die Stabilität der Wirbelsäule sowie des Beckens zuständig sind, und bei der Generierung von Kraft und dem Transfer auf die Extremitäten im Einsatz sind. (Putnam, 1993). Die Muskulatur der Hüfte, des Beckens und der Wirbelsäule hat eine stabilisierende Funktion, die der Körper benötigt, um die spezifische Funktion der Extremitäten zu gewährleisten (Kibler et al., 2006).

Rumpfstabilität ist ein wichtiger Faktor wenn es darum geht athletische Leistung zu maximieren. Bewegungen werden durch Kinetische Ketten erzeugt, die durch koordinierte Sequenzierung Körpersegmente aktivieren und distale Segmente mit optimaler Geschwindigkeit in optimale Positionen bringen um sportspezifische Aufgaben zu lösen. Als Kinetische Ketten werden zusammenarbeitende Segmente verstanden die meistens von Proximal nach Distal arbeiten um Bewegungen der distalen Segmente zu ermöglichen. Das Modell der kinetischen Ketten betrachtet den gesamten menschlichen Körper und konzentriert sich nicht nur auf einzelne Segmente (Putnam, 1993). Des Weiteren kann eine starke Rumpfmuskulatur Verletzungen der Wirbelsäule (Kibler et al., 2006), des Schultergürtels (McMullen &

Uhl, 2000), des Hüftgelenks (Vezina & Hubley-Kozey, 2000) und des Kniegelenks (Hollman et al., 2009; Willson, Dougherty, Ireland, & Davis, 2005) vorbeugen. Die Reduktion des Verletzungsrisikos ist ein zentrales Ziel des funktionellen Trainings und wird durch den Zugewinn spezifischer Kraft erreicht (Boyle, 2010).

Der Literatur zufolge ist funktionelles Krafttraining sowohl für Athleten als auch für junge und ältere Erwachsene (Kibele & Behm, 2009) eine geeignete Methode um die allgemeine muskuläre Leistungsfähigkeit zu steigern. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass funktionelles Krafttraining bei älteren Erwachsenen zu einer Steigerung der allgemeinen körperlichen Leistungsfähigkeit führen und einen positiven Einfluss auf die Selbstständigkeit im Alltag haben kann (Porcari & Foster, 2008).

2.4.1 Was ist CrossFit®?

CrossFit® ist ein Trainingskonzept welches in den letzten Jahren enorm an Popularität gewonnen und den Begriff funktionelles Krafttraining geprägt hat. Ziel ist es eine möglichst universelle körperliche Fitness aufzubauen und eine grundlegende Leistungsfähigkeit für alle Sportarten zu entwickeln.

Der Gründer Greg Glassman beschreibt CrossFit® als hoch intensives Kraft- und Ausdauertraining, mit ständiger Variation von funktionellen Bewegungen. Dem liegt die Intention zu Grunde möglichst schwere Lasten so schnell wie möglich über große Distanzen zu bewegen (Glassman, 2007). Funktionelle Bewegungen werden als universale motorische Rekrutierungsmuster beschrieben, deren Kontraktionen von der Rumpfmuskulatur aus zu den Extremitäten verlaufen. Sie werden als natürlich, effektiv und effizient beschrieben, um den eigenen Körper oder externe Gegenstände zu bewegen. Die Trainingsintensität spielt bei CrossFit® eine entscheidende Rolle, da durch hohe Intensität die Maximierung von gewünschten Adaptionen erreicht werden kann. CrossFit® ist kein spezifisches Fitnessprogramm, sondern zielt darauf ab zehn leistungsbestimmende Parameter positiv zu beeinflussen. Dazu gehören kardiovaskuläre Ausdauer, Durchhaltevermögen, Kraft, Beweglichkeit, Schnellkraft, Geschwindigkeit, Koordination, Agilität, Gleichgewichtsfähigkeit und Bewegungsgenauigkeit (Glassman, 2013).

Ein weiterer wichtiger Aspekt von CrossFit® ist das Gruppensetting. Es wird gemeinsam in kleinen Gruppen unter der ständigen Aufsicht eines Trainers trainiert,

wobei eine motivierende Atmosphäre entstehen soll, bei der sich die Teilnehmer gegenseitig zu Höchstleistungen motivieren. Eine Besonderheit von CrossFit® ist, dass Personen mit unterschiedlichsten körperlichen Voraussetzungen mit einander trainieren können und dabei das gleiche WOD absolvieren. Dies ist durch die Anpassung der Trainingsintensität, Wiederholungszahl, Übungsausführung sowie der Trainingsgewichte möglich (Glassman, 2013, S.25).

2.4.2 CrossFit® und HIPT

Hoch intensives Intervalltraining wird als Alternative zu klassischem Ausdauertraining verwendet um aerobe Fitness zu verbessern. HIIT ist zeitökonomischer als traditionelles Ausdauertraining und führt zu ähnlichen Effekten bezüglich der Verbesserung kardiovaskulärer Adaptationen (Gibala et al., 2006). Eine relativ neue Variation von HIIT hat in den letzten Jahren an Bekanntheit gewonnen, die hoch intensives Krafttraining beinhaltet, welches möglichst variationsreich mit mehrgelenkigen Übungen durchgeführt wird. Es wird angenommen, dass dieses „High-Intensity-Power-Training“ (HIPT) aerobe Fitness im Vergleich zu klassischem Ausdauertraining mit deutlich geringem Zeitaufwand verbessern kann (M. M. Smith et al., 2013). Diese Trainingsform kann mit wenigen Trainingsgeräten oder auch nur mit dem eigenen Körpergewicht durchgeführt werden und wird häufig in Form eines Zirkeltrainings absolviert (Bergeron et al., 2011).

HIPT ist eine Kombination aus HIIT und Krafttraining. Es unterscheidet sich von HIIT darin, dass bei dieser Trainingsform nicht immer Pausen vorgegeben sind und der Fokus darauf gerichtet ist ein möglichst hohes Leistungsniveau zu halten (M. M. Smith et al., 2013). Es handelt sich um eine Abfolge von Kraftübungen die entweder ohne Unterbrechung oder mit einer kurzen Pausendauer von unter 30 Sekunden durchgeführt werden (Babiash, 2013). Durch die kurzen Pausenzeiten und die hohe Trainingsintensität kommt es zu einer hohen physiologischen Belastung während der Trainingseinheiten (Albert et al., 2000). Dies hat zu Kritik an HIPT geführt, da diese intensive Trainingsform mögliche Risiken für die Gesundheit darstellen könnte (Hadeed, Kuehl, Elliot, & Sleight, 2011). Jedoch gibt es nur eine sehr limitierte Anzahl an Untersuchungen die diese Aussage untermauern können (Brian et al., 2015). Diese CrossFit®-basierte Trainingsform dauert in der Regel etwa eine Stunde und beinhaltet allgemeines Aufwärmen, Techniktraining sowie ein sogenanntes „Workout of the day“ (WOD) (M. M. Smith et al., 2013).

Das WOD hat in der Regel eine Dauer von weniger als 30 Minuten (Bergeron et al., 2011), ändert sich täglich und besteht in der Regel aus 3 bis 5 funktionellen Bewegungen die mit dem eigenen Körper oder mit externen Gewichten durchzuführen sind. Das Training ist mit einem Zirkeltraining zu vergleichen, wobei es das Ziel ist die vorgegebene Übungsabfolge entweder so schnell wie möglich „For time“, oder in einem vorgegebenen Zeitfenster so oft wie möglich „As many rounds as possible“ (Amrap) zu absolvieren. In Abbildung 12 ist die erste Trainingswoche der Studie von (M. M. Smith et al., 2013) ersichtlich, inklusive der beiden Trainingsmodalitäten „For time“ und „Amrap“.

	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
Strength/Skill	Back squat x5 @ 65% x5 @ 75% x5 @ 85% Weighted/assist pull-up x5 @ 65% x5 @ 75% x5 @ 85%	Novice - HS Intermediate - HSPU Advanced - HSW	Deadlift x5 @ 65% x5 @ 75% x5 @ 85% Overhead Press x5 @ 65% x5 @ 75% x5 @ 85%	Rings: pull-up and dip One-legged squats	Back Squat x5 @ 65% x5 @ 75% x5 @ 85% Weighted/assist pull-up x5 @ 65% x5 @ 75% x5 @ 85%
WOD	<u>For time:</u> 50 bodyweight squat 1 flight stairs 100 double under 25 burpees 50 double under 25 burpees 100 double under 1 flight stairs 50 bodyweight squat	<u>12 min AMRAP:</u> 7 pull-ups 14 front squat #95 men #65 women 21 push-ups w/ release	<u>For time:</u> 30 clean & jerk #135 men #95 women	<u>For time:</u> x21 KB swing x21 ring dip x15 KB swing x15 ring dip x9 KB swing #70 KB for men #53 KB for women x9 ring dip	<u>3 rounds for time:</u> 1 min rest between rounds. 5 wide-grip deadlift and high pull 5 squat press #135 for men #95 for women 5 pull-ups
Week #1					

Abb. 12: Eine Übersicht einer CrossFit®-basierten HIPT - Trainingswoche, inklusive der beiden Trainingsmodalitäten „For time“ und „Amrap“ (M. M. Smith et al., 2013).

Workouts die auf dem „Amrap“ Prinzip basieren, haben laut (M. M. Smith et al., 2013) eine Zeitdauer von etwa 10-20 Minuten und haben als Ziel die vorgegebene

Übungsabfolge so schnell wie möglich zu absolvieren. HIPT oder CrossFit® – Training beinhaltet oft eine randomisierte Auswahl an mehrgelenkigen Übungen die mit hohem Widerstand so schnell wie möglich durchgeführt werden. HIPT beinhaltet funktionelle Übungen aus dem Bereich Gewichtheben wie die Kniebeuge, Kreuzheben, Umsetzen, Reißen und Schulterdrücken. Außerdem werden gymnastische Übungen an den Ringen, auf dem Barren oder ohne Hilfsmittel durchgeführt (M. M. Smith et al., 2013).

Prinzipiell werden Übungen im CrossFit® in drei unterschiedliche Bereiche geteilt, die in Abbildung 13 ersichtlich sind. Gymnastische Übungen (Gymnastics) werden mit dem eigenen Körpergewicht durchgeführt und dienen der Verbesserung von Sensomotorik, Koordination, Agilität, Bewegungsgenauigkeit, Rumpfkraft, Oberkörperkraft sowie der Gleichgewichtsfähigkeit. Übungen die in die Sparte „Metabolic Conditioning“ fallen, haben zum Ziel die aerobe und anaerobe Kapazität sowie das Durchhaltevermögen zu verbessern. Es handelt sich dabei um sich vielfach wiederholende zyklische Bewegungsabläufe wie sie beim Rudern, Laufen oder Radfahren vorkommen, die über eine lange Zeitdauer durchgeführt werden können. Unter „Weightlifting“ versteht man jene Übungen die mit externen Gewichten durchgeführt werden. Olympisches Gewichtheben und „Powerlifting“ beinhalten die Basisübungen dieser Kategorie und haben als wichtigstes Ziel die Steigerung der Kraft sowie der Schnellkraft (Glassman, 2013, S. 52).

Gymnastics	Metabolic Conditioning	Weightlifting
Air Squat	Run	Deadlifts
Pull-up	Bike	Cleans
Push-up	Row	Presses
Dip	Jump Rope	Snatch
Handstand Push-up		Clean and Jerk
Rope Climb		Medicine-Ball Drills
Muscle-up		Kettlebell Swing
Press to Handstand		
Back Extension		
Sit-up		
Jumps		
Lunges		

Abb. 13: Eine Übersicht der Übungsbereiche inklusive der wichtigsten Übungen (Glassman, 2013, S.53).

3 Empirischer Teil der Arbeit

3.1 Beschreibung der Studie

Für das Thema dieser Masterarbeit dienen die Daten einer Studie, die vom „Österreichischen Institut für Sportmedizin“ (ÖISM) in Zusammenarbeit mit der „Versicherungsanstalt öffentlich Bediensteter“ (BVA) durchgeführt wurde. Diese Arbeit berücksichtigt die Daten der Herzfrequenzvariabilität sowie der maximalen Sauerstoffaufnahme des vorliegenden Projekts.

Der Name der Studie lautet: *„Bewegung verändert Alltag - Einfluss von funktionellem Krafttraining auf funktionelle- und gesundheitsbezogene Parameter zur betrieblichen Vorsorge“*. Es handelt sich dabei um eine kontrollierte, verblindete Interventionsstudie, die über einen Zeitraum von 8 Monaten durchgeführt wurde. Projektstart war September 2014, wobei an den ProbandInnen in den ersten 4 Wochen eine Testbatterie durchgeführt wurde, die sich aus physischen und psychologischen Tests zusammensetzte. Die Trainingsintervention wurde zwei Mal pro Woche im Zuge eines geführten Gruppentrainings und ein Mal pro Woche im Zuge eines vorgegebenen Heimtrainings über einen Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt. Anschließend an die 6 monatige Trainingsintervention wurden die ProbandInnen erneut mit der eingangs durchgeführten Testbatterie getestet.

3.1.1 StudienteilnehmerInnen

Bei den StudienteilnehmerInnen handelt es sich um Angestellte des Bundesministerium für Finanzen (BMF), die sich freiwillig für die Studie anmeldeten. Den ProbandInnen wurden im Zuge der Studie Zahlencodes zugewiesen um den vertraulichen Umgang der erhobenen Daten zu garantieren. Die Auswertung der Daten und deren weitere Verwendung erfolgte anonymisiert.

Im Zuge der im September 2014 eingangs durchgeführten Testbatterie wurden 63 Personen mittels sportmedizinischer Untersuchungen auf ihre Sporttauglichkeit überprüft. Alle 63 ProbandInnen (39 Frauen und 24 Männer) wurden als sporttauglich eingestuft und für die Trainingsintervention zugelassen. Während der Trainingsintervention führten akute Infektionszustände und Verletzungen zum frühzeitigen Ausschluss von 14 der StudienteilnehmerInnen. Am Retest im April

2015 nahmen schlussendlich 49 ProbandInnen (29 Frauen und 20 Männer) teil, die in die statistische Auswertung einbezogen wurden.

3.1.2 Einschlusskriterien

Alle StudienteilnehmerInnen mussten alle folgenden Einschlusskriterien erfüllen um an der Studie teilnehmen zu dürfen.

- Mindestalter von 25 Jahren
- Maximales Alter von 65 Jahren
- Großteils sitzende Arbeitstätigkeit
- Weniger als 2 Stunden durchschnittliche sportliche Betätigung pro Woche
- Schriftliche Einwilligungserklärung

3.1.3 Ausschlusskriterien

Die Erfüllung eines der folgenden Ausschlusskriterien reichte aus um von der Studie ausgeschlossen zu werden:

- Mehr als 2 Stunden durchschnittliche sportliche Betätigung pro Woche
- Leistungssportler
- Ehemalige Leistungssportler
- Orthopädische Krankheitsbilder oder Verletzungen die eine Teilnahme aus medizinischer Sicht nicht zulassen
- Schwerwiegende kardiovaskuläre, pulmonale oder metabolische Krankheitsbilder die eine Teilnahme an der Testbatterie oder der Trainingsintervention aus medizinischer Sicht nicht zulassen
- Die Einnahme von Medikamente mit einer modulierenden Wirkung auf das Immunsystem (z.B. Cyclosporine, Corticosteroide, nichtsteroidale Antirheumatika,...)
- Keine Teilnahme an mehr als 4 aufeinander folgenden Gruppentrainings
- Verweigerung der Blutabnahme im Zuge des Eingangs- oder Abschlusstestprotokolls
- Verweigerung der Teilnahme an der funktionellen Testbatterie
- Verweigerung der Fragebögen

3.1.4 Testbatterie

Nach Durchführung der standardisierten sportmedizinischen Gesundheitsuntersuchung, die zur Feststellung der Sporttauglichkeit durchgeführt wurde und um medizinische Kontraindikationen auszuschließen, wurden die vom Arzt für das Projekt zugelassenen ProbandInnen noch am selben Tag weiteren Untersuchungen unterzogen. Die Teilnehmer waren dazu angehalten am Vortag keinen Alkohol zu konsumieren und am Tag der Testung kein Frühstück zu sich zu nehmen, da die Bioimpedanzanalyse sowie die Blutabnahme auf nüchternen Magen erfolgen sollten. Nach Einschluss zur Studie wurden zwischen 8:30 und 9:30 Bioimpedanzanalyse, Messung der Gefäßsteifigkeit, Blutabnahme sowie die 2 minütige HRV Messung durchgeführt, nachdem die ProbandInnen zuvor 15 Minuten lang auf einer Liege Platz genommen hatten. Nach einem standardisierten Frühstück folgte ein 10 minütiges Aufwärmprogramm mit 40 Watt bei Frauen und 60 Watt bei Männern auf dem Fahrradergometer. Direkt danach wurde eine Reihe von isometrischen und funktionellen Krafttests, sowie Balance- und Beweglichkeitstests in vorgegebener Reihenfolge durchgeführt. Anschließend wurden Fragebögen zur Erfassung psychosozialer Parameter der Gesundheit der ProbandInnen ausgefüllt. Dies nahm 40 Minuten in Anspruch wodurch eine ausreichend lange Pause zwischen den physischen Tests gewährleistet war. Unmittelbar danach wurde die Fahrrad-ergometrie durchgeführt. Dieser zeitliche Ablauf wurde auch im Zuge der abschließenden Testung der Studie exakt eingehalten.

