

---

**Ausmaß, Variabilität und Zeitverlauf  
von Anpassungserscheinungen an  
ein 50-wöchiges gesundheits-  
sportliches Ausdauertraining**

---

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Philosophie  
der Philosophischen Fakultäten der Universität des Saarlandes

Vorgelegt von:  
Friederike Scharhag-Rosenberger

Saarbrücken, 2008

**Tag der Disputation:**

10.12.2008

**Dekan der Philosophischen Fakultät III:**

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jochen Kubiniok

**Berichterstatter:**

1. Univ.-Prof. Dr. phil. Eike Emrich
2. Univ.-Prof. Dr. med. Tim Meyer
3. Prof. Dr. med. Axel Urhausen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Ausdauertraining aus leistungsphysiologischer Sicht .....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Definition und Determinanten der Ausdauerleistungsfähigkeit .....	4
2.1.2	Leistungsphysiologisch relevante Trainingsadaptationen .....	6
2.1.3	Messung von Veränderungen der Ausdauerleistungsfähigkeit .....	8
<b>2.2</b>	<b>Gesundheitsprotektive Wirkung von Ausdauertraining .....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Effekte auf die Atherosklerose .....	12
2.2.2	Einfluss von Ausdauertraining auf ausgewählte kardiovaskuläre Risikofaktoren ..	12
2.2.3	Sonstige kardioprotektive Trainingsadaptationen .....	16
2.2.4	Ausdauertraining und Gewichtskontrolle .....	16
2.2.4.1	Einfluss von Ausdauertraining auf den Fettstoffwechsel .....	16
2.2.4.2	Einfluss von Ausdauertraining auf den Ruheumsatz .....	17
<b>2.3</b>	<b>Ausmaß, Variabilität und Zeitverlauf von Anpassungserscheinungen an gesundheitssportliches Ausdauertraining .....</b>	<b>19</b>
2.3.1	Das Ausmaß von Adaptationen an lange Ausdauertrainingsprogramme .....	19
2.3.2	Die Variabilität von Ausdauertrainingseffekten .....	22
2.3.3	Der Zeitverlauf von Adaptationen an lange Ausdauertrainingsprogramme .....	25
<b>2.4</b>	<b>Untersuchungsziel und Operationalisierung .....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Studiendesign .....</b>	<b>31</b>
3.1.1	Allgemeiner Studienablauf .....	31
3.1.2	Probanden .....	33
3.1.3	Ausdauertraining .....	33
3.1.4	Ausschlusskriterien .....	34
3.1.5	Eignungs- und Gewöhnungstest .....	35
3.1.6	Laufbandtests .....	35

---

3.1.7	Fahrradergometrien .....	37
3.1.8	Submaximale Feldstufentests .....	38
3.1.9	Ruheumsatzmessungen.....	40
3.1.10	Venöse Blutentnahmen.....	41
3.1.11	Festlegung der Hauptzielparameter .....	41
<b>3.2</b>	<b>Messmethodik.....</b>	<b>42</b>
3.2.1	Anthropometrische Daten .....	42
3.2.2	EKG und Herzfrequenzmessung.....	42
3.2.3	Laktatbestimmung .....	43
3.2.4	Spiroergometrie .....	43
3.2.5	Blutanalysen.....	44
<b>3.3</b>	<b>Abhängige und unabhängige Variablen.....</b>	<b>45</b>
3.3.1	Herzfrequenzvorgaben für das Ausdauertraining .....	45
3.3.2	Compliance .....	46
3.3.3	Anthropometrische Daten .....	47
3.3.4	Maximale Parameter.....	47
3.3.5	Leistungskurven .....	48
3.3.6	Individuelle anaerobe Schwelle.....	49
3.3.7	Ruheumsatz .....	49
3.3.8	Ermittlung von Nonrespondern.....	50
<b>3.4</b>	<b>Statistik .....</b>	<b>51</b>
3.4.1	Abschätzung der notwendigen Stichprobengröße .....	51
3.4.2	Statistische Untersuchung des Datenmaterials .....	52
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Probanden.....</b>	<b>55</b>
4.1.1	Dropouts.....	55
4.1.2	Anthropometrische Daten, Arbeits- und Sportanamnese der Probanden .....	55
4.1.3	Compliance .....	56
<b>4.2</b>	<b>Charakterisierung des Ausdauertrainings.....</b>	<b>57</b>

---

<b>4.3</b>	<b>Umgebungsbedingungen während der Datenaufnahme .....</b>	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Laufbandtests .....</b>	<b>60</b>
4.4.1	Körpergewicht, Körperfettanteil und fettfreie Körpermasse.....	60
4.4.2	Ruheherzfrequenz und Ruheblutdruck .....	61
4.4.3	Ausbelastung.....	62
4.4.4	Maximale Laufgeschwindigkeit und maximale Sauerstoffaufnahme.....	63
4.4.5	Herzfrequenzleistungskurve.....	65
4.4.6	Laktatleistungskurve .....	66
4.4.7	Submaximaler Respiratorischer Quotient und Fettstoffwechsel .....	67
4.4.8	Submaximale Sauerstoffaufnahme.....	71
4.4.9	Übersicht über die Zeitverläufe der Trainingsadaptationen.....	72
<b>4.5</b>	<b>Submaximale Feldstufentests .....</b>	<b>72</b>
<b>4.6</b>	<b>Fahrradergometrien .....</b>	<b>75</b>
4.6.1	Ausbelastung.....	75
4.6.2	Maximale Leistung und höchste Sauerstoffaufnahme.....	75
4.6.3	Herzfrequenzleistungskurve.....	77
4.6.4	Laktatleistungskurve und individuelle anaerobe Schwelle .....	77
4.6.5	Belastungsblutdruck .....	79
<b>4.7</b>	<b>Ruheumsatzmessungen .....</b>	<b>80</b>
<b>4.8</b>	<b>Laborparameter .....</b>	<b>82</b>
<b>4.9</b>	<b>Nonresponder .....</b>	<b>84</b>
<b>4.10</b>	<b>Einflussfaktoren auf die Trainingsadaptationen .....</b>	<b>85</b>
4.10.1	Alter .....	85
4.10.2	Geschlecht .....	86
4.10.3	Ausgangsniveau .....	87
4.10.4	Compliance .....	87
4.10.5	Vorhersagewert der potenziellen Einflussfaktoren.....	88
<b>4.11</b>	<b>Ergebnisse der Dropouts .....</b>	<b>89</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>91</b>

---

<b>5.1</b>	<b>Ausmaß der Trainingsadaptationen</b> .....	<b>93</b>
5.1.1	Maximale Sauerstoffaufnahme, Ruheherzfrequenz, Herzfrequenzleistungskurve und Laktatleistungskurve .....	93
5.1.2	Fettstoffwechsel und Laufökonomie .....	97
5.1.3	Maximale fahrradergometrische Leistung, individuelle anaerobe Schwelle und sonstige nicht sportartspezifische leistungsphysiologische Trainingsadaptationen .....	100
5.1.4	Anthropometrische Daten, Blutdruck, Ruheumsatz und Laborwerte .....	101
5.1.5	Effekt des Ausdauertrainings auf die Langlebigkeit – Vergleiche mit der Literatur .....	106
<b>5.2</b>	<b>Variabilität der Trainingsadaptationen</b> .....	<b>106</b>
<b>5.3</b>	<b>Zeitverläufe der Trainingsadaptationen</b> .....	<b>110</b>
<b>5.4</b>	<b>Methodenkritik</b> .....	<b>116</b>
<b>5.5</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>122</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>124</b>
	<b>Erklärung</b> .....	<b>139</b>
	<b>Dank</b> .....	<b>140</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des Studiendesigns (Abkürzungen siehe Text)...	31
Abbildung 2:	Exemplarische Darstellung eines Laufbandtestprotokolls.....	36
Abbildung 3:	Exemplarische Darstellung eines Fahrradergometrieprotokolls.....	37
Abbildung 4:	Exemplarische Darstellung eines Feldstufentestprotokolls.....	38
Abbildung 5:	Studienteilnehmer beim submaximalen Feldstufentest (aufleuchtendes Licht zur Geschwindigkeitsvorgabe am Rand der Tartanbahn). ....	39
Abbildung 6:	Aufbau der spiroergometrischen Messplätze. ....	44
Abbildung 7:	Blutlaktatkonzentrationen während des Ausdauertrainings in der elften und 47. Trainingswoche (MW $\pm$ SD; n = 10). ....	58
Abbildung 8:	Entwicklung der HF <sub>Ruhe</sub> im Trainingsverlauf (MW $\pm$ SD; n = 18). ....	61
Abbildung 9:	Entwicklung der V <sub>max</sub> bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW $\pm$ SD; n = 17). ....	64
Abbildung 10:	Entwicklung der VO <sub>2max</sub> bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW und SD; n = 17).....	64
Abbildung 11:	Entwicklung der HF-Leistungskurve bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW $\pm$ SD; n = 18).....	66
Abbildung 12:	Entwicklung der La-Leistungskurve bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (Mediane und Quartile; n = 18). Die Tests in der 25. und 37. Trainingswoche (unterbrochene Linien) sind nicht in die Auswertung eingegangen.....	67
Abbildung 13:	Entwicklung des RQ auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW $\pm$ SD; n = 17).....	68
Abbildung 14:	Entwicklung des prozentualen Fettstoffwechselanteils auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW $\pm$ SD; n = 17). ....	69
Abbildung 15:	Entwicklung der Fettflussrate auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW $\pm$ SD; n = 17).....	69
Abbildung 16:	Entwicklung der VO <sub>2</sub> auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (Mediane und Quartile; n = 18). ....	71
Abbildung 17:	Übersicht über die Zeitverläufe der Trainingsadaptationen von HF-Leistungskurve, Leistungskurve des RQ, VO <sub>2max</sub> und HF <sub>Ruhe</sub> (MW; VO <sub>2max</sub> und Leistungskurve des RQ: n = 17, ansonsten: n = 18).....	72
Abbildung 18:	Entwicklung der HF-Leistungskurve bei den submaximalen Feldstufentests im vierwöchentlichen Testrhythmus (MW $\pm$ SD; n = 18). ....	73
Abbildung 19:	Entwicklung der HF-Leistungskurve bei den submaximalen Feldstufentests in den ersten elf Trainingswochen im 14-täglichen Testrhythmus (MW $\pm$ SD; n = 18). ....	74

