

Aus dem Institut für Sport- und Präventivmedizin der
Universität des Saarlandes, Saarbrücken
Direktor: Univ.- Prof. Dr. med. Tim Meyer

**Herzfrequenzvariabilität,
Veränderung durch Leistungs- und Präventivsport**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES
2013

vorgelegt von: Jonas Sperber
geb. am: 03.01.1979 in Hannover

Inhalt

1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	3
2.1 Theoretische Grundlagen der Herzfrequenzvariabilität	6
2.1.1 Definition.....	6
2.1.2 Physiologie	6
2.1.3 Die wichtigsten Einflussfaktoren der Herzfrequenzvariabilität	8
2.1.3.1 Herzfrequenz	8
2.1.3.2 Lebensalter	8
2.1.3.3 Geschlecht	9
2.1.3.4 Trainingszustand.....	10
2.1.3.5 Gesundheitszustand	10
2.1.3.6 Physikalische Umgebungseinflüsse	11
2.1.3.7 Atmung	11
2.1.3.8 Auswertender.....	12
2.1.3.9 Zusammenfassung.....	12
2.1.4 Parameter der Herzfrequenzvariabilität.....	13
2.1.4.1 Zeitbereich	13
2.1.4.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer.....	13
2.1.4.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall- Dauer.....	13
2.1.4.2 Frequenzbereich	13
2.1.4.2.1 Niederfrequentes Leistungsspektrum; Low Frequency Power (LFP).....	15
2.1.4.2.2 Hochfrequentes Leistungsspektrum; High Frequency Power (HFP)	15
2.1.4.2.3 Sympathovagale Balance; Ratio der Herzfrequenzvariabilität, LFP / HFP	16
2.1.4.2.4 Gesamtleistungsspektrum; <i>Total Frequency Power</i> (TFP)	16
2.1.5 Änderung der Herzfrequenzvariabilität durch physisches Training	16
2.2 Ausdauertraining	20
2.2.1 Definition und Einteilung der Ausdauer	20
2.2.2 Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit.....	20
2.2.3 Ausdauertrainingsmethoden	21
2.2.3.1 Dauermethode	22
2.2.3.2 Intervallmethode	22
2.2.3.2.1 Hochintensive Intervallmethode	22
2.3 Fazit zum aktuellen Forschungsstand	23
2.4 Zielsetzung	23
2.4.1 Pretests	24
2.4.2 Studie A	24
2.4.3 Studie B	24
3 Untersuchungsmethodik	26
3.1 Allgemeines Studiendesign.....	26
3.2 Allgemeine Methodik	26
3.3 Studie A.....	28
3.3.1 Allgemeiner Studienablauf	28
3.3.2 Rekrutierung der Probanden.....	28
3.3.3 Probanden	29

3.3.4 Untersuchungsgruppen.....	29
3.3.5 Trainingsprogramme.....	29
3.3.6 Ablauf der Herzfrequenzmessung.....	31
3.3.7 Analyse der HRV-Daten.....	32
3.4 Studie B.....	32
3.4.1 Allgemeiner Studienablauf.....	32
3.4.2 Rekrutierung der Probanden.....	33
3.4.3 Probanden.....	34
3.4.4 Untersuchungsgruppen.....	35
3.4.5 Trainingsprogramme.....	35
3.4.6 Ablauf der Eingangs- und Abschlusstests.....	36
3.4.6.1 Ablauf der Herzfrequenzmessung.....	37
3.4.7 Analyse der HRV-Daten.....	38
3.5 Statistik.....	38
4 Ergebnisse.....	40
4.1 Studie A.....	40
4.1.1 Zeitbereich.....	41
4.1.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer.....	41
4.1.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer.....	42
4.1.2 Frequenzbereich.....	43
4.1.2.1 Low Frequency Power (LFP).....	43
4.1.2.2 High Frequency Power (HFP).....	43
4.1.2.3 LFP / HFP-Quotient.....	44
4.1.2.4 Total Frequency Power (TFP).....	45
4.2 Studie B.....	46
4.2.1 Studie B – Vergleich Trainingsgruppen und Kontrollgruppe.....	46
4.2.1.1 Zeitbereich.....	47
4.2.1.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer.....	47
4.2.1.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer.....	47
4.2.1.2 Frequenzbereich.....	48
4.2.1.2.1 Low Frequency Power (LFP).....	48
4.2.1.2.2 High Frequency Power (HFP).....	49
4.2.1.2.3 LFP / HFP-Quotient.....	49
4.2.1.2.4 Total Frequency Power (TFP).....	50
4.2.2 Studie B – Vergleich 5-Tage-Gruppe und Weekend Warrior.....	51
5 Diskussion.....	53
5.1 Studie A.....	53
5.1.1 Zeitbereich.....	53
5.1.2 Frequenzbereich.....	55
5.1.3 Schlussfolgerung.....	60
5.2 Studie B – Vergleich Trainingsgruppen und Kontrollgruppe.....	60
5.2.1 Zeitbereich.....	60
5.2.2 Frequenzbereich.....	61
5.3 Studie B – Vergleich 5-Tage-Gruppe und Weekend Warrior.....	64
5.4 Methodendiskussion.....	65
5.5 Zusammenfassung.....	66

5.5.1 HRV-Parameter	66
5.5.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer	66
5.5.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer	66
5.5.1.3 Low Frequency Power (LFP).....	66
5.5.1.4 High Frequency Power (HFP)	67
5.5.1.5 LFP / HFP-Quotient.....	67
5.5.1.6 Total Frequency Power (TFP)	67
5.5.2 Physiologische Interpretation der Ergebnisse der Studie A	68
5.5.3 Physiologische Interpretation der Ergebnisse der Studie B.....	69
5.5.4 Herzfrequenzvariabilität und Ausdauerleistungsfähigkeit	70
5.5.5 Herzfrequenzvariabilität und Trainingssteuerung	70
6 Literaturverzeichnis	72
7 Danksagung.....	84
8 Lebenslauf	85
9 Anhang	87
9.1 Ergebnisse der Studie A	87
9.2 Ergebnisse der Studie B	88

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
AF	Atemfrequenz
ANS	autonomes Nervensystem
BMI	<i>Body Mass Index</i>
bpm	<i>beats per minute</i>
cm	Zentimeter
CRP	C-reaktives Protein
DM	Dauermethode
EKG	Elektrokardiogramm
HF	Herzfrequenz
HFP	<i>high frequency power</i>
HIT	hoch intensives Intervalltraining
HRV	Herzfrequenzvariabilität
Hz	Hertz
kg	Kilogramm
KHK	koronare Herzkrankheit
LF	<i>low frequency</i>
LFP	<i>low frequency power</i>
m	männlich
min	Minute
ml	Milliliter
mmol	Millimol
ms	Millisekunden
n.s.	nicht signifikant
NS	Nervensystem
PNS	peripheres Nervensystem
RR	Zeit von R-Zacke zu R-Zacke
RR _{MW}	Mittelwert der Zeit von R-Zacke zu R-Zacke
RR _{SD}	Standardabweichung der Zeit R-Zacke zu R-Zacke
RT	Regenerationstraining
SDANN	Standardabweichung des Mittelwertes der NN-Intervalle in allen Fünf-Minuten der gesamten Aufzeichnung
SDNN	<i>standard deviation of all RR intervals</i>
TFP	<i>total frequency power</i>
TW	Trainingswoche
VNS	vegetatives Nervensystem
VO ₂ max	maximale Sauerstoffaufnahme
vs.	<i>versus</i>
VT	Vortest
w	weiblich
ZNS	zentrales Nervensystem

Abbildungen

Abbildung 1:	Wang Shuhe, 3. Jahrhundert	3
Abbildung 2:	Graphische Darstellung der pro Jahr unter dem Suchbegriff „heart rate variability“ gelisteten Publikationen in Pubmed.....	5
Abbildung 3:	Grafik der intrinsischen Herzfrequenz	6
Abbildung 4:	Schematische Darstellung des Prinzips der Frequenzanalyse	14
Abbildung 5:	Exemplarische Darstellung eines HRV-Leistungs-Spektrums.....	15
Abbildung 6:	Herzfrequenzmessgerät S810 der Firma Polar	26
Abbildung 7:	Portabler CD-Spieler der Firma Grundig	27
Abbildung 8:	Kapsel-Gehörschutz der Firma Kee Safety GmbH	27
Abbildung 9:	Trainingsprogramm der HIT-Gruppe	30
Abbildung 10:	Trainingsprogramm der Dauermethoden-Gruppe.....	30
Abbildung 11:	Regenerationstraining beider Gruppen.....	31
Abbildung 12:	Allgemeines Studiendesign der Studie B.....	33
Abbildung 13:	Trainingsprogramme der einzelnen Gruppen der Studie B.....	35
Abbildung 14:	RRMW zu den einzelnen Messzeitpunkten.	41
Abbildung 15:	Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer zu den einzelnen Messzeitpunkten.	42
Abbildung 16:	High Frequency Power zu den einzelnen Messzeitpunkten.....	43
Abbildung 17:	Total Frequency Power zu den einzelnen Messzeitpunkten.	45
Abbildung 18:	RRSD der Trainingsgruppen und der Kontrollgruppe bei Eingangs- und Abschlusstest.....	47
Abbildung 19:	Low Frequency Power bei Eingangs- und Abschlusstest differenziert in Trainingsgruppen und Kontrollgruppe. Die Datenerfassung erfolgte unter Atemregulation von 12/min.....	48
Abbildung 20:	High Frequency Power bei Eingangs- und Abschlusstest differenziert in Trainingsgruppen und Kontrollgruppe. Die Datenerfassung erfolgte unter Atemregulation von 12/min.....	49
Abbildung 21:	Total Frequency Power bei Eingangs- und Abschlusstest differenziert in die Trainingsgruppen und Kontrollgruppe. Die Datenerfassung erfolgte unter Atemregulation von 12/min.....	50

Tabellen

Tabelle 1:	Veränderung der einzelnen Herzfrequenzvariabilitätsparameter durch physisches Training16
Tabelle 2:	Veränderung der LFP nach medikamentöser Blockade mit Atropin und Propranolol in liegender und stehender Position nach Pomeranz et al.18
Tabelle 3:	Veränderung der HFP nach medikamentöser Blockade mit Atropin und Propranolol in liegender und stehender Position nach Pomeranz et al.18
Tabelle 4:	Anthropometrische Daten für Schwimmer der HIT- und der Dauermethoden-Gruppe29
Tabelle 5:	Anthropometrische Daten der Probanden, aufgeteilt in die vier Gruppen ..34
Tabelle 6:	Ergebnisse der Varianzanalyse der HRV-Parameter. Vergleich Dauermethode-Gruppe vs. HIT-Gruppe. Jeweils für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion mit F- und p-Wert.....40
Tabelle 7:	Ergebnisse der Varianzanalyse der HRV-Parameter. Vergleich Trainingsgruppen vs. Kontrollgruppe. Jeweils für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion mit F- und p-Wert.....46
Tabelle 8:	Ergebnisse der Varianzanalyse der HRV-Parameter. Vergleich 5-Tage-Gruppe vs. Weekend Warrior. Jeweils für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion mit F- und p-Wert.....51
Tabelle 9:	Studie A: Mittelwerte und Standardabweichung der HRV-Parameter zu den einzelnen Messzeitpunkten der DM- und der HIT-Gruppe87
Tabelle 10:	Studie A: Mittelwerte und Standardabweichung der HRV-Parameter bei Eingangs- und Abschlusstest der einzelnen Gruppen88

1 Zusammenfassung

VORHABEN: Ziel dieser Arbeit war es, die physiologischen Veränderungen der autonomen efferenten Herzinnervation durch unterschiedliche sportliche Aktivität am Phänomen der Herzfrequenzvariabilität aufzuzeigen. Dabei standen der Vergleich zweier Ausdauertrainingsmethoden bei Sportlern bzw. der Vergleich unterschiedlicher isokalorischer Trainingsprogramme bei Untrainierten im Fokus der empirischen Studien.

METHODEN: Die Arbeit besteht aus zwei getrennten Studien. An der Sportlerstudie (Studie A) nahmen 21 Wettkampfschwimmer teil, die entweder ein niedrig intensives Training nach der Dauermethode- oder ein hochintensives Intervalltrainingsprogramm über einen Zeitraum von fünf Wochen absolvierten. Die Untrainierten-Studie (Studie B) untersuchte 48 untrainierte Teilnehmer, die einer von drei Interventionsgruppen oder einer Kontrollgruppe randomisiert zugeordnet wurden. Nach einem Eingangstest erfolgte eine 12-wöchige Interventionsphase, wobei neben der nicht trainierenden Kontrollgruppe die drei Trainingsgruppen isokalorische Ausdauerprogramme absolvierten. Die *Fettstoffwechsel-Gruppe* trainierte 15 Herzschläge/Minute niedriger und dementsprechend etwas länger als die anderen beiden Gruppen. Die *5-Tage-Gruppe* trainierte an 5 Tagen der Woche. Die Gruppe der *Weekend Warrior* verteilten den gleichen Wochentrainingsumfang auf zwei aufeinanderfolgende Tage.

ERGEBNISSE: Studie A: Bei den Sportlern zeigten sich während des 5-wöchigen Trainings signifikant unterschiedliche Verläufe der RRMW- (Mittelwert der RR-Intervall-Dauer), LFP- (Low Frequency Power), HFP- (High Frequency Power) und TFP-Werte (Total Frequency Power) beider Trainingsgruppen. Studie B: Bei zuvor Untrainierten zeigte sich der Trainingseffekt im Vergleich zur Kontrollgruppe als ein signifikanter Anstieg bei RRSD (Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer), LFP, HFP und TFP. Keine Veränderung zeigte die sympathovagale Balance (LFP/HFP). Die Art und Weise des Trainings, d.h. die jeweils spezifische Kombination von Umfang, Frequenz und Intensität, resultierte in jeweils spezifischen Trainingseffekten. Intensiveres Training führt zu einem signifikanten Anstieg von RRMW, RRSD, LFP, HFP und TFP. Gleiches Trainingspensum zeigt bei unterschiedlichem Timing keine signifikanten Unterschiede der HRV.

SCHLUSSFOLGERUNG: Studie A: Die Ergebnisse zeigen, dass unterschiedlich intensive Ausdauertrainingsprogramme zu differenter Modulation der efferenten kardialen autonomen Innervation führen, welche unter intensivem Intervalltraining ausgeprägter erscheint.

Studie B: Ein 12-wöchiges Training bei zuvor Untrainierten führt sowohl zu einer vermehrten Sympathikusaktivität als auch insbesondere zu einem erhöhten Parasympathikotonus. Es finden sich zudem klare Hinweise, dass höhere Trainingsintensitäten zu einer ausgeprägteren kardialen autonomen Modulation führen.

Beide Studien zeigen, dass körperliches Training sowohl bei Sportlern als auch bei zuvor Untrainierten zu einer veränderten kardialen Innervationslage führt.

Heart rate variability, change by competitive and preventive sports

PURPOSE: The aim of this study was to demonstrate the physiological changes in the autonomic efferent cardiac innervation by different sporting activity to the phenomenon of heart rate variability. The focus was the comparison of two methods of endurance training in athletes and the comparison of different isocaloric training programs for untrained people.

METHODS: This work contains two separate studies. The athletes study (Study A) investigated 21 competitive swimmers who either attended a permanent training method or a high-intensity exercise program over a period of 5 weeks. The untrained study (Study B) investigated 48 untrained participants who were randomly assigned to one of three intervention groups or a control group. After an initial test, a 12-week training followed. In addition to the non-exercising control group, the three training groups completed isocaloric training programs, each with different amounts of training volume, frequency and intensity.

RESULTS: Study A: The athletes showed during the 5-week training significantly different progressions of RRMW (mean RR interval duration), LFP (low-frequency power), HFP (high frequency power) and TFP-values (total frequency power) in both training groups. Study B: In the sedentary study the training effect compared with the control group showed a significant increase in RRSD (standard deviation of the RR interval duration), LFP, HFP, and TFP. Just the sympathovagal balance (LFP / HFP) didn't change. The way of training, that is, the specific combination of volume, frequency and intensity, resulted in each specific training effects: as an aligned on fat metabolism training led to a significant increase of LFP and TFP, while the parameters RRMW, RRSD and HFP remained unchanged. However, more intensive training resulted in a significant increase of RRSD, LFP and TFP. In case of shortening the same amount of exercise to two consecutive days of training, all parameters of heart rate variability, except for RRSD and LFP / HFP are showing a significant increase. Some parameters are showing an even highly significant increase.

CONCLUSION: Study A: The results show that different training programs will lead to different modulation of the efferent cardiac autonomic innervation. In the intensive training appears more pronounced.

Study B: For previously sedentary subjects it could be found an equally significant result for the endurance training. In the 12-week training we found an increased sympathetic activity and an increased parasympathetic tone. This study also shows that training of higher intensity, compressed to a few days of total training time will increase this effect evidentially.

2 Einleitung

Das Herz ist ein gut faustgroßes muskuläres Hohlorgan und liegt mit seinen zwei Kammern und zwei Vorhöfen im Brustkorb. Es arbeitet wie eine Pumpe und versorgt durch seine rhythmischen Kontraktionen sämtliche Organe mit Blut. Die Anzahl dieser rhythmischen Kontraktionen pro Minute wird als Herzfrequenz bezeichnet, die durch verschiedene Regulationsmechanismen beeinflusst wird. Die Herzfrequenz unterliegt demnach gewissen charakteristischen Schwankungen der Schlag-zu-Schlag-Dauer, die definitionsgemäß die Herzfrequenzvariabilität (*heart rate variability*, HRV) darstellen.

Die ersten Aufzeichnungen zur Herzfrequenzvariabilität reichen bis in die Antike zurück. So untersuchte der im 3. Jahrhundert n. Chr. lebende Mediziner Wang Shuhe Pulse und beschrieb die klinische Bedeutung von 24 verschiedenen Puls-Typen (117).



Abbildung 1: Wang Shuhe, 3. Jahrhundert (57)

Eine seiner Feststellungen bezieht sich in bemerkenswerter Weise auf das Phänomen der HRV und zeigt, dass wohl schon der antike Arzt den Zusammenhang von erhöhter Variabilität des Pulses und Gesundheit erkannt hatte:

„Wenn der Herzschlag so regelmäßig wie das Klopfen des Spechts oder das Tröpfeln des Regens auf dem Dach wird, wird der Patient innerhalb von vier Tagen sterben.“ (117)

Als klinischer Indikator für „ein gesundes Herz“ wurde 1927 von Wenckebach und Winterberg die respiratorische Sinusarrhythmie beschrieben. In die klinische Medizin, insbesondere in die Kardiologie, hielt das Konzept der HRV im engeren Sinne in den 70er Jahren Einzug. Hinkle et al. (51) beschrieben bei reduzierter respiratorischer Sinusarrhythmie ein erhöhtes Herztodrisiko bei 301 mittelalten Patienten mit KHK, Hypertonie oder Lungenerkrankung. Seit dieser Zeit zeigt sich eine zunehmende Ausweitung dieses Analyse-Parameters in diverse klinische und experimentelle Bereiche. Die HRV stößt insbesondere auch in der Sportmedizin und im Bereich des Leistungssportes auf wachsendes Interesse.

Seit einiger Zeit etablierte sich darüber hinaus auch die Messung der HRV als geeignetes Instrument zur Darstellung der autonomen Innervation des Herzens, welche im Wesentlichen durch das vegetative Nervensystem modelliert wird. Im Unterschied zur Diagnostik vieler kardialer Erkrankungen, bei denen die Aufzeichnung einzelner Herzschläge durch ein 12-Kanal-EKG wesentlich ist, genügt zur HRV-Diagnostik die exakte Bestimmung der Abstände von R-Zacke zu R-Zacke. Ihr besonderer Nutzen liegt damit vor allem in der relativ einfachen Datenaufzeichnung, welche mit handelsüblichen Messapparaten möglich ist.

Durch die Herstellung tragbarer und kostengünstiger Messapparate ist die HRV-Analyse zunehmend in den Fokus der Sportmedizin gerückt, und findet dort hauptsächlich in den Bereichen Trainingssteuerung und Diagnostik von Übertrainingszuständen Anwendung. Der immer deutlicher werdende Stellenwert der Herzfrequenzvariabilität in der ambulanten medizinischen Versorgung und Forschung zeigt sich in dem kontinuierlichen Anstieg der Publikationen, die sich mit diesem interessanter werdenden Gegenstand beschäftigen, vgl. Abbildung 2:

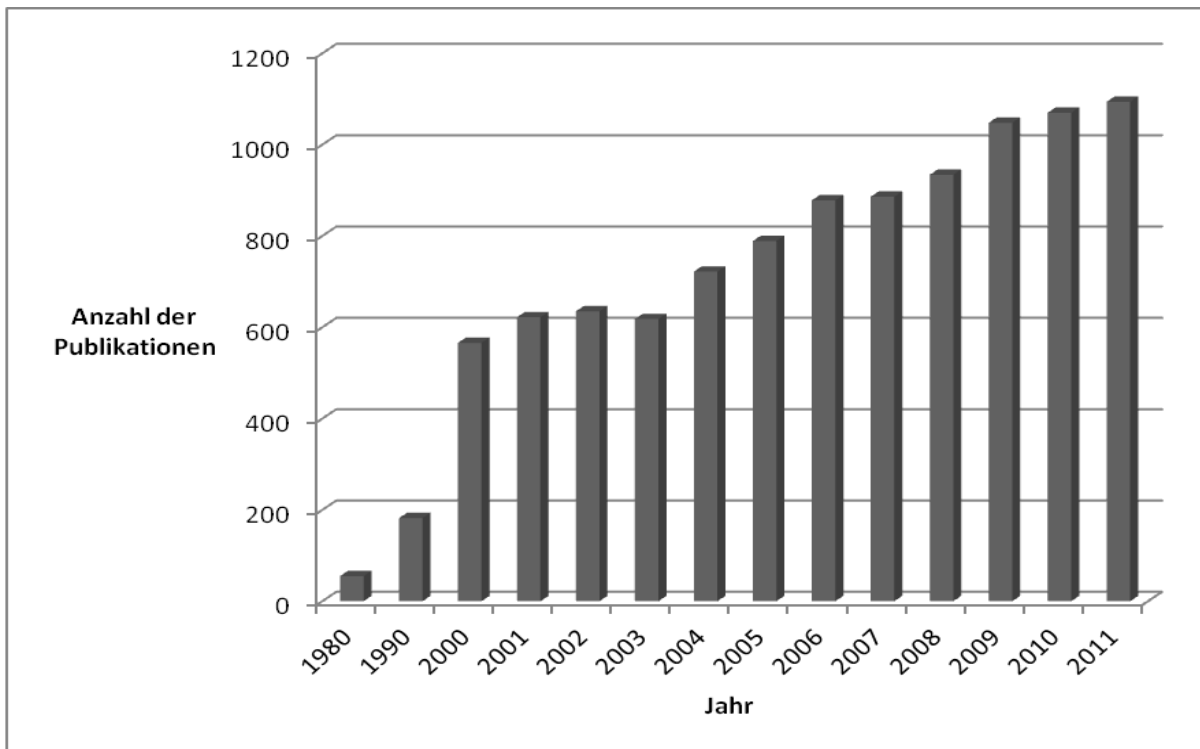


Abbildung 2: Graphische Darstellung der pro Jahr unter dem Suchbegriff „heart rate variability“ gelisteten Publikationen in Pubmed.

Diese Publikationen untersuchen im Bereich der Sportmedizin zumeist den Zusammenhang der HRV mit Leistungsdiagnostik, Trainingssteuerung und Erholungsfähigkeit der Probanden.

1996 setzte sich ein Expertengremium der *Europäischen Kardiologengesellschaft* und der *Nordamerikanischen Gesellschaft für Elektrophysiologie* zusammen und erarbeitete ein Positionspaper, um die bis dahin sehr unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zu standardisieren und somit die unterschiedlichen Ergebnisse vergleichbar zu machen (126). Die dort formulierten Empfehlungen zur Methodik, zur Analyse und zur Interpretation bilden bis heute eine einheitliche Grundlage für Methoden und Parameter einschlägiger Studien.

2.1 Theoretische Grundlagen der Herzfrequenzvariabilität

2.1.1 Definition

Unter „Herzfrequenzvariabilität“ (engl. *heart rate variability*, HRV) versteht man Schwankungen der Herzfrequenz von Schlag zu Schlag, über einen kürzeren (Minuten) oder längeren Zeitraum (bis zu 24 Stunden). Die HRV ist eine Messgröße der neurovegetativen Aktivität oder der autonomen Funktion des Herzens (77).

2.1.2 Physiologie

Intrinsische Herzfrequenz: Die Herzaktivität ist gekennzeichnet durch eine Autorhythmie, die sich ohne jegliche Beeinflussung in der intrinsischen Herzfrequenz widerspiegelt. Die Variabilität, die durch verschiedene Regulationsmechanismen entsteht, liegt hierbei nicht vor. Diese intrinsische Herzfrequenz wird mit ca. 100 bis 110 Schlägen/Minute angegeben. Hierbei ist der Sinusknoten für die rhythmischen Aktionspotentiale zuständig.

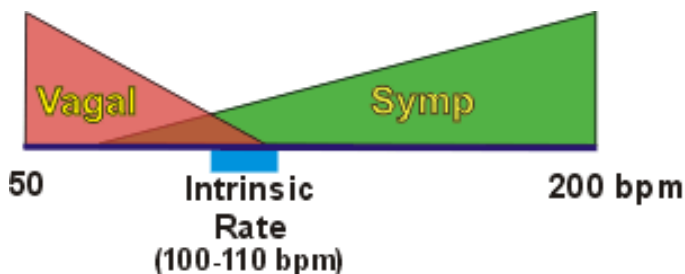


Abbildung 3: Grafik der intrinsischen Herzfrequenz (66)

Diese Grundfrequenz wird durch diverse Faktoren modelliert. Sympathikus und Parasympathikus spielen hierbei die bedeutendste Rolle. Dieses führt zu einer veränderten Frequenz und einer zunehmenden Variabilität (15). Robinson et al. beschrieben schon 1966 das Verhalten der Herzfrequenz bei Belastung unter Blockade des autonomen Nervensystems (104). Unter β -Blockern und Atropin zeigte sich auch bei zunehmender physischer Anstrengung auf dem Fahrradergometer nahezu konstante Herzfrequenz.