Diese Arbeit wird sich mit den Daten der Fahrradergometrie, sowie der 24 Stunden HRV Messung beschäftigen, da diese für die Beantwortung der Forschungsfragen zu analysieren sind. Die HRV Messung wurde in einem Abstand von mindestens 48 Stunden zu der Fahrradergometrie durchgeführt.

3.1.4.1 Fahrradergometrie

Die Fahrradergometrie (IEC 60 -1 – 60, Type 911905, Lode medical Technology) wurde zur Ermittlung der aeroben Kapazität auf einem Fahrradergometer durchgeführt. Die Startbelastung des Ausdauertests auf dem Fahrradergometer betrug bei Frauen 40 Watt und bei Männern 60 Watt, wobei das Belastungssinkrement alle 3 Minuten um 25 Watt gesteigert wurde. Die Fahrradergometrie wurde bei subjektiver Ausbelastung, Nichteinhalten der vorgegebenen Umdrehungszahl pro Minute und bei gesundheitlichen

Komplikationen abgebrochen. Herzfrequenz, Blutlaktat sowie die Leistung in Watt wurden zur Auswertung herangezogen.

3.1.4.2 Messung der HRV

Die 24 Stunden HRV Messung wurde mittels mobilem Herzfrequenzvariabilitätsmessgerät mit dem Namen ChornoCord (Human Research Institut, Joysys GmbH) durchgeführt. Da diese Messung in regeneriertem und ausgeruhtem Zustand zu erfolgen hatte, konnte sie nicht am Tag der physischen Tests (Krafttestungen und Fahrradergometrie) durchgeführt werden. In einem Abstand von mindestens einem Tag vor oder nach der Testung am ÖISM wurden den ProbandInnen die HRV Messgeräte angelegt. Der ChornoCord ist ein mobiles Messgerät, von dem 3 Elektroden zur Messung der HRV ausgehen, das mittels Brustgurt am Körper befestigt wird. Das Gerät wurde zwischen 09.00 und 12.00 von Mitarbeitern der Studie an den ProbandInnen angebracht und 24 Stunden später wieder abgenommen. Die Auswertung der aufgezeichneten Daten wurde vom Human Research Center in Weiz mittels der Software Chronobase ausgewertet und grafisch dargestellt.

Die 24 Stunden HRV Messung hat zum Ziel, Einblicke in die Arbeitsweise des autonomen Nervensystems zu verschaffen und seine Fähigkeit zur Regenerations- sowie Anpassungsfähigkeit an Umweltbedingungen (physisch und psychisch) zu evaluieren.

3.1.5 Trainingsintervention

3.1.5.1 Zeitplan

Die Trainingsintervention wurde zwei Mal pro Woche im Zuge eines geführten Gruppentrainings und ein Mal pro Woche im Zuge eines vorgegebenen Heimtrainings über einen Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt. Die geführten Trainingseinheiten, mit einer Zeitdauer von einer Stunde, wurden von zwei Trainerinnen durchgeführt. An folgenden Tagen wurden die geführten Gruppentrainings durchgeführt:

- Montag um 7:30 in der Hinteren Zollamtsstraße 2b
- Dienstag um 7:30 und um 16:00 in der Johannesgasse 5
- Mittwoch um 17:00 in der Hinteren Zollamtsstraße 2b
- Donnerstag um 7:30 und um 16:00 in der Johannesgasse 5

Aufgrund der höheren Teilnehmeranzahl wurden 4 Einheiten pro Woche in der Johannesgasse abgehalten. Abgesehen von der zweiwöchigen Pause über die Weihnachtsferien wurde das Gruppentraining ausnahmslos an den oben genannten Tagen abgehalten. Es wurden 51 Gruppentrainingseinheiten in der Hinteren Zollamtstraße und 100 Gruppentrainingseinheiten in der Johannesgasse angeboten. Bei der Absolvierung von zwei geplanten Trainingseinheiten pro Woche ergibt das rund 50 Trainingseinheiten pro TeilnehmerIn über einen Zeitraum von 6 Monaten.

3.1.5.2 Beschreibung des Gruppentrainingsprogramms

Das Trainingsprotokoll der Studie ist sehr stark an das von Greg Glassman erstellte Trainingsprogramm namens CrossFit® angelehnt, das als hoch intensives Kraft- und Ausdauertraining, mit ständiger Variation von funktionellen Bewegungen beschrieben wird (Glassman, 2007). Zur Verfügung standen jeweils in der Johannesgasse 5 sowie in der Hinteren Zollamtstraße 2b ein etwa 75 m² großer Trainingsraum sowie Therabänder, Medizinbälle (3kg und 5 kg), Kettlebells (4kg, 8kg, 12kg und 16kg), Gymnastikbälle, Springschnüre, Kurzhanteln (2kg und 3 kg) sowie Turnmatten.

Das Training war in ein allgemeines Aufwärmen, einen Technik-Teil, einen Hauptteil, einen „Finisher“ und ein „Cool Down“ unterteilt.

Das *allgemeine Aufwärmen* hatte eine Zeitdauer von etwa 10 Minuten und hatte das Ziel die Körpertemperatur zu steigern, das Herzkreislaufsystem anzuregen, Gelenke zu mobilisieren sowie die Stützmuskulatur zu aktivieren. Übungen wie Laufen, Springschnur springen, statische oder dynamische Kräftigungsübungen mit dem eigenen Körpergewicht sowie Mobilisationsübungen wurden hierzu eingesetzt. Auch unterschiedlichste Aufwärmspiele wurden durchgeführt um das Gruppengefüge zu stärken und den Spaßfaktor hoch zu halten.

Im *Technik-Teil* der ebenfalls etwa 10 Minuten in Anspruch nahm, wurden in jeder Einheit 1 bis 2 Übungen genauer behandelt. Ziel war es den ProbandInnen die korrekte und sichere Ausführung der jeweiligen Techniken zu vermitteln. Verletzungen sollen dadurch vermieden, sowie die korrekte Beanspruchung der Zielmuskulatur gefördert werden. Die Trainerinnen erklärten den Sinn der Übung und zeigten diese vor, bevor die TeilnehmerInnen die Technik mit leichten Gewichten und niedriger Wiederholungsanzahl übten. Zu Beginn der

Trainingsintervention wurde mit grundlegenden Übungen wie dem Unterarmstütz und der Kniebeuge begonnen, wobei sich der Schwierigkeitsgrad mit fortlaufender Studie erhöhte. Übungen die von den ProbandInnen weniger gut beherrscht wurden, wurden auch mehrmals im Technik-Teil durchgenommen.

Der *Hauptteil* hatte eine Zeitdauer von etwa 30 Minuten und wurde in Form eines Kraftzirkels durchgeführt. Diese Trainingsform wurde ausgewählt, da sie gut geeignet war um ein effektives und sinnvolles Training für die große Teilnehmeranzahl pro Trainingseinheit zu ermöglichen. Ähnlich wie HIIT oder HIPT hat Zirkeltraining eine möglichst hohe Arbeitsintensität zum Ziel. Diese Organisationsform ermöglichte es allen TeilnehmerInnen ihr eigenes Tempo und ihre eigene Intensität zu wählen, ohne sich mit anderen Teilnehmern während des Trainings zu vergleichen. Somit konnte sich jeder Proband auf seine eigene Bewegungsausführung konzentrieren, wodurch eine sichere Bewegungsausführung sowie eine angepasste Trainingsintensität möglich waren. Da es sich bei dem Studienkollektiv um eine stark heterogene Gruppe handelte, war dies ein wichtiger Aspekt, der stark zur Auswahl dieser Trainingsform beitrug. Der Hauptteil der einzelnen Trainingseinheiten bestand aus zwei Zirkeldurchgängen welche sich aus 8 bis 10 komplexen Übungen zusammensetzten. Es wurden Übungen mit dem eigenen Körpergewicht (z.B. Kniebeugen, Ausfallschritte, Seilspringen, Situps, uvm.) und mit Zusatzgewichten (Kettlebell Swings, Renegade Rows, Russiantwists, uvm.) durchgeführt, wobei den ProbandInnen unterschiedliche Skalierungsmöglichkeiten der Übungen gezeigt wurden um für Teilnehmer angemessene Trainingsmöglichkeiten zu bieten. Liegestütz konnten zum Beispiel durch das Aufstützen auf einer Bank oder einem Kasten erleichtert werden. Bei Übungen mit Zusatzgewicht konnten die ProbandInnen zwischen unterschiedlichen Gewichte wählen. Jede Übung wurde 30 Sekunde lang durchgeführt, gefolgt von einer Pause von 30 Sekunden während der die ProbandInnen Zeit hatten zur nächsten Station zu wechseln. Nach dem ersten Durchgang wurde eine Pause von 2 Minuten eingelegt, woraufhin der Zirkel ein zweites Mal durchgeführt wurde. Drei Monate nach Beginn der Trainingsintervention wurde die Belastungsdauer auf 45 Sekunden gesteigert um die Trainingsintensität zu steigern, wobei die Pausenzeit von 30 Sekunden nicht geändert wurde.

Der „*Finisher*“ dient als Trainingsabschluss mit einer Dauer von etwa 5 bis 8 Minuten. Es handelt sich dabei um kurze aber relativ hohe Belastungsreize die üblicherweise am Ende einer CrossFit®-Einheit gesetzt werden. Meist werden kurze

intervallartige Belastungen mit dem eigenen Körpergewicht durchgeführt, die entweder das Herzkreislaufsystem fordern oder auf die Kräftigung der Rumpfmuskulatur abzielen.

Zum „Cool Down“ wurden Entspannungs- oder Dehnungsübungen durchgeführt um den Kreislauf wieder zu beruhigen und die Regenerationsphase einzuleiten.

3.1.5.3 Beschreibung des Heimtrainingsplans

Das Heimtrainingsprogramm wurde von den TeilnehmerInnen einmal pro Woche durchgeführt und war auf die individuellen Bedürfnisse der einzelnen ProbandInnen abgestimmt. Die vorgesehene Zeit pro Einheit belief sich auf 30 Minuten. Die ersten 10 Minuten wurden der Verbesserung der Mobilität und der Anregung des Herzkreislaufsystems gewidmet. Der Hauptteil wurde in Form eines Kraftzirkels durchgeführt und hatte eine Zeitdauer von etwa 15 Minuten. Er beinhaltete Übungen mit dem eigenen Körpergewicht, mit Therabändern und teilweise auch mit Kurzhanteln, wenn diese zur Verfügung standen. Zum Abschluss wurde wie im Gruppentraining ein „Finisher“ mit einer Dauer von etwa 5 Minuten absolviert. Die ProbandInnen erhielten einen auf sie zugeschnittenen Trainingsplan, der nach drei Monaten durch einen neu angepassten Plan mit höherer Intensität und neuen Übungen ersetzt wurde. Zusätzlich erhielten die Teilnehmer vorgefertigte Tabellen um ihre Trainingserfolge des Heimtrainingsplans zu dokumentieren.

3.2 HRV Referenzwerte

Die Perzentilen der HRV-Messwerte der ProbandInnen wurden automatisch in der Übersichtstabelle der altersabhängigen Referenzdaten der 24 Stunden HRV Messung (Abb. 18) mittels der Software Chronobase dargestellt. Die Messwerte der ProbandInnen werden dabei mit den vorhandenen Messwerten der jeweiligen Altersklasse (± 3 Jahre) der Joysys-Datenbank verglichen. Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der beobachteten HRV Indizes der Eingangs- und Abschlussmessung sowie der Perzentilen bezogen auf die Joysys-Datenbank.

HRV Parameter	G (N=31)	Perzentil G (N=31)	W (N=18)	Perzentil W(N=18)	M (N=13)	Perzentil M (N=13)
SDNN	62,66 ± 17,70 ms	58,45 ± 28,03 %	67,46 ± 17,77 ms	70,69 ± 23,26 %	56,01 ± 15,93 ms	41,50 ± 25,92 %
SDNN - Schlaf	66,13 ± 22,95 ms	57,32 ± 27,55 %	68,70 ± 22,36 ms	66,15 ± 23,52 %	62,57 ± 24,19 ms	45,09 ± 28,88 %
ln HF	5,24 ± 0,93 ln ms ²	59,77 ± 29,97 %	5,53 ± 0,73 ln ms ²	68,40 ± 25,66 %	4,83 ± 1,05 ln ms ²	47,82 ± 30,22 %
ln HF - Schlaf	5,68 ± 1,15 ln ms ²	53,99 ± 29,34 %	5,93 ± 0,93 ln ms ²	60,12 ± 26,20 %	5,35 ± 1,37 ln ms ²	45,51 ± 32,32 %
ln TOT	7,82 ± 0,58 ln ms ²	58,96 ± 26,58 %	7,97 ± 0,49 ln ms ²	70,57 ± 21,25 %	7,62 ± 0,64 ln ms ²	42,89 ± 25,38 %
ln TOT- Schlaf	7,85 ± 0,74 ln ms ²	57,71 ± 27,49 %	7,95 ± 0,63 ln ms ²	66,39 ± 21,97 %	7,72 ± 0,87 ln ms ²	45,68 ± 30,59 %

Tab. 1: Mittelwerte ± Standardabweichung der beobachteten HRV Indizes sowie der Perzentilen bezogen auf die Joysys Datenbank des gesamten HRV-Kollektivs (G), der weiblichen (W) und der männlichen (M) ProbandInnen der Eingangsmessung.

HRV Parameter	G (N=31)	Perzentil G (N=31)	W (N=18)	Perzentil W(N=18)	M (N=13)	Perzentil M (N=13)
SDNN	63,18 ± 18,52 ms	60,90 ± 25,40 %	63,47 ± 15,81 ms	67,07 ± 20,39 %	62,63 ± 22,43 ms	52,36 ± 29,83 %
SDNN - Schlaf	65,22 ± 23,59 ms	56,28 ± 25,89 %	61,48 ± 17,58 ms	57,27 ± 19,63 %	70,39 ± 30,04 ms	54,90 ± 33,56 %
ln HF	5,22 ± 0,93 ln ms ²	61,75 ± 25,13 %	5,38 ± 0,72 ln ms ²	65,40 ± 21,25 %	4,99 ± 1,15 ln ms ²	56,70 ± 29,84 %
ln HF - Schlaf	5,68 ± 1,08 ln ms ²	55,15 ± 26,52 %	5,75 ± 0,75 ln ms ²	54,92 ± 20,77 %	5,58 ± 1,45 ln ms ²	55,48 ± 33,87 %
ln TOT	7,82 ± 0,62 ln ms ²	60,33 ± 25,89 %	7,85 ± 0,48 ln ms ²	65,90 ± 21,05 %	7,77 ± 0,80 ln ms ²	52,62 ± 29,34 %
ln TOT- Schlaf	7,80 ± 0,74 ln ms ²	55,45 ± 26,97 %	7,73 ± 0,51 ln ms ²	56,66 ± 20,74 %	7,91 ± 0,99 ln ms ²	53,77 ± 34,70 %

Tab. 2: Mittelwerte ± Standardabweichung der beobachteten HRV Indizes sowie der Perzentilen bezogen auf die Joysys Datenbank des gesamten HRV-Kollektivs (G), der weiblichen (W) und der männlichen (M) ProbandInnen der Abschlussmessung.