---

Abbildung 20:	$P_{\max}$ bei den Fahrradergometrien (MW und SD; n = 18). .....	76
Abbildung 21:	$VO_{2\text{peak}}$ bei den Fahrradergometrien (MW und SD; n = 18). .....	76
Abbildung 22:	HF-Leistungskurve bei den Fahrradergometrien (MW $\pm$ SD; Stufe 1 bis 3: n = 18; Stufe 4 (nicht in die Auswertung eingegangen): n = 15). .....	77
Abbildung 23:	La-Leistungskurve bei den Fahrradergometrien (Mediane und Quartile; Stufe 1 bis 3: n = 18; Stufe 4 (nicht in die Auswertung eingegangen): n = 15).....	78
Abbildung 24:	IAS bei den Fahrradergometrien (Mediane und Quartile; n = 15). .....	78
Abbildung 25:	Entwicklung des Ruheumsatzes im Trainingsverlauf (MW und SD; n = 17). .	80
Abbildung 26:	Entwicklung des Ruheumsatzes pro kg Körpergewicht (ausgefüllte Balken) und pro kg fettfreie Körpermasse (leere Balken) im Trainingsverlauf (MW und SD; n = 17).....	81
Abbildung 27:	Entwicklung des mittleren prozentualen Anteils der Kohlenhydrat- (KH) und Fettverstoffwechslung (Fette) am Ruheumsatz im Trainingsverlauf (MW; n = 17). .....	81
Abbildung 28:	Entwicklung von Hämoglobin und Cholesterin im Trainingsverlauf (MW $\pm$ SD; n = 18). .....	83

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anthropometrische Daten der Versuchspersonen beim Eingangstest (n = 18). .....	56
Tabelle 2:	Mittlere Anzahl der wöchentlich absolvierten Trainingseinheiten (TE pro Woche), deren durchschnittliche Dauer (Dauer TE) sowie mittlerer prozentualer Anteil der Trainingszeit innerhalb der vorgegebenen Herzfrequenzzone (Anteil in Zone) in den vier Zeiträumen zwischen den Laufbandtests (MW $\pm$ SD, Min – Max; n = 18).....	57
Tabelle 3:	Charakterisierung des Ausdauertrainings (MW $\pm$ SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 18). .....	57
Tabelle 4:	Laufgeschwindigkeit mit Trainingsherzfrequenz ( $V_{HF-Vorgabe}$ ) und die daraus errechnete Strecke, die von den Probanden während einer 45-minütigen Trainingseinheit zurückgelegt wurde, zu den einzelnen Testzeitpunkten (MW $\pm$ SD, Min – Max; n = 18).....	58
Tabelle 5:	Temperatur in den Untersuchungsräumen während der Laufbandtests (LB), Fahrradergometrien (FS) und Ruheumsatzmessungen (RU; MW $\pm$ SD, Min – Max; LB und FS: n = 18; RU: n = 17).....	59
Tabelle 6:	Körpergewicht (Gewicht), Körperfettanteil (KF) und fettfreie Körpermasse (FFM) der Probanden zu den einzelnen Testzeitpunkten (MW $\pm$ SD, Min – Max; n = 18).....	60
Tabelle 7:	$HF_{Ruhe}$ und $RR_{Ruhe}$ (systolisch/diastolisch) zu den einzelnen Testzeitpunkten ( $HF_{Ruhe}$ : MW $\pm$ SD, Min – Max; $RR_{Ruhe}$ : Mediane, Min – Max; n = 18).....	61
Tabelle 8:	Levelling-off der $VO_2$ , $HF_{max}$ , $La_{max}$ und $RQ_{max}$ sowie Belastungsdauer (Dauer Test) und Rampendauer (Dauer Rampe) bei den Laufbandtests (n oder MW $\pm$ SD, Min – Max; $RQ_{max}$ : n = 16, ansonsten: n = 17). .....	62
Tabelle 9:	$V_{max}$ und $VO_{2max}$ bei den Laufbandtests (MW $\pm$ SD, Min – Max; n = 17). .....	65
Tabelle 10:	Verschiebung der HF-Leistungskurve ( $\Delta$ HF-LK) bei den Laufbandtests von einem Test zum nächsten (MW $\pm$ SD, Spannen; n = 18). .....	66
Tabelle 11:	Verschiebungen der Leistungskurven von RQ ( $\Delta$ RQ-LK), prozentualem Fettstoffwechselanteil ( $\Delta$ Fettanteil-LK) und Fettflussrate ( $\Delta$ Fettfluss-LK) bei den Laufbandtests von einem Test zum nächsten (MW $\pm$ SD, Spannen; n = 17). .....	70
Tabelle 12:	Verschiebung der Leistungskurve der $VO_2$ ( $\Delta$ $VO_2$ -LK) bei den Laufbandtests von einem Test zum nächsten (MW $\pm$ SD, Spannen; n = 18).....	71
Tabelle 13:	Verschiebung der HF-Leistungskurve ( $\Delta$ HF-LK) während der submaximalen Feldstufentests im vierwöchentlichen Testrhythmus (MW $\pm$ SD, Spannen; n = 18). .....	73
Tabelle 14:	Verschiebung der HF-Leistungskurve ( $\Delta$ HF-LK) während der submaximalen Feldstufentests in den ersten elf Trainingswochen im 14-täglichen Testrhythmus (MW $\pm$ SD, Spannen; n = 18).....	74
Tabelle 15:	Levelling-off der $VO_2$ , $HF_{max}$ , $La_{max}$ und $RQ_{max}$ bei den Fahrradergometrien (n oder MW $\pm$ SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 18). .....	75

---

Tabelle 16:	$P_{\max}$ , und $VO_{2\text{peak}}$ bei den Fahrradergometrien (MW $\pm$ SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 18).....	76
Tabelle 17:	IAS bei den Fahrradergometrien (MW $\pm$ SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 15).....	79
Tabelle 18:	Systolischer und diastolischer Belastungsblutdruck während der Fahrradergometrien (Mediane (Quartile), Min – Max; n = 17).....	79
Tabelle 19:	Ruheumsatz und prozentualer Fettstoffwechselanteil (Fettanteil) in Ruhe zu den drei Messzeitpunkten (MW $\pm$ SD, Min – Max; n = 17).....	81
Tabelle 20:	Laborparameter zu den einzelnen Testzeitpunkten (MW $\pm$ SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 18).....	82
Tabelle 21:	Schematische Übersicht darüber, bei welchen Probanden welche Hauptzielparameter keine Trainingsadaptationen zeigten (weiße Felder: Verbesserung; schwarze Felder: keine Verbesserung; graue Felder: Proband ist nicht in die Auswertung eingegangen; $HF_{\text{Ruhe}}$ und $HF\text{-}LK_{\text{LB}}$ : n = 18; $VO_{2\text{maxLB}}$ und $RQ\text{-}LK_{\text{LB}}$ : n = 17; $IAS_{\text{FS}}$ : n = 15).....	84
Tabelle 22:	Aufteilung der Probanden, bei denen sich einzelne Hauptzielparameter nicht veränderten, nach der Intensität ihres Trainingsreizes ins obere Quartil, in den Interquartilsbereich oder ins untere Quartil der Gesamtstichprobe. ....	85
Tabelle 23:	Ergebnisse der Korrelationen des Alters der Probanden mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest.....	86
Tabelle 24:	Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest bei den männlichen vs. den weiblichen Studienteilnehmern. .86	86
Tabelle 25:	Ergebnisse der Korrelationen des Ausgangsniveaus mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest. ....	87
Tabelle 26:	Ergebnisse der Korrelationen der im Mittel absolvierten Trainingseinheiten pro Woche (TE pro Woche) mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest.....	88
Tabelle 27:	Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen der potenziellen Einflussfaktoren Alter, Geschlecht, Ausgangsniveau und Compliance mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter von Eingangs- zum Abschlusstest.....	88
Tabelle 28:	Vergleich der Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangstest zum Test in der 25. Trainingswoche von den vier Dropouts, die bis zu mindestens diesem Test teilnahmen, mit den ausgewerteten Studienteilnehmern. ....	89