Das Nervensystem: Das Nervensystem des Menschen lässt sich anatomisch und/oder funktionell auf verschiedene Weise unterteilen.

Anatomisch sind das zentrale Nervensystem (ZNS) und das periphere Nervensystem (PNS) zu trennen. Zum ZNS werden Gehirn und Rückenmark gerechnet; die verbleibenden, dem Gehirn und Rückenmark entspringenden Nervenwurzeln mit ihrer Fortsetzung in Form einzelner Nerven bilden das PNS.

Physiologisch, also funktionell ist das Nervensystem (NS) des menschlichen Körpers in drei Untereinheiten organisiert. Das motorische, das sensorische und das vegetative Nervensystem. Das motorische (oder willkürliche) Nervensystem steuert alle willentlichen Muskelbewegungen. Das sensorische Nervensystem leitet die Reize der Sinneszellen zum zentralen Nervensystem. Das vegetative Nervensystem ist für die Regulation der unwillkürlichen Körperfunktionen wie Stoffwechsel, Atmung, Herztätigkeit, Drüsenfunktion und Verdauung zuständig.

Diese drei Systeme sind auf jedem Niveau eng miteinander verknüpft (118).

Vegetatives Nervensystem: Das vegetative Nervensystem (VNS) oder auch „autonome“ Nervensystem (ANS) bildet zusammen mit dem somatischen Nervensystem das zentrale und periphere Nervensystem des Menschen (13). „Autonomie“ bezieht sich darauf, dass über das VNS festliegende physiologische innerkörperliche Regulationsvorgänge vermittelt werden, die aus diesem Grund vom Menschen willentlich nicht direkt beeinflusst werden können.

Die Aufrechterhaltung der inneren Homöostase durch Kontrolle der lebenswichtigen Funktionen (Vitalfunktionen) wird durch das VNS erbracht. Zu den Vitalfunktionen gehören Herzaktivität, Blutdruck, Atmung, Stoffwechsel und Verdauung. Weiterhin werden auch andere Organsysteme durch das VNS innerviert, wie z. B. die Schweißdrüsen, Sexualorgane und Pupillen.

Das vegetative Nervensystem untergliedert sich in das enterische Nervensystem, das sympathische Nervensystem und das parasympathische Nervensystem. Bei der Herzinnervation spielen im Wesentlichen das sympathische und parasympathische Nervensystem als Antagonisten eine Rolle. Die beiden vegetativen Gegenspieler wirken auf die Herzfrequenz (Chronotropie), auf die kardiale Kontraktionskraft (Inotropie), auf die kardiale Erregungsleitung (Dromotropie) und auf die Erregbarkeit des Herzens (Bathmotropie).

2.1.3 Die wichtigsten Einflussfaktoren der Herzfrequenzvariabilität

2.1.3.1 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz selbst steht in engem Zusammenhang mit der Herzfrequenzvariabilität. Insbesondere Vagus und Sympathikus sind die Haupteinflussfaktoren sowohl von Herzfrequenz als auch der Herzfrequenzvariabilität. Tsuji et al. (127) beschreiben in der in Amerika erhobenen *Framingham Heart Study* die Herzfrequenz neben dem Alter als den wichtigsten unabhängigen Einflussfaktor auf die HRV. Zu denselben Schlussfolgerungen gelangen auch Kuch et al. (67), die in einer multivariaten Analyse die Herzfrequenz als Hauptfaktor der Herzfrequenzvariabilität identifizieren.

Der Grund hierfür liegt bei einzelnen Herzfrequenzvariabilitätswerten zunächst in dem mathematischen Zusammenhang zwischen der Höhe der Herzfrequenz und ihrer Streuung. Z. B. bei dem Variationskoeffizienten – einem von uns nicht dargestellten Parameter der HRV – wird die Streuung auf den Mittelwert bezogen. Zudem ist die enge Kopplung auch physiologisch gesehen nachvollziehbar – ein Anstieg der Sympathikusaktivität hat in der Regel den Anstieg der Herzfrequenz zur Folge. Weiterhin erhöhen sich die z. T. sympathisch-vermittelten HRV-Parameter wie z. B. *Low Frequency Power*. Dieses beschreiben auch Ramaekers et al. (102). Umgekehrt kommt es bei einer verstärkten Aktivität des parasympathischen Nervensystems zu einem Abfall der Herzfrequenz mit resultierendem Anstieg der hauptsächlich vagal bestimmten HRV-Parameter sowie zu einem Abfall der sympathisch bestimmten HRV-Parameter.

Auf Grund der physiologischen Zusammenhänge sowie der Heterogenität der Daten verweisen einige Autoren auf die Notwendigkeit einer Normierung zur „Basisherzfrequenz“, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten und die systematische Fehlerquelle in der Auswertung zu reduzieren (69, 102, 129, 132).

2.1.3.2 Lebensalter

Das Lebensalter wird häufig als zweiter großer Hauptfaktor der Herzfrequenzvariabilität (127) diskutiert. Fukusaki et al. (41) beschreiben das Lebensalter als den dominanten Faktor bezüglich der HRV-Veränderungen, so dass

andere physiologische Veränderungen, wie Gewicht, Trainingszustand und Blutdruck nur eine geringe und untergeordnete Rolle spielen. In einer Studie an 75 männlichen Probanden im Alter zwischen 20 und 87 Jahren dokumentieren die Autoren Byrne et al. (29) eine Varianzaufklärung durch das Alter von ca. 15% für die niedrigfrequenten HRV-Parameter. Im hohen Frequenzbereich beschreiben sie sogar ca. 18% Varianzaufklärung. Jensen-Urstad et al. (59) zeigen anhand von EKG-Aufzeichnungen das Alter neben der Herzfrequenz als wichtigste Determinante der HRV, finden aber zwischen Lebensalter und Basisherzfrequenz keine direkte Beziehung. Gregoire et al. (45) argumentieren jedoch, dass regelmäßiges Training dem altersbedingten Abfall der HRV entgegenwirken könne.

In zahlreichen Studien bestätigt sich, dass sich im Alter hauptsächlich die gesamte autonome Aktivität reduziert und die sympatho-vagale Balance weniger beeinflusst wird (58, 94, 135).

Zusammenfassend kann man also sagen, dass die aktuelle Literatur neben der Herzfrequenz einheitlich die große Bedeutung des Lebensalters für die vegetative Innervation des Herzens und die damit verbundene Herzfrequenzvariabilität sieht (67, 68, 127).

2.1.3.3 Geschlecht

Das Geschlecht ist eine weitere Determinante der Herzfrequenzvariabilität, welche jedoch keinen so großen Einfluss auf die HRV besitzt wie die Basisherzfrequenz und das Lebensalter. Weiterhin muss konstatiert werden, dass nicht alle Bereiche der HRV gleichermaßen vom Geschlecht abhängig sind. Rossy et al. (107) sehen in ihrer Untersuchung eine höhere High Frequency-Power der weiblichen Probanden. Demgegenüber zeigt sich bei den männlichen Personen eine erhöhte sympathische Aktivität. In einer Untersuchung von Sinnreich et al. (120) werden die geschlechtsspezifischen Unterschiede der HRV auf die Spontanatmung und die erhöhte Herzfrequenz zurückgeführt, da unter kontrollierter Atmung diese Differenzen nicht mehr nachzuweisen waren. Van Hoogenhuyzen et al. (132) gehen sogar so weit, dass sie die Geschlechtsunterschiede ausschließlich auf die unterschiedliche Herzfrequenz zurückführen. Diese sei wiederum abhängig von der geringeren absoluten und körperrgewichtbezogenen Herzgröße weiblicher Probanden und dem damit verbundenen geringeren Schlagvolumen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die meisten Autoren eine geringere gesamt autonome Aktivität und eine höhere Herzfrequenz weiblicher gegenüber männlicher Personen beschreiben (40, 67, 68, 70, 73, 102, 103, 120).

2.1.3.4 Trainingszustand

Ein leicht zu erfassendes Merkmal der Ausdauerleistungsfähigkeit ist eine reduzierte Herzfrequenz des Sportlers in Ruhe (33, 107). Durch welche neurovegetative Modulation diese trainingsinduzierte Bradykardie entsteht, wird unterschiedlich erklärt. Eine verminderte sympathische Aktivität (28, 36), ein Anstieg des Parasympathikus (116) und eine Kombination aus beidem sind denkbar. Durch diesen veränderten vegetativen Tonus zeigen sich unabhängige Effekte des Trainingszustandes auf die unterschiedlichen Parameter der HRV. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die körperliche Ausdauerleistungsfähigkeit und auch die Herzfrequenzvariabilität nicht zu unterschätzenden genetischen Einflüssen unterliegen (17, 119).

2.1.3.5 Gesundheitszustand

Es ist unbestritten, dass der Gesundheitszustand einen wesentlichen Einfluss auf die HRV ausübt. In der aktuellen Literatur finden sich diverse Studien, in denen die Parameter der HRV mit Ausprägungsgraden verschiedener Erkrankungen korreliert werden. Hier sind insbesondere die Herzkreislauferkrankungen zu nennen. Perkiömäki et al. (97) beschreiben Veränderungen der Zeitbereichs-Parameter als wichtige „Vorboten“ von akuten koronaren Durchblutungsstörungen. Weitere Krankheitsbilder sind Diabetes mellitus, Nierenfunktionsstörungen, diverse neurologische Erkrankungen und viele mehr (42, 93, 105, 123).

Auch inflammatorische Prozesse im Körper wurden mit der Herzfrequenzvariabilität korreliert. Hierbei ist insbesondere das C-reaktive Protein (CRP) als objektiver Marker gewählt worden. Sloan et al. (121) untersuchten in ihrer Cardia-Studie bei jungen Erwachsenen den Zusammenhang zwischen Entzündungsmarkern und Parametern des Frequenzbereichs der HRV. Die Auswertung zeigte z. T. höchst signifikante Zusammenhänge. Ähnliches beschreiben Madsen et al. (80) und Soares-Miranda et al. (122). In ihrer Untersuchung an 269 Patienten mit klinischem Verdacht

auf koronare Durchblutungsstörungen bestimmten sie die Herzfrequenzparameter RR_{SD} (vgl. 2.1.4.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall- Dauer), $SDANN$ (RR_{SD} einer begrenzten Zeitperiode) und $SDNN$ -Index (Mittelwert aller $SDANN$) sowie das C-reaktive Protein und erhielten als Ergebnis hoch und höchst signifikante Zusammenhänge dieser Variablen.

Diese Assoziationen zwischen erhöhten inflammatorischen Serumwerten als Marker von reduziertem Gesundheitszustand und der reduzierten kardialen autonomen Funktion, dargestellt durch die HRV, werden in der Literatur vielfach beschrieben (6, 71, 89, 122). Hellard et al. (50) beschreiben die Herzfrequenzvariabilität als möglichen Marker, um Krankheitszustände bei Sportlern frühzeitig zu detektieren.

2.1.3.6 Physikalische Umgebungseinflüsse

Dass physikalische Umgebungseinflüsse die Parameter der HRV verändern, ist offenkundig. Leider wird in der verfügbaren Literatur jedoch wenig explizit auf die einzelnen Einflüsse und deren Wirkung auf die Herzfrequenzvariabilität eingegangen. Hori et al. (53) untersuchten unter anderem die HRV-Veränderungen bei Lärm, Schafer et al. (111) fokussierten den Einfluss von Licht und Liu et al. (74) untersuchten insbesondere den Frequenzbereichsparameter LFP/HFP bei unterschiedlichen Temperaturen. Einen weiteren bekannten physikalischen Umgebungseinfluss stellt die Luftfeuchtigkeit dar. Resümierend muss man von Veränderungen der HRV durch physikalische Umgebungseinflüsse ausgehen, ohne dass genau nachgewiesen ist, in welchem Umfang dies geschieht. Um diese Einflussfaktoren zu minimieren, sollten einschlägige Untersuchungen unter möglichst konstanten Bedingungen erfolgen.

2.1.3.7 Atmung

Eine enge Beziehung besteht zwischen der Atmung und einzelnen Parametern der HRV. Hierbei sind insbesondere die Variablen im Frequenzbereich zu nennen. Fällt die Rhythmik der physiologischen Atmung in den Frequenzbereich der *High Frequency Power* oder in den Bereich der *Low Frequency Power*, ändern sich diese Absolutwerte deutlich. Auch sonst ist eine atemabhängige Herzfrequenzveränderung als respiratorische Sinusarrhythmie bekannt. Nach der Inspiration kommt es zu

einem leichten Anstieg der HF, nach Expiration setzt leicht zeitverzögert ein Abfall der HF ein (76).

Nachdem Brown et al. (21) darauf verwiesen, dass auf die Atemfrequenz in den Studien zu wenig eingegangen wird, wird der Einfluss der Atmung auf die HRV in der aktuellen Literatur mittlerweile weitgehend berücksichtigt. So beschreibt Jovanov (60) signifikante Veränderungen der Herzfrequenzvariabilitätsparameter während sehr langsamen Atmens und Zöllei et al. (138) zeigen, dass die Reproduzierbarkeit von HRV-Daten mit kontrollierter Atmung deutlich ansteigt.

Auch andere Autoren betrachten das gleichmäßige Atmen als sehr wichtig, um einen weiteren Einflussfaktor der HRV zu eliminieren bzw. zu reduzieren (11, 38, 47, 109). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass vor allem unregelmäßiges Atmen einen relativ großen Einfluss auf die Herzfrequenzparameter und hier insbesondere auf die Werte des Frequenzbereiches hat.

2.1.3.8 Auswertender

Auch der Studienleiter bzw. der Auswertende hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Ergebnisse der HRV. Da in der Regel die Rohdaten vor der Auswertung visuell überprüft und Bereiche festgelegt oder eliminiert werden, spielt diese ausführende Person auch eine Rolle als Einflussfaktor.

2.1.3.9 Zusammenfassung

Die einzelnen Einflussfaktoren der Herzfrequenzvariabilität lassen sich unterschiedlich leicht verändern. So können zum einen beispielsweise Lebensalter und Geschlecht nicht beeinflusst werden, zum anderen lassen sich u. a. physikalische Umgebungseinflüsse und Auswertender sehr einfach verändern.

Da im Rahmen dieser Studie die Veränderung der HRV durch körperliche Aktivität messen wollen, sollte versucht werden, die anderen Einflussfaktoren während der Messungen jeweils so konstant wie möglich zu halten.

2.1.4 Parameter der Herzfrequenzvariabilität

2.1.4.1 Zeitbereich

Die Analyse der Herzfrequenzvariabilität im Zeitbereich bezieht sich auf die deskriptive Statistik aufeinander folgender RR-Intervalle und deren Differenzen und erfasst somit die Größe der Variabilität (95, 126). Ein essentieller Parameter, der als Marker für die kardiale tonische Vagusaktivität gilt, ist die Standardabweichung aller RR-Intervalle (RR_{SD}). Hierbei werden vornehmlich hochfrequente Änderungen aufgezeichnet.

Neben diesen Variablen existieren weitere relevante Parameter der HRV im Zeitbereich (126).

2.1.4.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer

Der arithmetische Mittelwert der Dauer der einzelnen RR-Intervalle (RR_{MW}) entspricht der Herzfrequenz und ist somit kein Parameter der Variabilität. Er wird jedoch als Ausgangsparameter derselben zumeist mit abgebildet. Der RR_{MW} wird in der Dimension Millisekunden (ms) dargestellt. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$\bar{x}_{\text{arithm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

2.1.4.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer

Die Standardabweichung der Mittelwerte der Dauer der einzelnen RR-Intervalle (RR_{SD}) wird in der Dimension Millisekunden (ms) angegeben. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{u(n) - \bar{u}\}^2}$$

2.1.4.2 Frequenzbereich

Der *Frequenzbereich* bezieht sich auf die Periodenlänge der Herzfrequenz-Schwankungen. Hierfür ist die Zeitreihe der RR-Intervalle der Ausgangspunkt. Auf

der Basis der von Akselrod et al. (2) eingeführten Leistungsspektralanalyse wird ein Signal, z. B. die Herzfrequenz, in Teilschwingungen zerlegt.

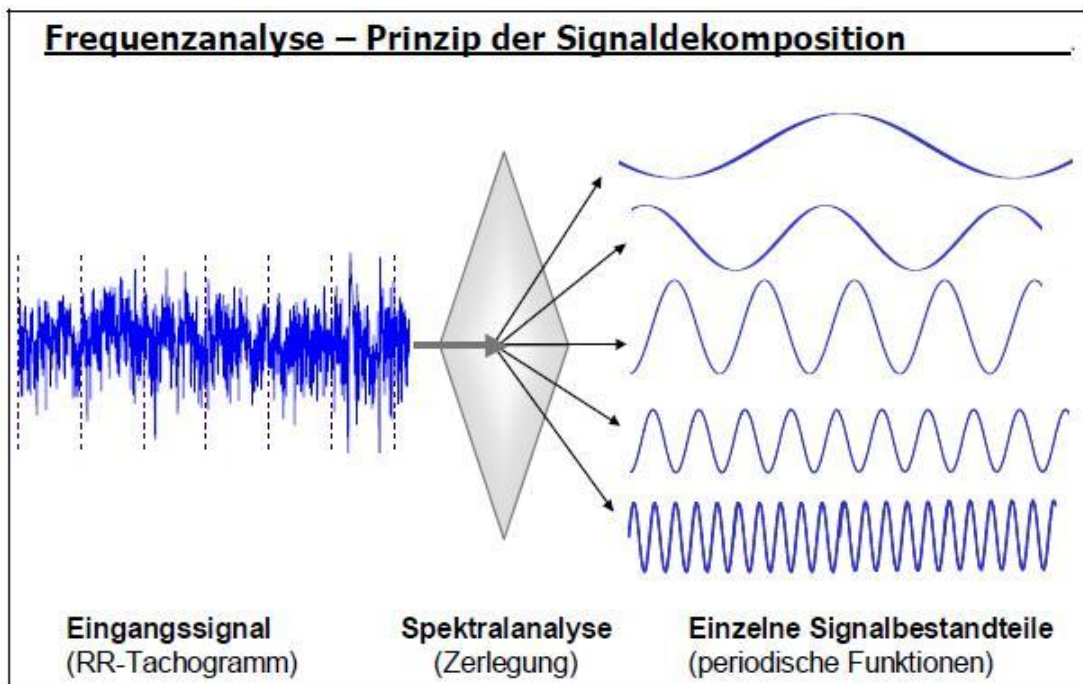


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Prinzips der Frequenzanalyse (54)

Durch eine *Fast-Fourier-Transformation* kann dann das Leistungsspektrum errechnet werden (81). Dieses Leistungsspektrum gibt den Anteil der niederfrequenten (*Low Frequency*) und der höherfrequenten (*High Frequency*) Teilschwingungen des Signals an. Das HRV-Spektrum ist somit durch zwei wesentliche Gipfel charakterisiert. Die Fläche darunter entspricht der Leistung (126).

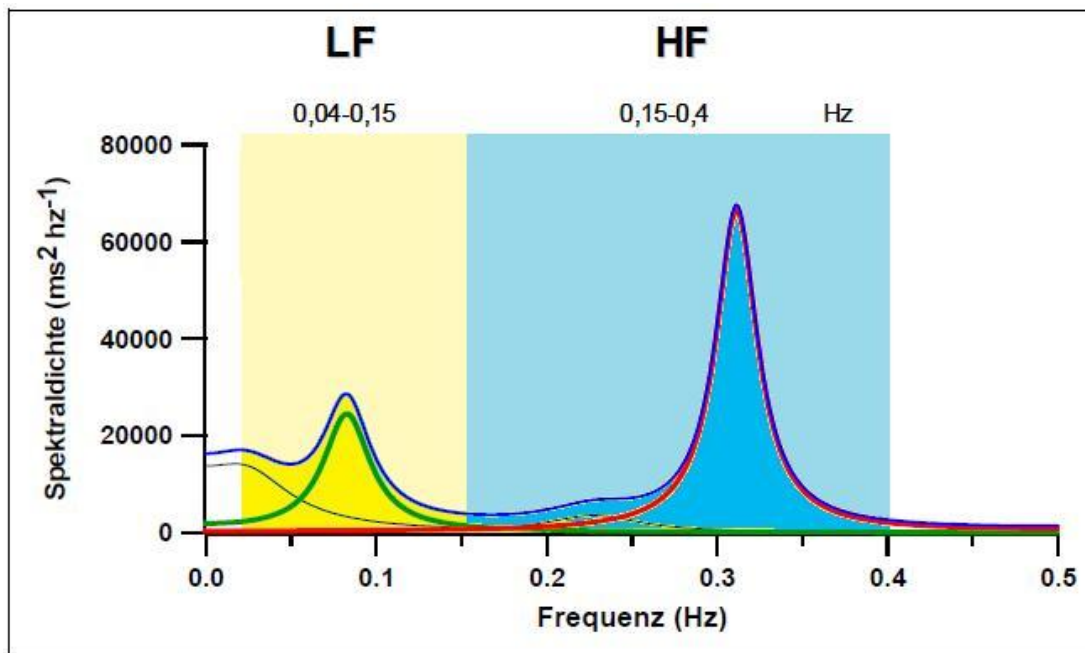


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung eines HRV-Leistungs-Spektrums (54)

LF=Low Frequency; HF=High Frequency.

2.1.4.2.1 Niederfrequentes Leistungsspektrum; Low Frequency Power (LFP)

Low Frequency Power wird definiert für Frequenzen zwischen 0,04 und 0,15 Hz. Sie entspricht den Blutdruck-Wellen mit einer Periodenlänge von 10 bis 20 Sekunden. Low Frequency-Schwankungen werden sympathisch vermittelt und unterliegen über den Baroreflex auch einem vagalen Einfluss.

2.1.4.2.2 Hochfrequentes Leistungsspektrum; High Frequency Power (HFP)

High Frequency Power wird definiert für Sequenzen zwischen 0,15 und 0,40 Hz. Durch dieses Sequenzspektrum stellt die High Frequency eine ca. Vier-Sekunden-Rhythmik dar und kann als Ausdruck der respiratorischen Sinusarrhythmie angesehen werden. Das Maximum liegt im Bereich der Atmungsfrequenz. Die High Frequency Power korreliert mit dem Vagotonus und quantifiziert die kardiale vagale Aktivität. Da diese Frequenz im Bereich der Atmungsfrequenz liegt, hat insbesondere die Atmung hierauf auch einen deutlichen Einfluss.

2.1.4.2.3 Sympathovagale Balance; Ratio der Herzfrequenzvariabilität, LFP / HFP

Der Quotient aus der LFP und der HFP wird als *Ratio der Herzfrequenzvariabilität* bezeichnet und fungiert als wesentlicher Marker der sympathovagalen Balance.

2.1.4.2.4 Gesamtleistungsspektrum; Total Frequency Power (TFP)

Die *Total Frequency Power* wird definiert für Sequenzen zwischen 0,0 und 1,0 Hz. Sie ist die Gesamtleistung der einzelnen Frequenzbereiche und ist Ausdruck der Varianz aller RR-Intervalle (15, 126).

2.1.5 Änderung der Herzfrequenzvariabilität durch physisches Training

HRV-Parameter	Veränderung durch physische Aktivität	Beeinflussung von	
		Sympathikus	Parasympathikus
RR _{MW}	- -	+	+++
RR _{SD}	++	(+)	+++
LFP	(+)	++	++
HFP	+++	(+)	+++
LFP / HFP	(-)	(+)	+
TFP	+++	+	+++

Tabelle 1: Veränderung der einzelnen Herzfrequenzvariabilitätsparameter durch physisches Training

HRV=Herzfrequenzvariabilität; RR_{MW}=Mittelwert der RR-Intervalldauer; RR_{SD}=Standardabweichung der RR-Intervalldauer; LFP=Low Frequency Power; HFP=High Frequency Power; LFP/HFP=Low Frequency Power / High Frequency Power; TFP=Total Frequency Power (88, 100, 101, 126).

Die Werte der Ruheherzfrequenz, die zur Berechnung der Herzfrequenzvariabilität als Berechnungsgrundlage, quasi als „Rohdaten“ dienen, sind bei trainierten gegenüber untrainierten Personen herabgesetzt (37, 45). Dies wurde sowohl in Quer- (33, 64, 79) als auch in Längsschnittstudien (72, 85, 86, 114) nachgewiesen. Die Mechanismen der trainingsbedingten Bradykardie werden kontrovers diskutiert. Es wird insbesondere von einer vermehrten vagalen Aktivität ausgegangen. Die

Veränderung der sympathischen Funktion wird umstritten gesehen (36, 116). Weiterhin wird auch über ein Sinken der intrinsischen Herzfrequenz diskutiert (30, 31).

Die Herzfrequenzvariabilität wird durch körperliches Training ebenfalls beeinflusst. Zahlreiche Forschungsgruppen sehen es als gesichert an, dass aerobes Ausdauertraining bei angemessener Intensität zu einer Zunahme der globalen Herzfrequenzvariabilität führt (92, 106, 115).

Spezifiziert man die Herzfrequenzvariabilität in ihre einzelnen Indizes, so kann man nicht von einer globalen Zunahme sprechen, denn einzelne Parameter spiegeln vermehrt die sympathische und andere die parasympathische, kardiale Innervation wider. In Studien mit medikamentöser Blockade des sympathischen bzw. parasympathischen Schenkels wurde gezeigt, dass die Modulation der Herzfrequenzvariabilität durch physisches Training am ehesten ein Anstieg der vagalen Aktivierung, bei wenig veränderter sympathischer Innervation ist (88, 116).

Nachfolgend werden die Veränderungen der einzelnen HRV-Parameter durch medikamentöse Blockade des Parasympathikus und des Sympathikus sowie durch komplette autonome Blockade beschrieben.

Die amerikanische Forschergruppe um Ng (88) untersuchte die Veränderung der einzelnen HRV-Parameter nach medikamentöser Blockade mit Propranolol (0,2mg/kg Körpergewicht) und Atropin (0,04mg/kg Körpergewicht).

Dass die Herzfrequenz nach Gabe eines β -Blockers sinkt und durch Gabe von Atropin steigt, ist bekannt. Anders sieht es aus bei der RR_{SD} . Hier zeigt sich nach Gabe von Propranolol keine Veränderung. Nach Injektion des Parasympatholytikums Atropin sinken die RR_{SD} -Werte höchst signifikant, genau wie nach der Gabe von Atropin und Propranolol (128). Diese Veränderungen zeigten auch Polanczyk et al. (100).