3.3 Analyse der HRV Daten

Wie bereits erwähnt wurde die 24 Stunden HRV Messung mittels mobilem Herzfrequenzvariabilitätsmessgerät mit dem Namen ChornoCord (Human Research Institut, Joysys GmbH) durchgeführt. Die Messergebnisse werden in mehreren Grafiken und einer Übersichtstabelle mit altersabhängigen Referenzdaten der HRV Indizes dargestellt.

Es handelt sich hierbei nicht um ein diagnostisches Instrument sondern um ein Screening-Werkzeug zur Identifizierung von Gesundheitsrisiken und ein Überprüfungsinstrument zur Beurteilung der Effizienz von gesundheitsorientierten Interventionen.

Abbildung 14 zeigt das gesamte Frequenzspektrum der HRV in seiner Variation über einen Zeitraum von 24 Stunden während Wach- sowie Schlafphase. Niedrige Frequenzen (LF) von 0 bis 0.15 Hz repräsentieren vor allem die Aktivität des Sympathikus sowie Stressreaktionen des Körpers (psychisch und physisch). Änderungen im LF-Frequenzbereich spiegeln außerdem den Einfluss des Baroreflex und die Auswirkungen von arteriellen Blutdruckschwankungen auf das Herzschlagfrequenzverhalten wider (Billman, 2013). Hohe Frequenzen (HF) zwischen 0.15 und 0.4 Hz repräsentieren die Aktivität des Parasympathikus und deuten auf Erholung des Organismus hin. Änderungen von RR-Intervallen im HF-Bereich (0.14–0.4 Hz) werden primär durch das Herz über den parasympathischen Nerv reguliert (Cardiology, 1996). Das HF_{RR} -Band schwingt mit einer Periode von 2,5 bis 7s und spiegelt die respiratorische Sinusarrhythmie wider (RSA) (Sammito & Böckelmann, 2015).

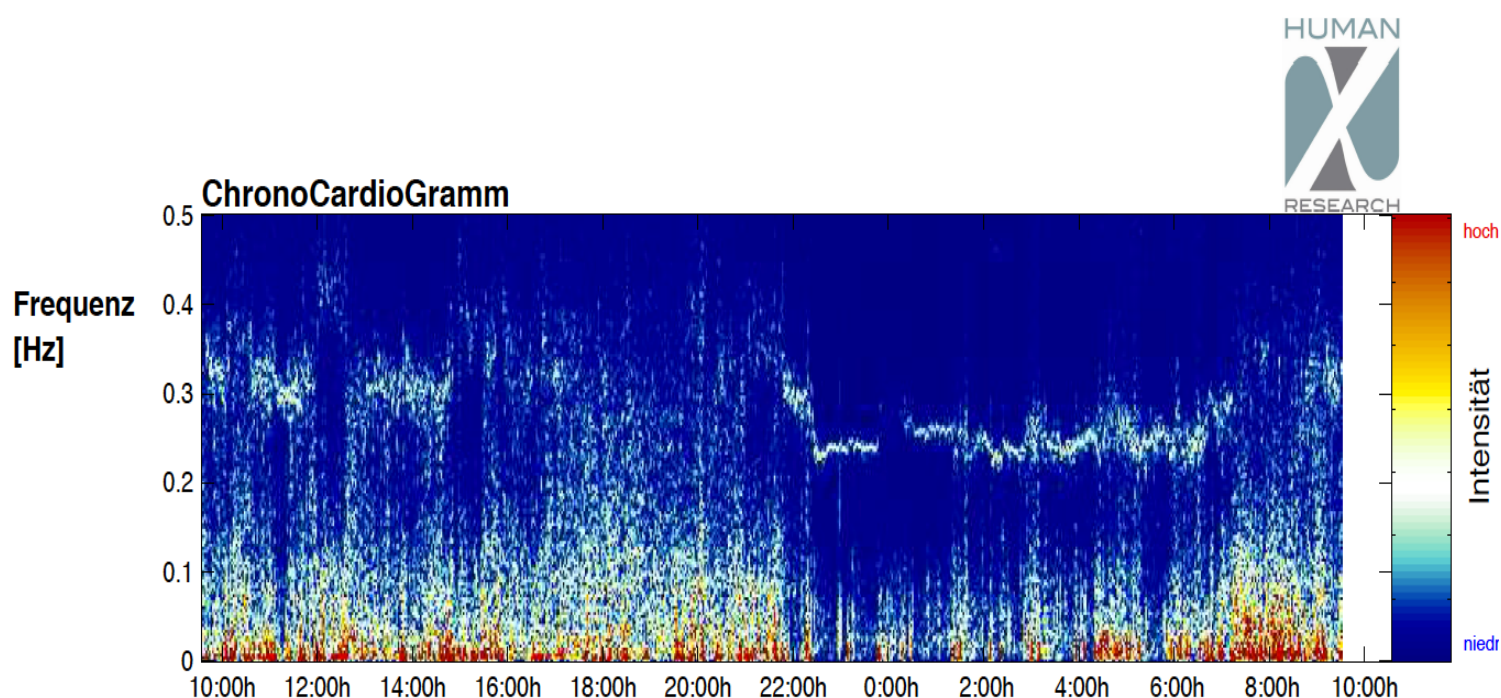


Abb. 14: ChronoCardiogramm einer 32 jährigen Frau.

Abbildung 15 zeigt die absoluten Intensitäten der sympathischen (Rot) und der parasympathischen (Blau) Aktivität und die gesamte autonome Aktivität (Sympathikus und Parasympathikus - Grau) während eines Zeitraums von 24 Stunden.

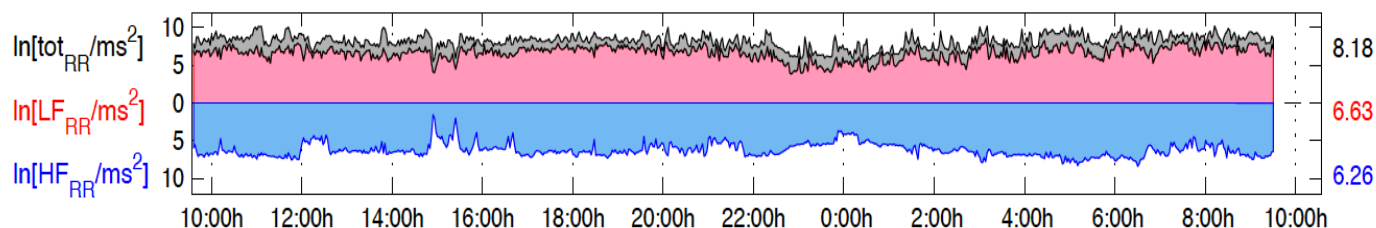


Abb. 15: Eine Aktivitätsdarstellung des ANS über einen Zeitraum von 24 Stunden.

In der folgenden Grafik (Abb. 16) werden einerseits die Aktivierung (oben) und Erholung (unten) des ANS dargestellt. Die Aktivierung zeigt die relative Prädominanz der sympathischen (Rot) oder des parasympathischen (Blau) Aktivität, die für jede Minute der 24-Stunden-Messung kalkuliert wurde. Der violette Bereich im unteren Teil der Grafik (Erholung) zeigt die Standardabweichung der RR-Intervalle (SDNN). Dieser Messwert spiegelt die Gesamtvariabilität der Herzschlagfolge wider (Taskforce, 1996). Der blaue Bereich im unteren Teil der Grafik zeigt den Logarithmus der respiratorischen Sinusarrhythmie, der ein Indikator für parasympathische Aktivität und für die Kapazität des Organismus sich von Stress zu erholen ist (Zucker, Samuelson, Muench, Greenberg, & Gevirtz, 2009).

Aktivierung

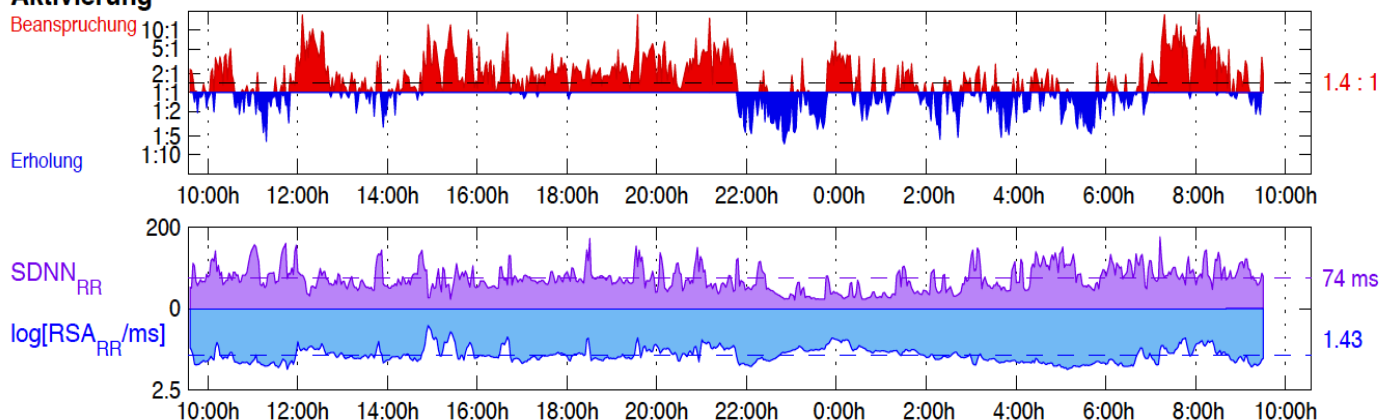


Abb. 16: Eine Aktivitätsdarstellung des ANS über einen Zeitraum von 24 Stunden.

Abbildung 17 zeigt Änderungen der Herzfrequenz durch wechselnde Anforderungen auf das Herzkreislaufsystem über einen Zeitraum von 24 Stunden.

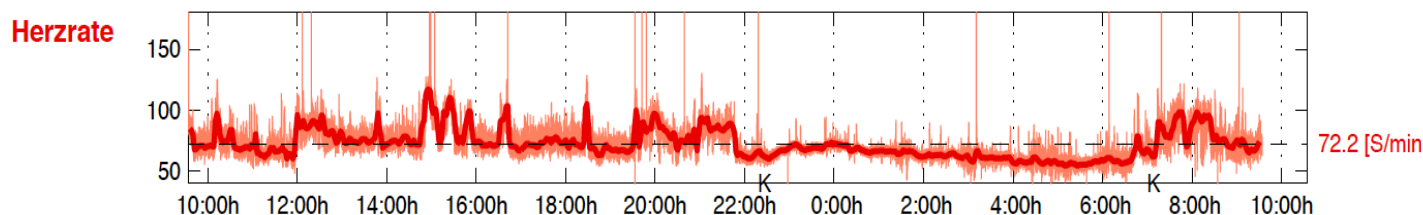


Abb. 17 Eine Darstellung der Herzrate über einen Zeitraum von 24 Stunden.

In Abbildung 18 ist eine Übersichtstabelle der altersabhängigen Referenzdaten der HRV Indizes, der Herzfrequenz sowie der RSA dargestellt. Es wird jeweils ein Mittelwert und ein Perzentilwert der jeweiligen Vergleichsgruppe (± 3 Jahre) für die gesamten 24 Stunden, die Wachphase sowie die Schlafphase angegeben. Die für diese Arbeit relevanten HRV Indizes sind SDNN, lnHF und lnTOT (TOT entspricht der TP).

Personen-ID		Messdatum	24/04/2015	Schlafbeginn	22:30:00
Alter [Jahre]	32	Startzeit	09:34:00	Schlafende	07:00:00
Geschlecht	w	Messdauer	23:59:59	Schlafdauer	8:30:00

		24-Stunden-Wert		Wachphase		Schlafphase	
		Mittelwert	Perzentil	Mittelwert	Perzentil	Mittelwert	Perzentil
Herzrate	[Schläge/min]	72.24	11.3 %	77.95	9.1 %	62.66	27.8 %
SDNN	[ms]	73.95	74.1 %	78.65	85.6 %	64.88	52.6 %
logRSA_{rr}	[lg ms]	1.43	93.6 %	1.40	96.6 %	1.47	66.5 %
ln LF_{rr}	[ln ms ²]	6.63	52.8 %	6.87	68.9 %	6.21	32.2 %
ln HF_{rr}	[ln ms ²]	6.26	81.9 %	6.19	89.2 %	6.33	53.7 %
ln TOT_{rr}	[ln ms ²]	8.18	72.9 %	8.37	83.4 %	7.85	45.6 %
VQ_{rr}	[1]	0.37	5.1 %	0.68	6.7 %	-0.12	12.6 %
QPA_{rsa}	[1]	4.29	8.1 %	4.34	3.4 %	4.19	49.9 %
SQ_{HRI}	[%]	49.0	36.0 %				

Qualität	Zeit ok	99.9%	5-Minuten-Fenster ok	100.0%
-----------------	---------	-------	----------------------	--------

Charakteristik der Vergleichsgruppe	
Anzahl	0 - 133
Alter [Jahre]	29 - 35
Geschlecht	w

Experimentalwerte

Biologisches Äquivalenzalter (alpha)

31.9 (def. 4.3.11)

Abb. 18: Eine Übersichtstabelle der altersabhängigen Referenzdaten der 24 Stunden HRV Messung.

4 Statistische Datenanalyse

Die statistische Datenanalyse sowie die graphische Aufbereitung wurden mit dem Programm IBM SPSS 23.0 durchgeführt. Um die erhobenen Daten der Pre- und Post-Tests zu anonymisieren wurden die Namen der ProbandInnen durch Codes ersetzt. Sämtliche Daten wurden mittels Kolmogorov–Smirnov–Test und Shapiro–Wilk–Test auf Normalverteilung überprüft. Bei gegebener Normalverteilung beider Tests wurde der T-Test für gepaarte Stichproben zur Überprüfung der Unterschiede angewendet. Bei Verletzung der Normalverteilung wurde der Wilcoxon-Test durchgeführt da dieser auch bei nicht gegebener Normalverteilung der Stichproben zulässig ist. Das Signifikanzniveau (Irrtumswahrscheinlichkeit) wird mit 5 % (0.05) festgesetzt. Ermittelte p-Werte der statistischen Datenanalyse werden mit dem Signifikanzniveau von 0.05 verglichen. Bei einem Signifikanzniveau von $p < 0.05$ spricht man von einem signifikanten Unterschied.

Das Kollektiv der 49 ProbandInnen das an den Abschlusstestungen teilnahm wird als Gesamtkollektiv bezeichnet. Da insgesamt 18 Messungen der abschließenden 24 Stunden HRV Messung aufgrund von Messfehlern nicht zur statistischen Datenanalyse herangezogen werden konnten, wurden diese für die statistische Datenanalyse nicht berücksichtigt. Das HRV-Kollektiv mit ausreichender Messqualität der 24-Stunden-HRV-Messung setzt sich aus 31 ProbandInnen zusammen. Eine ausreichende Messqualität der 24-Stunden-Messung wurde bei mindestens 90 % gültiger 5-Minuten-Fenster und einer gültigen Mindestmessdauer von 22 Stunden festgelegt. Diese sind aus dem Chronogramm (Abb. 14) und der Übersichtstabelle der altersabhängigen Referenzdaten der HRV Indizes (Abb. 17) zu entnehmen

Die ProbandInnen wurden des Weiteren nach Geschlecht aufgeteilt um geschlechtsspezifische Unterschiede zu untersuchen.

- Geschlecht (Gruppe 1 = männlich; Gruppe 2 = weiblich)

Die Annahmen werden für das Gesamtkollektiv (N=49), das HRV-Kollektiv (N=31), sowie für die Gruppe der Männer des HRV Kollektivs (N=13) und für die Gruppe der Frauen des HRV-Kollektivs (N=18) getestet.

4.1 Hypothesenprüfung ohne Gruppeneinteilung

A1: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der Gesamtvariabilität (SDNN).

- HRV-Kollektiv (N=31)

Gesamtvariabilität 24 Stunden (SDNN) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV 24h SDNN [ms]_post	63,1171	31	18,52536	3,32725
	HRV 24h SDNN [ms]_pre	62,6565	31	17,70498	3,17991

Tab. 3: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN (N=31).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	HRV 24h SDNN [ms]_post – HRV 24h SDNN [ms]_pre	,46065	11,32822	2,03461	-3,69458	4,61587	,226	30	,822

Tab. 4: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN mittels T-Test bei gepaarten Stichproben (N=31).