## Abkürzungsverzeichnis

$\alpha$	Signifikanzgrenze
ACSM	American College of Sports Medicine
AHA	American Heart Association
ANOVA	Varianzanalyse
avDO <sub>2</sub>	arterio-venöse Sauerstoffdifferenz
BE	Blutentnahme
Beta	Regressionskoeffizient bei der multiplen Regressionsanalyse
BMI	Body-Mass-Index
BSG	Blutkörperchensenkungsgeschwindigkeit
Chi <sup>2</sup>	Prüfgröße bei der Friedman-ANOVA
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CRP	C-reaktives Protein
d	Tag
diff	bedeutsame Mindestdifferenz
EDTA	Ethylen-Diamin-Tetra-Acetat
EKG	Elektrokardiogramm
EPOC	excess post-exercise oxygen consumption
ES	Effektgröße
F	Prüfgröße bei der ANOVA
Fat <sub>max</sub>	Intensität, bei der die höchste Fettflussrate auftritt
Fettanteil-LK	Leistungskurve des prozentualen Fettstoffwechselanteils
Fettfluss-LK	Leistungskurve der Fettflussrate
FFM	fettfreie Körpermasse
FS	Fahrradergometrie sitzend
FST	submaximaler Feldstufentest
HDL-Cholesterin	Lipoprotein hoher Dichte
HF	Herzfrequenz
HF-LK	Herzfrequenzleistungskurve
HF-LK <sub>LB</sub>	Herzfrequenzleistungskurve beim Laufbandtest
HF <sub>max</sub>	maximale Herzfrequenz
HF-Reserve	Herzfrequenz-Reserve
HF <sub>Ruhe</sub>	Ruheherzfrequenz
IAS	individuelle anaerobe Schwelle
IAS <sub>FS</sub>	individuelle anaerobe Schwelle bei der Fahrradergometrie
kcal	Kilokalorien
KF	Körperfettanteil
KG	Körpergewicht

---

KH	Kohlenhydrate
KHK	koronare Herzkrankheit
KI	Konfidenzintervall
La	Laktat
La-LK	Laktatleistungskurve
La <sub>max</sub>	maximale Blutlaktatkonzentration
LB	Laufbandtest
LDL-Cholesterin	Lipoprotein geringer Dichte
LK	Leistungskurve
Max	Maximum
MET	metabolisches Äquivalent
Min	Minimum
mmHg	Millimeter auf der Quecksilbersäule
MW	Mittelwert
n	Anzahl der Versuchspersonen
NO	Stickstoffmonoxid
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
p	Fehlerwahrscheinlichkeit
PAVK	periphere arterielle Verschlusskrankheit
P <sub>max</sub>	maximale Leistung
r	Korrelationskoeffizient bei der Pearsonschen Produkt-Moment-Korrelation
R	Korrelationskoeffizient bei der Spearmanschen Rangkorrelation
R	Korrelationskoeffizient bei der multiplen Regressionsanalyse
RQ	Respiratorischer Quotient
RQ-LK	Leistungskurve des Respiratorischen Quotienten
RQ-LK <sub>LB</sub>	Leistungskurve des Respiratorischen Quotienten beim Laufbandtest
RQ <sub>max</sub>	maximaler Respiratorischer Quotient
RR	Blutdruck
RR <sub>Ruhe</sub>	Ruheblutdruck
RU	Ruheumsatz bzw. Ruheumsatzmessung
SD	Standardabweichung
STPD	standard temperature pressure dry
t	Prüfgröße beim t-Test
T	Prüfgröße beim Wilcoxon-Test
TE	Trainingseinheiten
U	Prüfgröße beim Mann-Whitney-Test
v	intraindividuelle Variabilität
V	Geschwindigkeit
VCO <sub>2</sub>	Kohlendioxidabgabe
V <sub>E</sub>	Atemminutenvolumen

---

$V_{\text{HF-Vorgabe}}$	Laufgeschwindigkeit mit Trainingsherzfrequenz
$V_{\text{max}}$	maximale Laufgeschwindigkeit
Vol%	Volumenprozent
$\text{VO}_2$	Sauerstoffaufnahme
$\text{VO}_2\text{-LK}$	Leistungskurve der Sauerstoffaufnahme
$\text{VO}_{2\text{max}}$	maximale Sauerstoffaufnahme
$\text{VO}_{2\text{maxLB}}$	maximale Sauerstoffaufnahme beim Laufbandtest
$\text{VO}_{2\text{peak}}$	höchste Sauerstoffaufnahme
W	Watt
$W_x$	Trainingswoche x
$\Delta$	Differenz bzw. Verschiebung
♀	weiblich
♂	männlich

# 1 Zusammenfassung

Bislang liegen kaum wissenschaftlich gesicherte Informationen darüber vor, welches Ausmaß, welche Variabilität und welchen Zeitverlauf Anpassungserscheinungen innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings aufweisen. Die meisten Ausdauertrainingsstudien dauerten nur wenige Monate oder untersuchten für Sporteinsteiger ungeeignete intensive Trainingsprogramme. Kenntnisse der genannten Parameter erscheinen notwendig, um Gesundheitssportler zu betreuen und zukünftige Ausdauertrainingsstudien zu planen. Daher sollten im Rahmen der vorliegenden Studie das Ausmaß, die Variabilität und der Zeitverlauf von verschiedenen leistungsphysiologischen und gesundheitsbezogenen Anpassungserscheinungen an ein gesundheitssportliches Ausdauertraining über ein Jahr untersucht werden.

Achtzehn initial untrainierte Probanden (7 ♂/ 11 ♀;  $42 \pm 5$  Jahre; Body-Mass-Index:  $24,3 \pm 2,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ; maximale Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ):  $37,7 \pm 4,6 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) schlossen ein 50-wöchiges Ausdauertrainingsprogramm, bestehend aus dreimal wöchentlich 45 min Laufen oder Walking mit 60 % ihrer initialen Herzfrequenz (HF)-Reserve, ab. Die HF-Vorgabe für das Ausdauertraining blieb im Trainingsverlauf konstant. Alle Trainingseinheiten wurden mittels portabler HF-Messgeräte aufgezeichnet. Laufbandtests zur Bestimmung von HF, Blutlaktatkonzentration und Atemgasparametern sowie venöse Blutentnahmen wurden im Rahmen eines Eignungs- und Gewöhnungstests, eines Eingangstests sowie nach drei, sechs, neun und zwölf Monaten Training durchgeführt. Zusätzlich erfolgten Fahrradergometrien vor Trainingsbeginn und nach Abschluss des Trainings sowie spirometrische Messungen des Ruheumsatzes vor Trainingsbeginn, nach sechs und nach zwölf Monaten Training. Submaximale Feldstufentests zur Bestimmung der HF-Leistungskurve wurden ergänzend innerhalb der ersten drei Trainingsmonate 14-tägig und im weiteren Studienverlauf vierwöchentlich durchgeführt.