Für zwei Frequenzparameter beschrieben schon Pomeranz et al. 1985 die Veränderungen in liegender und stehender Körperposition. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt.

LFP				
	Atropin	Atropin + Propranolol	Propranolol	Propranolol + Atropin
Position				
liegend	- 84 ** (±4,6)	- 83 * (±5,6)	+ 47 n.s. (±23,3)	- 90 ** (±2,5)
stehend	- 72 * (±4,4)	- 89 * (±1,7)	- 73 * (±5,3)	- 90 * (±2,6)

Tabelle 2: Veränderung der LFP nach medikamentöser Blockade mit Atropin und Propranolol in liegender und stehender Position nach Pomeranz et al. (101)

LFP=Low Frequency Power; Atropindosierung: 0,03mg/kg Körpergewicht i.v.; Propranololdosierung: 0,15mg/kg Körpergewicht i.v.; *=signifikant; **=hoch signifikant; Mittelwerte [%] ± Standardabweichung.

HFP				
	Atropin	Atropin + Propranolol	Propranolol	Propranolol + Atropin
Position				
liegend	- 92 * (±4,2)	- 80 * (±1,7)	+ 18 n.s. (±25,0)	- 92 * (±2,9)
stehend	- 95 ** (±1,8)	- 93 ** (±1,1)	+ 11 n.s. (±48,9)	- 96 * (±1,1)

Tabelle 3: Veränderung der HFP nach medikamentöser Blockade mit Atropin und Propranolol in liegender und stehender Position nach Pomeranz et al. (101)

HFP=High Frequency Power; Atropindosierung: 0,03mg/kg Körpergewicht i.v.; Propranololdosierung: 0,15mg/kg Körpergewicht i.v.; *=signifikant; **=hoch signifikant; Mittelwerte [%] ± Standardabweichung.

Diese Ergebnisse werden durch Ng et al. (88) und Polanczyk et al. (100) bestätigt. Der LFP/HFP-Quotient veränderte sich bei der Forschergruppe aus Chicago nach Propranolol und nach Gabe von Atropin nicht, war jedoch nach kompletter autonomer Blockade signifikant niedriger.

Wie die Ergebnisse von LFP und HFP schon vermuten lassen, wurde eine ähnliche Veränderung bei der Total Frequency Power beschrieben. Nach Verabreichung des Sympatholytikums zeigte sich keine Veränderung. Atropin hingegen führte zu höchst signifikant niedrigeren Werten, genau wie die doppelte Blockade durch Atropin und Propranolol (88).

Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass aerobes Ausdauertraining über einen längeren Zeitraum zu einer Veränderung des vegetativen Tonus führt. Hierbei kommt es insbesondere zu vermehrter parasympathischer Aktivität bei weitestgehend unveränderter sympathischer Herzinnervation. Durch diese veränderte vegetative Herzmodulation kommt es zu einem Anstieg der Herzfrequenzvariabilität, welche je nach Parameter unterschiedlich ausgeprägt ist. Die größte Zunahme zeigen die Parameter, die im Wesentlichen die vagale Aktivität darstellen.

2.2 Ausdauertraining

2.2.1 Definition und Einteilung der Ausdauer

Heutzutage wird der Terminus „Ausdauer“ relativ umfassend benutzt. Die Beschreibung der Ausdauer beinhaltet die Begriffe: Leistung, Ermüdung und Wiederherstellungsfähigkeit. Kurz zusammengefasst definieren Zintl und Eisenhut (137) die Ausdauer als Ermüdungswiderstandsfähigkeit, Ermüdungstoleranz und rasche Wiederherstellungsfähigkeit.

Um die Ausdauer einzuteilen wurden zahlreiche Strukturierungen vorgenommen:

Je nach Umfang der eingesetzten Muskulatur wird lokale und globale Ausdauer unterschieden (52). Teilt man die Ausdauer in aerob und anaerob ein, bezieht man sich auf die vorrangige Energiegewinnung (52). Weiterhin wird zwischen dynamischer und statischer Ausdauer unterschieden. Nach der Dauer der Beanspruchung teilen Harre et al. (48) die Ausdauer in Kurz-, Mittel- und verschiedene Langzeitbereiche ein. Eine häufig gebrauchte Einteilung in Grundlagen- und spezielle Ausdauer wurde von Saziorski (110) beschrieben.

Diese einzelnen Gruppierungen fassen Zintl und Eisenhut (137) folgendermaßen zusammen: Sie differenzieren in Grundlagenausdauer und spezielle Ausdauer.

Bei der Grundlagenausdauer beschreiben sie drei Formen: Allgemeine, Spezifische und Azyklische Grundlagenausdauer. Die spezielle Ausdauer beschreibt die disziplinspezifische Belastungsstruktur und wird in Kurz-, Mittel- und vier verschiedene Langzeitausdauerbereiche eingeteilt.

2.2.2 Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit

Um die Ausdauerleistungsfähigkeit zu bestimmen existieren im Wesentlichen drei unterschiedliche Möglichkeiten:

Bei diversen sportpraktischen Tests kann die Ausdauerdiagnostik anhand der Herzfrequenzmessung, der Laktatuntersuchung und der Spiroergometrie bestimmt werden.

Ein relativ einfaches und nicht invasives Verfahren stellt die Messung der Herzfrequenz dar. Hierbei wird insbesondere der Nachbelastungspuls beurteilt und hierdurch Rückschlüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit gezogen. Die

Aussagekraft dieser Methode, im Vergleich zu den beiden anderen Methoden jedoch als geringer einzustufen.

Die Bestimmung des Blutlaktatwertes erfolgt ebenfalls bei Belastungstests. Hierbei lässt sich der Übergangsbereich von aerober zu anaerober Stoffwechsellage bestimmen. Anhand der Kombination aus Laktatwerten und der dazugehörigen individuellen Herzfrequenz und z. B. Laufgeschwindigkeit lassen sich gute Rückschlüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit ziehen und individuelle Belastungsvorgaben für das Training berechnen.

Die spiroergometrische Untersuchung stellt das wohl exakteste Verfahren dar. Durch die Bestimmung der Atemgase bei Belastung lassen sich die physiologischen Verhältnisse im Körper genau darstellen, woraus sehr gute Rückschlüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit gezogen werden können. Ebenso kann durch diese Daten in Kombination mit der individuellen Herzfrequenz oder der sportartspezifischen Belastungsintensität eine exakte Trainingsempfehlung ausgesprochen werden (137).

2.2.3 Ausdauertrainingsmethoden

Um ein effektives Ausdauertraining zu absolvieren wird es in gewisse Anforderungsbereiche eingeteilt. Hierbei gilt die Belastungsintensität als der wesentliche Einflussfaktor der Trainingswirkung. Weiterhin sind jedoch auch der Umfang, die Dauer und die Pausengestaltung von Bedeutung. Diese Faktoren werden von den einzelnen Trainingsmethoden berücksichtigt (Zintl, Eisenhut 2009).

Grundsätzlich lassen sich die Ausdauertrainingsmethoden in Grund- und spezielle Methoden unterscheiden. Folgende Trainingsmethoden sind den Grundmethoden zuzurechnen (10):

- Dauermethode
- Intervallmethode
- Intervallmethode/Serienprinzip
- Wiederholungsmethode
- Wettkampfmethode

Aus diesen Grundmethoden können sich zahlreiche spezielle Formen des Ausdauertrainings durch Veränderung von Belastungsdauer und – intensität ableiten.

2.2.3.1 Dauermethode

Im Vordergrund dieser Trainingsmethode steht die dauerhafte, ununterbrochene, trainingswirksame Belastung. Hierbei sind eine extensive und eine intensive Trainingsform zu unterscheiden. Die extensive Form, welche eher im leichteren bis mittleren Belastungsbereich trainiert, zielt auf die Ökonomisierung der Herz-Kreislauf-Arbeit ab und wird häufig im Gesundheitstraining eingesetzt. Das intensive Dauermethodentraining liegt von der Belastungsintensität im mittleren bis submaximalen Bereich. Die Wirkung dieser Trainingsmethode zielt eher auf die Entwicklung des Herzkreislaufsystems und die Erweiterung der aeroben Kapazität hin (137).

2.2.3.2 Intervallmethode

Die Intervallmethode ist gekennzeichnet durch einen Wechsel zwischen Belastungs- und Entlastungsphasen. Während diesen Entlastungsphasen kommt es jedoch nicht zur vollständigen Erholung, sondern es soll als Erholungskriterium eine Herzfrequenz von 120-130 bpm erreicht werden. Grundsätzlich lässt sich die Intervallmethode weiterhin nach Belastungsintensität und nach Belastungsdauer der Intervalle einteilen. Nach Intensität kann extensives und intensives Intervalltraining unterschieden werden. Eine weitere Einteilung ist in Kurzzeit, Mittelzeit- und Langzeitintervallen (134).

2.2.3.2.1 Hochintensive Intervallmethode

Das hochintensive Intervalltraining wird seit Ende der 90er Jahre zunehmend im Ausdauersport eingesetzt, insbesondere in der Phase vor Wettkämpfen um das Trainingsvolumen zu reduzieren. Charakterisiert wird es durch kurze aber sehr intensive Belastungen, gefolgt von kurzen Erholungspausen. Je nach Autor werden Belastungsperioden zwischen etwa 20 sec. und 4 min. beschrieben mit Intensitäten je nach Belastungsdauer zwischen 80% und 170% von VO_2max . Die Pausenlänge zwischen den einzelnen Belastungsintervallen wird mit der halben Dauer bis zur identischen Dauer angegeben (125, 136).

2.3 Fazit zum aktuellen Forschungsstand

Der in den letzten Jahren gestiegene Stellenwert der Herzfrequenzvariabilität in der medizinischen Versorgung und Forschung wird durch den kontinuierlichen Anstieg einschlägiger Publikationen reflektiert. Als mögliches zentrales Anwendungs- und Forschungsgebiet der HRV erweist sich neben der Inneren Medizin, der Neurologie und Anästhesie insbesondere die Sportmedizin.

Durch die detaillierte Beschreibung der einzelnen HRV-Parameter und den Versuch ihrer Standardisierung hat die *Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology* in einer 1996 in *Circulation* erschienenen Veröffentlichung Maßstäbe gesetzt (126).

Die übereinstimmenden Ergebnisse der einschlägigen Literatur konstatieren, dass Ausdauertraining die Herzfrequenzvariabilität verändert und diese die sympathovagale Balance insbesondere am Herzen widerspiegelt. Welcher Parameter die höchste Aussagekraft hat, ist derzeit noch nicht abschließend geklärt, wobei die Ergebnisse der aktuellen Literatur auf die Parameter im Frequenzbereich deuten. Die High Frequency Power scheint hier der trennschärfste Parameter zu sein, da dieser die vagale Aktivität widerspiegelt und wenig durch andere Faktoren beeinflusst wird.

2.4 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Auswirkung von unterschiedlich körperlichem Training auf die Herzfrequenzvariabilität systematisch zu beschreiben und diese in Zusammenschau mit der Literatur physiologisch zu interpretieren. Insbesondere soll untersucht werden, inwiefern ein hoch intensives Intervalltraining bzw. ein moderat intensives Ausdauertraining nach der Dauerperiode systematische Effekte in der Herzfrequenzvariabilität bei Sportlern zeigt. Eine weitere Untersuchung soll bei untrainierten Personen die durch physisches Training verursachten physiologischen Veränderungen anhand der HRV darstellen.

Um diese Ziele besser herausfiltern zu können, wurden einzelne Pretests durchgeführt.

2.4.1 Pretests

Nach den ersten Einzeltests bezüglich der Reliabilität der einzelnen Parameter zeigten sich insbesondere im Frequenzbereich deutliche Schwankungen in Abhängigkeit von der Atemfrequenz. Nach Literaturrecherche und erneuten Einzeltests, bei denen der Einfluss der Atmungsfrequenz auf die einzelnen Parameter der Herzfrequenzvariabilität dargestellt wurde, wurden Möglichkeiten entwickelt, um die Atemfrequenz der Probanden während der HRV-Aufzeichnung zu steuern. Dadurch ergab sich eine deutlich bessere Reproduzierbarkeit.

2.4.2 Studie A: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch hochintensives Intervalltraining, verglichen mit einem niedrig intensiven Dauermethodentraining bei Wettkampfschwimmern

Ein Ziel der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Studie A war es, systematische Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität bei Sportlern darzustellen. Weiterhin sollte untersucht werden, ob sich im Rahmen der unten genauer dokumentierten Studie zwei unterschiedliche Trainingsprogramme auch verschieden auf den vegetativen Tonus auswirken. Insbesondere stellte sich hierbei die Frage, ob das hochintensive Training bei den Probanden eine vermehrte oder eine verringerte parasympathische Aktivität zur Folge hat, verglichen mit einem niedrig intensiven Dauermethodentraining. Dabei wurde die folgende Arbeitshypothese 1 zugrunde gelegt:

Hypothese 1:

Hochintensives Intervalltraining führt zu einer Verschiebung der Innervation zu Gunsten des Sympathikus.

2.4.3 Studie B: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch Langzeit-Ausdauer-Training bei zuvor Untrainierten

Ein Ziel der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Studie B war es, systematische Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität bei zuvor Untrainierten durch ein 12-wöchiges Training aufzuzeigen. Es sollte untersucht werden, ob sich ein solches Training auf den vegetativen Tonus auswirkt. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob unterschiedliche isokalorische Ausdauertrainingsprogramme diesbezüglich

unterschiedliche Effekte zeigen. Es wurden die folgenden Arbeitshypothesen 2 und 3 zugrunde gelegt:

Hypothese 2:

Ein 12-wöchiges Ausdauertraining führt zu einer Verschiebung der kardialen Innervation zu Gunsten des Parasympathikus.

Hypothese 3:

Isokalorische Trainingsprogramme mit gleichem Trainingsumfang, gleicher Intensität und unterschiedlichem Timing der Trainingseinheiten zeigen unterschiedliche Effekte auf den kardialen vegetativen Tonus

3 Untersuchungsmethodik

3.1 Allgemeines Studiendesign

Nach umfangreichen Pretests zur Standardisierung der HRV-Untersuchungsbedingungen und Datenaufzeichnung wurde diese Arbeit, bestehend aus zwei eigenständigen Längsschnittstudien, durchgeführt (siehe 3.3 Studie A: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch hochintensives Intervalltraining, verglichen mit einem niedrig intensiven Dauermethodentraining bei Wettkampfschwimmern und 3.4 Studie B: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch Langzeit-Ausdauer-Training bei zuvor Untrainierten). Diese beiden Untersuchungen wurden primär unter anderen Fragestellungen konzipiert (9, 113) und die Analyse der HRV angegliedert.

Es erfolgte die Zustimmung der Ethikkommission. Weiterhin wurden die Probanden über den Ablauf der Studien aufgeklärt, ehe eine schriftliche Einwilligung erfolgte.

3.2 Allgemeine Methodik

Datenaufzeichnung:

Die Aufzeichnung der Herzfrequenz bzw. der RR-Intervalle erfolgte bei allen drei Studien mit dem Herzfrequenz-Messgerät *S810* der Firma *Polar* (Kempele; Finnland). Dieses besteht aus zwei Teilen, dem Sender (*Polar T61*), welcher mit einem elastischen Gurt verbunden ist und als Brustgurt getragen werden kann, sowie der Empfänger-Uhr, welche die EKG-Daten aufzeichnet und speichert.



Abbildung 6: Herzfrequenzmessgerät *S810* der Firma *Polar* (Kempele; Finnland)

Rhythmisierung der Atmung:

Bei Studie B erfolgte während der Aufzeichnung der Herzfrequenzdaten eine Vorgabe für den Atemrhythmus, analog einem Metronom. Diese Vorgabe erhielt jeder Proband über eine eigens entworfene CD, auf welcher sich ein Rhythmus in Form von Tönen unterschiedlicher Höhen befand. Diese CD wurde den Probanden über einen portablen CD-Spieler der Firma *Grundig* (Nürnberg; Deutschland) mit entsprechenden Kopfhörern vorgespielt.



Abbildung 7: Portabler CD-Spieler der Firma *Grundig* (Nürnberg; Deutschland)

Lärmschutz:

Um die Einflussfaktoren zu reduzieren und auf den physikalischen Lärmeinfluss einzuwirken, trugen die Probanden einen Gehörschutz während der Datenaufzeichnung.



Abbildung 8: Kapsel-Gehörschutz der Firma *Kee Safety GmbH* (Hanau; Deutschland), Schalldämmung: 27 dBA

3.3 Studie A: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch hochintensives Intervalltraining, verglichen mit einem niedrig intensiven Dauermethodentraining bei Wettkampfschwimmern

Studie A umfasste Schwimmtests, klinische Untersuchungen und die Ermittlung der Herzfrequenzvariabilität. Die Datenerhebung erfolgte am *Institut für Sport- und Präventivmedizin* der *Universität des Saarlandes* und dem angrenzenden Olympiastützpunkt der *Hermann Neuberger-Sportschule*. Die Studie war als Längsschnittstudie konzipiert und über einen Zeitraum von fünf Wochen angelegt. Das Konzept wurde unter einer anderen Fragestellung entworfen (113). Die Studie fiel in die Wettkampfphase der Nachwuchsschwimmer. Beiden beteiligten Trainern war das Studiendesign bekannt, so dass dieses bei der Erstellung der Trainingspläne berücksichtigt werden konnte.

3.3.1 Allgemeiner Studienablauf

Zu Beginn der Studie erfolgte eine medizinische Untersuchung der Probanden, die die Ausgangsdaten lieferte bzw. die Vergleichsbasis für die anschließende Interventionsphase darstellte. Es folgten drei Wochen mit intensivem Training, wonach in der letzten Woche regenerativ trainiert wurde. Die Erhebung der Herzfrequenzvariabilität wurde entsprechend zu vier Messzeitpunkten: in der ersten Woche (Ausgangs- / Vergleichsdaten), nach der ersten und der dritten Trainingswoche sowie nach der einwöchigen Regenerationszeit durchgeführt.

3.3.2 Rekrutierung der Probanden

Nach Studiengenehmigung durch die Ethik-Kommission wurde die Rekrutierung der Wettkampfschwimmer über die Landestrainer durchgeführt, welche ihren Jugendkader in die Studie einbanden. Als Einschlusskriterium galt die Zugehörigkeit zu dem Landesschwimmkader. Weiterhin war die ärztliche Unbedenklichkeit nach einer medizinischen Untersuchung Voraussetzung. Es nahmen 21 Wettkampfschwimmer im Alter zwischen 13 und 18 Jahren teil. Diese und deren Erziehungsberechtigte wurden ausführlich über das Studiendesign informiert und unterzeichneten eine schriftliche Einwilligungserklärung vor Einschluss in die Studie.

3.3.3 Probanden

Das Probandengut setzte sich aus acht weiblichen und 13 männlichen Wettkampfschwimmern zusammen. Ihre aktuelle Leistungsfähigkeit ist in Tabelle 4 als $VO_2\text{max}$ dargestellt. Diese maximale Sauerstoffaufnahme wurde bei den Athleten in sportartspezifischen Schwimmbanktests ermittelt. Teilweise hielten sie die deutschen Rekorde ihrer Altersklasse. Die Studienteilnehmer wurden zu gleichen Teilen einer Dauermethoden-Gruppe und einer HIT-Gruppe (Hoch intensives Intervalltraining) zugeteilt. Die körperlichen Daten sind in Tabelle 4 aufgezeigt.

Gruppe	Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	$VO_2\text{max}$ [ml/kg/min]	Geschlecht [w/m]
DM (n=10)	16,0 ± 1,5	174,8 ± 11,4	64,4 ± 9,9	55,4 ± 7,6	4 / 6
HIT (n=11)	15,7 ± 1,9	175,1 ± 6,9	65,4 ± 9,1	56,8 ± 5,7	4 / 7

Tabelle 4: Anthropometrische Daten für Schwimmer der HIT- und der Dauermethoden-Gruppe

DM=Dauermethode; HIT=hoch intensives Intervalltraining; Mittelwerte ± Standardabweichung.

3.3.4 Untersuchungsgruppen

Die Aufteilung in die zwei Untersuchungsgruppen wurde wie folgt vorgenommen: Zuerst wurden jeweils zwei Schwimmer nach Geschlecht und ihren zuletzt bestimmten Leistungen ($VO_2\text{max}$) zu Paaren geordnet und dann zufällig auf die zwei Trainingsgruppen (HIT-Gruppe, Dauermethoden-Gruppe) verteilt, die jeweils verschiedene Trainingsprogramme absolvierten. Der Ablauf der beiden Trainingsprogramme wird im Folgenden (vgl. 3.3.5 Trainingsprogramme) erläutert.

3.3.5 Trainingsprogramme

Die Anzahl der Trainingstage der HIT-Gruppe und der Dauermethoden-Gruppe waren identisch. Beide Trainingsprogramme waren auf sechs Tage pro Woche mit täglich jeweils zwei Stunden angelegt. An zwei der sechs wöchentlichen Trainingstage absolvierten alle Studienteilnehmer ein einstündiges intensives Konditionstraining an Land. Hierbei wurde für alle Muskelgruppen die Maximalkraft und die Kraftausdauer trainiert.

Die HIT-Gruppe absolvierte an jedem der verbleibenden vier Trainingstage jeweils eine Gesamtstrecke von 3.100 m, wobei auf eine Aufwärmphase ein Intervalltraining mit sehr hoher Belastung (Herzfrequenzbereich 170 bis 190/min) erfolgte; abschließend folgte eine Ausschwimmstrecke, vgl. Abbildung 9.



Abbildung 9: Trainingsprogramm der HIT-Gruppe

Ein Trainingstag der Dauermethoden-Gruppe sah ähnlich aus. Das Training begann ebenfalls mit einer Aufwärmphase. Hiernach wurde jedoch statt des Intervalltrainings ein Ausdauertraining nach der Dauer Methode mit einer Gesamtstrecke von 3.500 bis 4.000 m absolviert. Am Ende wurde auch hier ausgeschwommen, vgl. Abbildung 10.



Abbildung 10: Trainingsprogramm der Dauermethoden-Gruppe

Der Unterschied zwischen den beiden Trainingsgruppen liegt also insbesondere in der Trainingsintensität.

Freitags fand für beide Gruppen ein Regenerationstraining (Abbildung 11) statt, das aus Aufwärmen (1000 m), ausdauerndem Schwimmen in einem Umfang von 2 bis 2,5 km und abschließendem Ausschwimmen von 800 m bestand. Während des gesamten Regenerationstrainingstages sollten die Herzfrequenzen unterhalb von 150 bpm liegen. Der Sonntag war für beide Trainingsgruppen trainingsfrei.



Abbildung 11: Regenerationstraining beider Gruppen

3.3.6 Ablauf der Herzfrequenzmessung

Die Aufzeichnung der Herzfrequenz erfolgte im *Institut für Sport- und Präventivmedizin* zu den einzelnen Untersuchungszeitpunkten vor dem anschließend folgenden Schwimmtest. Die Datenerhebung fand zwischen acht und zehn Uhr morgens statt und wurde standardisiert durchgeführt. Die Probanden wurden zuvor in den Ablauf eingewiesen. Nach Anlegen des Brustgurtes und der Uhr zur Datenaufzeichnung erfolgte die ca. 20-minütige Aufzeichnung, wobei die Studienteilnehmer zuerst 7,5 Minuten lagen, dann 5 Minuten standen und am Ende erneut die Herzfrequenz 7,5 Minuten lang in liegender Position aufgenommen wurde. Anschließend wurden die Umwandlung der Daten in ein *.txt-Format* durchgeführt, in welchem sie dann ausgewertet werden konnten.

3.3.7 Analyse der HRV-Daten

Nach visueller Überprüfung der Daten wurden hier die einzelnen Abschnitte festgelegt. Diese drei Abschnitte entsprachen dann den unterschiedlichen Positionen (liegend, stehend). Anschließend erfolgte die mathematische Auswertung in einem von Prof. Peter Siegel entwickelten Programm. Sämtliche Parameter wurden zweifach in liegender Position und einfach in stehender Position berechnet, wobei lediglich die im liegen gewonnenen Ergebnisse weiter statistisch untersucht wurden.

3.4 Studie B: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch Langzeit-Ausdauer-Training bei zuvor Untrainierten

Die kontrollierte Längsschnittstudie wurde im Zeitraum Mai 2002 bis Januar 2004 am *Institut für Sport- und Präventivmedizin der Universität des Saarlandes* durchgeführt. Sie wurde unter der Fragestellung einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit und der Veränderung von Risikofaktoren und Gesundheitsindikatoren konzipiert (9). Aus diesem Grund wurden hier, im Gegensatz zur Studie A, untrainierte Normalpersonen untersucht.

3.4.1 Allgemeiner Studienablauf

Studie B wurde als kontrollierte randomisierte Längsschnittstudie mit unabhängigen Stichproben durchgeführt. Neben der Ermittlung der Ausdauerleistungsfähigkeit und Veränderung von Gesundheits- und Risikofaktoren war das Ziel, die Veränderungen der Herzfrequenzvariabilitätsparameter nach einem 12-wöchigen Ausdauertrainingsprogramm zu überprüfen. Weiterhin sollten drei isokalorische Trainingsprogramme, welche sich in Umfang, Intensität und Trainingsfrequenz unterschieden, in Hinblick auf deren Auswirkungen auf die HRV-Parameter und damit auf deren differente autonome Anpassungen untersucht werden. Diese Trainingsstudie bestand aus einem Eingangstest, einer 12-wöchigen Trainingsphase und einem Abschlusstest; Abbildung 12 zeigt eine schematische Darstellung dieses für alle Programme geltenden Studiendesigns.