Die SDNN – 24 Stunden hat sich beim HRV-Kollektiv nicht signifikant ($P = 0.822$) gesteigert.

Gesamtvariabilität-Schlaf (SDNN) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV Schlaf SDNN [ms]_post	65,2187	31	23,58645	4,23625
	HRV 24h SDNN [ms]_pre	62,6565	31	17,70498	3,17991

Tab. 5: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN–Schlaf (N=31).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	HRV Schlaf SDNN [ms]_post – HRV 24h SDNN [ms]_pre	2,56226	18,23734	3,27552	-4,12725	9,25177	,782	30	,440

Tab. 6: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN-Schlaf mittels *T-Test bei gepaarten Stichproben* (N=31).

Die SDNN - Schlaf hat sich beim HRV-Kollektiv nicht signifikant ($P = 0.440$) gesteigert.

A2: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der „Total power“ (TP).

- HRV-Kollektiv (N=31)

Total Power–24 Stunden (TP) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV 24h In TOTrr [ln ms2] _post	7,8165	31	,62215	,11174
	HRV 24h In TOTrr [ln ms2] _pre	7,8223	31	,57911	,10401

Tab. 7: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP (N=31).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV 24h ln TOTrr [ln ms2] _post - HRV 24h ln TOTrr [ln ms2] _pre	-,00581	,30766	,05526	-,11866	,10704	-,105	30	,917

Tab. 8: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP mittels T-Test bei gepaarten Stichproben (N=31).

Die In TP -24 Stunden hat sich beim HRV-Kollektiv nicht signifikant ($P = 0.917$) gesenkt.

Total Power-Schlaf (TP) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2] _post	7,8071	31	,74025	,13295
	HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2] _pre	7,8552	31	,73683	,13234

Tab. 9: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP-Schlaf (N=31).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2]_post - HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2]_pre	-,04806	,45960	,08255	-,21665	,12052	-,582	30	,565

Tab. 10: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP-Schlaf mittels T-Test bei gepaarten Stichproben (N=31).

Die In TP-Schlaf hat sich beim HRV-Kollektiv nicht signifikant ($P = 0.565$) gesenkt.

A3: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Verbesserung des HF Spektrums.

- **HRV-Kollektiv (N=31)**

High Frequency Spektrum – 24 Stunden (HF) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV 24h In HFrr [ln ms2]_post	5,2203	31	,93041	,16711
	HRV 24h In HFrr [ln ms2]_pre	5,2374	31	,93286	,16755

Tab. 11: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF (N=31).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_post – HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_pre	-,01710	,44818	,08049	-,18149	,14730	-,212	30	,833

Tab. 12: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der ln HF mittels T-Test bei gepaarten Stichproben (N=31).

Die ln HF – 24 Stunden hat sich beim HRV-Kollektiv nicht signifikant ($P = 0.833$) gesenkt.

High Frequency Spektrum-Schlaf (HF) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV Schlaf ln HFrr [ln ms2]_post	5,6826	31	1,08010	,19399
	HRV Schlaf ln HFrr [ln ms2]_pre	5,6855	31	1,15319	,20712

Tab. 13: Deskriptive Statistik der Veränderung der ln HF-Schlaf (N=31).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_post - HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_pre	-,00290	,59146	,10623	-,21985	,21404	-,027	30	,978

Tab. 14: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der ln HF-Schlaf mittels T-Test bei gepaarten Stichproben (N=31).

Die In HF-Schlaf hat sich beim HRV-Kollektiv nicht signifikant ($P = 0.978$) gesenkt.

A4: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zur Verbesserung der aeroben Kapazität.

- **Gesamtkollektiv (N=49)**

$W_{\max}$ - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

	Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1 Ergometrie maximale Leistung [Watt] _post	177,2347	49	40,23774	5,74825
Ergometrie maximale Leistung [Watt] _pre	170,265	49	39,5169	5,6453

Tab. 15: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung (N=49).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	Ergometrie maximale Leistung [Watt] _post - Ergometrie maximale Leistung [Watt] _pre	6,96939	14,11241	2,01606	2,91583	11,02294	3,457	48	,001

Tab. 16: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels T-Test bei gepaarten Stichproben (N=49).

Die $W_{\max}$ hat sich beim Gesamtkollektiv um 4,1 % signifikant ($P = 0.001$) gesteigert.

- **HRV-Kollektiv (N=31)**

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	Ergometrie maximale Leistung [Watt] _post	182,4742	31	40,72597	7,31460
	Ergometrie maximale Leistung [Watt] _pre	176,339	31	37,7770	6,7850

Tab. 17: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung (N=31).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	Ergometrie maximale Leistung [Watt] _post – Ergometrie maximale Leistung [Watt] _pre	6,13548	15,57095	2,79662	,42401	11,84695	2,194	30	,036

Tab. 18: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels T-Test bei gepaarten Stichproben (N=31).

Die $W_{\max}$ hat sich beim HRV-Kollektiv um 3.5 % signifikant ($P = 0.036$) gesteigert.

4.2 Hypothesenprüfung - Gruppeneinteilung nach Geschlecht

A1: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der Gesamtvariabilität (SDNN).

Frauen:

- Probandinnen des HRV-Kollektivs (N=18)

Gesamtvariabilität 24 Stunden (SDNN) – keine Normalverteilung

Deskriptive Statistik

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
HRV 24h SDNN [ms]_post	18	44,54	97,61	63,4672	15,81314
HRV 24h SDNN [ms]_pre	18	41,87	100,28	67,4583	17,76956
Gültige Werte (Listenweise)	18				

Tab. 19: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN 24 Stunden der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Der Median der Differenzen zwischen HRV 24h SDNN [ms]_post und HRV 24h SDNN [ms]_pre ist gleich 0.	Wilcoxon-Vorzeichenrangtest bei verbundenen Stichproben	,064	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanzen werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

Tab. 20: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN mittels Wilcoxon-Test der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Die SDNN 24 Stunden der Frauen des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.064$) reduziert.

Gesamtvariabilität-Schlaf (SDNN) – keine Normalverteilung

Deskriptive Statistik

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
HRV Schlaf SDNN [ms]_post	18	42,96	107,72	61,4789	17,58593
HRV Schlaf SDNN [ms]_pre	18	32,15	115,14	68,7056	22,35722
Gültige Werte (Listenweise)	18				

Tab. 21: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN-Schlaf der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Der Median der Differenzen zwischen HRV Schlaf SDNN [ms]_post und HRV Schlaf SDNN [ms]_pre ist gleich 0.	Wilcoxon-Vorzeichenrangtest bei verbundenen Stichproben	,031	Nullhypothese ablehnen

Asymptotische Signifikanzen werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

Tab. 22: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN-Schlaf mittels Wilcoxon-Test der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Die SDNN-Schlaf der Frauen des HRV-Kollektivs hat sich um 10.52 % signifikant ($P = 0.031$) reduziert.

Männer:

- Probanden des HRV-Kollektivs (N=13)

Gesamtvariabilität 24 Stunden (SDNN) – Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

	Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1 HRV 24h SDNN [ms]_post	62,6323	13	22,43410	6,22210
HRV 24h SDNN [ms]_pre	56,0077	13	15,93319	4,41907

Tab. 23: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN 24 Stunden der männlichen Probanden (N=13).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	HRV 24h SDNN [ms]_post – HRV 24h SDNN [ms]_pre	6,62462	11,63957	3,22824	–,40911	13,65834	2,052	12	,063

Tab. 24: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN 24 Stunden mittels T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden (N=13).

Die SDNN 24 Stunden der Männer des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.063$) gesteigert.

Gesamtvariabilität-Schlaf (SDNN) – Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV Schlaf SDNN [ms]_post	70,3969	13	30,04412	8,33274
	HRV Schlaf SDNN [ms]_pre	62,5708	13	24,19448	6,71034

Tab. 25: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN-Schlaf der männlichen Probanden (N=13).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	HRV Schlaf SDNN [ms]_post – HRV Schlaf SDNN [ms]_pre	7,82615	17,81666	4,94145	–2,94035	18,59265	1,584	12	,139

Tab. 26: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN 24 Stunden mittels T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden (N=13).

Die SDNN-Schlaf der Männer des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.139$) gesteigert.

A2: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Steigerung der „Total power“ (TP).

Frauen:

- **Probandinnen des HRV-Kollektivs (N=18)**

Total Power 24 Stunden (TP) - keine Normalverteilung

Deskriptive Statistik

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
HRV 24h In TOTrr [ln ms2] _post	18	7,17	8,71	7,8494	,47909
HRV 24h In TOTrr [ln ms2] _pre	18	7,12	8,81	7,9700	,49544
Gültige Werte (Listenweise)	18				

Tab. 27: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP 24 Stunden der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Der Median der Differenzen zwischen HRV 24h In TOTrr [ln ms2] _post und HRV 24h In TOTrr [ln ms2] _pre ist gleich 0.	Wilcoxon-Vorzeichenrangtest bei verbundenen Stichproben	,055	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanzen werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

Tab. 28: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP 24 Stunden mittels Wilcoxon-Test der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Die In TP – 24 Stunden der Frauen des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.055$) reduziert.

Total Power-Schlaf (TP) – Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

	Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1 HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2] _post	7,7300	18	,51368	,12108
HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2] _pre	7,9511	18	,62931	,14833

Tab. 29: Deskriptive Statistik der Veränderung der TP-Schlaf der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2]_post - HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2]_pre	-,22111	,42230	,09954	-,43112	-,01110	-2,221	17	,040

Tab. 30: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der TP-Schlaf mittels T-Test für gepaarte Stichproben der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Die In TP-Schlaf der Frauen des HRV-Kollektivs hat sich um 2,78 % signifikant ($P = 0.040$) reduziert.

Männer:

- Probanden des HRV-Kollektivs (N=13)

Total Power 24 Stunden (TP) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV 24h In TOTrr [ln ms2]_post	7,7708	13	,79914	,22164
	HRV 24h In TOTrr [ln ms2]_pre	7,6177	13	,64234	,17815

Tab. 31: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP 24 Stunden der männlichen Probanden (N=13).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabw eichung	Standardfehl er des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	HRV 24h ln TOTrr [ln ms2] _post – HRV 24h ln TOTrr [ln ms2] _pre	,15308	,30750	,08529	-,03274	,33890	1,795	12	,098

Tab. 32: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP 24 Stunden mittels T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden (N=13).

Die In TP 24 Stunden der Männer des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.098$) gesteigert.

Total Power-Schlaf (TP) – Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2] _post	7,9138	13	,98734	,27384
	HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2] _pre	7,7223	13	,87368	,24232

Tab. 33: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP–Schlaf der männlichen Probanden (N=13).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2]_post – HRV Schlaf In TOTrr [ln ms2]_pre	,19154	,41028	,11379	-,05639	,43947	1,683	12	,118

Tab. 34: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP-Schlaf mittels T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden (N=13).

Die In TP-Schlaf der Männer des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.118$) gesteigert.

A3: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zu einer Verbesserung des HF Spektrums.

Frauen:

- **Probandinnen des HRV-Kollektivs (N=18)**

High Frequency Spektrum 24 Stunden (HF) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_post	5,3844	18	,72248	,17029
	HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_pre	5,5344	18	,73321	,17282

Tab. 35: Deskriptive Statistik der Veränderung der ln HF 24 Stunden der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_post – HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_pre	-,15000	,46423	,10942	-,38085	,08085	-1,371	17	,188

Tab. 36: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der ln HF 24 Stunden mittels T-Test für gepaarte Stichproben der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Die ln HF 24 Stunden der Frauen des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.188$) reduziert.

High Frequency Spektrum – Schlaf (HF) - Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_post	5,7550	18	,74614	,17587
	HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_pre	5,9300	18	,92881	,21892

Tab. 37: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF-Schlaf der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_post – HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_pre	-,17500	,58491	,13786	-,46587	,11587	-1,269	17	,221

Tab. 38: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In HF-Schlaf mittels T-Test für gepaarte Stichproben der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Die In HF-Schlaf der Frauen hat sich nicht signifikant ($P = 0.221$) reduziert.

Männer:

- Probandinnen des HRV-Kollektivs (N=13)

High Frequency Spektrum 24 Stunden (HF) – Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV 24h In HFrr [ln ms2]_post	4,9931	13	1,15254	,31966
	HRV 24h In HFrr [ln ms2]_pre	4,8262	13	1,04806	,29068

Tab. 39: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF 24 Stunden der männlichen Probanden (N=13).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_post - HRV 24h ln HFrr [ln ms2]_pre	,16692	,36561	,10140	-,05401	,38786	1,646	12	,126

Tab. 40: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der ln HF 24 Stunden mittels T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden (N=13).

Die ln HF 24 Stunden der Männer des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.126$) gesteigert.

High Frequency Spektrum Schlaf (HF) – Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	HRV Schlaf ln HFrr [ln ms2]_post	5,5823	13	1,45226	,40279
	HRV Schlaf ln HFrr [ln ms2]_pre	5,3469	13	1,37427	,38115

Tab. 41: Deskriptive Statistik der Veränderung der ln HF-Schlaf der männlichen Probanden (N=13).

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_post – HRV Schlaf In HFrr [ln ms2]_pre	,23538	,53286	,14779	-,08662	,55739	1,593	12	,137

Tab. 42: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der ln HF-Schlaf mittels T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden (N=13).

Die ln HF-Schlaf der Männer des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.137$) gesteigert.

A4: Ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über eine Dauer von sechs Monaten führt zur Verbesserung der aeroben Kapazität.

Frauen:

- **Probandinnen des HRV-Kollektivs (N=18)**

$W_{\max}$ – Normalverteilung

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	Ergometrie maximale Leistung [Watt] _post	161,4333	18	24,17169	5,69732
	Ergometrie maximale Leistung [Watt] _pre	156,756	18	24,4444	5,7616

Tab. 43: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung der weiblichen ProbandInnen (N=18)

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere				Obere
Paaren 1	Ergometrie maximale Leistung [Watt]_post – Ergometrie maximale Leistung [Watt]_pre	4,67778	11,79459	2,78001	-1,18754	10,54309	1,683	17	,111

Tab. 44: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels T-Test für gepaarte Stichproben der weiblichen ProbandInnen (N=18).

Die $W_{\max}$ der Frauen des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant ($P = 0.111$) gesteigert.

Männer:

- **Probanden des HRV-Kollektivs (N=13)**

W_{max} – keine Normalverteilung**Deskriptive Statistik**

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Ergometrie maximale Leistung [Watt]_post	13	105,00	289,00	211,6077	41,65606
Ergometrie maximale Leistung [Watt]_pre	13	117,9	280,5	203,454	36,7357
Gültige Werte (Listenweise)	13				

Tab. 45: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung *der männlichen Probanden* (N=13).

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Der Median der Differenzen zwischen Ergometrie maximale Leistung [Watt]_post und Ergometrie maximale Leistung [Watt]_pre ist gleich 0.	Wilcoxon-Vorzeichenrangtest bei verbundenen Stichproben	,196	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanzen werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

Tab. 46: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels Wilcoxon – Test für gepaarte Stichproben *der männlichen Probanden* (N=13).

Die W_{max} der Männer des HRV-Kollektivs hat sich nicht signifikant (P = 0.196) gesteigert.

5 Zusammenfassung

Ein Ziel dieser Arbeit war es die Frage zu beantworten ob ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über Dauer von sechs Monaten zu Änderungen von Indizes der Herzfrequenzvariabilität führt. Insbesondere wurden die Gesamtvariabilität (SDNN), die Leistung des hochfrequenten Spektralbereichs (HF) sowie die autonome Gesamtaktivität (TP) untersucht.