Im Mittel trainierten die Probanden während der einjährigen Trainingsphase an  $2,8 \pm 0,2$  Tagen pro Woche jeweils  $48 \pm 3$  min. In den vier Zeitabschnitten zwischen den Laufbandtests war die Compliance jeweils gleich ( $p > 0,20$ ;  $n = 18$ ). Die Blutlaktatkonzentration während des Ausdauertrainings sank signifikant von im Mittel  $1,4 \pm 0,2 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  in der elften Trainingswoche auf im Mittel  $1,2 \pm 0,2 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  in der 47. Trainingswoche ( $p < 0,01$ ;  $n = 10$ ). Durch das Ausdauertraining veränderte sich das Körpergewicht der Studienteilnehmer nicht signifikant ( $p = 0,17$ ;  $n = 18$ ), während sich der Körperfettanteil signifikant um insgesamt im Mittel  $-3,7 \pm 2,3 \%$  ( $-7,8$  bis  $+1,8 \%$ ) veränderte ( $p < 0,001$ ;  $n = 18$ ). Die  $\text{VO}_{2\text{max}}$  veränderte sich im Trainingsverlauf signifikant um insgesamt durchschnittlich  $+5,7 \pm 4,1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $-1,1$  bis  $+13,8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ;  $n = 17$ ). Nach drei, sechs bzw. neun Monaten Training waren durchschnittlich 58, 75 bzw. 84 % der Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht. Bei vier der 17 Probanden stieg die  $\text{VO}_{2\text{max}}$  im Trainingsverlauf nicht an. Die Ruheherzfrequenz

quenz der Probanden veränderte sich insgesamt um durchschnittlich  $-9 \pm 6 \text{ min}^{-1}$  (-24 bis  $+1 \text{ min}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ;  $n = 18$ ) und 47 bzw. 102 % der Ein-Jahres-Gesamtveränderung waren nach drei bzw. sechs Monaten Training erreicht. Vier der 18 Studienteilnehmer zeigten keine Abnahme der Ruheherzfrequenz im Trainingsverlauf. Die HF-Leistungskurve beim Laufbandtest verschob sich durch das Ausdauertraining insgesamt um im Mittel  $-11 \pm 7 \text{ min}^{-1}$  (-22 bis  $+1 \text{ min}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ;  $n = 18$ ). Nach drei bzw. sechs Monaten Training waren 93 bzw. 101 % der Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht. Bei drei der 18 Probanden verschob sich die HF-Leistungskurve nicht. Die submaximalen Feldstufentests zeigten, dass sich die HF-Leistungskurve nach der neunten Trainingswoche nicht mehr signifikant verschob ( $p \geq 0,59$ ;  $n = 18$ ). Die Leistung an der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) im fahradergometrischen Stufentest veränderte sich im Trainingsverlauf signifikant um durchschnittlich  $+16 \pm 9 \text{ W}$  (-1 bis  $+35 \text{ W}$ ;  $p < 0,001$ ;  $n = 15$ ). Bei einem von 15 Studienteilnehmern war kein Anstieg zu beobachten. Der Ruheumsatz der Probanden stieg im Studienverlauf weder absolut noch körperrgewichtbezogen signifikant an ( $p = 0,43$  bzw.  $p = 0,27$ ;  $n = 17$ ). Auch der Gesamtcholesterinspiegel und die Unterfraktionen HDL- und LDL-Cholesterin veränderten sich nicht signifikant ( $p = 0,21$  bzw.  $p = 0,22$  bzw.  $p = 0,16$ ;  $n = 18$ ). Unter den Studienteilnehmern gab es insgesamt keine „Nonresponder“ in dem Sinne, dass alle Deskriptoren der Ausdauerleistungsfähigkeit ohne Effekt blieben.

Alle untersuchten Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit hatten nach sechs Trainingsmonaten mindestens 75 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht. Es erscheint für Gesundheitssportler daher empfehlenswert, ihre Trainingsvorgabe nach etwa diesem Zeitraum zu erhöhen, um weiterhin Leistungsverbesserungen zu erzielen. Ob eine Erhöhung der Trainingsintensität oder des Trainingsumfangs zu bevorzugen ist, geht aus dieser Untersuchung nicht hervor. Da die HF-Leistungskurve bereits nach drei Monaten Training über 90 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht hatte, scheint sie bei längeren Ausdauertrainingsstudien mit konstanter Trainingsvorgabe der gewählten Intensität und Dauer keinen geeigneten Parameter zur Dokumentation von Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit darzustellen. Bei etwa 70 % der Studienteilnehmer blieb mindestens ein Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit unverändert. Zur kompletten Dokumentation und Charakterisierung individueller Leistungsverbesserungen sollten daher Parameter unterschiedlicher Adaptations- und Messebenen erfasst werden. Die vorliegende Untersuchung wirft Zweifel an der Existenz von globalen Nonrespondern bei gesundheitssportlichem Ausdauertraining auf, weil sich bei jedem Studienteilnehmer mindestens zwei von fünf Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit veränderten. Untersuchungen an großen Stichproben sind notwendig, um die Existenz von Ausdauertrainings-Nonrespondern zu klären. Bei konstanter Trainingsvorgabe von 60 % HF-Reserve sind nach einem Jahr dreimal wöchentlich 45 min Ausdauertraining im Mittel Anstiege der  $\text{VO}_{2\text{max}}$  um etwa  $6 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  sowie Absenkungen der Ruheherzfrequenz und der HF-Leistungskurve um etwa  $10 \text{ min}^{-1}$  zu erwarten.

## 2 Einleitung

Als der Homo sapiens in der Steinzeit durch seine Jagdreviere zog, legte er Schätzungen zufolge täglich etwa 15 km zu Fuß zurück (39). Aus genetischer Sicht hat sich der Mensch seitdem nur marginal verändert, sein Lebensstil hingegen ist ein vollkommen anderer geworden. Wer in den westlichen Industrienationen lebt, wendet im Vergleich zu seinen steinzeitlichen Vorfahren für körperliche Aktivität<sup>1</sup> täglich etwa 62 % weniger Energie pro Kilogramm Körpergewicht auf, was mit einer deutlich reduzierten Ausdauerleistungsfähigkeit einher geht (39). Dieser Bewegungsmangel führt zur Entstehung so genannter Zivilisationskrankheiten, wie beispielsweise der Atherosklerose oder dem Metabolischen Syndrom. Aktuell machen solche Erkrankungen zusammen beinahe drei Viertel aller Todesursachen in der westlichen Welt aus und stellen eine zunehmende volkswirtschaftliche Belastung dar (56). Untersuchungen aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts haben gezeigt, dass gesundheitssportliches Ausdauertraining nicht nur die Ausdauerleistungsfähigkeit verbessert, sondern auch der Entstehung verschiedener chronisch-degenerativer Erkrankungen entgegen wirkt.

Erkenntnisse über geeignete Trainingsvorgaben für Gesundheitssportler werden regelmäßig von Fachgesellschaften wie dem American College of Sports Medicine (ACSM) zusammengefasst und als Empfehlungen publiziert (1, 2). Obwohl viele Sporteinsteiger nach diesen Empfehlungen trainieren, wurde bislang kaum untersucht, wie groß längerfristige Effekte eines solchen Trainings sind, welche interindividuelle Variabilität sie aufweisen und wie sie sich im Zeitverlauf verhalten. Wissenslücken über die Charakteristik der Adaptationen im ersten Jahr nach Beginn eines Ausdauertrainings erschweren es, Gesundheitssportler zu betreuen und zukünftige Ausdauertrainingsstudien zu planen. So können Gesundheitssportlern beispielsweise keine wissenschaftlich gesicherten Informationen darüber an die Hand gegeben werden, mit welchem Ausmaß von Anpassungserscheinungen sie innerhalb ihres ersten Trainingsjahres rechnen können, wie sicher überhaupt Verbesserungen auftreten und ob die Fortschritte im Zeitverlauf gleichmäßig vonstatten gehen. Durch genauere Kenntnisse über das Verhalten der Trainingsadaptationen könnten zukünftige Ausdauertrainingsstudien in angemessener Länge mit geeigneten Zielvariablen und adäquatem Stichprobenumfang geplant werden. Daher sollten im Rahmen der vorliegenden Studie das Ausmaß, die Variabilität und der Zeitverlauf von verschiedenen leistungsphysiologischen und gesundheitsbezogenen Anpassungserscheinungen innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines üblichen gesundheitssportlichen Ausdauertrainings untersucht werden.

---

<sup>1</sup> Die Begriffe „körperliche Aktivität“, „Bewegung“ und „Sport“ beziehen sich der Tradition sportwissenschaftlicher Forschung in medizinischen Fragen entsprechend lediglich auf physiologische Aspekte.

## 2.1 Ausdauertraining aus leistungsphysiologischer Sicht

Gesundheitssportlich orientiertes Ausdauertraining führt sowohl zu einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit als auch zu verschiedenen gesundheitsprotektiven Adaptationen (87, 88). Diese beiden Wirkungen können nicht streng voneinander getrennt werden. Einige Parameter, wie beispielsweise die submaximale Belastungsherzfrequenz oder der Fettstoffwechsel, sind nämlich sowohl aus leistungsphysiologischer als auch aus gesundheitlicher Perspektive von Bedeutung. Außerdem bringt jede Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit – wie später ausführlicher erklärt – auch eine Reduktion des gesundheitlichen Risikos mit sich. Der Übersichtlichkeit halber sind im Folgenden dennoch zunächst primär leistungsphysiologisch relevante und im Anschluss primär gesundheitlich relevante Adaptationen an gesundheitssportliches Ausdauertraining dargestellt.