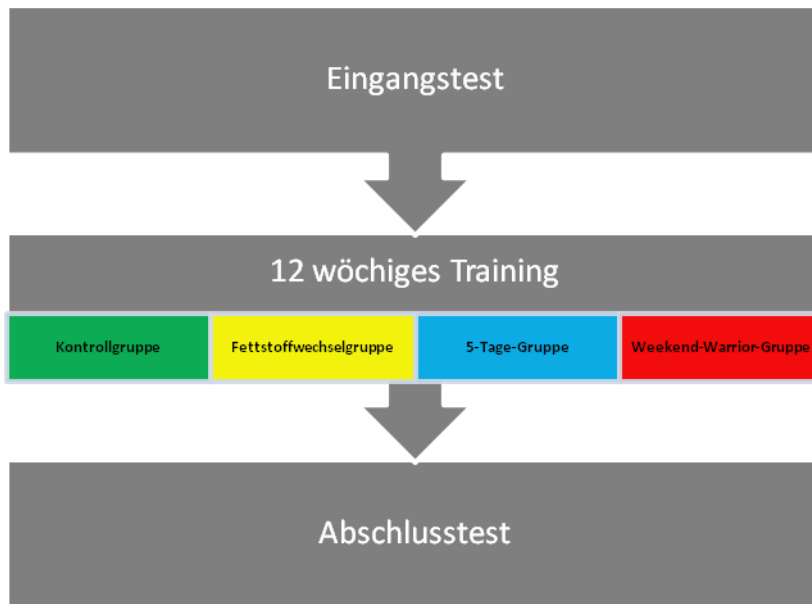


Abbildung 12: Allgemeines Studiendesign der Studie B

Jeder Proband wurde zunächst in einem umfangreichen Eingangstest untersucht (vgl. 3.4.6 Ablauf der Eingangs- und Abschlusstests), auf dessen Basis die stratifizierte randomisierte Zuteilung in eine der vier Trainings-Gruppen erfolgte. Hierbei dienten V_{O2max} in Relation zum Körpergewicht ($[ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}]$) und das Geschlecht als gestufte Kriterien. Dieses Vorgehen sollte die Homogenität der Gruppen hinsichtlich Ausdauerleistungsfähigkeit und anthropometrischer Daten gewährleisten. Im Anschluss an die Gruppenzuteilung wurde ein individueller Trainingsplan erstellt, wonach die Probanden ihr 12-wöchiges Training absolvierten. Nach Ablauf der Trainingszeit erfolgte ein Abschlusstest, welcher bezüglich Untersuchungsfolge und Zeitstruktur mit dem Eingangstest identisch war (9).

3.4.2 Rekrutierung der Probanden

Zur Gewinnung der Probanden dienten Aushänge an der *Universität des Saarlandes* sowie Inserate in den lokalen Zeitungen. Der erste Kontakt erfolgte meist telefonisch. Hierbei wurden das Studiendesign vorgestellt und die potentiellen Probanden befragt, insbesondere bezüglich der Einschlussfaktoren und Ausschlusskriterien. Die Ein- und Ausschlusskriterien wurden wie folgt definiert:

- Lebensalter zwischen 30 und 60 Jahren
- Untrainierter Status, welcher wie folgt definiert wurde: weniger als 30 min. ausdauerorientiertes Training pro Woche im letzten halben Jahr, andere sportliche Aktivitäten durften bis max. eine Std. pro Woche ausgeübt werden.
- Keine ausgeprägten kardiovaskulären Risikofaktoren, wie art. Hypertonus (maximal milde Hypertonie (<160/100 mmHg) wurde erlaubt), Diabetes mellitus und Hypercholesterinämie (>300 mg/dl).
- Keine gesundheitlichen Einschränkungen, die eine Kontraindikation zur Durchführung der Tests und des Trainingsprogrammes darstellen (65).

3.4.3 Probanden

An der Studie nahmen 64 Personen teil, von denen 13 ihre Teilnahme auf Grund unterschiedlicher Ursachen (orthopädische Beschwerden, private Gründe, fehlende Compliance, längere Erkrankung während der Studienteilnahme etc.) vorzeitig abbrechen. Bei drei der verbleibenden 51 Studienteilnehmer waren die HRV-Aufzeichnungen unzureichend bzw. nicht vorhanden. Letztendlich konnten in der vorliegenden Studie die Daten von 48 Probanden ausgewertet werden. Das Lebensalter lag zwischen 30 und 60 Jahren und die Geschlechtsverteilung mit 25 zu 23 leicht auf der Seite der weiblichen Teilnehmer.

Die anthropometrischen Daten der einzelnen Gruppen sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Ausgeglichenheit der Daten resultiert aus der stratifizierten randomisierten Zulosung der Probanden.

Gruppe	Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	Geschlecht [w/m]
Kontrollgruppe (n=12)	45,8 ± 6,8	170,1 ± 7,6	76,3 ± 17,0	6 / 6
Fettstoffwechselgruppe (n=12)	43,3 ± 6,8	173,7 ± 11,8	82,9 ± 20,9	7 / 5
5-Tage-Gruppe (n=13)	43,7 ± 7,7	172,1 ± 7,5	83,9 ± 18,8	6 / 7
Weekend-Warrior-Gruppe (n=11)	44,7 ± 9,1	172,5 ± 10,8	76,3 ± 18,0	6 / 5

Tabelle 5: Anthropometrische Daten der Probanden, aufgeteilt in die vier Gruppen

3.4.4 Untersuchungsgruppen

Nach absolviertem Eingangstest und dessen Auswertung erfolgte die stratifizierte randomisierte Zuweisung der Probanden zu den vier Untersuchungsgruppen:

- Kontrollgruppe
- Fettstoffwechsel-Gruppe
- 5-Tage-Gruppe
- Weekend-Warrior-Gruppe

Die jeweils verschiedenen Trainingsprogramme dieser vier Gruppen werden im Folgenden spezifiziert (vgl. 3.4.5 Trainingsprogramme).

3.4.5 Trainingsprogramme

Gruppen	Kontrollgruppe	Fettstoffwechsel-Gruppe	5-Tage-Gruppe	Weekend-Warrior-Gruppe
Trainingsumfang		2,5 Std. / Woche + x (siehe 2.4.5)	2,5 Std. / Woche	2,5 Std. / Woche
Trainingsfrequenz		5 Tage / Woche	5 Tage / Woche	2 aufeinanderfolgende Tage / Woche
Dauer der Trainingseinheit		30 min.	30 min.	75 min.
Trainingsintensität	unveränderte Lebensführung, kein ausdauerwirksames Training	HF 90% der 1,5 mmol Laktat-Schwelle - 15 Herzschläge	HF 90% der 1,5 mmol Laktat-Schwelle	HF 90% der 1,5 mmol Laktat-Schwelle

Abbildung 13: Trainingsprogramme der einzelnen Gruppen der Studie B

Die Trainingsprogramme der einzelnen Gruppen sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Ähnlichkeit der Trainingsprogramme der einzelnen Gruppen ist durch die Subtilität der Fragestellung der primären Untersuchungsintention begründet. Bei

unterschiedlicher Trainingsgestaltung jedoch gleichem Energieverbrauch wurde nach der Trainingsauswirkung in Form von Veränderungen der Ausdauerleistungsfähigkeit, gesundheitlichen Risikofaktoren und Gesundheitsindikatoren gesucht.

Alle drei Programme waren isokalorisch. Dies wurde über eine indirekte Kalorimetrie aus den Laufbandtests bei der Eingangsuntersuchung kalkuliert. Die Trainingsintensität war bei der Fettstoffwechsel-Gruppe etwas geringer im Vergleich zur 5-Tages-Gruppe und zur Weekend-Warrior-Gruppe, dafür wurde der Trainingsumfang so weit erhöht, dass ein identischer Kalorienverbrauch erreicht wurde. Der Unterschied zwischen der Weekend-Warrior-Gruppe und der 5-Tages-Gruppe bestand lediglich in der Trainingsfrequenz, wobei die 5-Tages-Gruppe ihren Wochenumfang auf fünf Tage verteilte und die Weekend-Warrior-Gruppe denselben Umfang an zwei aufeinanderfolgenden Tagen absolvierte.

3.4.6 Ablauf der Eingangs- und Abschlusstests

Alle Untersuchungen begannen am Vormittag in der Zeit zwischen 8.00 Uhr und 9.30 Uhr. Die Probanden erschienen nüchtern. Es wurde bei dem Abschlusstest bei jedem Probanden sorgfältig darauf geachtet, dass die Untersuchungsabfolge und zeitliche Struktur der Untersuchung identisch mit dem Eingangstest waren. Hierdurch sollten tageszeitliche Schwankungen vermieden werden. Im Verlauf des Eingangstests wurden die Probanden detailliert mit dem Ablauf und den möglichen Risiken der Untersuchung vertraut gemacht und erklärten schriftlich ihr Einverständnis zur Teilnahme einschließlich der erforderlichen Blutentnahmen. Ferner erfolgte eine erneute Instruktion bzgl. der Lebensführung während des Untersuchungszeitraumes und des Verhaltens an bzw. vor den Testtagen. Folgende Untersuchungsverfahren wurden im Rahmen der Eingangs- und Abschlussuntersuchung in der dargestellten Reihenfolge durchgeführt:

- Fragebogen zum körperlichen und psychischen Wohlbefinden.
Bearbeitungszeit: ca. 15 min
- Messung der Herzfrequenzvariabilität (Dauer: 30 min)
- Venöse Blutentnahme
- Ärztliche Untersuchung inkl. Körperfettmessung: ca. 30 min
- Erfassung der anthropometrischen Daten mit Körperfettmessung und Ruhe-EKG/Ruheblutdruck im Liegen: ca. 20 min
- Belastungsuntersuchung auf dem Laufband mit simultaner Spiroergometrie:
45-80 min

3.4.6.1 Ablauf der Herzfrequenzmessung

Die Datenaufzeichnung der Herzfrequenz erfolgte im Rahmen des Eingangs- bzw. Abschlusstests (siehe oben). Nach einer kurzen Einweisung in die Untersuchungsform und die einzelnen Atemfrequenzen wurden den Probanden der Brustgurt und die Uhr angelegt. Die CD im portablen CD-Spieler wurde nach Aufsetzen des Gehörschutzes gestartet und nun wurde die Datenaufzeichnung nach folgendem Ablaufschema durchgeführt:

- 300 Sekunden in liegender Position bei freier Atmung
- 95 Sekunden in liegender Position bei einer Atemfrequenz von 5 bpm
- 480 Sekunden in liegender Position bei einer Atemfrequenz von 12 bpm
- Aufstehen
- 240 Sekunden in stehender Position bei freier Atmung
- 95 Sekunden in stehender Position bei einer Atemfrequenz von 5 bpm
- 360 Sekunden in stehender Position bei einer Atemfrequenz von 12 bpm
- Hinlegen
- 180 Sekunden in erneut liegender Position bei freier Atmung

Abschließend wurden die Daten zur Vorbereitung der Analyse in ein *.txt*-Format umgewandelt.

3.4.7 Analyse der HRV-Daten

Die nun vorhandenen .txt-Dateien wurden zuerst visuell überprüft und dann wurden in diesen Dateien einzelne Abschnitte festgelegt. Diese Abschnitte entsprachen den unterschiedlichen Positionen (liegend, stehend) und den einzelnen Atemfrequenzen. Dies erfolgte stets durch dieselbe Person. In einem von Prof. Peter Siegel entwickelten Programm wurde dann die mathematische Auswertung der Daten durchgeführt.

RR_{MW} und RR_{SD} wurden aus den Daten in liegender Position bei freier Atmung berechnet. Die Berechnung der Frequenzbereichsparameter erfolgte aus den Daten der 480 Sekunden in liegender Position bei einer Atemfrequenz von 12 bpm.

3.5 Statistik

Die in dieser Arbeit durchgeführten statistischen Berechnungen erfolgten computergestützt mit Hilfe des Statistikprogrammes *Statistica 6.1* (StatSoft, Inc. Tulsa, OK 740104, USA).

Varianzanalyse:

Um eine Varianzanalyse durchführen zu können, müssen spezifische Voraussetzungen erfüllt sein; bei der Varianzanalyse sind Normalverteilung und Varianzhomogenität Grundvoraussetzungen. Die Überprüfung auf Normalverteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt. Die Varianzhomogenitätsüberprüfung erfolgte durch den Levene-Test. Nach Überprüfung dieser Voraussetzungen erfolgte die Berechnung der zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA). Hierbei stellt die zeitliche Veränderung den einen Faktor und die jeweils unterschiedlichen Trainingsprogramme den anderen Faktor dar. Bei der Schwimmerstudie wurden beim Faktor Zeit vier Faktorstufen ausgewertet und auf Wechselwirkungen zu den zwei Faktorstufen des Trainingsprogrammes überprüft. Bei der Ausdauertrainingsstudie wurden der Eingangs- und der Abschlusstest als zwei Faktorstufen den vier Trainingsprogrammen (vier Faktorstufen) gegenübergestellt. Abschließend wurde, wenn angebracht, als Post-hoc-Test der Scheffé-Test durchgeführt.

Das Signifikanzniveau wird wie folgt definiert und notiert:

- α -Fehler = 0,1; Tendenz
- α -Fehler = 0,05; Unterschied ist signifikant
- α -Fehler = 0,01; Unterschied ist hoch signifikant
- α -Fehler = 0,001; Unterschied ist höchst signifikant

4 Ergebnisse

4.1 Studie A: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch hochintensives Intervalltraining, verglichen mit einem niedrig intensiven Dauermethodentraining bei Wettkampfschwimmern

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion für alle HRV-Parameter der Studie A.

HRV-Parameter	Effekte					
	Gruppe		Zeit		Interaktion Gruppe x Zeit	
	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert
RR_{MW}	0,78	0,40	9,34	< 0,001	3,70	0,02
RR_{SD}	0,34	0,57	5,86	0,001	9,89	< 0,001
LFP	0,48	0,50	4,74	0,005	3,45	0,02
HFP	1,44	0,24	4,08	0,011	2,85	0,045
LFP / HFP	0,31	0,58	1,18	0,32	2,42	0,08
TFP	0,02	0,88	5,02	0,004	3,21	0,03

Tabelle 6: Ergebnisse der Varianzanalyse der HRV-Parameter. Vergleich Dauermethoden-Gruppe vs. HIT-Gruppe. Jeweils für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion mit F- und p-Wert

RR_{MW}=Mittelwert der RR-Intervall-Dauer; RR_{SD}=Standardabweichung der RR-Intervalldauer; LFP=Low Frequency Power; HFP=High Frequency Power; LFP / HFP=Low Frequency Power / High Frequency Power; TFP=Total Frequency Power; signifikante Ergebnisse sind fett hinterlegt.

4.1.1 Zeitbereich

4.1.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer

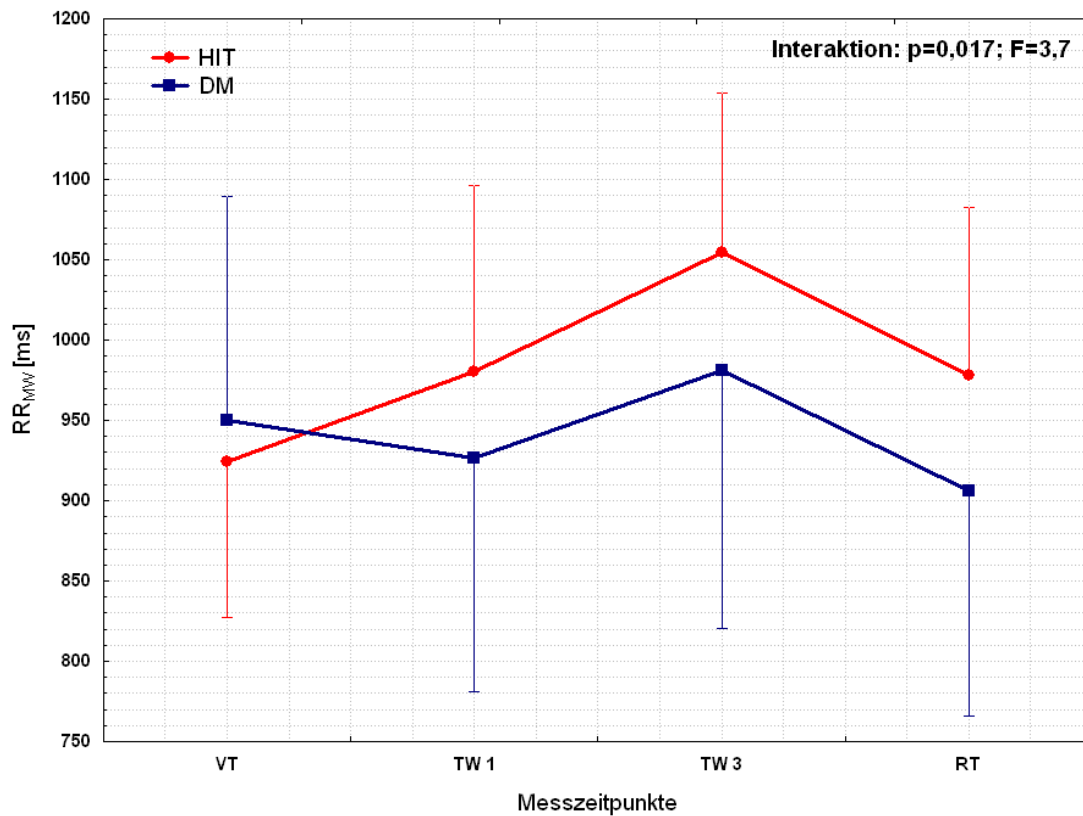


Abbildung 14: RR_{MW} zu den einzelnen Messzeitpunkten

RR_{MW} =Mittelwert der RR-Intervalldauer; DM=Dauermethoden-Gruppe; HIT=HIT-Gruppe; VT=Vortest; TW 1=nach der ersten Trainingswoche; TW 3=nach der dritten Trainingswoche; RT=Regenerationstraining; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Der Vergleich der RR_{MW} -Werte ist in Abbildung 14 dargestellt. Bei der Analyse zeigt sich ein höchst signifikanter Effekt des Faktors Zeit ($F=9,34$; $p<0,001$) und eine signifikante Interaktion der Faktoren Gruppe x Zeit ($F=3,70$; $p=0,02$).

4.1.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer

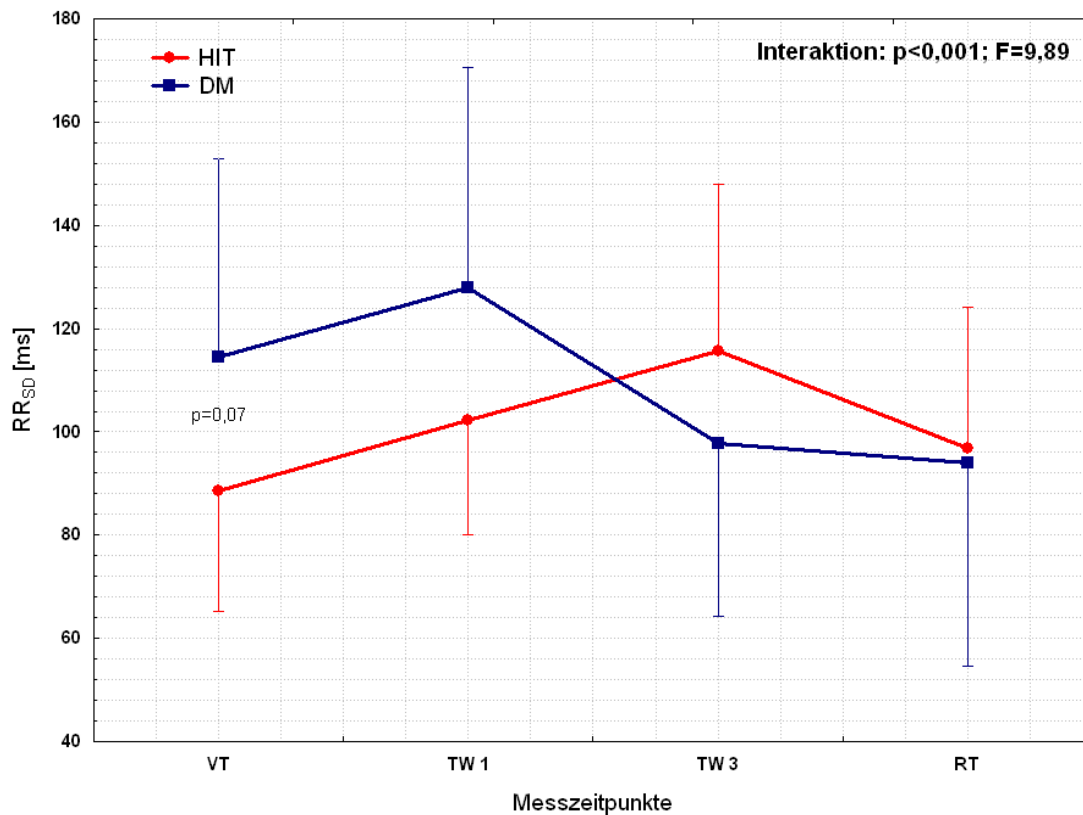


Abbildung 15: Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer zu den einzelnen Messzeitpunkten

RR_{SD}=Standardabweichung der RR-Intervalldauer; DM=Dauermethoden-Gruppe; HIT=HIT-Gruppe; VT=Vortest; TW 1=nach der ersten Trainingswoche; TW 3=nach der dritten Trainingswoche; RT=Regenerationstraining; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Abbildung 15 zeigt die Standardabweichung der RR-Intervalldauer. Zum Zeitpunkt des Vortests (VT) zeigen sich tendenziell höhere Werte der Dauermethoden-Gruppe ($p = 0,07$). Der Effekt der Interaktion Gruppe \times Zeit ist höchst signifikant unterschiedlich ($F = 9,89$; $p < 0,001$). Bei der Auswertung des Faktors Zeit zeigt sich ebenfalls ein messbarer Effekt ($F = 5,86$; $p = 0,002$).

4.1.2 Frequenzbereich

4.1.2.1 Low Frequency Power (LFP)

Die Auswertung der Low Frequency Power zeigt relativ große Standardabweichungen. Bei der statistischen Analyse lässt sich dennoch ein signifikanter Effekt für die Interaktion Gruppe x Zeit nachweisen ($F=3,45$; $p=0,02$). Einen noch deutlicheren Effekt zeigt der Faktor Zeit ($F=4,74$; $p=0,005$). Tabelle 9Tabelle 6 zeigt die einzelnen Werte mit Standardabweichung.

4.1.2.2 High Frequency Power (HFP)

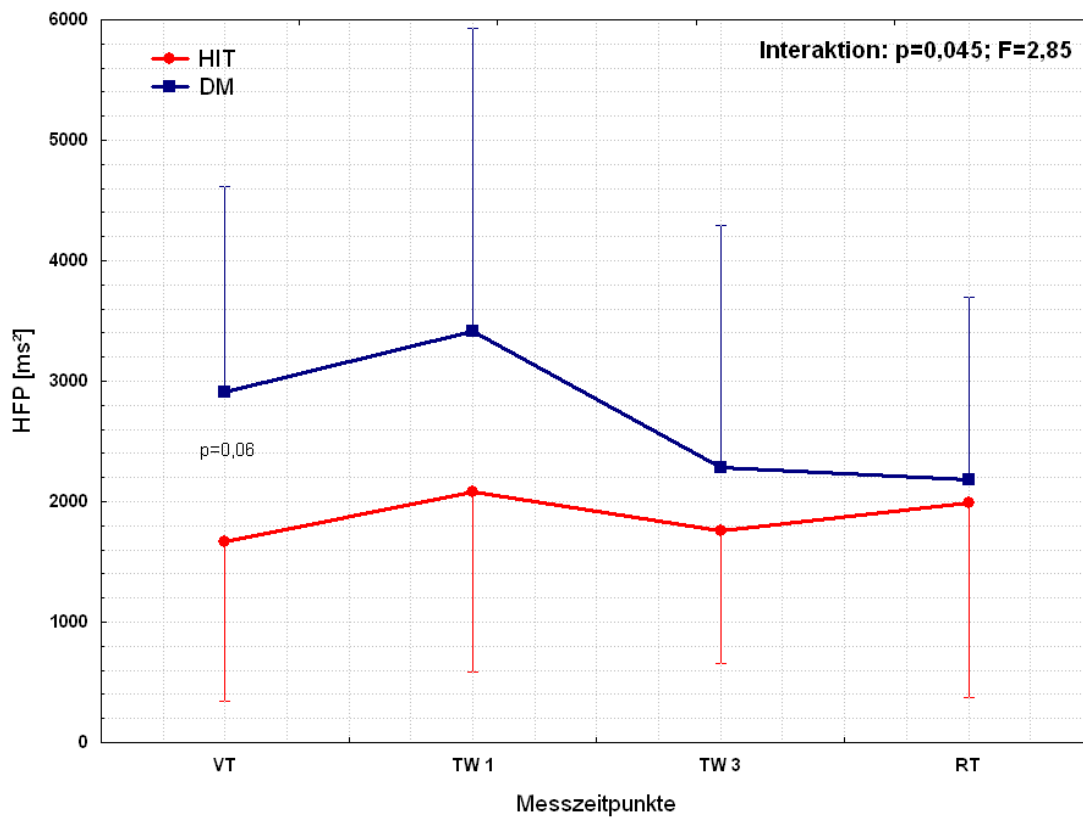


Abbildung 16: High Frequency Power zu den einzelnen Messzeitpunkten

DM=Dauermethoden-Gruppe; HIT=HIT-Gruppe; VT=Vortest; TW 1=nach der ersten Trainingswoche; TW 3=nach der dritten Trainingswoche; RT=Regenerationstraining; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Abbildung 16 zeigt die Verläufe der High Frequency Power in beiden Trainingsgruppen. Die Veränderungen beider Gruppen sind ähnlich, wobei die Dauermethoden-Gruppe mit tendenziell höheren Werten zum Zeitpunkt VT startet ($p=0,06$). Die statistische Auswertung ergibt für den Zeit-Effekt $F=4,08$ und $p=0,011$. Ebenfalls signifikant ist die Interaktion Gruppe x Zeit ($F=2,85$; $p=0,045$).

4.1.2.3 LFP / HFP-Quotient

Die Mittelwerte des LFP/HFP-Quotienten sind in Tabelle 9Tabelle 6 im Anhang dargestellt. Hierbei zeigt sich eine relativ große Streuung der Werte, welche die hohen Standardabweichungen widerspiegeln. Statistisch messbare Effekte konnten nicht berechnet werden.