Bisher gibt es nur eine sehr begrenzte Anzahl an Studien die sich mit den Auswirkungen von HIPT auf die Aktivität des ANS beschäftigen. Eine Studie von Brian et al. (2015) zeigte, dass eine Einheit HIPT zu signifikanten Reduktionen der HF unmittelbar nach Belastung führen kann. Im Vergleich zu HIIT wurden bei HIPT signifikant größere Reduktionen der HF festgestellt wodurch gezeigt wurde, dass diese Trainingsform zu akutem Stress des ANS führt. Des Weiteren demonstrierte diese Studie dass HIPT hohe Anforderungen an das Herzkreislautsystem stellt, die sich in der durchschnittlichen Herzfrequenz ($85\% \text{ HR}_{\text{max}}$) über einen Zeitraum von 20 Minuten widerspiegeln. Derzeit sind in der Literatur keine Langzeitstudien bezüglich der Auswirkung von HIPT auf die HRV vorhanden. Klassisches Krafttraining hat unmittelbar nach Belastung ebenfalls einen signifikanten Effekt auf das ANS (K. Heffernan, Sosnoff, Jae, Gates, & Fernhall, 2008; Rezk, Marrache, Tinucci, Mion Jr, & Forjaz, 2006) jedoch scheint es, als ob Krafttraining keinen langfristigen Effekt auf die HRV bei gesunden Erwachsenen hat.

Diese Ergebnisse werden von folgenden Studien bestätigt, die gezeigt haben, dass 8 Wochen Krafttraining zu keiner Änderungen der HRV bei gesunden Erwachsenen führten (J. R. Carter, Ray, Downs, & Cooke, 2003; Cooke & Carter, 2005). Obwohl folgende Studien keine Effekte bezüglich der HRV zeigen konnten, führte Krafttraining zu einer Verbesserung der Herzfrequenzerholung, die auf positive Auswirkungen dieser Trainingsform auf die Modulation des N. Vagus hindeutet (K. S. Heffernan, Fahs, Shinsako, Jae, & Fernhall, 2007; Otsuki et al., 2007).

Aus den Ergebnissen der genannten Studien lässt sich schlussfolgern, dass klassisches Krafttraining die HRV von gesunden Erwachsenen nicht verbessern kann. Dies ist vermutlich einerseits auf die bereits normale Funktion des ANS (Kingsley & Figueroa, 2014) und andererseits auf den zu geringen Reiz auf Herzkreislautsystems zurückzuführen. Eine Studie von Figueroa et al. (2008) konnte jedoch zeigen, dass Krafttraining über einen Zeitraum von 16 Wochen bei übergewichtigen Frauen mit Fibromyalgie zu signifikanten Steigerungen der TP, HF

und RMSSD führt. Auch Piras et al. (2015) konnten zeigen, dass Krafttraining an Maschinen zu signifikanten Steigerungen der HRV (RMSSD, SDNN, LF, HF), VO_{2max} sowie der Baroreflexsensitivität führen kann. Die 12-wöchige Trainingsintervention wurde jedoch in Form eines Zirkeltrainings durchgeführt, wobei über einen Zeitraum von etwa 40 Minuten 60-80 % der HR_{max} erreicht wurde. Im Vergleich mit HIIT wurden durch das Zirkeltraining keine signifikanten Unterschiede bezüglich Steigerungen der HRV, VO_{2max} und der Baroreflexsensitivität erzielt. Anzumerken ist, dass es sich um junge gesunde inaktive ProbandInnen mit geringer aeroben Leistungsfähigkeit handelt (23 ± 3 Jahre, VO_{2max} 32 ± 8 ml/kg/min). Krafttraining scheint also einen positiven Effekt auf die HRV bei Personen mit Dysfunktionen des ANS und mit einer geringen aeroben Leistungsfähigkeit haben zu können, wenn es mit ausreichender Intensität durchgeführt wird. Steigerungen der HRV Indizes durch klassisches Krafttraining in dieser Studie sind vermutlich auf mangelnde körperliche Leistungsfähigkeit und Übergewicht zurückzuführen (Kingsley & Figueroa, 2014).

Zirkeltraining und HIPT scheinen durch ihre hohe Intensität deutlich höhere Anforderungen an das kardiovaskuläre System und das ANS zu stellen als dies bei klassischem Krafttraining der Fall ist. Laut Albert et al. (2000) führt hoch intensives Krafttraining (HIPT) durch seine geringe Pausendauer und hohe Intensität höchst wahrscheinlich zu einem hohen Grad an physiologischer Belastung (Albert et al., 2000). Diese Aussage konnte durch Brian et al. (2015) bestätigt werden, die während 20 Minuten HIPT eine durchschnittliche HR von 85 % der HR_{max} beobachten konnten. Des Weiteren führte HIPT zu einer starken Reduktion der Aktivität des ANS direkt nach Belastungsende.

Laut (Hottenrott, 2007) führt aerobes Ausdauertraining über einen Zeitraum von 3 Monaten bei gesunden Personen und Patienten mit Herzkreislauferkrankungen zu einer Steigerung der Aktivität des Parasympathikus, der Gesamtvariabilität sowie einer Reduktion der Ruheherzfrequenz. Als Voraussetzung dafür gilt eine optimal angepasste Belastungsintensität und Belastungsdauer, die auf die individuelle Leistungsfähigkeit angepasst werden muss. Dies konnte auch für die kurze hoch intensive Trainingsform HIIT gezeigt werden. Zahlreiche Untersuchungen konnten nachweisen, dass HIIT bei gesunden untrainierten Personen zu signifikanten Steigerungen der HRV sowie der VO_{2max} führt (S. H. Boutcher et al., 2013; Kiviniemi et al., 2014; Rakobowchuk et al., 2013). Aus der vorliegenden Literatur ist anzunehmen, dass HIPT durch seine hohe Intensität zu Verbesserungen der HRV führen kann.

Die Ergebnisse der in Kapitel drei beschriebenen Studie konnten diese These jedoch nicht bestätigen. Die 24 Stunden HRV Messung ergab weder für die gesamte Messdauer, noch für die Schlafphase signifikante Änderungen der beobachteten Parameter. Bei geteilter Betrachtung der ProbandInnen in Gruppen von Frauen und Männern konnte jedoch eine signifikante Reduktion um 10.52 % ($P = 0.031$) der SDNN im Schlaf der Frauen sowie eine signifikante Reduktion um 2.78 % ($P = 0.040$) der TP im Schlaf der Frauen festgestellt werden. Die Annahme, dass ein CrossFit®-basiertes HIPT zu Steigerungen von HRV Indizes führt konnte demnach nicht bestätigt werden. Bemerkenswert ist, dass sich alle übrigen HRV Indizes bei Frauen sowohl während der gesamten Messdauer als auch während der Schlafphase nach Durchführung der Trainingsintervention nicht signifikant reduziert haben. Bei den Männern war ein gegenteiliger Trend zu erkennen. Sämtliche untersuchten HRV Indizes der Männer, während der gesamten Messdauer sowie während der Schlafphase, zeigten eine nicht signifikante Steigerung im Vergleich zur Ausgangsmessung. Möglicherweise sind die mangelnden Anpassungen des ANS im Zuge dieser Trainingsintervention auf einen zu geringen Reiz auf das Herzkreislaufsystems sowie das ANS zurückzuführen. Da keine Messungen der HR während der Trainingseinheiten durchgeführt wurden, ist dies jedoch nicht zu überprüfen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es die Frage zu beantworten welche Auswirkung ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining mit einer Dauer von sechs Monaten auf die kardiale Leistungsfähigkeit hat.

Ausgehend von dem Ergebnis der Studie, dass sich die W_{max} sowohl beim Gesamtkollektiv ($N=49$) um 4.1 % signifikant ($P = 0.001$) als auch beim HRV-Kollektiv ($N=31$) um 3.5 % signifikant ($P = 0.036$) gesteigert hat, wäre eine dementsprechende Verbesserung der kardialen Leistung in Form der VO_{2max} zu erwarten. Diese wurde im Zuge dieser Studie jedoch nicht direkt gemessen da keine Belastungsergospirometrie sondern eine Belastungsergometrie auf einem Fahrrad durchgeführt wurde. In der Studie von (McNaughton, Roberts, & Bentley, 2006) wurde gezeigt, dass die maximale mechanischen Leistungsfähigkeit die im Zuge einer Stufenergometrie (3 Minuten Stufen) gemessen wurde, eine valide physiologische Variable ist, die mit der Ausdauerleistungsfähigkeit in Verbindung steht. Auch (Bentley, Wilson, Davie, & Zhou, 1998) konnten zeigen, dass die W_{max} (Stufenergometrie mit 3 Minuteninkrement) mit der Zeitdauer beim 40km Zeitfahren

korreliert. Davon ausgehend lassen die Ergebnisse des Gesamtkollektivs und des HRV-Kollektivs auf eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit schließen.

Bei geteilter Betrachtung der ProbandInnen in Gruppen von Frauen und Männer konnte jedoch keine signifikante Steigerung der $W_{\max}$ festgestellt werden. Ein anderes Ergebnis zeigt eine Studie von (M. M. Smith et al., 2013), bei der 10 Wochen HIPT zu signifikanten Steigerungen der $VO_{2\max}$ bei Männern (+13.6 %) und Frauen (+11.8 %) führte. Eine Studie von Beltz et al. (2013) untersuchte die Auswirkungen eines „Kettlebell“-Trainingsprogramm auf die aerobe Leistungsfähigkeit von „National Collegiate Athletic Association Division I“ Fußballspielerinnen, die 3 Trainingseinheiten (20 Minuten; 15 Sekunden Arbeit, 15 Sekunden Pause) pro Woche über einen Zeitraum von 4 Wochen absolvierten. Diese Trainingsform ist HIPT und Zirkeltraining sehr ähnlich und führte ebenfalls zu signifikanten Steigerungen der $VO_{2\max}$. Der Literatur zufolge stellt hoch intensives Zirkeltraining durch seine hohe Intensität beträchtliche Ansprüche an das kardiorespiratorische System und führt zu signifikanten Steigerungen der $VO_{2\max}$ (Myers et al., 2015), der Arbeitskapazität sowie zu einer Abnahme der Ruheherzfrequenz (Miller et al., 2014). Die Studie von (Miller et al., 2014) zeigt, dass die durchschnittliche HR bei hoch intensivem Zirkeltraining etwa 85 % der $HR_{\max}$ betragen kann. Auch Brian et al. (2015) konnten im Zuge ihrer Studie zeigen, dass die durchschnittliche HR während 20 Minuten HIPT etwa 85 % der $HR_{\max}$ betrug. Der Literatur und der Ergebnisse der Studie „Bewegung Verändert Alltag- Einfluss von funktionellem Krafttraining auf funktionelle- und gesundheitsbezogene Parameter zur betrieblichen Vorsorge“ zufolge führt HIPT zu erheblichem Stress auf den Organismus der zu signifikanten Steigerungen der Ausdauerleistungsfähigkeit führt. Die Verbesserungen der aeroben Kapazität die Brian et al. (2015) zeigen konnten sind mit Ergebnissen bisher durchgeführter Studien bezüglich der Auswirkungen von HIPT, HIIT und aerobem Training auf die $VO_{2\max}$ (Burgomaster et al., 2008; M. M. Smith et al., 2013; Tjønnå et al., 2008; Tremblay, Simoneau, & Bouchard, 1994) vergleichbar. Bei geteilter Betrachtung der ProbandInnen in Gruppen von Frauen und Männer konnte jedoch nicht bestätigt werden, dass ein CrossFit®-basiertes hoch intensives funktionelles Krafttraining über Dauer von sechs Monaten zu signifikanten Änderungen der Ausdauerleistungsfähigkeit führt.

Wie bereits erwähnt gibt es bisher nur eine extrem begrenzte Anzahl an Studien die sich mit den Auswirkungen von HIPT auf die HRV und die Ausdauerfähigkeit beschäftigt. Steigerungen der $VO_{2\max}$ wurden zuvor nur mit aerobem Training und

HIIT in Verbindung gebracht. Es gibt jedoch durchaus Grund zur Annahme, dass diese relativ neue Trainingsform ebenfalls positive Auswirkungen auf die VO_{2max} haben kann, wie die Studie „Bewegung Verändert Alltag- Einfluss von funktionellem Krafttraining auf funktionelle- und gesundheitsbezogene Parameter zur betrieblichen Vorsorge“ sowie die Studie von (M. M. Smith et al., 2013) gezeigt haben. Hoch intensive Trainingsprotokolle wie HIIT konnten in der Vergangenheit sowohl signifikante Steigerungen der VO_{2max} als auch der HRV auslösen (S. H. Boutcher et al., 2013; Kiviniemi et al., 2014; Rakobowchuk et al., 2013). Es ist anzunehmen, dass HIPT durch seine hohe Intensität wie HIIT zu Verbesserungen der Modulation des ANS führen kann. Dies konnte durch die durchgeführte Studie jedoch nicht bestätigt werden. Anzumerken ist jedoch, dass die Steigerungen der W_{max} des Gesamtkollektivs (N=49) um 4.1 % und des HRV-Kollektiv (N=31) um 3.5 % nur relativ gering ausfielen. Ein möglicher Grund dafür war eventuell eine zu geringe Trainingsintensität um große Steigerungen der Ausdauerleistungsfähigkeit und damit mögliche einhergehende Verbesserungen der HRV zu bewirken. Es ist anzunehmen, dass die mangelnde Erfahrung der ProbandInnen im Kraftsport Einfluss auf die Arbeitsintensität in dieser Studie hatte. Eine Möglichkeit um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse im Zuge zukünftiger Studien bezüglich HIPT und dessen Auswirkungen auf die HRV sowie die kardiale Leistungsfähigkeit zu erlangen, wäre eine Steuerung und Überprüfung der Trainingsintensität über die Herzfrequenz.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit kann darauf geschlossen werden, dass HIPT zur Steigerung der kardialen Leistungsfähigkeit führt. Diese Ergebnisse könnten sowohl für Athleten als auch für Untrainierte bedeutsam sein, da diese Trainingsmethode im Vergleich mit HIIT zu ähnlichen Steigerungen der VO_{2max} (Burgomaster et al., 2008; Tremblay et al., 1994) führt. Zusätzlich kommt es zu einer Verbesserung der Maximalkraft (Alcaraz et al. 2014) sowie der Laufgeschwindigkeit und der Sprungkraft (Kotzamanidis, Chatzopoulos, Michailidis, Papaiaikovou, & Patikas, 2005). HIPT ist eine zeitsparende Trainingsform die Vorteile von Ausdauertraining und Krafttraining vereint. Ob HIPT auch zu Steigerungen der HRV führen kann, muss in zukünftigen Studien erforscht werden.

6 Literaturverzeichnis

Acar, B., Savelieva, I., Hemingway, H., & Malik, M. (2000). Automatic ectopic beat elimination in short-term heart rate variability measurement. *Computer methods and programs in biomedicine*, 63(2), 123-131.

Acharya, U. R., Joseph, K. P., Kannathal, N., Lim, C. M., & Suri, J. S. (2006). Heart rate variability: a review. *Medical and biological engineering and computing*, 44(12), 1031-1051.

Achten, J., & Jeukendrup, A. E. (2003). Heart rate monitoring. *Sports medicine*, 33(7), 517-538.

Al Haddad, H., Laursen, P., Chollet, D., Ahmaidi, S., & Buchheit, M. (2011). Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *International journal of sports medicine*, 32(8), 598.

Al-Ani, M., Munir, S., White, M., Townend, J., & Coote, J. (1996). Changes in RR variability before and after endurance training measured by power spectral analysis and by the effect of isometric muscle contraction. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 74(5), 397-403.

Albert, C. M., Mittleman, M. A., Chae, C. U., Lee, I.-M., Hennekens, C. H., & Manson, J. E. (2000). Triggering of sudden death from cardiac causes by vigorous exertion. *New England Journal of Medicine*, 343(19), 1355-1361.

Albinet, C. T., Boucard, G., Bouquet, C. A., & Audiffren, M. (2010). Increased heart rate variability and executive performance after aerobic training in the elderly. *European journal of applied physiology*, 109(4), 617-624.

Amano, M., Kanda, T., Ue, H., & Moritani, T. (2001). Exercise training and autonomic nervous system activity in obese individuals. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(8), 1287-1291.

Armstrong, R. G., Ahmad, S., Seely, A. J., & Kenny, G. P. (2012). Heart rate variability and baroreceptor sensitivity following exercise-induced hyperthermia in endurance trained men. *European journal of applied physiology*, 112(2), 501-511.

Aubert, A. E., Seps, B., & Beckers, F. (2003). Heart rate variability in athletes. *Sports medicine*, 33(12), 889-919.

Babiash, P. E. (2013). *Determining the energy expenditure and relative intensity of two crossfit workouts*. UNIVERSITY OF WISCONSIN-LA CROSSE.