### 2.1.1 Definition und Determinanten der Ausdauerleistungsfähigkeit

Ausdauer kann als Fähigkeit definiert werden, eine gegebene Leistung über einen möglichst langen Zeitraum durchhalten zu können (87). Sie wird daher auch als „Ermüdungswiderstandsfähigkeit“ bezeichnet. Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit bedeuten im Hinblick auf gesundheits- oder freizeitsportlichen Dauerlauf also ein längeres Durchhaltevermögen bei gegebener Laufgeschwindigkeit bzw. eine höhere mögliche Laufgeschwindigkeit bei gegebener Strecke.

Die Ausdauerleistungsfähigkeit wird beim gesundheitssportlichen Dauerlauf im Wesentlichen dadurch bestimmt, wie lange und wie schnell Energie auf aerobem Weg bereitgestellt werden kann. Das ist wiederum von den Funktionen verschiedener Organsysteme abhängig, die in periphere und zentrale Funktionen eingeteilt werden können (87). Unter peripheren Funktionen versteht man alle Vorgänge, die auf der Ebene der Skelettmuskulatur ablaufen. Bei gesunden Menschen sind insbesondere die folgenden peripheren Funktionen leistungslimitierend (87):

- Energieproduktionskapazität des mitochondrialen Stoffwechsels
- intrazelluläres Sauerstoffangebot pro Zeiteinheit, welches (auf peripherer Ebene) wiederum von der Vaskularisierung (Diffusionsstrecke) und dem Myoglobingehalt der Muskulatur abhängt
- Größe der intramuskulären Kohlenhydratdepots
- Fettstoffwechselanteil an der Gesamtenergiebereitstellung
- Koordination bzw. Bewegungsökonomie.

Unter zentralen Funktionen werden die Tätigkeiten des kardiorespiratorischen Systems und metabolische Vorgänge außerhalb der arbeitenden Muskulatur zusammengefasst. Die Aufgaben von Herz, Lunge, Blut und Gefäßsystem bestehen darin, die Peripherie mit Sauerstoff und Nährstoffen zu beliefern und Metabolite abzutransportieren. Herz, Blut und Gefäßsystem leisten außerdem über die Hautdurchblutung einen Beitrag zur Konstanthaltung der Körpertemperatur. Zentrale metabolische Aufgaben liegen in der Glykogenspeicherung außerhalb der Arbeitsmuskulatur sowie in der Mobilisation von Glukose und freien Fettsäuren. Entscheidend sind für die Ausdauerleistungsfähigkeit im Wesentlichen folgende zentrale Funktionen (43, 87):

- maximales Herzzeitvolumen
- Blutvolumen, Hämoglobingehalt und Fließeigenschaften des Bluts
- Blutverteilung im Organismus (effiziente kollaterale Vasokonstriktion)
- Glykolyse- und Lipolyserate
- Größe der Kohlenhydratdepots in der Leber und der unbeteiligten Muskulatur
- bei Hochausdauertrainierten auch Diffusionskapazität der Lunge und Ventilation.

Je nach Dauer der Ausdauerbelastung spielen verschiedene Funktionen hinsichtlich der maximal möglichen Leistung unterschiedlich wichtige Rollen. Bei Ausdauerbelastungen bis zu etwa 10 min Dauer ist entscheidend, wie viel Energie maximal pro Zeiteinheit auf aerobem Weg bereitgestellt werden kann, wobei zusätzlich aufgrund der hohen Intensität anaerobe Stoffwechselprozesse ablaufen (11, 87). Bei der maximalen aeroben Kapazität, die üblicherweise als maximale Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2max}$ ) gemessen wird, lässt sich beim Gesunden nicht eindeutig entschlüsseln, welches Teilsystem die Leistungsfähigkeit begrenzt. Es gibt Theorien, die der Sauerstofftransportkapazität leistungsbegrenzenden Charakter zusprechen. Anderen Theorien zufolge wirkt die Umsatzrate von Sauerstoff durch die oxidativen Enzyme, also die maximale Durchflussrate von Zitratzyklus und Atmungskette, limitierend (220).

Bei länger andauernden Ausdauerbelastungen kommt es neben der maximalen aeroben Kapazität vor allem darauf an, welche Leistung bzw. wie viel Prozent der maximalen aeroben Kapazität über den gegebenen Belastungszeitraum durchgehalten werden können (46, 127). Das hängt im Wesentlichen davon ab, bis zu welcher Leistung ausreichend Energie auf aerobem Weg ohne zu große anaerobe Stoffwechselanteile bereitgestellt werden kann. Oberhalb dieser Grenze, der so genannten anaeroben Schwelle, muss die Belastung unter anderem wegen eines pH-Abfalls durch anaerobe Metabolite nach recht kurzer Zeit eingestellt werden (76, 87).

Nimmt die Länge der Ausdauerbelastung weiter zu, gewinnen die Glykogenspeicherkapazität und die realisierte Fettstoffwechselrate an Bedeutung (11, 87). Da die Verstoffwechslung von Fetten langsamer abläuft und pro erzeugtem Energieäquivalent mehr Sauerstoff verbraucht als die von Kohlenhydraten, zwingt ein Aufbrauchen der nur begrenzt vorhandenen Glykogenreserven zur Drosselung der Belastungsintensität (99). Eine hohe Fettstoffwechselkapazität spart hingegen Kohlenhydratreserven und ermöglicht Energiegewinn aus der wesentlich größeren Quelle der Fettreserven (100). Schließlich spielt auch die Bewegungsökonomie eine Rolle, da ein geringerer Energiebedarf bei gegebener Geschwindigkeit längere Durchhaltezeiten bzw. höhere Belastungen ermöglicht (11).

### **2.1.2 Leistungsphysiologisch relevante Trainingsadaptationen**

Durch gesundheits- oder freizeitsportliches Ausdauertraining kommt es zu einer Vielzahl von Adaptationen an unterschiedlichen Organsystemen, von denen nur ausgewählte leistungsphysiologisch relevante im Folgenden dargestellt sind.

Am Herzen werden durch gesundheitssportliches Ausdauertraining primär funktionelle Adaptationen hervorgerufen. Strukturelle Veränderungen im Sinne einer Sportherzbildung treten nahezu ausschließlich bei leistungssportlichem Ausdauertraining auf (115). Ein gesundheitssportlich trainiertes Herz zeichnet sich durch ein im Vergleich zum untrainierten Herzen in Ruhe, während gegebener submaximaler und während maximaler Belastung erhöhtes Schlagvolumen aus, das aus einer veränderten hämodynamischen Konstellation resultiert (12, 87, 112). Das größere Schlagvolumen und eine vergrößerte arterio-venöse Sauerstoffdifferenz ( $avDO_2$ ) führen in Ruhe und während gegebener submaximaler Belastung zu einer niedrigeren Herzfrequenz (HF), also zu einer „Ökonomisierung der Herzarbeit“. Während maximaler Belastung ergibt sich aus dem höheren maximalen Schlagvolumen bei unveränderter maximaler Herzfrequenz ( $HF_{max}$ ) ein größeres Herzzeitvolumen. Die maximale Herzleistung ist also verbessert, wodurch mehr Blut pro Zeiteinheit in die Arbeitsmuskulatur transportiert werden kann (12, 115, 220).

Gesundheitssportliches Ausdauertraining führt zu einer Zunahme des Blutvolumens, die sich aus einer deutlichen Zunahme des Plasmavolumens und einer geringeren Zunahme der roten Blutzellmasse zusammensetzt. Daraus ergeben sich sowohl ein gegenüber dem untrainierten Zustand reduzierter Hämatokrit, der mit besseren Fließeigenschaften in Verbindung gebracht wird, als auch eine größere Sauerstofftransportkapazität infolge der Zunahme der Hämoglobinmenge. Das vergrößerte Blutvolumen verändert in der Regel die Druck-Volumen-Verhältnisse des Herzens und trägt dadurch zusammen mit weiteren Faktoren zur Absenkung der Ruheherzfrequenz und der submaximalen Belastungsherzfrequenz bei. Au-

ßerdem steht der Hautdurchblutung mehr Blutvolumen zur Verfügung, was neben anderen Mechanismen die Thermoregulation verbessert (38, 57, 189, 220). Durch Ausdauertraining kommt es ferner zur Neubildung zahlreicher Kapillaren in der Skelett- und Herzmuskulatur, wodurch die Flächen zum Gas-, Substrat- und Metabolitaustausch vergrößert und die Transportwege verkleinert werden. Die Blutverteilung im Organismus ist beim Trainierten durch verbesserte Vasokonstriktion und Vasodilatation, einen erhöhten Venen-Tonus und einen reduzierten submaximalen sowie erhöhten maximalen systolischen Belastungsblutdruck effektiver (12, 185, 220).