4.1.2.4 Total Frequency Power (TFP)

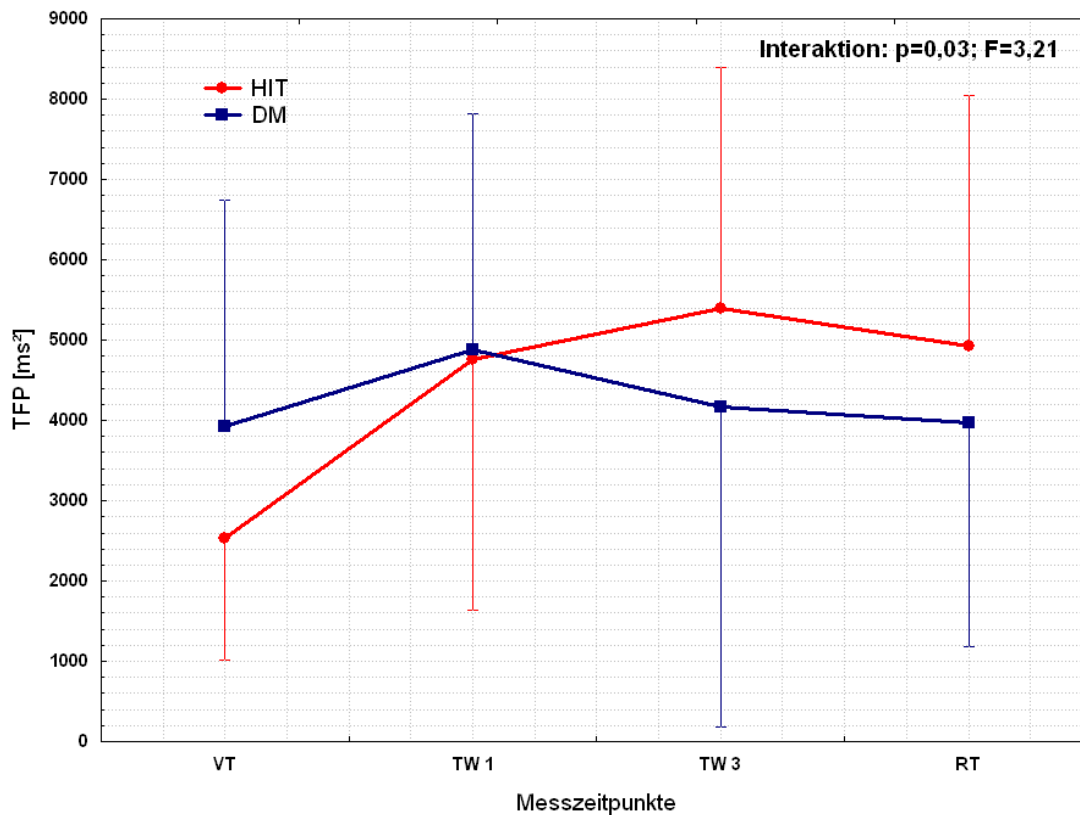


Abbildung 17: Total Frequency Power zu den einzelnen Messzeitpunkten

DM=Dauermethoden-Gruppe; HIT=HIT-Gruppe; VT=Vortest; TW 1=nach der ersten Trainingswoche; TW 3=nach der dritten Trainingswoche; RT=Regenerationstraining; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Abbildung 17 stellt den Verlauf der Total Frequency Power dar. Bei der statistischen Auswertung ergibt sich ein hoch signifikanter Effekt des Faktors Zeit ($F=5,02$; $p=0,004$). Die Interaktion der zwei Faktoren Gruppe x Zeit ist ebenfalls signifikant ($F=3,21$; $p=0,03$).

Bei sehr hoher Standardabweichung bei allen Werten zeigt die Dauermethoden-Gruppe im Verlauf der Studie eine Zunahme, wobei die Werte nach dem Regenerationstraining (RT) wieder das Ausgangsniveau (VT) erreicht haben ($p=1$). Anders stellt es sich bei der hoch intensiv trainierenden Gruppe (HIT-Gruppe) dar. Bei einem Durchschnittswert von 2527 ms^2 ($\pm 1508 \text{ ms}^2$) zum Zeitpunkt des Vortests (VT) steigen die TFP-Werte auf das Maximum ($5388 \pm 3000 \text{ ms}^2$) am Messpunkt TW 3 ($p=0,015$).

4.2 Studie B: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch Langzeit-Ausdauer-Training bei zuvor Untrainierten

4.2.1 Studie B – Vergleich Trainingsgruppen und Kontrollgruppe

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion für alle HRV-Parameter der Studie B beim Vergleich der Trainingsgruppen mit der Kontrollgruppe.

HRV-Parameter	Effekte					
	Gruppe		Zeit		Interaktion Gruppe x Zeit	
	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert
RR_{MW}	0,04	0,84	9,73	0,003	2,37	0,13
RR_{SD}	1,72	0,20	0,50	0,48	5,69	0,02
LFP	1,53	0,22	8,45	0,006	6,21	0,02
HFP	0,33	0,57	13,12	0,001	4,81	0,03
LFP / HFP	0,06	0,80	0,23	0,63	0,34	0,56
TFP	0,00	0,96	4,01	0,051	8,74	0,005

Tabelle 7: Ergebnisse der Varianzanalyse der HRV-Parameter. Vergleich Trainingsgruppen vs. Kontrollgruppe. Jeweils für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion mit F- und p-Wert

RR_{MW}=Mittelwert der RR-Intervall-Dauer; RR_{SD}=Standardabweichung der RR-Intervalldauer; LFP=Low Frequency Power; HFP=High Frequency Power; LFP / HFP=Low Frequency Power / High Frequency Power; TFP=Total Frequency Power; signifikante Ergebnisse sind fett hinterlegt.

4.2.1.1 Zeitbereich

4.2.1.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer

Die Mittelwerte der RR_{MW} steigen in den Trainingsgruppen vom Eingangs- zum Abschlusstest von 907 ± 138 ms auf 982 ± 167 ms an, was einer höchst signifikanten Zunahme entspricht ($p < 0,001$). Somit zeigt sich ein hoch signifikanter Effekt für den Faktor Zeit ($F = 9,73$; $p = 0,003$). Die Interaktion ist nicht signifikant ($F = 2,37$; $p = 0,13$).

4.2.1.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer

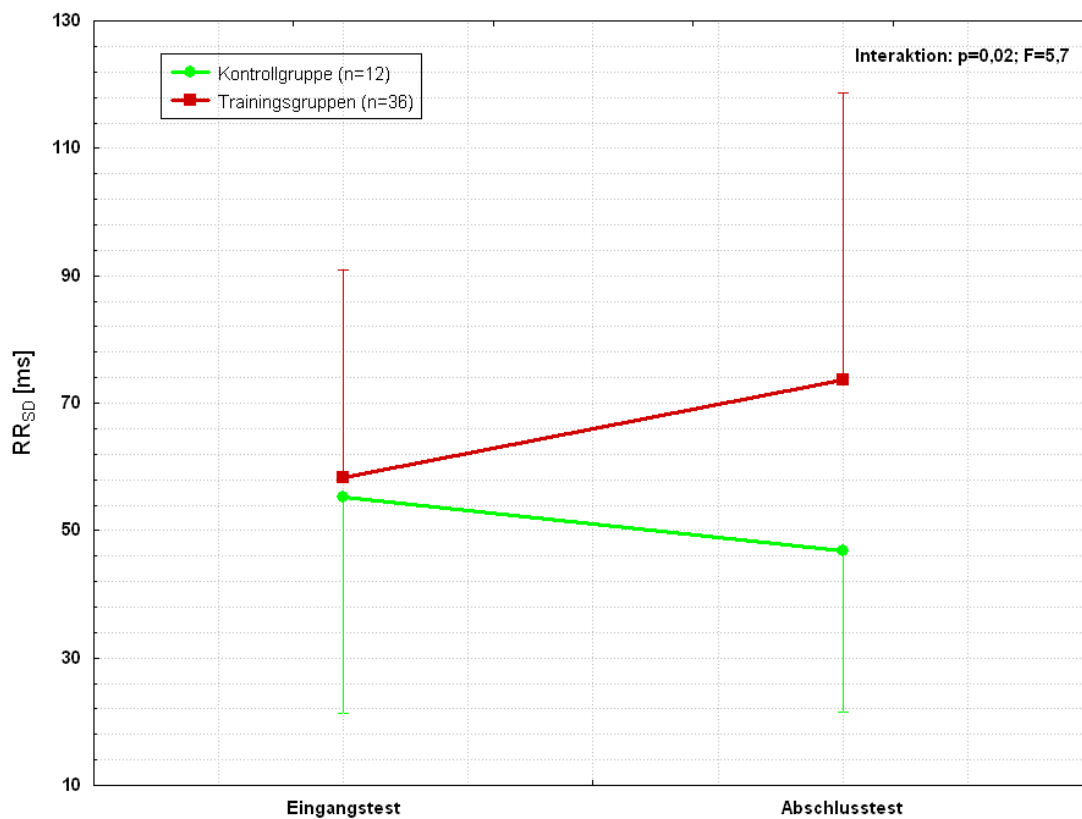


Abbildung 18: RR_{SD} der Trainingsgruppen und der Kontrollgruppe bei Eingangs- und Abschlusstest

RR_{SD} = Standardabweichung der RR-Intervalldauer; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Bei den Mittelwerten der RR_{SD} (Abbildung 18) zeigt sich kein zeitlicher Effekt ($F = 0,5$; $p = 0,48$), wobei die Mittelwerte der Trainingsgruppen signifikant ansteigen ($p = 0,03$). Die Interaktion Gruppe x Zeit ist signifikant.

4.2.1.2 Frequenzbereich

4.2.1.2.1 Low Frequency Power (LFP)

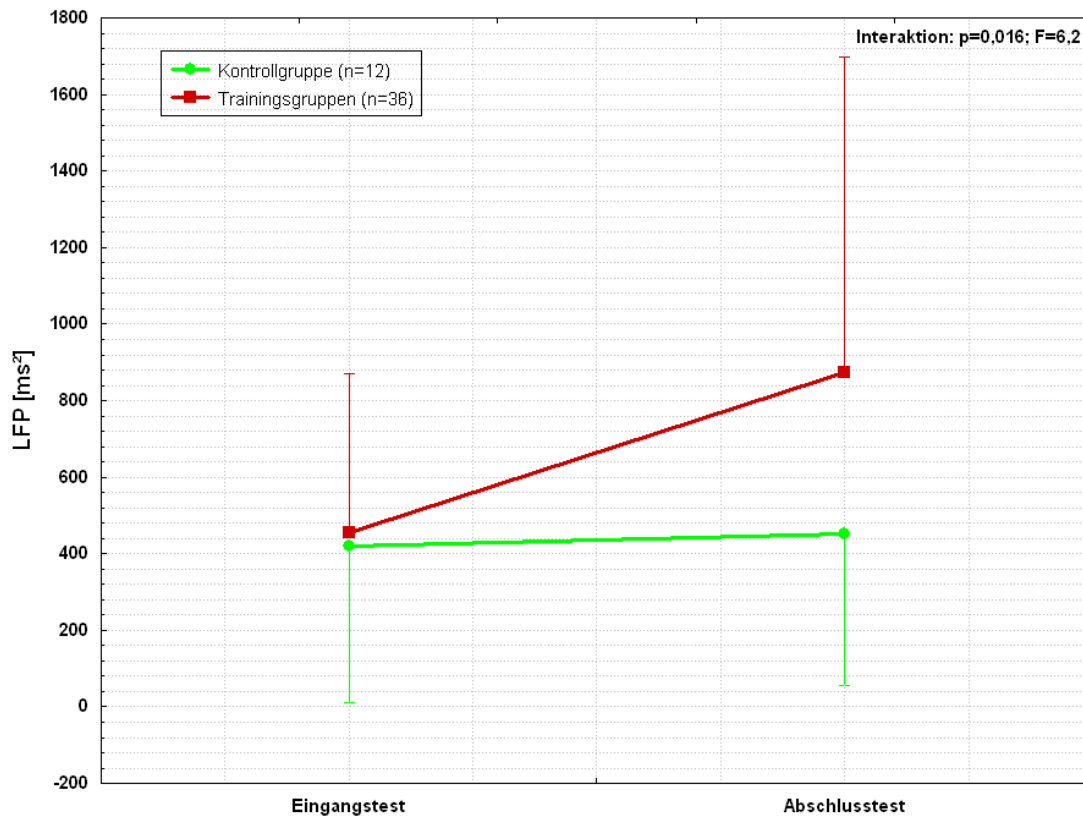


Abbildung 19: Low Frequency Power bei Eingangs- und Abschlusstest differenziert in Trainingsgruppen und Kontrollgruppe. Die Datenerfassung erfolgte unter Atemregulation von 12/min

LFP=Low Frequency Power; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Abbildung 19 stellt die Low Frequency Power Werte dar. Die Trainingsgruppen zeigen einen Anstieg der LFP-Werte von $456 \pm 414 \text{ ms}^2$ auf $873 \pm 824 \text{ ms}^2$ ($p < 0,001$).

Die Varianzanalyse ergab für den Effekt Zeit einen F-Wert von 8,45 und einen p-Wert von 0,006. Die Auswertung der Interaktion Gruppe x Zeit erreichte folgende Werte: $F=6,2$ und $p=0,016$.

In Tabelle 10 sind die Mittelwerte mit der Standardabweichung als Steumaß aufgelistet.

4.2.1.2.2 High Frequency Power (HFP)

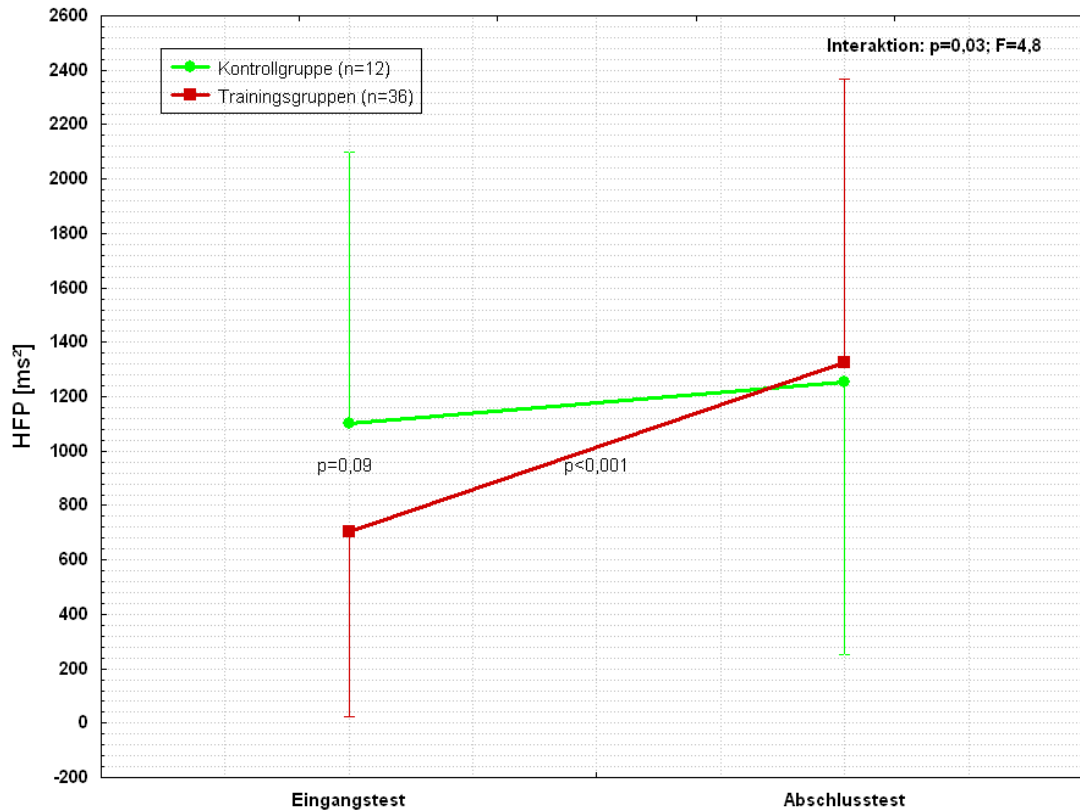


Abbildung 20: High Frequency Power bei Eingangs- und Abschlusstest differenziert in Trainingsgruppen und Kontrollgruppe. Die Datenerfassung erfolgte unter Atemregulation von 12/min

HFP=High Frequency Power; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Abbildung 20 stellt die Werte der High Frequency Power dar. Die Varianzanalyse zeigt für den Effekt Zeit einen höchst signifikanten Anstieg vom Eingangs- zum Abschlusstest ($F=13,11; p<0,001$). Die Interaktion Gruppe x Zeit ist signifikant ($F=4,8; p=0,03$).

4.2.1.2.3 LFP / HFP-Quotient

Tabelle 10 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichung des Quotienten aus LFP/HFP. Unterschiede lassen sich hier durch die Varianzanalyse nicht nachweisen.

4.2.1.2.4 Total Frequency Power (TFP)

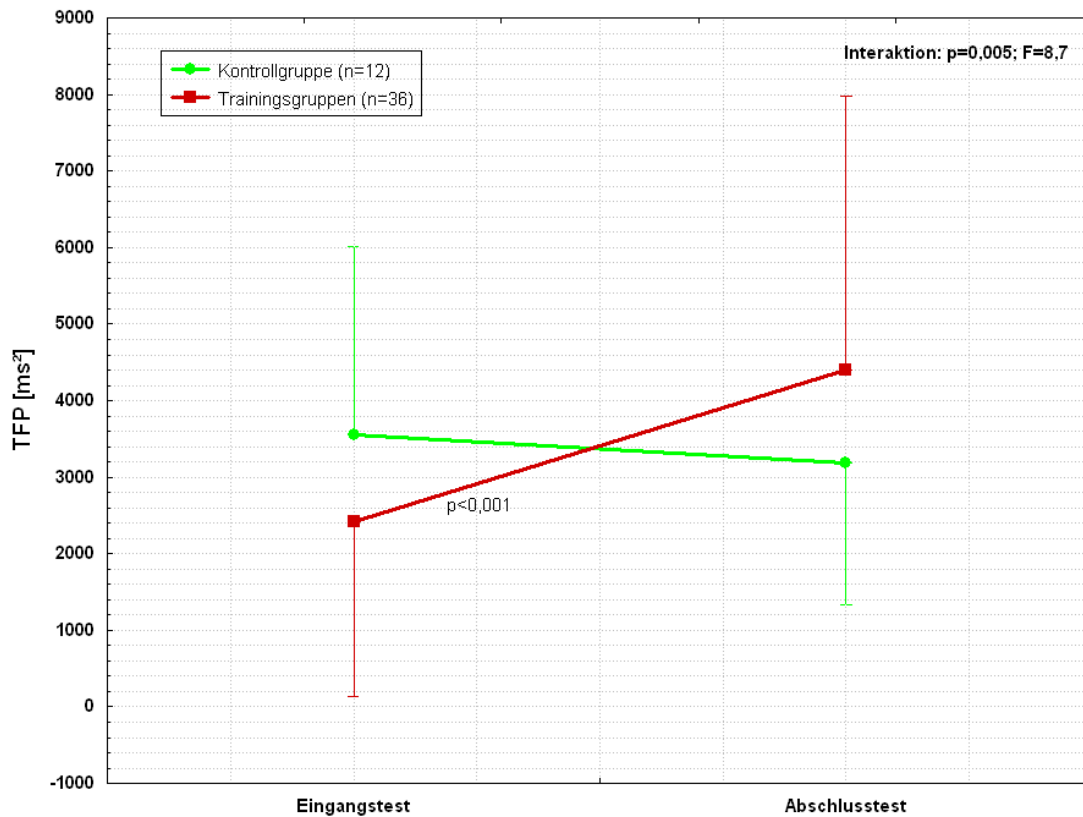


Abbildung 21: Total Frequency Power bei Eingangs- und Abschlusstest differenziert in die Trainingsgruppen und Kontrollgruppe. Die Datenerfassung erfolgte unter Atemregulation von 12/min

TFP=Total Frequency Power; Mittelwerte \pm Standardabweichung.

Abbildung 21 zeigt die Total Frequency Power der Trainings- und der Kontrollgruppe. Die Varianzanalyse zeigt für den Effekt Zeit lediglich eine Tendenz ($F=4,01$; $p=0,051$). Die Interaktion zwischen Gruppe und Zeit ergibt eine hoch signifikante Veränderung ($F=8,74$; $p=0,005$). Die Zunahme der TFP der Trainingsgruppe ist höchst signifikant ($p<0,001$).

4.2.2 Studie B – Vergleich 5-Tage-Gruppe und Weekend Warrior

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion für alle HRV-Parameter der Studie B beim Vergleich der 5-Tage-Gruppe mit der Gruppe der Weekend Warrior.

HRV-Parameter	Effekte					
	Gruppe		Zeit		Interaktion Gruppe x Zeit	
	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert
RR_{MW}	0,06	0,81	27,31	<0,001	0,46	0,51
RR_{SD}	0,00	0,95	8,76	0,007	0,04	0,84
LFP	0,19	0,67	15,52	<0,001	0,24	0,63
HFP	0,65	0,43	27,02	<0,001	0,00	0,97
LFP / HFP	0,35	0,56	0,22	0,65	1,11	0,30
TFP	0,31	0,58	19,71	<0,001	3,07	0,09

Tabelle 8: Ergebnisse der Varianzanalyse der HRV-Parameter. Vergleich 5-Tage-Gruppe vs. Weekend Warrior. Jeweils für die Effekte Gruppe, Zeit und Interaktion mit F- und p-Wert

RR_{MW}=Mittelwert der RR-Intervall-Dauer; RR_{SD}=Standardabweichung der RR-Intervalldauer; LFP=Low Frequency Power; HFP=High Frequency Power; LFP / HFP=Low Frequency Power / High Frequency Power; TFP=Total Frequency Power; signifikante Ergebnisse sind fett hinterlegt.

Die Mittelwerte der RR_{MW} steigen sowohl bei der 5-Tage- (p=0,03) als auch bei der Weekend Warrior Gruppe (p=0,006) an, wobei sich keine signifikante Interaktion (F=0,46; p=0,51) zeigt. Auch der zweite Parameter des Zeitbereichs kann keine Interaktion der beiden Gruppen aufweisen (F=0,04; p=0,84).

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch im Frequenzbereich. Die LFP-Mittelwerte beider Gruppen steigen von 407 ± 390 ms² beim Eingangstest auf 895 ± 897 ms² beim Abschlusstest an, was mehr als einer Verdoppelung entspricht. Die Interaktion Gruppe x Zeit ist mit F=0,24 und p=0,63 nicht signifikant.

Bei einem parallelen Anstieg der HFP beider Gruppen, welche beide um mehr als 500 ms² zunehmen, lässt sich zwar ein höchst signifikanter zeitlicher Effekt aufzeigen

($F=27,02$; $p<0,001$), bei jedoch fehlender Interaktion Gruppe x Zeit ($F=0,002$; $p=0,97$).

Im Gegensatz zu den anderen Parametern zeigt der Quotient aus LFP/HFP keine Unterschiede.

Abschließend zeigen die Verläufe der HFP-Werte vom Eingangs- zum Abschlusstest einen höchst signifikanten Effekt für den Faktor Zeit ($F=19,7$; $p<0,001$). Die HFP der Weekend Warrior steigt hoch signifikant ($p=0,004$) von $1252 \pm 722 \text{ ms}^2$ auf $4194 \pm 3585 \text{ ms}^2$. Die Varianzanalyse ergibt eine nicht signifikante Interaktion ($F=3,07$; $p=0,09$).

Zusammenfassend zeigt sich außer beim Quotient aus LFP/HFP ein Unterschied für den Faktor Zeit. Ein Gruppeneffekt und der Effekt der Interaktion lassen sich jedoch bei keinem HRV-Parameter nachweisen.

5 Diskussion

Ziel der durchgeführten Studien war es, die Auswirkung von körperlichem Training auf die Herzfrequenzvariabilität zu untersuchen.

In Studie A und Studie B konnten Veränderungen der einzelnen HRV-Parameter durch sportliche Aktivität bei trainierten bzw. untrainierten Personen nachgewiesen werden, die im Folgenden diskutiert werden.

5.1 Studie A: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch hochintensives Intervalltraining, verglichen mit einem niedrig intensiven Dauermethodentraining bei Wettkampfschwimmern

5.1.1 Zeitbereich

Mittelwert der RR-Intervall-Dauer

Der Verlauf der Ruheherzfrequenz während der 5-wöchigen Studie zeigt steigende RR_{MW} -Werte während der hoch intensiven Intervalltrainingsphase und leicht absinkende Werte nach dem Regenerationstraining.

Die RR-Intervalle der Dauermethoden-Gruppe zeigen nach einem leichten Absinken von VT zu TW 1 einen parallelen Verlauf zur HIT-Gruppe. Statistisch erweist sich der Faktor Zeit als höchst signifikant, bei signifikant unterschiedlichen Verläufen beider Gruppen.

2006 beschrieben Baumert et al. den Verlauf der HRV während eines 2-wöchigen Trainingslagers. Zehn ca. 25-jährige Probanden absolvierten täglich einen Stufen-Test. Anschließend erfolgten ein 40-minütiges Lauftraining sowie ein 80-minütiges Fahrradtraining. Die HRV-Aufzeichnungen erfolgten vor, während und nach dem Trainingslager. Die Ruheherzfrequenz stieg während des Trainingslagers leicht an und lag zum letzten Messzeitpunkt, d.h. drei bis vier Tage nach dem Trainingslager, unter der Ausgangsruheherzfrequenz ($p=0,008$) (12).

Die Differenz der Ruheherzfrequenz vom Ausgangswert zu dem Abschlusswert nach Regeneration ist bei den Ergebnissen von Baumert et al. (12) und unserer HIT-Gruppe gleich. In beiden Untersuchungen liegen die abschließenden RR_{MW} -Werte über den Ausgangswerten. Bei Baumert et al. liegt der RR_{MW} -Wert bei der Untersuchung während des Trainingslagers niedriger als die Baseline. Unsere Ergebnisse zeigen schon während des Trainings einen signifikanten Anstieg. Hierfür

könnte der in unserer Studie integrierte Regenerationstrainingstag vor den HRV-Aufzeichnungen verantwortlich sein. Auch wird von Baumert et al. (12) nur der Trainingsumfang, nicht jedoch die genaue Intensität beschrieben. Es wird nur sehr vage von „höherer Intensität als gewöhnlich“ gesprochen.