- Bangsbo, J., Graham, T., Johansen, L., & Saltin, B. (1994). Muscle lactate metabolism in recovery from intense exhaustive exercise: impact of light exercise. *Journal of Applied Physiology*, 77(4), 1890-1895.
- Bayati, M., Farzad, B., Gharakhanlou, R., & Agha-Alinejad, H. (2011). A practical model of low-volume high-intensity interval training induces performance and metabolic adaptations that resemble 'all-out' sprint interval training. *Journal of sports science & medicine*, 10(3), 571.
- Beaston-Wimmer, P., & Smolen, A. J. (1991). Gender differences in neurotransmitter expression in the rat superior cervical ganglion. *Developmental brain research*, 58(1), 123-128.
- Beltz, N., Erbes, D., Porcari, J. P., Martinez, R., Doberstein, S., & Foster, C. (2013). Effects of kettlebell training on aerobic capacity, muscular strength, balance, flexibility, and body composition. *Journal of Fitness Research*, 2(2).
- Bentley, D. J., Wilson, G. J., Davie, A. J., & Zhou, S. (1998). Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 38(3), 201-207.
- Benton, C. R., Nickerson, J. G., Lally, J., Han, X.-X., Holloway, G. P., Glatz, J. F., . . . Bonen, A. (2008). Modest PGC-1 α overexpression in muscle in vivo is sufficient to increase insulin sensitivity and palmitate oxidation in subsarcolemmal, not intermyofibrillar, mitochondria. *Journal of Biological Chemistry*, 283(7), 4228-4240.
- Berbalk, A., Bauer, S., & Rombach, G. (2001). Diagnostische Aussage der Herzfrequenzvariabilität in Sportmedizin und Trainingswissenschaft. *Z Angew Trainingswiss*, 2, 156-176.
- Bergeron, M. F., Nindl, B. C., Deuster, P. A., Baumgartner, N., Kane, S. F., Kraemer, W. J., . . . O'Connor, F. G. (2011). Consortium for Health and Military Performance and American College of Sports Medicine consensus paper on extreme conditioning programs in military personnel. *Current sports medicine reports*, 10(6), 383-389.
- Bernardi, L., & Piepoli, M. (2001). [Autonomic nervous system adaptation during physical exercise]. *Italian heart journal. Supplement: official journal of the Italian Federation of Cardiology*, 2(8), 831-839.
- Berntson, G. G., Bigger, J. T., Eckberg, D. L., Grossman, P., Kaufmann, P. G., Malik, M., . . . Stone, P. H. (1997). Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34(6), 623-648.

- Bigger, J. T., Fleiss, J. L., Rolnitzky, L. M., & Steinman, R. C. (1993). Frequency domain measures of heart period variability to assess risk late after myocardial infarction. *Journal of the American College of Cardiology*, 21(3), 729-736.
- Bigger, J. T., Fleiss, J. L., Steinman, R. C., Rolnitzky, L. M., Schneider, W. J., & Stein, P. K. (1995). RR variability in healthy, middle-aged persons compared with patients with chronic coronary heart disease or recent acute myocardial infarction. *Circulation*, 91(7), 1936-1943.
- Billat, L. V. (2001). Interval training for performance: a scientific and empirical practice. *Sports medicine*, 31(1), 13-31.
- Billman, G. E. (2011). Heart rate variability—a historical perspective. *Frontiers in physiology*, 2.
- Billman, G. E. (2013). The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Frontiers in physiology*, 4.
- Blair, S. N. (2009). Physical inactivity: the biggest public health problem of the 21st century. *British journal of sports medicine*, 43(1), 1-2.
- Blomqvist, C. G., & Saltin, B. (1983). Cardiovascular adaptations to physical training. *Annual Review of Physiology*, 45(1), 169-189.
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*, 14(5), 377-381.
- Borst, C., Hollander, A., & Bouman, L. (1972). Cardiac acceleration elicited by voluntary muscle contractions of minimal duration. *Journal of Applied Physiology*, 32(1), 70-77.
- Boutcher, S., Meyer, B. J., Craig, G. A., & Astheimer, L. (1998). Resting autonomic function in aerobically trained and untrained postmenopausal women. *JOURNAL OF AGING AND PHYSICAL ACTIVITY*, 6, 310-316.
- Boutcher, S. H. (2010). High-intensity intermittent exercise and fat loss. *Journal of obesity*, 2011.
- Boutcher, S. H., Park, Y., Dunn, S. L., & Boutcher, Y. N. (2013). The relationship between cardiac autonomic function and maximal oxygen uptake response to high-intensity intermittent-exercise training. *Journal of sports sciences*, 31(9), 1024-1029.

Boutcher, S. H., & Stein, P. (1995). Association between heart rate variability and training response in sedentary middle-aged men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(1), 75-80.

Boyle, M. (2010). *Functional Training: das Erfolgsprogramm der Spitzensportler; [Bewegungsabläufe perfektionieren, Muskelgruppen stärken, individuelle Schwächen beheben]*: Riva-Verlag.

Brenner, I. K., Thomas, S., & Shephard, R. J. (1998). Autonomic regulation of the circulation during exercise and heat exposure. *Sports medicine*, 26(2), 85-99.

Brian, K. M., John, Q. C., Daniel, B. L., Gretchen, O. D., Michael, E. R., Kyle, T. J., & Price, B. M. (2015). Autonomic Responses to an Acute Bout of High-Intensity Body Weight Resistance Exercise vs. Treadmill Running. *J Strength Cond Res*. doi: 10.1519/jsc.0000000000001173

Brooks, G. A., Fahey, T. D., & White, T. P. (1996). *Exercise physiology: Human bioenergetics and its applications*: Mayfield publishing company.

Buccelletti, E., Gilardi, E., Scaini, E., Galiuto, L., Persiani, R., Biondi, A., . . . Silveri, N. G. (2009). Heart rate variability and myocardial infarction: systematic literature review and metanalysis. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 13(4), 299-307.

Buchheit, M., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A., Quod, M. J., & Bourdon, P. C. (2011). Effect of maturation on hemodynamic and autonomic control recovery following maximal running exercise in highly trained young soccer players. *Frontiers in physiology*, 2.

Buchheit, M., Simon, C., Viola, A. U., Doutreleau, S., Piquard, F., & Brandenberger, G. (2004). Heart rate variability in sportive elderly: relationship with daily physical activity. *Medicine and science in sports and exercise*, 36(4), 601-605.

Burgomaster, K. A., Howarth, K. R., Phillips, S. M., Rakobowchuk, M., MacDonald, M. J., McGee, S. L., & Gibala, M. J. (2008). Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *The Journal of Physiology*, 586(1), 151-160.

Bürklein, M., Vogt, L., & Banzer, W. (2005). Messverfahren zur Erfassung der Herzfrequenzvariabilität-Eine vergleichende Studie. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 56(12), 415-421.

Cardiology, T. F. o. t. E. S. o. (1996). Heart rate variability standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J*, 17, 354-381.

Cardiology, T. F. o. t. E. S. o., & Cardiology, T. F. o. t. E. S. o. (1996). the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043-1065.

Carter, J. B., Banister, E. W., & Blaber, A. P. (2003). The effect of age and gender on heart rate variability after endurance training. *Medicine and science in sports and exercise*, 35(8), 1333-1340.

Carter, J. R., Ray, C. A., Downs, E. M., & Cooke, W. H. (2003). Strength training reduces arterial blood pressure but not sympathetic neural activity in young normotensive subjects. *Journal of Applied Physiology*, 94(6), 2212-2216.

Charifi, N., Kadi, F., Feasson, L., Costes, F., Geyssant, A., & Denis, C. (2004). Enhancement of microvessel tortuosity in the vastus lateralis muscle of old men in response to endurance training. *The Journal of Physiology*, 554(2), 559-569.

Clark, D. R., Lambert, M. I., & Hunter, A. M. (2012). Muscle activation in the loaded free barbell squat: A brief review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 1169-1178.

Cohen, M. A., & Taylor, J. A. (2002). Short - term cardiovascular oscillations in man: measuring and modelling the physiologies. *The Journal of Physiology*, 542(3), 669-683.

Cooke, W. H., & Carter, J. R. (2005). Strength training does not affect vagal-cardiac control or cardiovagal baroreflex sensitivity in young healthy subjects. *European journal of applied physiology*, 93(5-6), 719-725.

Cottin, F., Papelier, Y., & Escourrou, P. (1999). Effects of exercise load and breathing frequency on heart rate and blood pressure variability during dynamic exercise. *International journal of sports medicine*, 20(4), 232-238.

Daussin, F. N., Zoll, J., Dufour, S. P., Ponsot, E., Lonsdorfer-Wolf, E., Doutreleau, S., . . . Richard, R. (2008). Effect of interval versus continuous training on cardiorespiratory and mitochondrial functions: relationship to aerobic performance improvements in sedentary subjects. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 295(1), R264-R272.

Davy, K., Willis, W., & Seals, D. (1997). Influence of exercise training on heart rate variability in post - menopausal women with elevated arterial blood pressure. *Clinical Physiology*, 17(1), 31-40.

- Dekker, J. M., Schouten, E. G., Klootwijk, P., Pool, J., Swenne, C. A., & Kromhout, D. (1997). Heart Rate Variability from Short Electrocardiographic Recordings Predicts Mortality from All Causes in Middle-aged and Elderly Men The Zutphen Study. *American Journal of Epidemiology*, 145(10), 899-908.
- Du, X. J., Dart, A., & Riemersma, R. (1994). Sex differences in the parasympathetic nerve control of rat heart. *Clinical and experimental pharmacology and physiology*, 21(6), 485-493.
- Eckberg, D. L., Kifle, Y. T., & Roberts, V. L. (1980). Phase relationship between normal human respiration and baroreflex responsiveness. *The Journal of Physiology*, 304(1), 489-502.
- Ekblom, B., & Hermansen, L. (1968). Cardiac output in athletes. *Journal of Applied Physiology*, 25(5), 619-625.
- Escamilla, R. F. (2001). Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(1), 127-141.
- Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Zheng, N., Lander, J. E., Barrentine, S. W., Andrews, J. R., . . . Moorman, C. T. (2001). Effects of technique variations on knee biomechanics during the squat and leg press. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(9), 1552-1566.
- Esperer, H., Esperer, M., Frommer, J., & Robra, B. (2003). Herzfrequenzvariabilität: klassische und neue Analysemethoden. *Intensiv Notfallbehandlung*, 28(2), 82-99.
- Esperer, H., Hollenbach, P., & Esperer, H. (2006). Kann die 24-h-HRV im Zeitbereich aus Kurzzeit-EKG-Aufzeichnungen zuverlässig abgeschätzt werden. *Herzfrequenzvariabilität: Methoden und Anwendungen in Sport und Medizin. Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaften, Bd, 162*, 132-142.
- Essen, B., Hagenfeldt, L., & Kaijser, L. (1977). Utilization of blood - borne and intramuscular substrates during continuous and intermittent exercise in man. *The Journal of Physiology*, 265(2), 489-506.
- Ettinger, S. M., Silber, D. H., Collins, B. G., Gray, K. S., Sutliff, G., Whisler, S., . . . Sinoway, L. (1996). Influences of gender on sympathetic nerve responses to static exercise. *Journal of Applied Physiology*, 80(1), 245-251.
- Fagard, R., Aubert, A., Lysens, R., Staessen, J., Vanhees, L., & Amery, A. (1983). Noninvasive assessment of seasonal variations in cardiac structure and function in cyclists. *Circulation*, 67(4), 896-901.

Fagard, R. H., Unit, C. R., & Leuven, K. U. (1997). Impact of different sports and training on cardiac structure and function. *Cardiology clinics*, 15(3), 397-412.

Figuerola, A., Kingsley, J. D., McMillan, V., & Panton, L. B. (2008). Resistance exercise training improves heart rate variability in women with fibromyalgia. *Clinical physiology and functional imaging*, 28(1), 49-54.

Freeman, J. V., Dewey, F. E., Hadley, D. M., Myers, J., & Froelicher, V. F. (2006). Autonomic nervous system interaction with the cardiovascular system during exercise. *Progress in cardiovascular diseases*, 48(5), 342-362.

Gibala, M. J., Little, J. P., MacDonald, M. J., & Hawley, J. A. (2012). Physiological adaptations to low - volume, high - intensity interval training in health and disease. *The Journal of Physiology*, 590(5), 1077-1084.

Gibala, M. J., Little, J. P., Van Essen, M., Wilkin, G. P., Burgomaster, K. A., Safdar, A., . . . Tarnopolsky, M. A. (2006). Short - term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *The Journal of Physiology*, 575(3), 901-911.

Gibala, M. J., & McGee, S. L. (2008). Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exercise and sport sciences reviews*, 36(2), 58-63.

Gibala, M. J., McGee, S. L., Garnham, A. P., Howlett, K. F., Snow, R. J., & Hargreaves, M. (2009). Brief intense interval exercise activates AMPK and p38 MAPK signaling and increases the expression of PGC-1 α in human skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 106(3), 929-934.

Glaesser, G. A., & Rich, R. C. (1984). Effects of high-and low-intensity training on aerobic capacity an. *Medicine and science in sports and exercise*, 16(3), 269-274.

Glassman, G. (2007). Understanding CrossFit. *The CrossFit Journal Articles*, 56, 1-2.

Goldstein, D. S., Horwitz, D., & Keiser, H. R. (1982). Comparison of techniques for measuring baroreflex sensitivity in man. *Circulation*, 66(2), 432-439.

González-Camarena, R., Carrasco-Sosa, S., Román-Ramos, R., Gaitán-González, M. J., Medina-Bañuelos, V., & Azpiroz-Leehan, J. (2000). Effect of static and dynamic exercise on heart rate and blood pressure variabilities. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(10), 1719-1728.

Goodpaster, B. H., Katsiaras, A., & Kelley, D. E. (2003). Enhanced fat oxidation through physical activity is associated with improvements in insulin sensitivity in obesity. *Diabetes*, 52(9), 2191-2197.

Gotshalk, L. A., Berger, R. A., & Kraemer, W. J. (2004). Cardiovascular responses to a high-volume continuous circuit resistance training protocol. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18(4), 760-764.

Green, H. J. (2000). Altitude acclimatization, training and performance. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3(3), 299-312.

Green, H. J., Jones, L. L., & Painter, D. C. (1990). Effects of short-term training on cardiac function during prolonged exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 22(4), 488-493.

Greenwood, J., Durham, N., & Nolan, J. (1998). Autonomic assessment of cardiovascular disease. *Hospital medicine (London, England: 1998)*, 59(9), 714-718.

Haas, J., Liebrich, A., Himmrich, E., & Treese, N. (2000). Kurzzeitmessung der Herzfrequenzvariabilität bei Postinfarktpatienten—. *Herzschrittmachertherapie und Elektrophysiologie*, 11(2), 102-109.

Hadeed, M. J., Kuehl, K. S., Elliot, D. L., & Sleight, A. (2011). Exertional Rhabdomyolysis After Crossfit Exercise Program: 1210: June 3 9: 40 AM-10: 00 AM. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(5), 224-225.

Hainsworth, R. (1998). Physiology of the cardiac autonomic system *Clinical guide to cardiac autonomic tests* (pp. 3-28): Springer.

Hallal, P. C., Andersen, L. B., Bull, F. C., Guthold, R., Haskell, W., Ekelund, U., & Group, L. P. A. S. W. (2012). Global physical activity levels: surveillance progress, pitfalls, and prospects. *The lancet*, 380(9838), 247-257.

Handschin, C. (2009). Peroxisome proliferator - activated receptor - γ coactivator - 1 α in muscle links metabolism to inflammation. *Clinical and experimental pharmacology and physiology*, 36(12), 1139-1143.

Hartikainen, J. E., Tahvanainen, K. U., & Kuusela, T. A. (1998). Short-term measurement of heart rate variability *Clinical guide to cardiac autonomic tests* (pp. 149-176): Springer.

Hautala, A., Tulppo, M. P., Mäkilä, T. H., Laukkanen, R., Nissilä, S., & Huikuri, H. V. (2001). Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clinical Physiology*, 21(2), 238-245.