Auch am respiratorischen System kommt es zu verschiedenen Ausdauertrainingsadaptationen. Beispielsweise ist die Atemfrequenz bei gegebener submaximaler Belastung beim Trainierten infolge eines geringeren Atemstimulus reduziert. Während maximaler Belastung ermöglicht die gekräftigte Atemmuskulatur beim Trainierten über eine Steigerung des maximalen Atemzugvolumens ein größeres maximales Atemminutenvolumen (138, 220). Allerdings ist das respiratorische System beim gesunden Untrainierten nach Meinung der meisten Autoren nicht leistungslimitierend, so dass die Adaptationen vermutlich nicht von primärer Bedeutung für die Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit sind (43, 220).

Die trainierte Skelettmuskulatur weist im Vergleich zum untrainierten Zustand einen höheren Myoglobingehalt auf, der das intrazelluläre Sauerstoffangebot verbessert. Das Nährstoffangebot wird durch eine größere Glykogenspeicherkapazität und eine Zunahme der Kohlenhydrat und Fett mobilisierenden Enzyme erhöht. Auch in der Leber nimmt die Glykogenspeicherkapazität zu und die Glykogenolyserate, die Glykogensyntheserate und Lipolyserate steigen an. Ausdauertrainierte Muskelfasern enthalten sowohl zahlreichere als auch größere Mitochondrien, was eine erhöhte Kapazität oxidativer Enzyme mit sich bringt. Dadurch werden die aeroben Glukose- und Fettstoffwechselraten erhöht. In geringerem Maße verbessert sich auch die anaerobe Stoffwechselkapazität (12, 87, 138). Die genetisch determinierte Zusammensetzung der Skelettmuskelfasern aus langsam zuckenden, ermüdungsresistenten Typ I- und schnell zuckenden, schneller ermüdenden Typ IIa-, IIb- und IIx-Fasern wird durch Ausdauertraining dahingehend verändert, dass mehr Muskelfasern hinsichtlich ihrer hohen kapillären Dichte, ihrer großen aeroben Stoffwechselkapazität und ihrer kontraktiven Eigenschaften der Charakteristik von Typ-I-Fasern entsprechen (12). Querschnittvergleiche von Ausdauerathleten und Untrainierten zeigen darüber hinaus deutliche Unterschiede der Bewegungsökonomie, die möglicherweise auf eine verbesserte oxidative Kapazität, veränderte Rekrutierungsmuster von motorischen Einheiten sowie auf eine Reduzierung von Ventilation und Herzfrequenz zurückzuführen sind (85, 103).

Ausdauertraining führt ferner zu einer veränderten autonomen Regulation des Organismus. Zu den wichtigsten Trainingsadaptationen auf dieser Ebene gehören eine erhöhte Vagusaktivität sowie eine in Ruhe und während submaximaler Belastung reduzierte Sympathikusaktivität. Über die Innervation des Sinusknotens wird die Herzfrequenz dadurch in Ruhe und bei gegebener submaximaler Belastung reduziert. Außerdem nimmt der periphere Gefäßwiderstand infolge des veränderten Sympathikotonus ab, was eine Zunahme des Schlagvolumens und eine Reduzierung des submaximalen systolischen Belastungsblutdrucks zur Folge hat. Das endokrine System, insbesondere das Nebennierenmark, beeinflusst durch die Ausschüttung von Katecholaminen dieselben Prozesse. Bei Ausdauertrainierten sind gegenüber Untrainierten niedrigere Katecholaminkonzentrationen in Ruhe und während submaximaler Belastung zu beobachten (12, 115, 220).

### **2.1.3 Messung von Veränderungen der Ausdauerleistungsfähigkeit**

Die Ausdauerleistungsfähigkeit ist durch Ergometrien mit ansteigenden Belastungsprotokollen indirekt messbar (28). Direkte Messungen der Ausdauer mittels Dauertests sind im Rahmen von Trainingsstudien weniger üblich, da sie aufwändiger sind und verschiedene Kennwerte nicht erfasst werden können.

Der bekannteste Indikator für die Ausdauerleistungsfähigkeit ist die maximale Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2max}$ ), die durch Hill und Lupton (83) im Jahr 1923 erstmals beschrieben wurde (51). Die  $VO_{2max}$  repräsentiert die obere Leistungsgrenze der aeroben Stoffwechselwege und integriert damit die maximalen Funktionen aller Sauerstoff transportierenden und Sauerstoff utilisierenden Systeme (28). Sie wird in ansteigenden Belastungstests, die optimalerweise in etwa acht bis zwölf Minuten zur Ausbelastung führen, spiroergometrisch gemessen (33). Als weitere maximale Parameter stehen die maximale Geschwindigkeit ( $V_{max}$ ) beim Laufbandtest und die maximale Leistung ( $P_{max}$ ) bei der Fahrradergometrie zur Verfügung. Bei der Interpretation der Maximalparameter ist zu beachten, dass sie vom Grad der Ausbelastung abhängig sind (51, 91). Im Verlauf von Trainingsstudien gewöhnen sich initial untrainierte Probanden häufig an körperliche Anstrengung und belasten sich daher zunehmend besser aus. Da sich bei Trainingsstudien Treatment und Testprozeduren nur schwer verblinden lassen, können außerdem die Erwartung des Versuchsleiters und der Wunsch der Probanden, Verbesserungen zu demonstrieren, zu Verzerrungen der Ergebnisse führen (152). Veränderungen der Ausdauerleistungsfähigkeit lassen sich auch nicht allein durch Unterschiede der Maximalparameter abbilden, so dass insgesamt eine zusätzliche Betrachtung von submaximalen Parametern notwendig erscheint (28).

Unter den submaximalen Parametern der Ausdauerleistungsfähigkeit kommt den „Schwellen“ besondere Bedeutung zu. Sie beschreiben Schlüsselstellen des Energiestoffwechsels und liefern Hinweise dafür, welche Belastung über einen längeren Zeitraum durchgehalten werden kann. Das „Zwei-Schwellen-Konzept“ identifiziert zum einen den Übergang vom rein aeroben zum gemischt aerob-anaeroben Energiestoffwechsel, der im deutschsprachigen Raum als aerobe Schwelle bezeichnet wird. Zum anderen wird das Ende des aerob-anaeroben Übergangsbereichs bestimmt, das nach Kindermann (114) oder McLellan (139) anaerobe Schwelle genannt wird. Im deutschsprachigen Raum werden Schwellen üblicherweise aus der Laktatkonzentration ( $L_a$ ) im Blut, einem Metabolit des Glukosestoffwechsels, abgeleitet. Die aerobe Schwelle entspricht dabei dem ersten Laktatanstieg während ansteigender körperlicher Belastung und die anaerobe Schwelle dem maximalen Laktat-Steady-State, bei dem sich Laktatproduktion und Laktatelemination gerade noch die Waage halten (151). Ein validiertes anaerobes Schwellenkonzept ist die individuelle anaerobe Schwelle (IAS) nach Stegmann et al. (205), die aus dem Verhalten der Blutlaktatkonzentration während und nach stufenweise ansteigender Belastung grafisch abgeleitet wird. Im englischsprachigen Raum hat sich die spiroergometrische Bestimmung von Schwellen durchgesetzt, die zumindest für die aerobe Schwelle mit der Laktatdiagnostik weitgehend übereinstimmende Ergebnisse liefert. Die Anzahl unterschiedlicher Schwellenkonzepte ist groß. Neben einer verwirrenden Vielzahl von Benennungen muss beachtet werden, dass Schwellen zum Teil schwer zu bestimmen sind und manche Verfahren eine geringe Reliabilität zwischen verschiedenen Diagnostikern bzw. eine geringe Objektivität aufweisen (146).

Maximalwerte und Schwellen ermöglichen interindividuelle Vergleiche der Ausdauerleistungsfähigkeit. Interessieren, wie bei Ausdauertrainingsstudien, jedoch in erster Linie intraindividuelle Verbesserungen über die Zeit, stehen weitere submaximale Parameter zur Verfügung. Beispiele hierfür sind die Herzfrequenz in Ruhe ( $HF_{\text{Ruhe}}$ ) und während gegebener submaximaler Belastung sowie die Blutlaktatkonzentration bei gegebener submaximaler Belastung. Aus den Werten, die während einer stufenweise ansteigenden Ergometrie am Ende jeder submaximalen Belastungsstufe gemessen werden, lassen sich Leistungskurven bilden. Die Herzfrequenzleistungskurve (HF-Leistungskurve) verschiebt sich als Ausdruck einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit aufgrund ihres linearen Verlaufs annähernd parallel nach rechts (150). Bei verbesserter aerober Energiebereitstellung kommt es zu einer Rechtsverschiebung der Laktatleistungskurve ( $L_a$ -Leistungskurve), die ebenfalls als robuster Indikator für Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit gilt (28). Leistungskurven weisen zirkadiane Schwankungen auf und reagieren empfindlich auf Veränderungen des Hydrationsstatus und der Ernährung, was bei der Interpretation zu berücksichtigen ist.