Eine HRV-Messung während einer Spanienrundfahrt 2001 beschreiben Earnest et al. (39), die die HRV-Parameter bei acht Profiradfahrern zu drei Zeitpunkten bestimmten. Nach Auswertung der RR_{MW} konnten im Zeitverlauf keine nachweisbaren Veränderungen im Sinne signifikanter Ergebnisse aufgezeigt werden. Dies könnte auf der jeweils unterschiedlichen Belastung der Profis basieren. Ein Radfahrer fährt möglicherweise das gesamte Rennen ohne größere Anstrengung im Feld mit; ein anderer ruft möglicherweise als „Ausreißer“ nahezu das Maximum ab. Hierdurch ergibt sich eine relativ große Standardabweichung. Auch starten die Radfahrer auf einem sehr hohen Leistungsstand im Gegensatz zu unseren Probanden, unter denen die Schwimmer während der Studie eine deutliche Intensitätssteigerung erlebten.

Carter et al. (30) führten eine Längsschnittstudie mit 24 Probanden durch und erhoben Daten vor und nach 12 Wochen Training. Die Ruheherzfrequenz zeigte eine signifikante Abnahme. Die Ergebnisse sind also mit den unseren identisch, wobei wir diese Veränderung schon nach einem deutlich geringeren Zeitraum feststellen konnten.

Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer

Bei der HIT-Gruppe steigt die RR_{SD} vom Vortest (VT) bis zur TW 3 signifikant an, ehe der Mittelwert wieder leicht fällt.

Die Dauermethoden-Gruppe zeigt von TW 1 zu Messzeitpunkt 3 (TW 3) ein deutliches Absinken. Statistisch zeigen sich höchst signifikant unterschiedliche Verläufe beider Gruppen und ein hoch signifikanter Faktor Zeit.

Die oben bereits erwähnte vergleichbare Studie von Baumert et al. (12), in der die HRV-Aufzeichnung während eines 2-wöchigen Trainingscamps erfolgte, konnte keine signifikanten Veränderungen der RR_{SD} darstellen, sondern ergab lediglich eine Tendenz zu sinkenden RR_{SD} -Werten. Die Autoren beschreiben einen initialen Abfall der HRV nach Steigerung der Belastung, welcher von einem Anstieg gefolgt wird. Unsere Ergebnisse zeigen diesen initialen Abfall bei der RR_{SD} nicht. Hierfür könnte

die geringere Steigerung der Trainingsbelastung im Vergleich zu Baumert et al. ursächlich sein.

Ein 7-wöchiges Intervalltraining ergab bei 38 Kindern (Durchschnittsalter 9,6) keine signifikant veränderten HRV-Parameter bei jedoch signifikant höherer Leistung (VO_2max) (44). Soares-Miranda et al. (122) konnten in einer Querschnittsuntersuchung höhere Leistung signifikant mit erhöhten RR_{SD} -Werten korrelieren.

Eine Längsschnittstudie mit 46 Probanden in einem 8-wöchigen Training präsentieren Tulppo et al. (130). Obwohl eine der beiden Trainingsgruppen ein leichtes und die andere ein intensives Training absolvierte, wurde bei beiden Trainingsgruppen eine signifikante Zunahme der RR_{SD} -Werte nachgewiesen.

Dass der RR_{SD} bei sportlich aktiven Probanden steigt, zeigen auch Martinelli et al. (83) in einer Querschnittsstudie, die Radsportler mit Kontrollprobanden vergleicht und dabei signifikant höhere RR_{SD} -Werte bei den Radfahrern findet. Die Autoren schlussfolgern – wie wir –, dass physische Aktivität die Standardabweichung der RR-Intervalle erhöht.

Die oben schon beschriebene Radprofi-Studie von Earnest et al. (39) zeigt keine signifikanten Veränderungen des Parameters RR_{SD} . Entsprechende Veränderungen wären bei einer etwa 3-wöchigen Rundfahrt jedoch auch nur bei Überlastungserscheinungen zu erwarten, ihr Ausbleiben ist also aufgrund der kurzen Studiedauer mit unseren Ergebnissen kompatibel.

In Anbetracht der Fülle der konvergierenden Ergebnisse kann als unstrittig angenommen werden, dass sich die Standardabweichung der Mittelwerte der Dauer von RR-Intervallen durch stetige körperliche Aktivität erhöht. Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine größere Steigerung durch hoch intensives Intervalltraining erreicht wird.

5.1.2 Frequenzbereich

Low Frequency Power

Bei der Low Frequency Power kann ein signifikant unterschiedlicher Verlauf beider Gruppen gezeigt werden, bei welchem jedoch die Abschlusswerte zum Zeitpunkt RT ähnlich wie zu VT sind. Diese unterschiedlichen Verlaufskurven beider Gruppen lassen sich jedoch durch die aktuelle Literatur nicht erklären. Hoch signifikant zeigt sich der Faktor Zeit.

Hedelin et al. (49) untersuchten die Herzfrequenzvariabilität unter standardisierten Atembedingungen an 17 Langlaufskifahrern vor und nach einer Saison. Die Ergebnisse der Low Frequency Power zeigten jedoch keine signifikanten Veränderungen. Da der LFP-Parameter stark durch die Sympathikusaktivität mitbestimmt wird, erfolgte eine zusätzliche Messung in stehender Position. Hierbei zeigten sich signifikant niedrigere LFP-Werte nach der Saison. Hedelin et al. beschreiben eine erniedrigte LFP nach der Saison. Als Ursache unserer Erhöhung lässt sich am ehesten die erhöhte Sympathikusaktivität während des Trainings anführen. Nach Regenerationstraining ist diese dann wieder rückläufig und erreicht niedrigere Werte als die Baseline, wie es von Hedelin et al. dargestellt wurde.

Die HRV-Messungen während eines 2-wöchigen Trainings von Baumert et al. (12) zeigen zwar nur tendenzielle Veränderungen – die LFP sinkt nach dem Training auf etwa 61% des Ausgangswertes – doch auch diese Ergebnisse erreichen bei sehr hoher Standardabweichung nicht das Signifikanzniveau.

Buchheit et al. (23) können bei ihren drei Gruppen keine Unterschiede erkennen. Auch zwei Jahre später messen Buchheit et al. (24) nur einen Unterschied zwischen der Gruppe der geringen kardiorespiratorischen Fitness mit niedriger Trainingsbelastung und der Gruppe mit hoher Fitness und hoher Trainingsbelastung.

Unsere Ergebnisse legen im Einklang mit den genannten Studien nahe, dass es durch langjähriges Training und einem damit verbundenen besseren Fitnessniveau zu einer Erhöhung der Low Frequency Power kommt, da die vegetative Innervation des Herzens gesteigert wird. Durch pharmakologische Intervention mit einem β -Blocker lässt sich die LFP höchst signifikant senken (131), was auf den starken Einfluss des Sympathikus deutet.

Insgesamt zeigt die aktuelle Datenlage zur Low Frequency Power, welche am ehesten mit der sympathischen Innervation zu erklären ist, sehr differente Ergebnisse. Tendenziell ist jedoch von einem maximal geringen Anstieg der LFP in Ruhe als Trainingseffekt auszugehen.

High Frequency Power

Die Daten der High Frequency Power zeigen in der Studie A sowohl einen signifikanten Faktor Zeit als auch eine signifikante Interaktion bei tendenziellem

Unterschied zum Zeitpunkt VT. Loimaala et al. (75) untersuchten in einer randomisierten Studie den Effekt zweier verschiedener Trainingsprogramme durch ein 5-monatiges Training. Die 80 Probanden wurden drei Gruppen zugeteilt, wobei ein Kollektiv die Kontrollgruppe darstellte. Nach dieser Trainingszeit konnten in allen drei Gruppen keine signifikanten Veränderungen der High Frequency Power festgestellt werden. Die Schlussfolgerung der Autoren ist, dass Training bei mittelalten Probanden die HRV nicht verändert. Dieser Schlussfolgerung widersprechen Aubert et al. (2003) in ihrem Review. Sie weisen darauf hin, dass obwohl die HRV mit dem Alter sinkt, trotzdem eine Steigerung durch körperliche Aktivität erfolgt.

Die Untersuchungen von Buchheit et al. (27) zeigen eine signifikante Korrelation der vagal beeinflussten HRV-Parameter mit der Geschwindigkeit an der aeroben Schwelle von Läufern. Hierbei zeigen sich bei höheren Geschwindigkeiten an der Schwelle ebenfalls erhöhte HRV-Werte, weswegen die Autoren zu der Schlussfolgerung kommen, dass man durch Messung der HFP eine Vorhersage zur Auswirkung von aerobem Training treffen kann.

Eine Längsschnittstudie mit einem 16-wöchigen Trainingsprogramm von Melanson et al. (84) zeigt nach 12 Wochen Training eine hoch signifikante Steigerung der HFP ($p=0,01$) und nach 16 Wochen eine immer noch signifikante Erhöhung ($p=0,05$). Die Teilnehmer dieser Studie waren mittelalte Personen, die zuvor keinen Sport betrieben hatten. Es ist davon auszugehen, dass unsere Schwimmer schon als Ausgangswert eine deutlich erhöhte High Frequency Power im Vergleich zu Normalpersonen aufweisen und dass deswegen – insbesondere durch zeitlich kurzes Training – keine noch deutlicheren Effekte zu erreichen sind. Es scheint vielmehr eine Art „kritische Schwelle“ zu geben, die in Abhängigkeit vom Trainingszustand variiert und überschritten werden muss, um eine signifikante Steigerung zu erreichen. Dafür spricht auch die Studie von Carter et al. (30), die ein 12-wöchiges Lauftraining mit Eingangs- und Abschlusstest beschreiben. Trotz regelmäßiger sportlicher Aktivität in den Jahren vor der Studie, konnte für deren Probanden ein signifikanter Anstieg der HFP verzeichnet werden.

Während für die trainierten Probanden Carters et al. eine 12-wöchige Trainingszeit für eine signifikante Erhöhung ausreicht, trifft dies nicht auf die von Earnest et al.

2004 untersuchten Radprofis zu, die im Verlauf des 3-wöchigen Rennens keine Veränderungen zeigen (39).

Fasst man abschließend unsere Ergebnisse der HFP-Messung mit der aktuellen Literatur zusammen, so muss man insbesondere von einem Langzeiteffekt durch sportliche Aktivität ausgehen (8, 27, 30). Hierbei ist ein Anstieg der High Frequency Power beschrieben. Unser Studiendesign, besonders die nur 3-wöchige Trainingsphase mit hoher Belastung ist offensichtlich zu kurz, um solche Effekte hervorzubringen. Trotzdem zeigt sich ein signifikant unterschiedlicher Verlauf beider Gruppen, welcher nicht hinreichend erklärt werden kann. Weiterhin ist eine Reduktion der Einflussfaktoren durch kontrollierte Atmung wesentlich, wie es zunehmend in der Literatur beschrieben wird (21, 49, 98).

LFP/HFP-Quotient

Bei den Verläufen des LFP/HFP-Quotienten zeigen sich keine signifikanten Veränderungen. Auffallend ist die sehr große Streuung der Werte, welche durch eine sehr hohe Standardabweichung zum Ausdruck gebracht wird.

In der Literatur sind unterschiedliche Ergebnisse beschrieben. Aubert et al. (7) vergleichen Probanden aus drei unterschiedlichen Sportarten mit Kontrollpersonen. Bei dieser Querschnittsstudie wiesen Rugbyspieler signifikant höhere LFP/HFP-Quotienten als die Kontrollgruppe auf. Bei den anderen Sportlern lässt sich kein Unterschied ausmachen, was unseren Ergebnissen entspricht.

Bosquet et al. (16) beschreiben in ihrer Metaanalyse, mittels der sie den Effekt von Übertrainingszuständen auf die HRV untersuchen, ein Anstieg des LFP/HFP-Quotienten bei kurzzeitigen Überlastungszuständen, d.h. Zuständen, die aus einem < 2-wöchigen Übertraining resultieren. Bei länger andauerndem Übertraining zeigt sich keine messbare Veränderung.

In einem Vergleich zwischen Athleten und Nicht-Athleten finden Martinelli et al. (83) in liegender Position keinen Unterschied des LFP/HFP-Quotienten von Sportlern und Nicht-Sportlern. Bei der Messung im Stehen ergibt sich bei den Athleten ein signifikant höherer LFP/HFP-Quotient. Betrachtet man unsere Verlaufswerte, so liegen die Werte tendenziell über der Baseline bzw. dem Vortest, jedoch ohne signifikant höher zu sein.

Tulppo et al. (130) konnten in ihrer Längsschnittstudie mit 46 Probanden signifikante Veränderungen des LFP/HFP-Quotienten darstellen. Sie teilten die

Studienteilnehmer randomisiert drei Gruppen zu, wobei neben einer Kontrollgruppe zwei Gruppen differente Trainingsprogramme absolvierten. Nach dem 8-wöchigen Training zeigten sich bei beiden Trainingsgruppen hoch signifikant niedrigere LFP/HFP-Quotient-Werte als zu Studienbeginn. Der Quotient der Kontrollgruppe blieb unverändert.

Zusammenfassend ist bei diesem Parameter keine wesentliche Veränderung durch physische Aktivität zu erwarten, da sowohl LFP als auch HFP vagale Komponenten aufweisen und insbesondere die Veränderung des Sympathikus unterschiedlich beschrieben wird.

Total Frequency Power

Die Auswertung der Total Frequency Power zeigt bei der HIT-Gruppe einen deutlichen ansteigenden Verlauf von VT zu TW 3. Bei der Dauermethoden-Gruppe kommt es im Zeitverlauf zu keiner wesentlichen Veränderung der TFP. Die Varianzanalyse ergibt einen hoch signifikanten Faktor Zeit bei signifikant unterschiedlichen Verläufen beider Gruppen.

Fasst man unsere Ergebnisse zusammen, so lässt sich tendenziell ein durch hoch intensives Intervalltraining induzierter Anstieg der Total Frequency Power darstellen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen Hedelin et al. (49) in einer Längsschnittstudie. Es wurden 17 junge Ski-Langläufer vor und nach der Saison untersucht. Hierbei konnte nach der Saison eine signifikant höhere TFP nachgewiesen werden. Dabei lag die Ausgangsuntersuchung vor der Saison im Monat August und die Abschlussuntersuchung nach der Saison im Monat April des folgenden Jahres.

Eine weitere Trainingsstudie über 12 Wochen mit Aufzeichnung der TFP wurde von Carter et al. (30) durchgeführt. Zwölf Probanden im Alter zwischen 40 und 45 Jahren absolvierten ein Laufprogramm. Nach diesem 12-wöchigen Trainingsprogramm zeigten sich signifikant höhere Total Frequency Power-Werte.

Gamelin et al. (43) präsentieren eine Längsschnittstudie mit zehn Probanden, die ein 12-wöchiges aerobes Trainingsprogramm absolvierten. Bei den gewonnenen Herzfrequenzdaten zeigte sich ein signifikanter Anstieg der Total Frequency Power. Auch Gamelin et al. (43) zeigten, dass physisches Training die autonome kardiovaskuläre Innervation moduliert. Diese Veränderungen sind mit den von uns aufgezeigten Veränderungen konform.

Abschließend ist zu konstatieren, dass die Veränderung der Total Frequency Power erst ab einer gewissen Trainingsphase deutlich und damit statistisch nachweisbar wird. Trotz unseres zeitlich relativ kurzen Trainingsprogramms konnten wir diese Veränderung jedoch nachweisen.

5.1.3 Schlussfolgerung

In Zusammenschau unserer Ergebnisse und der Literatur zeigt sich, dass Ausdauertraining bei Sportlern zu einem Anstieg der autonomen Innervation am Herzen führt. Hierbei ist der Anstieg der vagalen Komponente ausgeprägter.

Weiterhin weisen unsere Ergebnisse darauf hin, dass dieser Effekt unter einem hoch intensiven Intervalltraining ausgeprägter ist als bei einem Training nach der Dauermethode.

5.2 Studie B: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch Langzeit-Ausdauer-Training bei zuvor Untrainierten – Vergleich Trainingsgruppen und Kontrollgruppe

5.2.1 Zeitbereich

Mittelwert der RR-Intervall-Dauer

In Bezug auf die Herzfrequenz zeigt der Vergleich zwischen Eingangstest und Abschlusstest in Studie B einen hoch signifikanten Rückgang der Herzfrequenz bzw. eine Erhöhung der RR-Intervall-Länge (Faktor Zeit). Bei den Trainingsgruppen konnte eine durchschnittliche Verlängerung des RR-Intervalls um 76 ms aufgezeigt werden, was einem höchst signifikanten Anstieg entspricht. Der zeitliche Gruppenvergleich, also die Interaktion, ergab keine signifikanten Ergebnisse. Das Phänomen einer durch Ausdauertraining sinkenden Ruheherzfrequenz ist in der einschlägigen Literatur bereits gut beschrieben (112). Buchheit et al. fanden z.B. bei ihren Untersuchungen an 22 älteren Probanden (75,7 Jahre Durchschnittsalter) eine signifikant niedrigere Herzfrequenz für jene Probanden, die sich regelmäßig sportlich betätigen. Es zeigte sich eine Ruheherzfrequenz der Sportlichen von $60,1 \pm 0,7$ bpm gegenüber $66,4 \pm 0,6$ bpm bei den sportlich weniger Aktiven (24). Carter et al. ließen 24 Probanden ähnlich wie in der vorliegenden Studie 12 Wochen trainieren und führten einen Ausgangs- und einen Abschlusstest durch. Die Erfassung der HRV-

Parameter wurde unter Atemregulation durchgeführt. Auch sie konnten eine signifikante Zunahme der RR-Intervalle verzeichnen ($1019,6 \pm 181,0$ ms vs. $1069,4 \pm 171,6$ ms). Stellt man diese Zahlen in prozentualer Veränderung dar, ergibt sich eine Zunahme der RR-Intervalle von knapp 5% (30).

Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer

Die RR_{SD} stellt in den Trainingsgruppen einen Anstieg von 58 ± 33 ms zum Zeitpunkt des Eingangstests auf 74 ± 45 ms zum Abschlusstest dar, was eine signifikante Zunahme ($p=0,03$) bedeutet.

Auch diese Daten bestätigen in der Literatur bereits dokumentierte Beobachtungen. Carter et al. (30) untersuchten unter Atemregulation 24 Probanden hinsichtlich verschiedener Herzfrequenzparameter und konnten bei der RR_{SD} ebenfalls einen Anstieg verzeichnen. Nach dem 12-wöchigen Trainingsprogramm zeigt sich bei den Probanden eine Zunahme von $55,9 \pm 25,1$ ms auf $68,9 \pm 25,7$ ms. Dies entspricht einem Zuwachs von 23,3% und ist – wie in unserer Studie – als signifikante Veränderung einzustufen. Eine weitere, der unseren ähnliche Untersuchung wurde von Albinet et al. durchgeführt. Hier wurden 24 ältere untrainierte Probanden in zwei Gruppen eingeteilt. Die eine Gruppe absolvierte ein 12-wöchiges aerobes Ausdauertraining und die andere ein 12-wöchiges Stretching. Die Probanden, welche drei mal pro Woche das Ausdauertrainingsprogramm durchführten, zeigten nach diesen 12 Wochen signifikant höhere RR_{SD} -Werte (4), vergleichbar mit unseren Ergebnissen. Nach einem 8-wöchigen Training bei Läufern zeigen Buchheit et al. (27) eine Korrelation der HRV-Parameter mit der Performance an der anaeroben Schwelle. Sie beschreiben eine signifikante Korrelation von steigenden RR_{SD} -Werten und maximaler aerober Geschwindigkeit. In einer aktuellen Querschnittsstudie zeigen sich bei 80 Studenten signifikante Korrelationen zwischen erhöhter RR_{SD} und Leistungsvermögen (122).

5.2.2 Frequenzbereich

Low Frequency Power

Die Low Frequency Power zeigt in den Trainingsgruppen einen signifikanten Anstieg ($p=0,016$) gegenüber der Kontrollgruppe.

Diese Ergebnisse werden in der Literatur zumeist nicht bestätigt. Kamath et al. beschreiben gleichbleibende LFP-Werte nach Langzeittraining (62). Diese Erklärung wird auch von Aubert et al. (7) in ihrer Querschnittsstudie diskutiert. Deren Ergebnisse zeigen bei sportlich aktiven Probanden keinen signifikanten Unterschied zu Kontrollprobanden. Breuer et al. (20) wie auch Norton et al. (90) beschreiben einen durch Training induzierten Rückgang der Low Frequency Power. Dieser Rückgang wurde auch von Dixon et al. (37) beschrieben. Ähnliche Trainingseffekte wie die unseren wurden bei älteren untrainierten Frauen nach sechsmonatigem Training gezeigt, wobei die LFP ebenfalls signifikant anstieg (46).

High Frequency Power

Unsere Daten zeigen bei der Trainingsgruppe einen signifikanten Anstieg der High Frequency Power im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die Werte steigen nach dem 12-wöchigen Training von $705 \pm 683 \text{ ms}^2$ auf $1325 \pm 1043 \text{ ms}^2$.

Die überwiegende Zahl der Studien bilden Querschnitts-Vergleiche zwischen Trainierten und Untrainierten (5, 8, 14, 34). So untersuchten Buchheit et al. (23) ältere Probanden und differenzierten diese in zwei Gruppen nach ihrer gewöhnlichen körperlichen Aktivität. Hierbei zeigten die Probanden mit höherer sportlicher Aktivität HFP-Werte von $624,9 \pm 66,1 \text{ ms}^2/\text{Hz}$ und somit gegenüber den weniger aktiven Probanden ($165,1 \pm 12,3 \text{ ms}^2/\text{Hz}$) signifikant größere Werte ($p < 0,05$). Diese Daten sind mit unseren vergleichbar.

Eine weitere relevante Querschnittsuntersuchung präsentierten Sztajzel et al. (124). Hierbei wurden Ausdauerathleten, Mannschaftssportler und Kontrollprobanden miteinander verglichen. Sowohl die Ausdauerathleten als auch die Mannschaftssportler zeigten signifikant höhere High Frequency Power-Werte als die Kontrollgruppe. Ähnliche Unterschiede zeigen sich auch bei 62 Sportlern, welche mit 30 Untrainierten verglichen wurden (5). Diese Ergebnisse bestätigen die unseren, die für die Trainingsgruppen ebenfalls eine deutlich höhere HFP zeigen.

In einer Längsschnittstudie (30), bei der die Datenerhebung unter Atemkontrolle, ähnlich wie in unserem Studiendesign, aufgezeichnet wurde, zeigte sich nach einem 12-wöchigen Trainingsprogramm ein signifikanter Anstieg der HFP. Die High Frequency Power, welche vor dem Training $205,7 \pm 290,5 \text{ ms}^2$ betrug, erhöhte sich auf $568,0 \pm 696,0 \text{ ms}^2$. Dies entspricht einem Zuwachs von ca. 276%. Somit sind deren Ergebnisse mit den unsrigen kongruent.

2001 untersuchten Melanson und Freedson 16 Probanden in einer 16-wöchigen Trainingsstudie (84). Hierbei wurde das Untersuchungsgut in zwei Gruppen, eine Trainings- und eine Kontrollgruppe, eingeteilt. Nach 12 und 16 Wochen des Trainingsprogramms zeigten sich bei der Trainingsgruppe signifikant höhere HFP-Werte. In einer 4-wöchigen Trainingsstudie wurden die 24 Teilnehmer anhand ihrer $VO_2\text{max}$ -Werte in Responder und Non-Responder eingeteilt. In der Responder-Gruppe zeigten sich nach zwei Stunden Training pro Woche signifikant höhere HFP-Werte. Dieser Anstieg korreliert mit den erhöhten $VO_2\text{max}$ -Werten (91). Bei einem ebenfalls 12-wöchigen Trainingsprogramm konnte ein signifikanter Anstieg der HFP bei der Gruppe nachgewiesen werden, welche dreimal pro Woche ein aerobes Ausdauerprogramm absolvierte (4). Auch diese Datenlage zeigt ähnliche Ergebnisse wie die unseren.

LFP/HFP-Quotient

Nach dem 12-wöchigen Training zeigen die Trainingsgruppen einen nahezu unveränderten LFP/HFP-Quotienten.

Mit den unseren vergleichbare Ergebnisse fanden Aubert et al. (7) in einer Querschnittsuntersuchung, als sie ihre Probanden sportartspezifisch untersuchten. Hierbei zeigten die aerob und die anaerob trainierenden Probanden keine wesentlichen Unterschiede zur Kontrollgruppe. Im Gegensatz zu unseren Untersuchungen wiesen jedoch Rugbyspieler signifikant höhere LFP/HFP-Quotient-Werte gegenüber der Kontrollgruppe auf.

Total Frequency Power

Unsere Daten stellen nach dem 12-wöchigen Training insgesamt einen hoch signifikanten Anstieg der TFP von 2426 ms^2 auf 4404 ms^2 in den Trainingsgruppen verglichen mit der Kontrollgruppe dar. Der Faktor Zeit zeigt mit $p=0,051$ lediglich eine steigende Tendenz.

Eine Querschnittsuntersuchung ergibt höchst signifikant höhere TFP-Werte bei Sportlern im Vergleich zu Kontrollpersonen, welche nicht physisch aktiv sind (5). Bei ähnlichem Studiendesign konnten auch Christoforidi et al. (32) diese Ergebnisse aufzeigen.

Hedelin et al. (49) ermittelten in einer Längsschnittstudie mit Sportlern (Skilangläufern) einen signifikanten Unterschied zwischen Messzeitpunkten vor und

nach einer Ski-Saison. Die Datenerhebung erfolgte analog zu unseren Bedingungen unter Atemkontrolle (12 Atemzüge/Minute). Die Total Frequency Power war nach der Saison signifikant höher als vor Beginn der Saison. Ergebnisse, die sich mit den unseren gut vergleichen lassen und unsere Erkenntnisse also untermauern.