- Hedelin, R., Wiklund, U., Bjerle, P., & Henriksson-Larsén, K. (2000). Cardiac autonomic imbalance in an overtrained athlete. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(9), 1531-1533.
- Heffernan, K., Sosnoff, J., Jae, S., Gates, G., & Fernhall, B. (2008). Acute resistance exercise reduces heart rate complexity and increases QTc interval. *International journal of sports medicine*, 29(4), 289-293.
- Heffernan, K. S., Fahs, C. A., Shinsako, K. K., Jae, S. Y., & Fernhall, B. (2007). Heart rate recovery and heart rate complexity following resistance exercise training and detraining in young men. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 293(5), H3180-H3186.
- Helgerud, J., Hoydal, K., Wang, E., Karlsen, T., Berg, P., Bjerkaas, M., . . . Bach, R. (2007). Aerobic High-Intensity Intervals Improve VO₂ max More Than Moderate Training. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(4), 665.
- Hill, M., Wallick, D., Martin, P. J., & Levy, M. N. (1995). Effects of repetitive vagal stimulation on heart rate and on cardiac vasoactive intestinal polypeptide efflux. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 268(5), H1939-H1946.
- Hollman, J. H., Ginos, B. E., Kozuchowski, J., Vaughn, A. S., Krause, D. A., & Youdas, J. W. (2009). Relationships between knee valgus, hip-muscle strength, and hip-muscle recruitment during a single-limb step-down. *Journal of sport rehabilitation*, 18(1), 104.
- Hood, D. A. (2001). Invited Review: contractile activity-induced mitochondrial biogenesis in skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 90(3), 1137-1157.
- Hoppeler, H., & Flück, M. (2002). Normal mammalian skeletal muscle and its phenotypic plasticity. *Journal of Experimental Biology*, 205(15), 2143-2152.
- Horn, A. (2004). *Diagnostik der Herzfrequenzvariabilität in der Sportmedizin—Rahmenbedingungen und diagnostische Möglichkeiten*. Dissertation: Ruhr-Universität Bochum, Universitätsbibliothek, Fakultät für Sportwissenschaft.
- Horn, E., & Lee, S. (1995). Electronic evaluations of the fetal heart rate patterns preceding fetal death: further observation. *Am J Obstet Gynecol*, 87, 824-826.
- Hottenrott, K. (2007). *Training with the heart rate monitor*. Meyer & Meyer Verlag.

- Howorka, K., Pumpila, J., & Schabmann, A. (1998). Optimal parameters of short-term heart rate spectrogram for routine evaluation of diabetic cardiovascular autonomic neuropathy. *Journal of the autonomic nervous system*, 69(2), 164-172.
- Huikuri, H. V., Pikkuja, S. M., Airaksinen, K. J., Ika, M. J., Rantala, A. O., Kauma, H., . . . Kesa, Y. A. (1996). Sex-related differences in autonomic modulation of heart rate in middle-aged subjects. *Circulation*, 94(2), 122-125.
- Hull, S., Vanoli, E., Adamson, P. B., Verrier, R. L., Foreman, R. D., & Schwartz, P. J. (1994). Exercise training confers anticipatory protection from sudden death during acute myocardial ischemia. *Circulation*, 89(2), 548-552.
- Huston, T. P., Puffer, J. C., & Rodney, W. M. (1985). The athletic heart syndrome. *New England Journal of Medicine*, 313(1), 24-32.
- Jänig, W. (1989). Autonomic nervous system *Human physiology* (pp. 333-370): Springer.
- Javorka, M., Zila, I., Balharek, T., & Javorka, K. (2002). Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 35(8), 991-1000.
- Kaikkonen, Hynynen, E., Mann, T., Rusko, H., & Nummela, A. (2010). Can HRV be used to evaluate training load in constant load exercises? *European journal of applied physiology*, 108(3), 435-442.
- Kaikkonen, Nummela, A., & Rusko, H. (2007). Heart rate variability dynamics during early recovery after different endurance exercises. *European journal of applied physiology*, 102(1), 79-86.
- Kaikkonen, Rusko, H., & Martinmäki, K. (2008). Post - exercise heart rate variability of endurance athletes after different high - intensity exercise interventions. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 18(4), 511-519.
- Kamath, M. V., Fallen, E. L., & Mckelvie, R. (1991). Effects of steady state exercise on the power spectrum of heart rate variability. *Medicine and science in sports and exercise*, 23(4), 428-434.
- Karas, M., Lacourcière, Y., LeBlanc, A.-R., Nadeau, R., Dubé, B., Florescu, M., . . . de Champlain, J. (2005). Effect of the renin-angiotensin system or calcium channel blockade on the circadian variation of heart rate variability, blood pressure and circulating catecholamines in hypertensive patients. *Journal of hypertension*, 23(6), 1251-1260.

- Kessler, H. S., Sisson, S. B., & Short, K. R. (2012). The potential for high-intensity interval training to reduce cardiometabolic disease risk. *Sports medicine*, 42(6), 489-509.
- Kezdi, P., & Geller, E. (1968). Baroreceptor control of postganglionic sympathetic nerve discharge. *American Journal of Physiology--Legacy Content*, 214(3), 427-435.
- Kibele, A., & Behm, D. G. (2009). Seven weeks of instability and traditional resistance training effects on strength, balance and functional performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(9), 2443-2450.
- Kibler, W. B., Press, J., & Sciascia, A. (2006). The role of core stability in athletic function. *Sports medicine*, 36(3), 189-198.
- Kiens, B. (1997). Effect of endurance training on fatty acid metabolism: local adaptations. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(5), 640-645.
- Kingsley, J. D., & Figueroa, A. (2014). Acute and training effects of resistance exercise on heart rate variability. *Clinical physiology and functional imaging*.
- Kiviniemi, A. M., Tulppo, M. P., Eskelinen, J. J., Savolainen, A. M., Kapanen, J., Heinonen, I., . . . Kalliokoski, K. K. (2014). Cardiac autonomic function and high-intensity interval training in middle-age men. *Med Sci Sports Exerc*, 46(10), 1960-1967.
- Klingenheben, T., Zabel, M., & Hohnloser, S. (1998). Kurzzeitanalyse der Herzfrequenzvariabilität im Zeitbereich zur Prognosebeurteilung nach Myokardinfarkt: methodologisch sinnvolle Alternative zum Langzeit-EKG? *Zeitschrift für Kardiologie*, 87(2), 128-133.
- Kohl, H. W., Craig, C. L., Lambert, E. V., Inoue, S., Alkandari, J. R., Leetongin, G., . . . Group, L. P. A. S. W. (2012). The pandemic of physical inactivity: global action for public health. *The lancet*, 380(9838), 294-305.
- Kotzamanidis, C., Chatzopoulos, D., Michailidis, C., Papaikovou, G., & Patikas, D. (2005). The effect of a combined high-intensity strength and speed training program on the running and jumping ability of soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 19(2), 369-375.
- Kuipers, H., & Keizer, H. (1988). Overtraining in elite athletes. *Sports medicine*, 6(2), 79-92.
- Kuo, T. B., Lin, T., Yang, C. C., Li, C.-L., Chen, C.-F., & Chou, P. (1999). Effect of aging on gender differences in neural control of heart rate. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 277(6), H2233-H2239.

Laursen, P. B., & Jenkins, D. G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training. *Sports medicine*, 32(1), 53-73.

LeBlanc, P. J., Howarth, K. R., Gibala, M. J., & Heigenhauser, G. J. (2004). Effects of 7 wk of endurance training on human skeletal muscle metabolism during submaximal exercise. *Journal of Applied Physiology*, 97(6), 2148-2153.

Liao, D., Cai, J., Rosamond, W. D., Barnes, R. W., Hutchinson, R. G., Whitset, E. A., . . . Heiss, G. (1997). Cardiac Autonomic Function and Incident Coronary Heart Disease: A Population-based Case-Cohort Study The ARIC Study. *American Journal of Epidemiology*, 145(8), 696-706.

Linossier, M.-T., Denis, C., Dormois, D., Geyssant, A., & Lacour, J. (1993). Ergometric and metabolic adaptation to a 5-s sprint training programme. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 67(5), 408-414.

MacDougall, J., Tuxen, D., Sale, D., Moroz, J., & Sutton, J. (1985). Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 58(3), 785-790.

Macpherson, R., Hazell, T. J., Olver, T. D., Paterson, D. H., & Lemon, P. (2011). Run sprint interval training improves aerobic performance but not maximal cardiac output. *Med Sci Sports Exerc*, 43(1), 115-122.

Makivić¹, B., Nikić, M. D., Willis, M. S., Education, P., & Parovića, B. (2013). Heart rate variability (HRV) as a tool for diagnostic and monitoring performance in sport and physical activities.

Malfatto, G., Facchini, M., Sala, L., Branzi, G., Bragato, R., & Leonetti, G. (1998). Effects of cardiac rehabilitation and beta-blocker therapy on heart rate variability after first acute myocardial infarction. *The American journal of cardiology*, 81(7), 834-840.

Malik, M. (2008). Standard measurement of heart rate variability. *Dynamic electrocardiography*, 13-21.

Malik, M., & Camm, A. J. (1990). Heart rate variability. *Clinical cardiology*, 13(8), 570-576.

Malliani, A., Lombardi, F., Pagani, M., & Cerutti, S. (1994). Power spectral analysis of cardiovascular variability in patients at risk for sudden cardiac death. *Journal of cardiovascular electrophysiology*, 5(3), 274-286.

Malliani, A., Pagani, M., Lombardi, F., & Cerutti, S. (1991). Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation*, 84(2), 482-492.

- Manzi, V., Castagna, C., Padua, E., Lombardo, M., D'Ottavio, S., Massaro, M., . . . Iellamo, F. (2009). Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 296(6), H1733-H1740.
- Mazzeo, R. S., & Marshall, P. (1989). Influence of plasma catecholamines on the lactate threshold during graded exercise. *Journal of Applied Physiology*, 67(4), 1319-1322.
- McGill, S. M., Karpowicz, A., Fenwick, C. M., & Brown, S. H. (2009). Exercises for the torso performed in a standing posture: spine and hip motion and motor patterns and spine load. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(2), 455-464.
- McMullen, J., & Uhl, T. L. (2000). A kinetic chain approach for shoulder rehabilitation. *Journal of athletic training*, 35(3), 329.
- McNaughton, L. R., Roberts, S., & Bentley, D. J. (2006). The relationship among peak power output, lactate threshold, and short-distance cycling performance: effects of incremental exercise test design. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 20(1), 157-161.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., . . . Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine and science in sports and exercise*, 45(1), 186-205.
- Meeusen, R., Duclos, M., Gleeson, M., Rietjens, G., Steinacker, J., & Urhausen, A. (2006). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: ECSS Position Statement 'Task Force'. *Eur J Sport Sci*, 6(01), 1-14.
- Melanson, E. L., & Freedson, P. S. (2001). The effect of endurance training on resting heart rate variability in sedentary adult males. *European journal of applied physiology*, 85(5), 442-449.
- Meyer, M., Marconi, C., Ferretti, G., Fiocchi, R., Cerretelli, P., & Skinner, J. (1996). Heart rate variability in the human transplanted heart: nonlinear dynamics and QT vs RR-QT alterations during exercise suggest a return of neurocardiac regulation in long-term recovery. *Integrative Physiological and Behavioral Science*, 31(4), 289-305.
- Miller, M. B., Pearcey, G. E., Cahill, F., McCarthy, H., Stratton, S. B., Nofall, J. C., . . . Button, D. C. (2014). The effect of a short-term high-intensity circuit

training program on work capacity, body composition, and blood profiles in sedentary obese men: a pilot study. *BioMed research international*, 2014.

Mourot, L., Bouhaddi, M., Tordi, N., Rouillon, J.-D., & Regnard, J. (2004). Short-and long-term effects of a single bout of exercise on heart rate variability: comparison between constant and interval training exercises. *European journal of applied physiology*, 92(4-5), 508-517.

Munk, P. S., Butt, N., & Larsen, A. I. (2010). High-intensity interval exercise training improves heart rate variability in patients following percutaneous coronary intervention for angina pectoris. *International journal of cardiology*, 145(2), 312-314.

Myers, T. R., Schneider, M. G., Schmale, M. S., & Hazell, T. J. (2015). Whole-Body Aerobic Resistance Training Circuit Improves Aerobic Fitness and Muscle Strength in Sedentary Young Females. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(6), 1592-1600.

Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems* (Vol. 191977): Wiley, New York.

Orizio, C., Perini, R., Comandè, A., Castellano, M., Beschi, M., & Veicsteinas, A. (1988). Plasma catecholamines and heart rate at the beginning of muscular exercise in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 57(5), 644-651.

Orizio, C., Perini, R., Comandè, A., Castellano, M., Beschi, M., & Veicsteinas, A. (1988). Plasma catecholamines and heart rate at the beginning of muscular exercise in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 57(5), 644-651.

Otsuki, T., Maeda, S., Iemitsu, M., Saito, Y., Tanimura, Y., Sugawara, J., . . . Miyauchi, T. (2007). Postexercise heart rate recovery accelerates in strength-trained athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(2), 365.

Partanen, J. (2014). Changes in nocturnal heart rate variability and endurance performance during a high-intensity or high-volume endurance training period in recreational endurance runners.

Pelliccia, A., & Maron, B. J. (1997). Outer limits of the athlete's heart, the effect of gender, and relevance to the differential diagnosis with primary cardiac diseases. *Cardiology clinics*, 15(3), 381-396.

Penttilä, J., Helminen, A., Jartti, T., Kuusela, T., Huikuri, H. V., Tulppo, M. P., . . . Scheinin, H. (2001). Time domain, geometrical and frequency domain analysis of cardiac vagal outflow: effects of various respiratory patterns. *Clinical Physiology*, 21(3), 365-376.

- Perini, R., Orizio, C., Baselli, G., Cerutti, S., & Veicsteinas, A. (1990). The influence of exercise intensity on the power spectrum of heart rate variability. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 61(1-2), 143-148.
- Perry, C. G., Heigenhauser, G. J., Bonen, A., & Spriet, L. L. (2008). High-intensity aerobic interval training increases fat and carbohydrate metabolic capacities in human skeletal muscle. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33(6), 1112-1123.
- Persson, P. B. (1996). Modulation of cardiovascular control mechanisms and their interaction. *Physiological Reviews*, 76(1), 193-244.
- Piccirillo, G., Ogawa, M., Song, J., Chong, V. J., Joung, B., Han, S., . . . Chen, P.-S. (2009). Power spectral analysis of heart rate variability and autonomic nervous system activity measured directly in healthy dogs and dogs with tachycardia-induced heart failure. *Heart Rhythm*, 6(4), 546-552.
- Pichot, V., Roche, F., Gaspoz, J.-M., Enjolras, F., Antoniadis, A., Minini, P., . . . Barthelemy, J. C. (2000). Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(10), 1729-1736.
- Piras, A., Persiani, M., Damiani, N., Perazzolo, M., & Raffi, M. (2015). Peripheral heart action (PHA) training as a valid substitute to high intensity interval training to improve resting cardiovascular changes and autonomic adaptation. *European journal of applied physiology*, 115(4), 763-773.
- 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.
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2013). Evaluating Training Adaptation with Heart Rate Measures: A Methodological Comparison. *International journal of sports physiology and performance*.
- Pluim, B. M., Zwinderman, A. H., van der Laarse, A., & van der Wall, E. E. (2000). The athlete's heart a meta-analysis of cardiac structure and function. *Circulation*, 101(3), 336-344.
- Porcari, J. P., & Foster, R. C. (2008). The effect of functional exercise training on functional fitness levels of older adults. *GUNDERSEN LUTHERAN*, 4.
- Puhan, M. A., Schünemann, H. J., Frey, M., Scharplatz, M., & Bachmann, L. M. (2005). How should COPD patients exercise during respiratory rehabilitation? Comparison of exercise modalities and intensities to treat skeletal muscle dysfunction. *Thorax*, 60(5), 367-375.

Puig, J., Freitas, J., Carvalho, M., Puga, N., Ramos, J., Fernandes, P., . . . de Freitas, A. F. (1993). Spectral analysis of heart rate variability in athletes. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 33(1), 44-48.

Pumpila, J., Howorka, K., Groves, D., Chester, M., & Nolan, J. (2002). Functional assessment of heart rate variability: physiological basis and practical applications. *International journal of cardiology*, 84(1), 1-14.

Putnam, C. A. (1993). Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: descriptions and explanations. *Journal of biomechanics*, 26, 125-135.