Als weitere Determinanten der Ausdauerleistungsfähigkeit lassen sich im Rahmen von Ergometrien die Bewegungsökonomie und das Ausmaß des Fettstoffwechsels erfassen. Die Bewegungsökonomie ist als Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_2$ ) bei gegebener absoluter Leistung bzw. Laufgeschwindigkeit definiert und kann spiroergometrisch auf submaximalen Belastungsstufen gemessen werden (103). Eine Verbesserung der Ökonomie zeichnet sich durch eine geringere  $\text{VO}_2$  bei gegebener Belastung aus bzw. durch eine Verschiebung der Leistungskurve der Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_2$ -Leistungskurve) nach rechts. Obwohl Querschnittsuntersuchungen Unterschiede der Bewegungsökonomie zwischen Trainierten und Untrainierten zeigten, werfen die meisten Trainingsstudien Zweifel an messbaren Effekten von Ausdauertraining auf die Laufökonomie auf (103). Åstrand et al. (12) schätzen Verbesserungen der Bewegungsökonomie bei koordinativ wenig anspruchsvollen Sportarten wie Laufen oder Radfahren relativ gering ein. Hoff und Helgerud (85) berichten von Verbesserungen der Bewegungsökonomie durch Krafttraining, die sie auf neuronale Adaptationen zurückführen. Die Beobachtung von Leistungssportlern legt nahe, dass es sich bei der Verbesserung der Arbeitsökonomie um einen langjährigen Prozess handelt, der erst bei älteren und erfahrenen Athleten deutlich wird. Jones und Carter (103) wenden allerdings ein, dass die meisten Trainingsstudien zur Laufökonomie nur sechs bis zwölf Wochen dauerten und somit möglicherweise zu kurz waren, um relevante Effekte aufzudecken.

Der prozentuale Anteil des Fettstoffwechsels an der Energiebereitstellung und die Fettflussrate werden spiroergometrisch aus dem Respiratorischem Quotienten (RQ) bzw. aus dem RQ und der  $\text{VO}_2$  ermittelt (135). Ein bei gegebener Belastung reduzierter RQ indiziert einen erhöhten Fettanteil an der Energiebereitstellung. Der RQ und damit auch der Fettstoffwechselanteil und die Fettflussrate sind stark ernährungsabhängig und weisen eine hohe Tag-zu-Tag-Schwankung auf. Außerdem wird der RQ bei hohen Belastungsintensitäten durch Excess- $\text{CO}_2$ , das bei der Bikarbonatpufferung von bei der Laktatproduktion anfallenden Wasserstoff-Ionen entsteht, nicht-metabolisch verfälscht (101). Daher kann der Fettstoffwechsel nur unter standardisierten Testbedingungen auf submaximalen Belastungsstufen fehlerfrei bestimmt werden.

## 2.2 Gesundheitsprotektive Wirkung von Ausdauertraining

Herz-Kreislauf-Erkrankungen haben sich im Laufe des 20. Jahrhunderts zur mit Abstand häufigsten Todesursache in den Industrienationen entwickelt (64). Im Jahr 2004 machten sie in Deutschland 45 % aller Todesursachen aus (203). Aus präventivmedizinischer Sicht ist die kardioprotektive Wirkung von Ausdauertraining daher als sein wichtigster Effekt anzusehen. In den letzten Jahrzehnten ist es in den Industrienationen außerdem lebensstilbedingt zu

einem drastischen Anstieg der Prävalenz von Adipositas gekommen. Während in den USA im Jahr 1980 15 % der Erwachsenen als adipös eingestuft wurden, waren es im Jahr 2006 bereits 31 % (136). Die dadurch entstehenden Kosten werden allein für die USA auf jährlich etwa 140 Milliarden U.S.-Dollar geschätzt (136). Von einem Gesundheitssportprogramm wird daher heute auch erwartet, dass es extremem Übergewicht vorbeugt oder es bekämpft.

Bereits in den 1950er Jahren zeigten Morris et al. (154, 155) durch einen retrospektiven Vergleich von Fahrern und Schaffnern öffentlicher Verkehrsmittel in London, dass körperliche Betätigung kardioprotektiv wirkt. Bei den körperlich inaktiveren Fahrern wurde eine höhere Inzidenzrate der koronaren Herzkrankheit (KHK) beobachtet und sie starben häufiger an kardialen Todesursachen als die körperlich aktiveren Schaffner. Ein weiterer klassischer Beleg für die gesundheitsförderliche Wirkung von Bewegung ist die „Harvard-Alumni-Studie“, im Rahmen derer Absolventen der Harvard-Universität in den 1960er und 70er Jahren prospektiv begleitet wurden (164). Es zeigte sich bei einem wöchentlichen Kalorienmehrverbrauch durch körperliche Aktivität von mindestens 2000 kcal ein um 25 bis 33 % reduziertes Sterberisiko im Vergleich zu den weniger aktiven Absolventen. Dass körperliche Aktivität unabhängig von genetischen Faktoren lebensverlängernd wirkt, konnte später durch eine Zwillingsstudie, „The Finnish Twin Cohort“, belegt werden (120). Auch zwischen körperlicher Aktivität und Übergewicht fanden verschiedene Studien einen inversen Zusammenhang. Ein Beispiel hierfür ist die „Iowa Women’s Health Study“, im Rahmen derer bei Frauen anthropometrische Daten erhoben und verschiedene Aspekte des Lebensstils erfragt wurden (109). Je häufiger sich die Frauen freizeitsportlich betätigten, desto geringer war ihr Body-Mass-Index (BMI).

Die genannten und zahlreiche weitere epidemiologische Studien untersuchten den Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und gesundheitsbezogenen Variablen, ohne die Ausdauerleistungsfähigkeit der untersuchten Individuen zu berücksichtigen. Sandvik et al. (186) publizierten 1993 eine Untersuchung zur Korrelation der Ausdauerleistungsfähigkeit mit dem Risiko, an einer Herz-Kreislauf-Erkrankung zu sterben. Sie teilten gesunde Männer nach ihrer fahrradergometrischen Leistung in Fitness-Quartile ein und erfassten die Todesursachen prospektiv. Es zeigte sich ein inverser Zusammenhang zwischen fahrradergometrischer Leistung und kardiovaskulärer Mortalität. Das Sterberisiko betrug im Quartil mit der besten Leistungsfähigkeit gegenüber dem Quartil mit der schlechtesten Leistungsfähigkeit 41 %. Etwa zehn Jahre später veröffentlichten Myers et al. (156) eine epidemiologische Untersuchung, deren Teilnehmer nach Laufbandtests und weiteren medizinischen Untersuchungen prospektiv beobachtet wurden. Die maximale Leistungsfähigkeit hatte im Vergleich zu anderen Risikoindikatoren den größten Vorhersagewert für das Mortalitätsrisiko. Das war umso geringer, je höher die Ausdauerleistungsfähigkeit war. Aus einer Metaanalyse von Williams (218) geht hervor, dass eine hohe Ausdauerleistungsfähigkeit einen stärkeren Schutz-

faktor vor Herz-Kreislauf-Erkrankungen darstellt als körperliche Aktivität. Die Studien zeigen, dass sich präventive Ausdauertrainingseffekte nicht per se von leistungsphysiologischen trennen lassen, weil jeder Anstieg der Ausdauerleistungsfähigkeit potenziell auch mit einem reduzierten Gesundheitsrisiko einhergeht.