Nach einem 12-wöchigen Trainingsprogramm sehen Carter et al. (30) einen signifikanten Anstieg der Total Frequency Power bei ihren zwölf Studienteilnehmern, die während der Testphase alle das gleiche Laufprogramm absolvierten. Diese Ergebnisse wurden von Gamelin et al. (43) bestätigt. Nach einem ebenfalls 12-wöchigen Trainingsprogramm zeigten seine zehn Probanden einen signifikanten Anstieg der HFP. Diese Studien bestätigen unsere Ergebnisse.

5.3 Studie B: Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität durch Langzeit-Ausdauer-Training bei zuvor Untrainierten – Vergleich 5-Tage-Gruppe und Weekend Warrior

Der differenzierte Vergleich der Ausdauertrainingsprogramme der Weekend Warrior und der 5-Tage-Gruppe zeigt für die Interaktion Gruppe x Zeit keine Unterschiede. Der Faktor Zeit ist jedoch bei fast allen Parametern höchst signifikant. Dieser Vergleich zweier so ähnlicher Trainingsprogramme ist in der Literatur bis dato nicht beschrieben.

Der von uns beschriebene zeitliche Effekt bei den Zeitbereichsparametern mit einem Anstieg sowohl der RR_{MW} als auch der RR_{SD} wird zahlreich gesehen (22, 56).

Buchheit et al. beschreiben in ihrer 2006 veröffentlichten Studie vergleichbare Ergebnisse (24). Sie teilen die Probanden ebenfalls in vier Gruppen ein, die Zuordnung erfolgt jedoch anhand leistungsphysiologischer Parameter und der Trainingsanamnese. Ihre Daten erheben sie an einem Tag, ohne einen Zeitverlauf aufzuzeichnen. Hierbei zeigen sich signifikante Unterschiede bei der RR_{MW} und RR_{SD} zwischen den besser trainierten und den untrainierten Probanden.

Bei den Parametern des Frequenzbereichs zeigt sich in der Literatur kein ganz homogenes Bild.

Die Low Frequency Power wird kontrovers diskutiert. Den von uns gesehenen Anstieg der Werte durch körperliches Training zeigen auch andere Forschergruppen (7, 24, 46). Keine Veränderung sehen Kamath et al. (62). Bei der HFP und der TFP wird es hingegen klarer. Hier ist ein relativ deutlicher Anstieg beider Parameter durch Training zu sehen.

2011 wurde von einer finnischen Gruppe eine 28-wöchige Trainingsstudie durchgeführt, wobei 14 Wochen ein Basistraining und 14 Wochen ein intensives Training absolviert wurde (133). Keine Veränderung zeigten die HFP-Werte nach 14-wöchigem Basistraining, allerdings wurde nach dem intensiven Training ein Anstieg der HFP nachgewiesen. Das gleiche Bild zeigte sich bei der TFP, hier stiegen die Werte nach dem intensiven Training sogar hoch signifikant an.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass diese zwei Trainingsprogramme, welche sich nur vom Timing her unterschieden, zu ähnlich waren, um unterschiedliche Verläufe der einzelnen HRV-Parameter zu detektieren. Die von uns gesehenen zeitlichen Veränderungen lassen sich von der Literatur bestätigen.

5.4 Methodendiskussion

Die immensen Unterschiede der Herzfrequenzvariabilität werden durch die zahlreichen Einflussfaktoren hervorgerufen. Um nun den Einflussfaktor der körperlichen Fitness durch den Marker der kardialen Innervation herauszufiltern, wurde versucht, die anderen Einflussfaktoren zu reduzieren bzw. konstant zu halten. Dieses Bemühen ist bei dieser Komplexität nicht perfekt möglich. In Studie A fehlte die Atemregulation, welche im weiteren Verlauf der Untersuchungen in Studie B durchgeführt wurde. Die Atemregulation wurde jedoch nur bei der Datengewinnung der HRV-Parameter des Frequenzbereichs eingesetzt. Die Studie A war mit ihrer Dauer von fünf Wochen zu kurz, um entsprechende Langzeitveränderungen darstellen zu können.

Trotz einzelner Hinweise auf Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen der Studie B waren insbesondere durch das isokalorische Trainingsdesign keine größeren Unterschiede zu erzielen.

5.5 Zusammenfassung

5.5.1 HRV-Parameter

5.5.1.1 Mittelwert der RR-Intervall-Dauer

Unsere Daten zeigen, dass die Ruheherzfrequenz mit zunehmender Dauer des Trainings abnimmt. Diese im Sport bedeutsame Bradykardie entsteht im Sinusknoten. Dieses hinlänglich bekannte Phänomen beruht auf der durch Ausdauertraining hervorgerufenen physiologischen Anpassung. Hauptursache ist die verstärkte Vagusaktivität. Diese zentrale Aktivitätssteigerung wird durch Impulse aus peripheren Mechano- und Chemorezeptoren der Muskulatur und Barorezeptoren der Blutgefäße vermittelt. Ausdauersportler weisen ebenfalls eine erniedrigte intrinsische Ruhfrequenz auf (30, 31). Eine physiologische Frequenzverminderung während der Nacht ist auch bei Normalpersonen vorhanden, diese ist jedoch bei Sportlern deutlich ausgeprägter (78).

5.5.1.2 Standardabweichung der RR-Intervall-Dauer

Unsere Daten zeigen eine signifikante Zunahme der RR_{SD} durch Training bzw. körperliche Aktivität.

Die von uns erzielten Ergebnisse bestätigen damit Erkenntnisse der Literatur. Iellamo et al. (56) untersuchten an 59 Patienten den Verlauf der RR_{SD} nach kardialer Intervention. In einer poststationären Rehabilitationseinrichtung wurden die Patienten in zwei Gruppen eingeteilt, wovon die eine Gruppe ein 3-wöchiges gesundheitssportlich orientiertes Trainingsprogramm absolvierte. Vor und nach dieser Zeit wurden Herzfrequenzdaten aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigten einen hoch signifikanten Anstieg der RR_{SD} in der Trainingsgruppe. Bei der Kontrollgruppe wurden keine Unterschiede nachgewiesen (56).

5.5.1.3 Low Frequency Power (LFP)

Die Veränderung der Low Frequency Power unterliegt in den von uns erhobenen Daten großen Schwankungen mit großer Streuung. Zusammenfassend lässt sich bei

den trainierenden Probanden meist eine Zunahme registrieren. Die aktuelle Literatur zeigt hier unterschiedliche Ergebnisse. Aubert et al. (7) können hier nur bei einer Trainingsgruppe signifikante Unterschiede zur Kontrollgruppe aufzeigen. Wobei hier die Trainingsgruppe höhere Werte aufweist als die Kontrollgruppe. Bei den Daten von Hedelein et al. (49) zeigen sich bei der Low Frequency Power keine signifikanten Unterschiede zwischen der Datenerhebung vor und nach der Saison von Skifahrern. Carter et al. (30) beschreiben in ihrer zusammenfassenden Begutachtung einen Rückgang der LFP, den sie mit einer Abnahme der Sympathikusaktivität bei sich in Ruhe befindenden Sportlern erklären.

5.5.1.4 High Frequency Power (HFP)

Zusammenfassend zeigen unsere Daten eine deutliche Zunahme der High Frequency Power durch Training bei Untrainierten. Je nach Trainingsprogramm werden HFP-Anstiege um bis zu 150 % beobachtet. Diese Veränderungen der HFP werden mit einer erhöhten Vagusaktivität erklärt (108, 126). Die aktuelle einschlägige Forschungsliteratur beschreibt vergleichbare Ergebnisse (30, 84). Achten et al. (1) beschreiben z. B. in ihrem zusammenfassenden Artikel signifikant erhöhte Werte der High Frequency Power bei trainierten Personen im Vergleich zu sportlich nicht aktiven.

5.5.1.5 LFP / HFP-Quotient

Bei der Untersuchung des LFP/HFP-Quotienten, welcher als Parameter für den autonomen Tonus gilt (126), zeigen sich bei unseren Daten keine Signifikanzen. Tendenziell kann beobachtet werden, dass der Quotient durch regelmäßiges Training ansteigt. Wertet man nun die High Frequency Power als hauptsächlich durch den Vagus verursacht und die Low Frequency Power als geprägt vom Sympathikus, könnte der erhöhte Quotient als Indikator für einen vermehrten Sympathikusanstieg interpretiert werden.

5.5.1.6 Total Frequency Power (TFP)

Betrachtet man den HRV-Parameter Total Frequency Power, so zeigt sich generell ein statistisch belegbarer Anstieg durch Training. Sowohl in der Studie A als auch in

Studie B zeigen sich eindeutig durch sportliche Aktivität hervorgerufene Erhöhungen der TFP. Diese Erhöhung lässt auf eine vermehrte vegetative Aktivität schließen, da die Total Frequency Power am ehesten die parasympathische und sympathische Innervation in Summe widerspiegelt (126).

5.5.2 Physiologische Interpretation der Ergebnisse der Studie A

Das 5-wöchige Trainingsprogramm führte bei den Schwimmern, welche ein Dauermethoden-Training absolvierten, zu geringeren Veränderungen der einzelnen Herzfrequenzvariabilitätsparameter als dies bei den Probanden, die das hochintensive Intervalltrainingsprogramm durchführten, der Fall war. Dies bedeutet, setzt man die physiologische Interpretation der *Task Force of the European Society* (126) voraus, dass sich bei dieser Gruppe die kardiale vegetative Innervation nur sehr geringfügig verändert hat.

Bei den Probanden, welche in diesen fünf Wochen hoch intensiv trainierten (HIT-Gruppe), konnten einige Veränderungen der Parameter der HRV gegenüber der Dauermethoden-Gruppe aufgezeigt werden. Es zeigte sich eine erhöhte RR_{MW} -Verlaufskurve während der 5-wöchigen Studie. Im Frequenzbereich zeigte sich schon ab der ersten Trainingswoche ein Anstieg der TFP bei der HIT-Gruppe mit – gegenüber der Dauermethoden-Gruppe – signifikant höherem Verlauf. Auch der Verlauf der HFP unterscheidet sich in beiden Gruppen – bei leicht steigenden Werten in der HIT-Gruppe gegenüber sinkendem Verlauf in der DM-Gruppe.

Physiologisch deutet dies darauf hin, dass sich bereits nach der ersten Trainingswoche eine vermehrte vegetative Innervation bei den hoch intensiv trainierenden Schwimmern einstellt. Die erhöhten RR_{MW} - und RR_{SD} -Werte deuten auf eine Innervationsverschiebung zugunsten der vagalen Komponente hin. Diese Annahme wird insbesondere durch die doch viel deutlicheren Anstiege der TFP-Werte bei der HIT-Gruppe bestätigt.

Aufschluss über eine speziell veränderte sympathische Innervation am Herzen lässt sich aus unseren Daten nicht sicher ableiten. Insbesondere die Kurvenverläufe beider Gruppen bei der LFP lassen hier keine weitere Interpretation zu. Dies ist jedoch möglicherweise der fehlenden Atemrhythmisierung zuzurechnen.

Die zusammenfassende Interpretation der Studie A zeigt eine sehr geringe Veränderung der kardialen Innervation durch ein 5-wöchiges Dauermethoden-Trainingsprogramm, wobei es scheint, dass sich durch ein hoch intensives Intervalltraining eine Innervationszunahme mit Verschiebung zum vagalen Tonus ergibt. Somit muss Hypothese 1 abgelehnt werden.

5.5.3 Physiologische Interpretation der Ergebnisse der Studie B

Diese 12-wöchige Ausdauertrainings-Studie bei zuvor Untrainierten hat gezeigt, dass körperliche Aktivität den vegetativen Tonus am Herzen verändert. Insbesondere der Vergleich der Probanden, welche ein Trainingsprogramm absolviert hatten, mit der Kontrollgruppe ergibt bei fast allen Herzfrequenzvariabilitäts-Parametern unterschiedliche Verläufe. Dies weist insbesondere auf eine zunehmende parasympathische Innervation des Herzens hin. Da jedoch auch die LFP- und TFP-Veränderungen in der Trainingsgruppe höher sind, ist ebenfalls zusätzlich von einem Anstieg der Sympathikusaktivität auszugehen.

Fokussiert man nun die beiden isokalorischen Trainingsgruppen, kommt es zu ähnliche Veränderungen bzw. Tendenzen:

Mit Ausnahme des LFP/HFP-Quotienten weisen sämtliche untersuchte Parameter einen Langzeiteffekt auf. Ein Gruppeneffekt und eine Interaktion zwischen diesen vom Trainingsdesign her ähnlichen Gruppen zeigt sich jedoch nicht.

Signifikante Unterschiede konnten zwischen diesen beiden Gruppen nicht herausgefiltert werden, sodass bei isokalorischen, vom Umfang und der Intensität gleichen Trainingsprogrammen, welche sich nur durch ihr Timing unterscheiden, gleiche physiologische Effekte erzielt werden.

Die LFP, HFP und insbesondere die TFP des Frequenzbereiches zeigen jedoch bei allen Trainingsgruppen eine Zunahme, was physiologisch als vermehrte sowohl parasympathische als auch sympathische Innervation zu interpretieren ist.

Zusammenfassend kann man sagen, dass ein 12 Wochen langes Ausdauertrainingsprogramm die autonome kardiale Innervation verändert. Sowohl der sympathische Schenkel und deutlich mehr noch der Parasympathikus zeigen eine trainingsinduzierte vermehrte Aktivität. Dies bedeutet, dass Hypothese 2 angenommen wird. Unterschiede zwischen zwei isokalorischen

Trainingsprogrammen mit gleichem Umfang und gleicher Intensität bei unterschiedlichem Trainingstiming zeigen sich nicht. Somit muss Hypothese 3 verworfen werden.

5.5.4 Herzfrequenzvariabilität und Ausdauerleistungsfähigkeit

Seit Langem ist bekannt, dass Ausdauersportler eine ausgeprägte Ruhebradykardie aufweisen. Erklärungsmodelle beschreiben eine erniedrigte intrinsische Herzfrequenz und einen veränderten autonomen Tonus (35, 63).

Dass sich auch die Herzfrequenzvariabilität durch Ausdauerleistungsfähigkeit verändert, ist auf Grund der Ergebnisse zahlreicher Querschnittsstudien anzunehmen (1, 8). Auch einzelne Längsschnittstudien belegen diese Ergebnisse (91, 133). Im Widerspruch hierzu stehen jedoch einige Studien, welche keine Veränderungen durch Training nachweisen konnten (19, 96). Kritisch ist hierbei die Trainingsdauer zu betrachten, die häufig nur wenige Wochen betrug. Ein weiterer erschwerender Faktor, Effekte bei der HRV heraus zu kristallisieren ist, dass es eine sehr große interindividuelle Schwankung der einzelnen HRV-Parameter gibt.

Zusammenfassend deutet vieles darauf hin, dass es klare Unterschiede zwischen Untrainierten und Sportlern bei der autonomen Innervation des Herzens gibt. Es ist davon auszugehen, dass bei Ausdauertrainierten eine verstärkte vegetative Innervation am Herzen besteht. Hierbei ist insbesondere die vagale Komponente deutlich vermehrt. Diese Hinweise lassen sich durch die physiologische Interpretation der einzelnen veränderten HRV-Parameter konstatieren.

5.5.5 Herzfrequenzvariabilität und Trainingssteuerung

Die einschlägige Fachliteratur der letzten Jahre liefert einzelne Belege, dass die Messung der Herzfrequenzvariabilität als nicht invasives Verfahren zur Trainingssteuerung eingesetzt werden kann. Insbesondere scheint die Messung der kardialen Erholung hierdurch möglich zu sein (87). Weiterhin werden vermehrt die HRV-Parameter bei Belastung und die Erholung der Werte untersucht und mit leistungsphysiologischen Daten korreliert (18, 26, 27, 99). Die zum großen Teil signifikanten Ergebnisse versuchen eine tragfähige Möglichkeit der

Trainingssteuerung und der Vermeidung von Übertrainingszuständen zu etablieren (3, 55, 61, 82).

6 Literaturverzeichnis

- 1 **Achten J, Jeukendrup AE (2003)** Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Med.* 33(7):517-38
- 2 **Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Berger AC, Cohen RJ (1981)** Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science.* 213(4504):220-2
- 3 **Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S, Buchheit M (2009)** Nocturnal heart rate variability following supramaximal intermittent exercise. *Int J Sports Physiol Perform.* 4(4):435-47
- 4 **Albinet CT, Boucard G, Bouquet CA, Audiffren M (2010)** Increased heart rate variability and executive performance after aerobic training in the elderly. *Eur J Appl Physiol.* 109(4):617-24
- 5 **Alom MM, Bhuiyan NI, Hossain MM, Hoque MF, Rozario RJ, Nessa W (2011)** Physical training induced resting bradycardia and its association with cardiac autonomic nervous activities. *Mymensingh Med J.* 20(4):665-70
- 6 **Araújo F, Antelmi I, Pereira AC, Latorre Mdo R, Grupi CJ, Krieger JE, Mansur AJ (2006)** Lower heart rate variability is associated with higher serum high-sensitivity C-reactive protein concentration in healthy individuals aged 46 years or more. *Int J Cardiol.* 107(3):333-7
- 7 **Aubert AE, Beckers F, Ramaekers D (2001)** Short-term heart rate variability in young athletes. *J Cardiol.* 37 Suppl 1:85-8
- 8 **Aubert AE, Seps B, Beckers F (2003)** Heart rate variability in athletes. *Sports Med.* 33(12):889-919
- 9 **Auracher M (2007)** Die Effektivität präventiver Ausdauertrainingsprogramme: Eine kontrollierte Längsschnittstudie zur Problematik der "Weekend Warrior" und der Intensitätswahl. Diss. Universität des Saarlandes
- 10 **Autorenkollektiv (1982)** Sportpolitische und trainingswissenschaftliche Grundlagen für den Übungsleiter. Theorie und Praxis der KK (Beiheft 1)
- 11 **Aysin B, Aysin E (2006)** Effect of respiration in heart rate variability (HRV) analysis. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 1:1776-9
- 12 **Baumert M, Brechtel L, Lock J, Voss A (2006)** Changes in heart rate variability of athletes during a training camp. *Biomed Tech (Berl).* 51(4):201-4

- 13 **Birbaumer N, Schmidt RF (eds) (2010)** Biologische Psychologie. Springer, Heidelberg
- 14 **Bonaduce D, Petretta M, Cavallaro V, Apicella C, Ianniciello A, Romano M, Breglio R, Marciano F (1998)** Intensive training and cardiac autonomic control in high level athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 30(5):691-6
- 15 **Bootsma M (1994)** Heart rate and heart rate variability as indexes of sympathovagal balance. *Am J Physiol.* 266(4 Pt 2):H1565-71
- 16 **Bosquet L, Merkari S, Arvisais D, Aubert AE (2008)** Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. *Br J Sports Med.* 42(9):709-14
- 17 **Bouchard C, Rankinen T (2001)** Individual differences in response to regular physical activity. *Med Sci Sports Exerc.* 33(6 Supp):446-51 (discussion 452-3)
- 18 **Boullosa DA, Tuimil JL, Leicht AS, Crespo-Salgado JJ. (2009)** Parasympathetic modulation and running performance in distance runners. *J Strength Cond Res.* 23(2):626-31
- 19 **Boutcher SH, 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
- 20 **Breuer HW, Skyschally A, Schulz R, Martin C, Wehr M, Heusch M (1993)** Heart rate variability and circulating catecholamine concentrations during steady state exercise in healthy volunteers. *Br Heart J.* 70(2):144-9
- 21 **Brown TE, Beightol LA, Koh J, Eckberg DL (1993)** Important influence of respiration on human R-R interval power spectra is largely ignored. *J Appl Physiol.* 75(5):2310-7
- 22 **Buchheit M, Simon C, Piquard F, Ehrhart J, Brandenberger G (2004)** Effects of increased training load on vagal-related indexes of heart rate variability: a novel sleep approach. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 287(6):H2813-8
- 23 **Buchheit M, Simon C, Viola AU, Doutreleau S, Piquard F, Brandenberger G (2004)** Heart rate variability in sportive elderly: relationship with daily physical activity. *Med Sci Sports Exerc.* 36(4):601-5
- 24 **Buchheit M, Gindre C (2006)** Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 291(1):H451-8

- 25 **Buchheit M, Laursen PB, Ahmaidi S (2007)** Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 293(1):H133-41
- 26 **Buchheit M, Al Haddad H, Millet GP, Lepretre PM, Newton M, Ahmaidi S (2009)** Cardiorespiratory and cardiac autonomic responses to 30-15 intermittent fitness test in team sport players. *J Strength Cond Res.* 23(1):93-100
- 27 **Buchheit M, Chivot A, Parouty J, Mercier D, Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S (2010)** Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *Eur J Appl Physiol.* 108(6):1153-67
- 28 **Butler J, O'Brien M, O'Mally K, Kelly JG (1982)** Relationship of beta-adrenoreceptor density to fitness in athletes. *Nature.* 298(5869):60-2
- 29 **Byrne EA, Fleg JL, Vaitkevicius PV, Wright J, Porges SW (1996)** Role of aerobic capacity and body mass index in the age-associated decline in heart rate variability. *J Appl Physiol.* 81(2):743-50
- 30 **Carter JB, Banister EW, Blaber AP (2003)** Effect of endurance exercise on autonomic control of heart rate. *Sports Med.* 33(1):33-46
- 31 **Carter JB, Banister EW, Blaber AP (2003)** The effect of age and gender on heart rate variability after endurance training. *Med Sci Sports Exerc.* 35(8):1333-40
- 32 **Christoforidi V, Koutlianos N, Deligiannis P, Kouidi E, Deligiannis A (2012)** Heart rate variability in free diving athletes. *Clin Physiol Funct Imaging.* 32(2):162-6
- 33 **Davy KP, Miniclier ML, Taylor JA, Stevenson ET, Seals DR (1996)** Elevated heart rate variability in physically active postmenopausal women: a cardioprotective effect? *Am J Physiol.* 271:H455-60
- 34 **De Meersman RE (1993)** Heart rate variability and aerobic fitness [Artikel] // *Am Heart J.* 125(3):726-31
- 35 **Dickhuth HH, Lehmann M, Auch-Schwelk W, Meinertz T, Keul J (1987)** Physical training, vegetative regulation, and cardiac hypertrophy. *J Cardiovasc Pharmacol.* 10 Suppl 6:S71-8
- 36 **Dickhuth HH, Niess AM, Röcker K, Heitkamp KH (1999)** Die Bedeutung der körperlichen Aktivität für die physiologische Streßreaktion. *Z Kardiol.* 88:305-14

- 37 **Dixon EM, Kamath MV, McCartney N, Fallen EL (1992)** Neural regulation of heart rate variability in endurance athletes and sedentary controls. *Cardiovasc Res.* 26(7):713-9
- 38 **Drinnan MJ, Allen J, Murray A (2001)** Relation between heart rate and pulse transit time during paced respiration. *Physiol Meas.* 22(3):425-32
- 39 **Earnest CP, Jurca R, Church TS, Chicharro JL, Hoyos J, Lucia A (2004)** Relation between physical exertion and heart rate variability characteristics in professional cyclists during the Tour of Spain. *Br J Sports Med.* 38(5):568-75
- 40 **Evans JM, Ziegler MG, Patwardhan AR, Ott JB, Kim CS, Leonelli FM, Knapp CF (2001)** Gender differences in autonomic cardiovascular regulation: spectral, hormonal, and hemodynamic indexes. *J Appl Physiol.* 91(6):2611-8
- 41 **Fukusaki C, Kawakubo K, Yamamoto Y (2000)** Assessment of the primary effect of aging on heart rate variability in humans. *Clin Auton Res.* 10(3):123-30
- 42 **Furuland H, Linde T, Englund A, Wikström B (2008)** Heart rate variability is decreased in chronic kidney disease but may improve with hemoglobin normalization. *J Nephrol.* 21(1):45-52
- 43 **Gamelin FX, Berthoin S, Sayah H, Libersa C, Bosquet L (2007)** Effect of training and detraining on heart rate variability in healthy young men. *Int J Sports Med.* 28(7):564-70
- 44 **Gamelin FX, Baquet G, Berthoin S, Thevenet D, Nourry C, Nottin S, Bosquet L (2009)** Effect of high intensity intermittent training on heart rate variability in prepubescent children. *Eur J Appl Physiol.* 105(5):731-8
- 45 **Gregoire J, Tuck S, Yamamoto Y, Hughson RL (1996)** Heart rate variability at rest and exercise: influence of age, gender, and physical training. *Can J Appl Physiol.* 21(6):455-70
- 46 **Gulli G, Cevese A, Cappelletto P, Gasparini G, Schena F (2003)** Moderate aerobic training improves autonomic cardiovascular control in older women. *Clin Auton Res.* 13(3):196-202
- 47 **Guzik P, Piskorski J, Krauze T, Schneider R, Wesseling KH, Wykretowicz A, Wysocki H (2007)** Correlations between the Poincaré plot and conventional heart rate variability parameters assessed during paced breathing. *J Physiol Sci.* 57(1):63-71
- 48 **Harre D et al (1982)** Trainingslehre. Berlin-Ost

- 49 **Hedelin R, Wiklund U, Bjerle P, Henriksson-Larsén K (2000)** Pre- and post-season heart rate variability in adolescent cross-country skiers. *Scand J Med Sci Sports*. 10(5):298-303
- 50 **Hellard P, Guimaraes F, Avalos M, Houel N, Hauswirth C, Toussaint JF (2011)** Modeling the association between HR variability and illness in elite swimmers. *Med Sci Sports Exerc*. 43(6):1063-70
- 51 **Hinkle LE Jr, Carver ST, Plakun A (1972)** Slow heart rates and increased risk of cardiac death in middle-aged men. *Arch Intern Med*. 129(5):732-48
- 52 **Hollmann W, Hettinger T (2000)** Sportmedizin. 4. Aufl. Schattauer, Stuttgart
- 53 **Hori K, Yamakawa M, Tanaka N, Murakami H, Kaya M, Hori S (2005)** Influence of sound and light on heart rate variability. *J Hum Ergol (Tokyo)*. 34(1-2):25-34
- 54 **Horn A (2003)** Diagnostik der Herzfrequenzvariabilität in der Sportmedizin – Rahmenbedingungen und methodische Grundlagen. Diss. Ruhr-Universität Bochum
- 55 **Hynynen E, Vesterinen V, Rusko H, Nummela A (2010)** Effects of moderate and heavy endurance exercise on nocturnal HRV. *Int J Sports Med*. 31(6):428-32.
- 56 **Iellamo F, Legramante JM, Massaro M, Raimondi G, Galante A (2000)** Effects of a residential exercise training on baroreflex sensitivity and heart rate variability in patients with coronary artery disease: A randomized, controlled study. *Circulation*. 102(21):2588-92
- 57 **Institute for Traditional Medicine** Online im Internet: URL: <http://www.itmonline.org/docs/wangshu.htm> (Stand: 22.11.2012)
- 58 **Jennings JR, Mack ME (1984)** Does aging differentially reduce heart rate variability related to respiration? *Exp Aging Res*. 10(1):19-23
- 59 **Jensen-Urstad K, Storck N, Bouvier F, Ericson M, Lindblad LE, Jensen-Urstad M (1997)** Heart rate variability in healthy subjects is related to age and gender. *Acta Physiol Scand*. 160(3):235-41
- 60 **Jovanov E (2005)** On Spectral Analysis of Heart Rate Variability during Very Slow Yogic Breathing. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 3:2467-70
- 61 **Kaikkonen P, Hynynen E, Mann T, Rusko H, Nummela A (2012)** Heart rate variability is related to training load variables in interval running exercises. *Eur J Appl Physiol*. 112(3):829-38