Rakobowchuk, M., Harris, E., Taylor, A., Cubbon, R. M., & Birch, K. M. (2013). Moderate and heavy metabolic stress interval training improve arterial stiffness and heart rate dynamics in humans. *European journal of applied physiology*, 113(4), 839-849.

Ramaekers, D., Ector, H., Aubert, A., Rubens, A., & Van de Werf, F. (1998). Heart rate variability and heart rate in healthy volunteers. *European Heart Journal*, 19, 1334-1341.

Randall, W. C. (1994). Efferent sympathetic innervation of the heart. *Neurocardiology*, 77-94.

Rezk, C., Marrache, R., Tinucci, T., Mion Jr, D., & Forjaz, C. (2006). Post-resistance exercise hypotension, hemodynamics, and heart rate variability: influence of exercise intensity. *European journal of applied physiology*, 98(1), 105-112.

Rogers, L., & Sherman, T. (2001). Leg Press Versus Squat. *Strength & Conditioning Journal*, 23(4), 63.

Rost, R., & Hollmann, W. (1983). Athlete's heart--a review of its historical assessment and new aspects. *International journal of sports medicine*, 4(3), 147.

Roure, R., Collet, C., Deschaumes-Molinaro, C., Dittmar, A., Rada, H., Delhomme, G., & Vernet-Maury, E. (1998). Autonomic nervous system responses correlate with mental rehearsal in volleyball training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 78(2), 99-108.

Roy, A., Doyon, M., Dumesnil, J., Jobin, J., & Landry, F. (1988). Endurance vs. strength training: comparison of cardiac structures using normal predicted values. *Journal of Applied Physiology*, 64(6), 2552-2557.

- Saltin, B., & Calbet, J. A. (2006). Point: in health and in a normoxic environment, VO₂ max is limited primarily by cardiac output and locomotor muscle blood flow. *Journal of Applied Physiology*, 100(2), 744-748.
- Sammito, S., & Böckelmann, I. (2015). Analyse der Herzfrequenzvariabilität. *Herz*, 40(1), 76-84.
- Sandercock, G., Bromley, P. D., & Brodie, D. A. (2005). Effects of exercise on heart rate variability: inferences from meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc*, 37(3), 433-439.
- Seiler, S., Haugen, O., & Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(8), 1366.
- Smith, M. L., Hudson, D. L., Graitzer, H. M., & Raven, P. B. (1989). Exercise training bradycardia: the role of autonomic balance. *Medicine and science in sports and exercise*, 21(1), 40-44.
- Smith, M. M., Sommer, A. J., Starkoff, B. E., & Devor, S. T. (2013). Crossfit-based high-intensity power training improves maximal aerobic fitness and body composition. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(11), 3159-3172.
- Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Consecutive days of cold water immersion: effects on cycling performance and heart rate variability. *European journal of applied physiology*, 113(2), 371-384.
- Stein, P. K. (2005). Potential role of different components of heart rate variability for risk-stratification in critical care*. *Critical care medicine*, 33(9), 2128-2130.
- Stoggl, T., & Sperlich, B. (2014). Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Front Physiol*, 5, 33.
- Sugawara, J., Murakami, H., Maeda, S., Kuno, S., & Matsuda, M. (2001). Change in post-exercise vagal reactivation with exercise training and detraining in young men. *European journal of applied physiology*, 85(3-4), 259-263.
- Talanian, J. L., Galloway, S. D., Heigenhauser, G. J., Bonen, A., & Spriet, L. L. (2007). Two weeks of high-intensity aerobic interval training increases the capacity for fat oxidation during exercise in women. *Journal of Applied Physiology*, 102(4), 1439-1447.

- Taskforce. (1996). Heart rate variability standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J*, 17, 354-381.
- Tereshchenko, L. G., Cygankiewicz, I., McNitt, S., Vazquez, R., Bayes-Genis, A., Han, L., . . . de Luna, A. B. (2012). Predictive value of beat-to-beat qt variability index across the continuum of left ventricular dysfunction competing risks of noncardiac or cardiovascular death and sudden or nonsudden cardiac death. *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology*, 5(4), 719-727.
- Thayer, J. F., Åhs, F., Fredrikson, M., Sollers, J. J., & Wager, T. D. (2012). A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(2), 747-756.
- Tjønnå, A. E., Lee, S. J., Rognmo, Ø., Stølen, T. O., Bye, A., Haram, P. M., . . . Slørdahl, S. A. (2008). Aerobic Interval Training Versus Continuous Moderate Exercise as a Treatment for the Metabolic Syndrome A Pilot Study. *Circulation*, 118(4), 346-354.
- Tremblay, A., Simoneau, J.-A., & Bouchard, C. (1994). Impact of exercise intensity on body fatness and skeletal muscle metabolism. *Metabolism*, 43(7), 814-818.
- Trump, M. E., Heigenhauser, G., Putman, C., & Spriet, L. L. (1996). Importance of muscle phosphocreatine during intermittent maximal cycling. *Journal of Applied Physiology*, 80(5), 1574-1580.
- Tygesen, H., Wettersvik, C., & Wennerblom, B. (2001). Intensive home-based exercise training in cardiac rehabilitation increases exercise capacity and heart rate variability. *International journal of cardiology*, 79(2), 175-182.
- Ueno, L. M., & Moritani, T. (2003). Effects of long-term exercise training on cardiac autonomic nervous activities and baroreflex sensitivity. *European journal of applied physiology*, 89(2), 109-114.
- 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.
- Uusitalo, A., Uusitalo, A., & Rusko, H. (2000). Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *International journal of sports medicine*, 21(1), 45-53.
- Vanoli, E., De Ferrari, G. M., Stramba-Badiale, M., Hull, S., Foreman, R. D., & Schwartz, P. J. (1991). Vagal stimulation and prevention of sudden death in

conscious dogs with a healed myocardial infarction. *Circulation Research*, 68(5), 1471-1481.

Vezina, M. J., & Hubley-Kozey, C. L. (2000). Muscle activation in therapeutic exercises to improve trunk stability. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 81(10), 1370-1379.

Voss, A., Schroeder, R., Fischer, C., Heitmann, A., Peters, A., & Perz, S. (2013). *Influence of age and gender on complexity measures for short term heart rate variability analysis in healthy subjects*. Paper presented at the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of the IEEE.

Warren, J. H., Jaffe, R. S., Wraa, C. E., & Stebbins, C. L. (1997). Effect of autonomic blockade on power spectrum of heart rate variability during exercise. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 273(2), R495-R502.

Weiss, T., Kreitinger, J., Wilde, H., Wiora, C., Steege, M., Dalleck, L., & Janot, J. (2010). Effect of functional resistance training on muscular fitness outcomes in young adults. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 8(2), 113-122.

Wenz, T., Rossi, S. G., Rotundo, R. L., Spiegelman, B. M., & Moraes, C. T. (2009). Increased muscle PGC-1 α expression protects from sarcopenia and metabolic disease during aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(48), 20405-20410.

Whitehurst, M. A., Johnson, B. L., Parker, C. M., Brown, L. E., & Ford, A. M. (2005). The benefits of a functional exercise circuit for older adults. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 19(3), 647-651.

WHO. (2009). *Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks*: World Health Organization.

WHO. (2010). Global recommendations on physical activity for health.

Willson, J. D., Dougherty, C. P., Ireland, M. L., & Davis, I. M. (2005). Core stability and its relationship to lower extremity function and injury. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 13(5), 316-325.

Wisløff, U., Ellingsen, Ø., & Kemi, O. J. (2009). High-intensity interval training to maximize cardiac benefits of exercise training? *Exercise and sport sciences reviews*, 37(3), 139-146.

Wolf, M., Varigos, G., Hunt, D., & Sloman, J. (1978). Sinus arrhythmia in acute myocardial infarction. *The Medical journal of Australia*, 2(2), 52-53.

Zucker, T. L., Samuelson, K. W., Muench, F., Greenberg, M. A., & Gevirtz, R. N. (2009). The effects of respiratory sinus arrhythmia biofeedback on heart rate variability and posttraumatic stress disorder symptoms: A pilot study. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 34(2), 135-143.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: „Total Power“ vor der Trainingsintervention, während Woche 5 und nach der Trainings-intervention (Amano et al., 2001).....	11
Abb. 2 Trainingsprotokoll des aeroben Ganzkörper-Zirkeltrainings (Myers et al., 2015).....	16
Abb. 3: Änderungen der relativen VO ₂ max nach 10 Wochen HIPT. Eine Unterteilung in Gruppen des Ausgangsniveaus der aeroben Fitness bezogen auf das Körpergewicht, zeigt signifikante Steigerungen der relativen VO ₂ max in allen Gruppen. **p< 0.01; *p<0.05 (M. M. Smith et al., 2013).	18
Abb. 4: Der grobe Aufbau des Autonomen Nervensystems veranschaulicht die duale Innervation des Herzens sowie anderer Organe (Jänig, 1989).	21
Abb. 5: Analyse der HRV. Ermittlung der aufeinanderfolgenden RR- Intervalle (a) des EKG, resultieren in einem Tachogram (b) das durch die Analyse des Frequenzspektrums (c) und des Zeitbereichs (d) untersucht werden kann (Aubert, Seps, & Beckers, 2003).	23
Abb. 6: Ein Modell der kardiovaskulären Kontrollmechanismen (Makivić ¹ et. al., 2013, S107; mod.n. Aubert et. al., 2003, S 892).....	26
Abb. 7: Spektralanalyse mittels „Fast-Fourier“-Transformation (a) und parametrische Autoregression (b). Die Frequenzbänder eines gesunden Probanden werden getrennt dargestellt (Sammito & Böckelmann, 2015).	29
Abb. 8: Kurzzeit – Spektralanalyse während modifizierter orthostatischer Belastung. (Pumprla et al., 2002)	31
Abb. 9: Evaluation der parasympathischen Nervenaktivität durch Spektralanalyse der HRV vor und nach Belastung (Wenige Sekunden bis 48 Stunden nach Belastung) in stehender und liegender Position in Folge von HIIT (SWEET) und kontinuierlichem Training (CST) (Mourot et al., 2004).	43
Abb. 10: Ein Tachogramm (a) eines Freizeitsportlers während einer Stufenergometrie (60-280W; alle 3 Min Steigerung des Belastungsincrements um 20W). Leistungsdichtespektrum (b) vor, während und nach 20 Minuten Dauerbelastung (A= Ruhe; B= aerobe Bel. bei 50 % V _{O2} max; C= aerobe-anaerobe Bel. bei 80 % V _{O2} max) (Hottenrott, 2007).	45
Abb. 11: (a) Ein Tachogramm mit Aufnahmen der Spektralleistungsdichte einer jungen inaktiven Person vor der Trainingsintervention (HF = 812.3 ms ⁻²) und (b) die selbe Person nach 6 Monaten aerobem Training (HF =1878.4 ms ⁻²) (Aubert et al., 2003).....	47

Abb. 12: Eine Übersicht einer CrossFit®-basierten HIPT - Trainingswoche, inklusive der beiden Trainingsmodalitäten „For time“ und „Amrap“ (M. M. Smith et al., 2013).	54
Abb. 13: Eine Übersicht der Übungsbereiche inklusive der wichtigsten Übungen (Glassman, 2013, S.53).	55
Abb. 14: <i>ChronoCardiogramm einer 32 jährigen Frau.</i>	64
Abb. 15: Eine Aktivitätsdarstellung des ANS über einen Zeitraum von 24 Stunden.	65
Abb. 16: Eine Aktivitätsdarstellung des ANS über einen Zeitraum von 24 Stunden.	65
Abb. 17 Eine Darstellung der Herzrate über einen Zeitraum von 24 Stunden.	65
Abb. 18: Eine Übersichtstabelle der altersabhängigen Referenzdaten der 24 Stunden HRV Messung.	66

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der beobachteten HRV Indizes sowie der Perzentilen bezogen auf die Joysys Datenbank des Gesamten HRV-Kollektivs (G), der weiblichen (W) und der männlichen (M) ProbandInnen der Eingangsmessung.	63
Tab. 2: Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der beobachteten HRV Indizes sowie der Perzentilen bezogen auf die Joysys Datenbank des Gesamten HRV-Kollektivs (G), der weiblichen (W) und der männlichen (M) ProbandInnen der Abschlussmessung.	63
Tab. 3: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN ($N=31$)	68
Tab. 4: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> ($N=31$)	68
Tab. 5: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN–Schlaf ($N=31$)	69
Tab. 6: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN-Schlaf mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> ($N=31$)	69
Tab. 7: Deskriptive Statistik der Veränderung der ln TP ($N=31$)	70
Tab. 8: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der ln TP mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> ($N=31$)	70
Tab. 9: Deskriptive Statistik der Veränderung der ln TP-Schlaf ($N=31$)	70

Tab. 10: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP-Schlaf mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> (N=31)	71
Tab. 11: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF (N=31)	71
Tab. 12: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In HF mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> (N=31)	72
Tab. 13: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF-Schlaf (N=31)	72
Tab. 14: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In HF-Schlaf mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> (N=31)	72
Tab. 15: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung (N=49)	73
Tab. 16: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> (N=49)	73
Tab. 17: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung (N=31)	74
Tab. 18: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels <i>T-Test bei gepaarten Stichproben</i> (N=31)	74
Tab. 19: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN 24 Stunden <i>der weiblichen ProbandInnen</i> (N=18)	75
Tab. 20: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN mittels <i>Wilcoxon-Test der weiblichen ProbandInnen</i> (N=18)	75
Tab. 21: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN-Schlaf <i>der weiblichen ProbandInnen</i> (N=18)	75
Tab. 22: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN-Schlaf mittels <i>Wilcoxon-Test der weiblichen ProbandInnen</i> (N=18)	76
Tab. 23: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN 24 Stunden der männlichen Probanden (N=13)	76
Tab. 24: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN 24 Stunden mittels <i>T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden</i> (N=13)	77
Tab. 25: Deskriptive Statistik der Veränderung der SDNN-Schlaf <i>der männlichen Probanden</i> (N=13)	77
Tab. 26: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der SDNN 24 Stunden mittels <i>T-Test für gepaarte Stichproben der männlichen Probanden</i> (N=13)	77
Tab. 27: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP 24 Stunden <i>der weiblichen ProbandInnen</i> (N=18)	78
Tab. 28: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP 24 Stunden mittels <i>Wilcoxon-Test der weiblichen ProbandInnen</i> (N=18)	78
Tab. 29: Deskriptive Statistik der Veränderung der TP-Schlaf <i>der weiblichen ProbandInnen</i> (N=18)	78

Tab. 30: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der TP-Schlaf mittels T-Test für gepaarte Stichproben <i>der weiblichen ProbandInnen (N=18)</i>	79
Tab. 31: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP 24 Stunden <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	79
Tab. 32: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP 24 Stunden mittels T – Test für gepaarte Stichproben <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	80
Tab. 33: Deskriptive Statistik der Veränderung der In TP–Schlaf <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	80
Tab. 34: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In TP-Schlaf mittels T – Test für gepaarte Stichproben <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	80
Tab. 35: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF 24 Stunden <i>der weiblichen ProbandInnen (N=18)</i>	81
Tab. 36: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In HF 24 Stunden mittels T – Test für gepaarte Stichproben <i>der weiblichen ProbandInnen (N=18)</i>	81
Tab. 37: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF-Schlaf <i>der weiblichen ProbandInnen (N=18)</i>	82
Tab. 38: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In HF-Schlaf mittels T – Test für gepaarte Stichproben <i>der weiblichen ProbandInnen (N=18)</i>	82
Tab. 39: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF 24 Stunden <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	82
Tab. 40: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In HF 24 Stunden mittels T-Test für gepaarte Stichproben <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	83
Tab. 41: Deskriptive Statistik der Veränderung der In HF–Schlaf <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	83
Tab. 42: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der In HF–Schlaf mittels T – Test für gepaarte Stichproben <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	83
Tab. 43: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung <i>der weiblichen ProbandInnen (N=18)</i>	84
Tab. 44: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels T-Test für gepaarte Stichproben <i>der weiblichen ProbandInnen (N=18)</i>	84
Tab. 45: Deskriptive Statistik der Veränderung der maximalen Leistung <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	85
Tab. 46: Signifikanzüberprüfung der Veränderung der maximalen Leistung mittels Wilcoxon – Test für gepaarte Stichproben <i>der männlichen Probanden (N=13)</i>	85