- 62 Kamath MV, Fallen EL, McKelvie R (1991)** Effects of steady state exercise on the power spectrum of heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc.* 23(4):428-34
- 63 Katona PG, McLean M, Dighton DH, Guz A (1982)** Sympathetic and parasympathetic cardiac control in athletes and nonathletes at rest. *J Appl Physiol.* 52(6):1652-7
- 64 Kenney WL (1985)** Parasympathetic control of resting heart rate: relationship to aerobic power. *Med Sci Sports. Exerc* 17:451-5
- 65 Kindermann W (1987)** Ergometrie-Empfehlungen für die ärztliche Praxis. *Dtsch Z Sportmed.* 38:244-322
- 66 Klabunde RE (2007)** Control of Heart Rate. *Cardiovascular Physiology Concepts.* Online im Internet: URL: <http://www.cvphysiology.com/Arrhythmias/E010.htm> (Stand: 22.11.2012)
- 67 Kuch B, Hense HW, Sinnreich R, Kark JD, von Eckardstein A, Sapoznikov D, Bolte HD (2001)** Determinants of short-period heart rate variability in the general population. *Cardiology.* 95(3):131-8
- 68 Kuo TB, Lin T, Yang CC, Li CL, Chen CF, Chou P (1999)** Effect of aging on gender differences in neural control of heart rate. *Am J Physiol.* 277(6 Pt 2):H2233-9
- 69 Kupari M, Virolainen J, Koskinen P, Tikkanen MJ (1993)** Short-term heart rate variability and factors modifying the risk of coronary artery disease in a population sample. *Am J Cardiol.* 72(12):897-903
- 70 Laitinen T, Hartikainen J, Vanninen E, Niskanen L, Geelen G, Länsimies E (1998)** Age and gender dependency of baroreflex sensitivity in healthy subjects. *J Appl Physiol.* 84(2):576-83
- 71 Lanza GA, Sgueglia GA, Cianflone D, Rebuzzi AG, Angeloni G, Sestito A, Infusino F, Crea F, Maseri A (2006)** Relation of heart rate variability to serum levels of C-reactive protein in patients with unstable angina pectoris. *Am J Cardiol.* 97(12):1702-6
- 72 Levy WC, Cerqueira MD, Harp GD, Johannessen KA, Abrass IB, Schwartz RS, Stratton JR (1998)** Effect of endurance exercise training on heart rate variability at rest in healthy young and older men. *Am J Cardiol.* 82(10):1236-41

- 73 Liao D, Barnes RW, Chambless LE, Simpson RJ Jr, Sorlie P, Heiss G (1995)** Age, race, and sex differences in autonomic cardiac function measured by spectral analysis of heart rate variability--the ARIC study. *Atherosclerosis Risk in Communities. Am J Cardiol.* 76(12):906-12
- 74 Liu W, Lian Z, Liu Y (2008)** Heart rate variability at different thermal comfort levels. *Eur J Appl Physiol.* 103(3):361-6
- 75 Loimaala A, Huikuri H, Oja P, Pasanen M, Vuori I (2000)** Controlled 5-mo aerobic training improves heart rate but not heart rate variability or baroreflex sensitivity. *J Appl Physiol.*89(5):1825-9
- 76 Löllgen D, Müeck-Weymann M, Beise RD (2009)** The deep breathing test: median-based expiration-inspiration difference is the measure of choice. *Muscle Nerve.* 39(4):536-44
- 77 Löllgen H (2000)** Kardiopulmonale Funktionsdiagnostik. Novartis Pharma GmbH, Nürnberg
- 78 Löllgen H, Gerke R (2001)** Bradykardie im Sport. *Dtsch Z Sportmed.* (52)5:180-1
- 79 Macor F, Fagard R, Amery A (1996)** Power spectral analysis of RR interval and blood pressure short-term variability at rest and during dynamic exercise: comparison between cyclists and controls. *Int J Sports Med.* 17:175-81
- 80 Madsen T, Christensen JH, Toft E, Schmidt EB (2007)** C-reactive protein is associated with heart rate variability. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 12(3):216-22
- 81 Malliani A, Lombardi F, Pagani M (1994)** Power spectrum analysis of heart rate variability: a tool to explore neural regulatory mechanisms. *Br Heart J.* 71(1):1-2
- 82 Manzi V, Castagna C, Padua E, Lombardo M, D'Ottavio S, Massaro M, Volterrani M, Iellamo F (2009)** Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 296(6):H1733-40
- 83 Martinelli FS, Chacon-Mikahil MP, Martins LE, Lima-Filho EC, Golfetti R, Paschoal MA, Gallo-Junior L (2005)** Heart rate variability in athletes and nonathletes at rest and during head-up tilt. *Braz J Med Biol Res.* 38(4):639-47

- 84 **Melanson EL, Freedson PS (2001)** The effect of endurance training on resting heart rate variability in sedentary adult males. *Eur J Appl Physiol.* 85(5):442-9
- 85 **Meyer T, Auracher M, Heeg K, Urhausen A, Kindermann W (2006)** Does cumulating endurance training at the weekends impair training effectiveness? *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil.* 13(4):578-84
- 86 **Meyer T, Auracher M, Heeg K, Urhausen A, Kindermann W (2007)** Effectiveness of low-intensity endurance training. *Int J Sports Med.* 28(1):33-9
- 87 **Myllymäki T, Rusko H, Syväoja H, Juuti T, Kinnunen ML, Kyröläinen H (2012)** Effects of exercise intensity and duration on nocturnal heart rate variability and sleep quality. *Eur J Appl Physiol.* 112(3):801-9
- 88 **Ng J, Sundaram S, Kadish AH, Goldberger JJ (2009)** Autonomic effects on the spectral analysis of heart rate variability after exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 297(4):H1421-8
- 89 **Nolan RP, Reid GJ, Seidelin PH, Lau HK (2007)** C-reactive protein modulates vagal heart rate control in patients with coronary artery disease. *Clin Sci (Lond).* 112(8):449-56
- 90 **Norton KH, Boushel R, Strange S, Saltin B, Raven PB (1999)** Resetting of the carotid arterial baroreflex during dynamic exercise in humans. *J Appl Physiol.* 87(1):332-8
- 91 **Nummela A, Hynynen E, Kaikkonen P, Rusko H (2010)** Endurance performance and nocturnal HRV indices. *Int J Sports Med.* 31(3):154-9
- 92 **Okazaki K, Iwasaki K, Prasad A, Palmer MD, Martini ER, Fu Q, Arbab-Zadeh A, Zhang R, Levine BD (2005)** Dose-response relationship of endurance training for autonomic circulatory control in healthy seniors. *J Appl Physiol.* 99:1041–49
- 93 **Orlov S, Bril V, Orszag A, Perkins BA (2012)** Heart Rate Variability and Sensorimotor Polyneuropathy in Type 1 Diabetes. *Diabetes Care.* 35(4):809-16
- 94 **Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R, Pizzinelli P, Sandrone G, Malfatto G, Dell'Orto S, Piccaluga E, Turiel M, Baselli G, Cerutti S, Malliani A (1986)** Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circ Res.* 59(2):178-93

- 95 **Patzak A, Mrowka R, Springer S, Eckard T, Ipsiroglu OS, Erler T, Hofmann S (2000)** Heart rate variability--physiology, methods of registration and application in pediatric sleep laboratory. *Wien Klin Wochenschr.* 112(5):234-50
- 96 **Perini R, Fisher N, Veicsteinas A, Pendergast DR (2002)** Aerobic training and cardiovascular responses at rest and during exercise in older men and women. *Med Sci Sports Exerc.* 34(4):700-8
- 97 **Perkiömäki JS, Jokinen V, Tapanainen J, Airaksinen KE, Huikuri HV (2008)**. Autonomic markers as predictors of nonfatal acute coronary events after myocardial infarction. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 13(2):120-9
- 98 **Pinna GD, Maestri R, Torunski A, Danilowicz-Szymanowicz L, Szwoch M, La Rovere MT, Raczak G (2007)** Heart rate variability measures: a fresh look at reliability. *Clin Sci (Lond).* 113(3):131-40
- 99 **Plews DJ, Laursen PB, Kilding AE, Buchheit M (2012)** Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *Eur J Appl Physiol.* 112(11):3729-41
- 100 **Polanczyk CA, Rohde LE, Moraes RS, Ferlin EL, Leite C, Ribeiro JP (1998)** Sympathetic nervous system representation in time and frequency domain indices of heart rate variability. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 79(1):69-73
- 101 **Pomeranz B, Macaulay RJ, Caudill MA, Kutz I, Adam D, Gordon D, Kilborn KM, Barger AC, Shannon DC, Cohen RJ, Benson H (1985)** Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 248:H151-3
- 102 **Ramaekers D, Ector H, Aubert AE, Rubens A, Van de Werf F (1998)** Heart rate variability and heart rate in healthy volunteers. Is the female autonomic nervous system cardioprotective? *Eur Heart J.* 19(9):1334-41
- 103 **Rennie KL, Hemingway H, Kumari M, Brunner E, Malik M, Marmot M (2003)** Effects of moderate and vigorous physical activity on heart rate variability in a British study of civil servants. *Am J Epidemiol.* 158(2):135-43
- 104 **Robinson BF, Epstein SE, Beiser GD, Braunwald E (1966)** Control of heart rate by the autonomic nervous system. Studies in man on the interrelation between baroreceptor mechanisms and exercise. *Circ Res.* 19(2):400-11

- 105 **Rodrigues TC, Ehrlich J, Hunter CM, Kinney GL, Rewers M, Snell-Bergeon JK (2010)** Reduced heart rate variability predicts progression of coronary artery calcification in adults with type 1 diabetes and controls without diabetes. *Diabetes Technol Ther.* 12(12):963-9
- 106 **Rosenwinkel ET, Bloomfield DM, Arwady MA, Goldsmith RL (2001)** Exercise and autonomic function in health and cardiovascular disease. *Cardiol Clin.* 19(3):369-87
- 107 **Rossy LA, Thayer JF (1998)** Fitness and gender-related differences in heart period variability. *Psychosom Med.* 60(6):773-81
- 108 **Sandercock GR, Bromley PD, Brodie DA (2006)** Effects of exercise on heart rate variability: inferences from meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 37(3):433-9
- 109 **Sandercock G, Gladwell V, Dawson S, Nunan D, Brodie D, Beneke R (2008)** Association between RR interval and high-frequency heart rate variability acquired during short-term, resting recordings with free and paced breathing. *Physiol Meas.* 29(7):795-802
- 110 **Saziorski V (1987)** Biomechanische Grundlagen der Ausdauer. Berlin-Ost
- 111 **Schäfer A, Kratky KW (2006)** The effect of colored illumination on heart rate variability. *Forsch Komplementmed.* 13(3):167-73
- 112 **Scharhag-Rosenberger F, Meyer T, Walitzek S, Kindermann W (2009)** Time course of changes in endurance capacity: a 1-yr training study. *Med Sci Sports Exerc.* 41(5):1130-7
- 113 **Scheidt A (2003)** Auswirkungen eines hochintensiven Intervalltrainings auf leistungsphysiologische und hormonelle Parameter bei jugendlichen Wettkampfschwimmern. Examensarbeit. Universität des Saarlandes
- 114 **Seals DR, Chase PB (1989)** Influence of physical training on heart rate variability and baroreflex circulatory control. *J Appl Physiol.* 66(4):1886-95
- 115 **Schuit AJ, van Amelsvoort LG, Verheij TC, Rijnke RD, Maan AC, Swenne CA, Schouten EG (1999)** Exercise training and heart rate variability in older people. *Med Sci Sports Exerc.* 31(6):816-21
- 116 **Shi X, Stevens GH, Foresman BH, Stern SA, Raven PB (1995)** Autonomic nervous system control of the heart: endurance exercise training. *Med Sci Sports Exerc.* 27:1406-13
- 117 **Shuhe W (3. Jhd. n. Chr.)** The Knowledge of Pulse Diagnosis.

- 118 **Silbernagel S, Lang F (eds) (1998)** Taschenatlas Pathophysiologie. Thieme, Stuttgart
- 119 **Singh JP, Larson MG, O'Donnell CJ, Tsuji H, Evans JC, Levy D (1999)** Heritability of heart rate variability: the Framingham Heart Study. *Circulation*. 99(17):2251-4
- 120 **Sinnreich R, Kark JD, Friedlander Y, Sapoznikov D, Luria MH (1998)** Five minute recordings of heart rate variability for population studies: repeatability and age-sex characteristics. *Heart*. 80(2):156-62
- 121 **Sloan RP, McCreath H, Tracey KJ, Sidney S, Lui K, Seeman T (2007)** RR interval variability is inversely related to inflammatory markers: the CARDIA study. *Mol Med*.13(3-4):178-84
- 122 **Soares-Miranda L, Negrao CE, Antunes-Correa LM, Nobre TS, Silva P, Santos R, Vale S, Mota J (2012)** High levels of C-reactive protein are associated with reduced vagal modulation and low physical activity in young adults. *Scand J Med Sci Sports*. 22(2):278-84
- 123 **Stróżecki P, Polak G, Manitius J (2008)** Heart rate variability (HRV) in kidney failure: measurement and consequences of reduced HRV. *Nephrol Dial Transplant*. 23(12):4085
- 124 **Sztajzel J, Jung M, Sievert K, Bayes De Luna A (2008)** Cardiac autonomic profile in different sports disciplines during all-day activity. *J Sports Med Phys Fitness*. 48(4):495-501
- 125 **Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, Yamamoto K. (1996)** Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO₂max. *Med Sci Sports Exerc*. 28(10):1327-30
- 126 **Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996)** Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation*.93(5):1043-65
- 127 **Tsuji H, Larson MG, Venditti FJ Jr, Manders ES, Evans JC, Feldman CL, Levy D (1996)** Impact of reduced heart rate variability on risk for cardiac events. The Framingham Heart Study. *Circulation*. 94(11):2850-5

- 128 Tulppo MP, Mäkikallio TH, Takala TE, Seppänen T, Huikuri HV (1996)** Quantitative beat-to-beat analysis of heart rate dynamics during exercise. *Am J Physiol.* 271(1 Pt 2):H244-52
- 129 Tulppo MP, Mäkikallio TH, Seppänen T, Laukkanen RT, Huikuri HV (1998)** Vagal modulation of heart rate during exercise: effects of age and physical fitness. *Am J Physiol.* 274(2 Pt 2):H424-9
- 130 Tulppo MP, Hautala AJ, Mäkikallio TH, Laukkanen RT, Nissilä S, Hughson RL, Huikuri HV (2003)** Effects of aerobic training on heart rate dynamics in sedentary subjects. *J Appl Physiol.* 95(1):364-72
- 131 Uusitalo AL, Tahvanainen KU, Uusitalo AJ, Rusko HK (1996)** Non-invasive evaluation of sympathovagal balance in athletes by time and frequency domain analyses of heart rate and blood pressure variability. *Clin Physiol.* 16(6):575-88
- 132 Van Hoogenhuyze D, Weinstein N, Martin GJ, Weiss JS, Schaad JW, Sahyouni XN, Fintel D, Remme WJ, Singer DH (1991)** Reproducibility and relation to mean heart rate of heart rate variability in normal subjects and in patients with congestive heart failure secondary to coronary artery disease. *Am J Cardiol.* 68(17):1668-76
- 133 Vesterinen V, Häkkinen K, Hynynen E, Mikkola J, Hokka L, Nummela A (2011)** Heart rate variability in prediction of individual adaptation to endurance training in recreational endurance runners. *Scand J Med Sci Sports.* doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01365.x.
- 134 Weineck J (2004)** *Optimales Training.* 14. Aufl. Spitta Verlag, Balingen
- 135 Ziegler D, Piolot R, Strassburger K, Lambeck H, Dannehl K (1999)** Normal ranges and reproducibility of statistical, geometric, frequency domain, and non-linear measures of 24-hour heart rate variability. *Horm Metab Res.* 31(12):672-9
- 136 Ziemann E, Grzywacz T, Łuszczuk M, Laskowski R, Olek RA, Gibson AL (2011)** Aerobic and anaerobic changes with high-intensity interval training in active college-aged men. *J Strength Cond Res.* 25(4):1104-12
- 137 Zintl F, Eisenhut A (eds) (2009)** *Ausdauertraining.* BLV Buchverlag, München
- 138 Zöllei E, Csillik A, Rabi S, Gingl Z, Rudas L (2007)** Respiratory effects on the reproducibility of cardiovascular autonomic parameters. *Clin Physiol Funct Imaging.* 27(4):205-10

7 Danksagung

Mein herzlicher Dank geht an alle, die zur Entstehung und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders möchte ich mich bedanken bei Herrn Prof. Dr. med. T. Meyer und Frau Dr. med. A. Hecksteden für die Weiterbetreuung nach dem Ausscheiden von Herrn Prof. Dr. med. A. Urhausen und Herrn Prof. Dr. med. W. Kindermann, welchen ich für die Überlassung des Themas herzlich danke.

Ein weiterer Dank geht an alle Probanden, welche an diesen beiden Studien und Untersuchungen teilgenommen haben. Einen wesentlichen Anteil am Gelingen und an der Einarbeitung hatte Herr Prof. P. B. Siegel. Herzlichen Dank!

Ohne die familiäre Unterstützung und Akzeptanz wäre diese Arbeit nicht gelungen. Meine Lebensgefährtin Frau Dr. med. Anna Maria Raisig und die Kinder Mattheo Emilian und Paula Johanna mussten häufig mich entbehren. Hierfür danke ich euch!

Publikationen:

- 12/03 **Schwarz L, Urhausen A, Sperber J, Coen B, Wilkinson JG, Kindermann W (2003)** Herzfrequenzvariabilität nach unterschiedlich intensiven Trainingsphasen bei Schwimmern. Dtsch Z Sportmed. 54(Suppl):63
- 03/04 **Siegel PB, Urhausen A, Sperber J, Kindermann W (2004)** Putting your heart into physics. Am J Phys. 72:324-32
- 10/04 **Siegel PB, Sperber J, Urhausen A, Kindermann W (2004)** Nonstationary time series analysis of heart rate variability. Los Alamos Preprint Archive: Quantitative Biology QM/0410010

8 Lebenslauf

Curriculum vitae

Zur Person

Jonas Sperber
Blücherstr. 18
66119 Saarbrücken

Geboren am 03.01.1979 in Hannover

ledig

Sohn: Mattheo Emilian Sperber, geb. am 08.04.2011

Schulische Ausbildung

09/85 - 06/98 Freie Waldorfschule Saarbrücken
Allgemeine Hochschulreife 06/98

Studium

Seit 10/99 Medizinstudium an der Universität des Saarlandes
09/01 Physikum
03/03 1. Staatsexamen
03/05 2. Staatsexamen
04/05 - 03/06 Praktisches Jahr

Praktisches Jahr

Innere Medizin Caritasklinik St. Theresia Saarbrücken
04/05 - 08/05 Kardiologie: Chefarzt Dr. med. A. Schmitt
Gastroenterologie: Chefarzt PD Dr. med. M. Lutz
Anästhesie Caritasklinik St. Theresia Saarbrücken
08/05 - 12/05 Chefarzt: Prof. Dr. med. P. Altmayer

Chirurgie Caritasklinik St. Theresia Saarbrücken
12/05 - 03/06 Allgemein Chirurgie: Chefarzt PD Dr. med. S. Frick
Unfallchirurgie und Orthopädie: Chefarzt Prof. Dr. med. W.
Kasperczyk

Klinische Tätigkeit

Seit 07/06 Knappschaftskrankenhaus Püttlingen
Assistenzarzt in der Abteilung für Allgemein-, Viszeral- und
Gefäßchirurgie : Chefarzt Prof. Dr. Th. Reck

Praktische Erfahrung

11/98 - 01/99 Rettungssanitäter – Ausbildung
11/98 - 10/99 Ersatzdienst: Rettungsdienst DRK Rettungswache Sulzbach
11/99 - 03/05 Ehrenamtlich Einsatz im Rettungsdienst

Kenntnisse

Fremdsprachen Englisch: gute Kenntnisse
Französisch: solide Grundkenntnisse
EDV Microsoft Office, Statistica, Internet

Aktivitäten

Sport Hockey: aktiver Spieler, Bundesligaschiedsrichter
Musik Bratsche: Mitwirken in Orchestern u. a. im Landes-Jugend-
Orchester des Saarlandes

9 Anhang

9.1 Ergebnisse der Studie A

Studie A								
Messzeitpunkt	VT		TW 1		TW 3		RT	
Gruppe	DM	HIT	DM	HIT	DM	HIT	DM	HIT
RR_{MW} [ms] (±Standardabweichung)	950 (±140)	924 (±97)	927 (±146)	981 (±116)	981 (±160)	1055 (±99)	906 (±140)	978 (±105)
RR_{SD} [ms] (±Standardabweichung)	114 (±38)	89 (±23)	128 (±43)	102 (±22)	98 (±33)	116 (±32)	94 (±39)	97 (±27)
LFP [ms²] (±Standardabweichung)	1282 (±916)	928 (±503)	2354 (±2230)	1250 (±888)	746 (±420)	1268 (±1033)	864 (±450)	946 (±498)
HFP [ms²] (±Standardabweichung)	2910 (±1704)	1672 (±1332)	3411 (±2514)	2083 (±1498)	2281 (±2011)	1753 (±1101)	2184 (±1513)	1988 (±1618)
LFP / HFP (±Standardabweichung)	0,600 (±0,483)	0,646 (±0,352)	0,666 (±0,485)	0,660 (±0,509)	0,573 (±0,384)	0,577 (±0,300)	0,948 (±0,592)	0,547 (±0,451)
TFP [ms²] (±Standardabweichung)	3925 (±2817)	2527 (±1508)	4886 (±2941)	4756 (±3116)	4164 (±3974)	5388 (±3000)	3974 (±2798)	4927 (±3122)

Tabelle 9: Studie A: Mittelwerte und Standardabweichung der HRV-Parameter zu den einzelnen Messzeitpunkten der DM- und der HIT-Gruppe

RR_{MW}=Mittelwert der RR-Intervall-Dauer; RR_{SD}=Standardabweichung der RR-Intervalldauer; LFP=Low Frequency Power; HFP=High Frequency Power; LFP / HFP=Low Frequency Power / High Frequency Power; TFP=Total Frequency Power; DM=Dauermethoden-Gruppe; HIT=HIT-Gruppe; VT=Vortest; TW 1=nach der ersten Trainingswoche; TW 3=nach der dritten Trainingswoche; RT=Regenerationstraining.

9.2 Ergebnisse der Studie B

Studie B					
HRV-Parameter	Gruppe				
	Kontroll- gruppe	Trainings- gruppen	Fett- stoffwechsel- gruppe	5-Tage- Gruppe	Weekend Warrior Gruppe
RR_{MW} [ms] Eingangstest (±Standardabweichung)	922 (±120)	907 (±138)	911 (±172)	904 (±96)	904 (±153)
RR_{MW} [ms] Abschlusstest (±Standardabweichung)	948 (±173)	982 (±167)	939 (±190)	992 (±139)	1018 (±177)
RR_{SD} [ms] Eingangstest (±Standardabweichung)	55 (±34)	58 (±33)	70 (±38)	51 (±29)	54 (±30)
RR_{SD} [ms] Abschlusstest (±Standardabweichung)	47 (±25)	74 (±45)	74 (±37)	74 (±45)	73 (±56)
LFP [ms²] Eingangstest (±Standardabweichung)	419 (±408)	456 (±415)	555 (±462)	431 (±411)	378 (±380)
LFP [ms²] Abschlusstest (±Standardabweichung)	451 (±396)	873 (±825)	829 (±692)	974 (±1044)	801 (±723)
HFP [ms²] Eingangstest (±Standardabweichung)	1102 (±998)	705 (±683)	882 (±945)	722 (±559)	492 (±456)
HFP [ms²] Abschlusstest (±Standardabweichung)	1254 (±1003)	1325 (±1042)	1525 (±1245)	1336 (±1029)	1095 (±851)
LFP / HFP Eingangstest (±Standardabweichung)	1,062 (±0,96)	1,372 (±1,63)	1,833 (±2,24)	1,177 (±1,55)	1,099 (±0,75)
LFP / HFP Abschlusstest (±Standardabweichung)	1,376 (±2,28)	1,342 (±2,10)	1,413 (±1,48)	0,919 (±0,90)	1,763 (±3,41)
TFP [ms²] Eingangstest (±Standardabweichung)	3560 (±2456)	2426 (±2288)	3290 (±2686)	2622 (±2482)	1252 (±722)
TFP [ms²] Abschlusstest (±Standardabweichung)	3179 (±1851)	4404 (±3572)	5144 (±4422)	3898 (±2777)	4194 (±3585)

Tabelle 10: Studie A: Mittelwerte und Standardabweichung der HRV-Parameter bei Eingangs- und Abschlusstest der einzelnen Gruppen

RR_{MW}=Mittelwert der RR-Intervall-Dauer; RR_{SD}=Standardabweichung der RR-Intervalldauer; LFP=Low Frequency Power; HFP=High Frequency Power; LFP / HFP=Low Frequency Power / High Frequency Power; TFP=Total Frequency Power.