### **2.2.1 Effekte auf die Atherosklerose**

Atherosklerose bildet die gemeinsame pathophysiologische Grundlage für die koronare Herzkrankheit, den ischämischen Schlaganfall und die periphere arterielle Verschlusskrankheit (PAVK). Zur Entwicklung der Atherosklerose existieren verschiedene Theorien, deren prominenteste derzeit die „Response-to-injury-Hypothese“ ist (123). Hiernach kommt es – unter anderem bei fehlender körperlicher Belastung durch Reduktion der Scherkräfte am Endothel – zur Erniedrigung der endothelialen NO-Synthase-Aktivität und Störung der Endothelfunktion. Das begünstigt Entzündungsreaktionen, durch die Immunzellen in die Gefäßwand einwandern und sich Lipoproteine einlagern, bis atherosklerotische Plaques entstehen. Durch Anlagerung von Lipiden, Bildung von Schaumzellen und Wachstum von glatten Muskelfasern nimmt die Plaquemasse kontinuierlich zu. Allmählich bilden sich Stenosen, die die Blutversorgung des Gewebes limitieren können. Zum akuten Gefäßverschluss kommt es, wenn eine Plaque rupturiert und aus dem zirkulierenden Blut Thrombozyten anhaften, die durch Fibrinogenfäden stabilisiert werden (123). Die Gefäße von Ausdauerathleten sind im Schnitt weniger von Atherosklerose betroffen als die von Untrainierten. Das zeigten beispielsweise Dinunno et al. (48), indem sie die Intima-Media-Dicke der Femoralarterie als Indikator des atherosklerotischen Prozesses mittels Ultraschall bei Ausdauersportlern und Untrainierten verglichen. Sie konnten außerdem im Längsschnitt zeigen, dass durch dreimonatiges moderates Ausdauertraining die Intima-Media-Dicke der Femoralarterie um 15 bis 20 % abnimmt (48). Ausdauertraining führt also wahrscheinlich zur Verhinderung oder Verlangsamung der Entstehung von Plaques und zu einem Umbau der Arterienwand im Sinne einer Abnahme der Plaquemasse. Bislang sind die Mechanismen, die zur Primär- und Sekundärprävention von Atherosklerose durch körperliche Aktivität führen, nicht vollständig geklärt. Man geht derzeit von einer Reduzierung der endothelialen Dysfunktionen und Entzündungsprozesse in den Gefäßen durch körperliche Aktivität aus (225).

### **2.2.2 Einfluss von Ausdauertraining auf ausgewählte kardiovaskuläre Risikofaktoren**

Im Rahmen der „Framingham-Studie“, einer prospektiven Kohortenstudie aus den 1950er und 60er Jahren mit einem Kollektiv von 4210 Probanden, wurden erstmals systematisch Risikofaktoren für Herz-Kreislauf-Erkrankungen identifiziert (105). Seitdem ist die Liste der

klassischen kardiovaskulären Risikofaktoren auf der Grundlage neuerer Studien kontinuierlich erweitert worden. Sie umfasst Fettstoffwechselstörung, Adipositas, Diabetes mellitus, arterielle Hypertonie, Nikotinabusus, übermäßigen Alkoholkonsum, Bewegungsmangel, Dysstress, hohes Alter, männliches Geschlecht und positive Familienanamnese (180). Zusätzlich wurden in jüngerer Zeit verschiedene Biomarker als so genannte nicht-klassische Risikofaktoren oder Risikoindikatoren eingeführt. Es handelt sich dabei unter anderem um erhöhte Konzentrationen des inflammatorischen Markers C-reaktives Protein (CRP) sowie der Stoffwechselvariablen Harnsäure, Homocystein und Lipoprotein(a) (180). Außerdem wurden verschiedene Lebensstilfaktoren wie schlechte Ernährung, niedriges Bildungsniveau und bestimmte ethnische Herkünfte als Risikofaktoren identifiziert. Im Folgenden sind die Risikofaktoren, die im Rahmen der vorliegenden Studie erfasst wurden, näher erläutert.

Eine Fettstoffwechselstörung liegt vor, wenn die Plasmakonzentrationen einer oder mehrerer Lipidkomponenten verändert sind. Von einer Hypercholesterinämie wird beispielsweise ab einem Gesamtcholesterinspiegel von  $200 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$  ausgegangen (23). Die Plasmakonzentration der Unterfraktion LDL-Cholesterin (Lipoprotein geringer Dichte) sollte nicht über  $130 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$  liegen. Im Gegensatz dazu ist die Konzentration des HDL-Cholesterins (Lipoprotein hoher Dichte) negativ mit dem Auftreten der KHK assoziiert. Ihr unterer Normwert liegt bei  $35 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$  (181). Ausdauertraining wird allgemein eine lipidsenkende Wirkung zugesprochen. Allerdings berichten nur etwa die Hälfte (6) bis ein Viertel (55) aller Ausdauertrainingsstudien von einer Reduzierung des Gesamtcholesterinspiegels. Ebenfalls bei nur etwa der Hälfte aller Ausdauertrainingsstudien konnten Anstiege des HDL-Cholesterinspiegels nachweisen werden, wobei einige Studien sogar eine signifikante Absenkung durch körperliche Aktivität fanden (121, 226). Angesichts der divergenten Studienergebnisse wurden von einigen Autoren Untergrenzen an körperlicher Aktivität vorgeschlagen, die zur Verbesserung des HDL-Cholesterinspiegels notwendig seien. Sie lägen bei einem wöchentlichen Kalorienmehrverbrauch durch Bewegung von 800 bis 1200 kcal und könnten dennoch die unterschiedlichen Ergebnisse bisheriger Studien nicht vollständig aufklären (55, 121). Der Einfluss der Dauer eines Ausdauertrainingsprogramms wurde bislang nur durch eine Gegenüberstellung von Studien mit mehr und weniger als zwölf Wochen Dauer untersucht (121). Zwar konnte dabei kein signifikanter Effekt der Studiendauer festgestellt werden, allerdings sind möglicherweise wesentlich längere Trainingsprogramme notwendig, um zuverlässige Veränderungen des Blutlipidprofils hervorzurufen.

Adipositas ist ein von genetischen Faktoren beeinflusstes Syndrom, welches als  $\text{BMI} > 30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  definiert wird (23). Da bei der Berechnung des BMI der Anteil und die Verteilung des Fettgewebes unberücksichtigt bleiben, orientieren sich alternative Risiko-Klassifizierungen am Körperfettanteil (KF) oder Hüftumfang (23). Adipositas tritt immer dann

auf, wenn die Energiezufuhr langfristig den Energiebedarf übersteigt (204). Insofern kann zusätzlicher Energieverbrauch durch körperliche Aktivität dazu beitragen, das Energieungleichgewicht zu verringern. Zahlreiche Interventionsstudien deuten darauf hin, dass tägliche körperliche Aktivität einer Gewichtszunahme entgegengewirkt und die Aufrechterhaltung eines reduzierten Körpergewichts begünstigt. Eine Gewichtsabnahme kann durch körperliche oder sportliche Aktivität allein kaum erzielt werden, während Diätprogramme in Kombination mit Ausdauertraining häufiger effektiv sind (65, 204, 219).

Von Hypertonie spricht man bei einem Ruheblutdruck ( $RR_{\text{Ruhe}}$ )  $\geq 140/90$  mmHg (36) bzw. einem systolischen Belastungsblutdruck bei 100 W fahradergometrischer Leistung von  $> 200$  mmHg (113). Genauer lassen sich verschiedene Blutdruckkategorien unterscheiden, denen zufolge beispielsweise ein Ruheblutdruck von 130 bis 139/85 bis 89 mmHg als hochnormal und von 140 bis 149/90 bis 94 mmHg als Grenzwerthypertonie gilt (36). Durch die veränderte Hämodynamik, Kapillarisation der Skelettmuskulatur und reduzierte Katecholaminausschüttung kann Ausdauersport zu einer Normalisierung des arteriellen Blutdrucks führen (88). Cornelissen und Fagard (40) untersuchten in einer Metaanalyse 72 Trainingsstudien und fanden eine durchschnittliche Senkung des systolischen Ruheblutdrucks verschiedener Probandenkollektive um 3 mmHg. Eine Subgruppenanalyse von hypertensiven Probanden ergab eine Reduzierung um 7 mmHg. Positive Effekte des Ausdauertrainings auf den systolischen Ruhe- und Belastungsblutdruck sind insofern vor allem bei Individuen mit initial leichtem bis mittelschwerem Bluthochdruck zu beobachten. Bei unauffälligem Blutdruck oder schwerem Bluthochdruck sind den Autoren zufolge hingegen nur geringe oder gar keine Effekte zu erwarten.

Bewegungsmangel wurde 1992 in die Liste der Risikofaktoren für Herz-Kreislauf-Erkrankungen aufgenommen, nachdem verschiedene Studien den Zusammenhang von körperlicher Inaktivität und der Auftretenswahrscheinlichkeit eines kardiovaskulären Ereignisses demonstriert hatten (221). Einer Einteilung von Pollock und Wilmore (174) zufolge ist das Risiko für eine koronare Herzkrankheit bereits mäßig erhöht, wenn weniger als 30 min wöchentlich mit einer Intensität von 60 % der Herzfrequenzreserve (HF-Reserve) Sport getrieben wird. Unter der HF-Reserve versteht man die Differenz zwischen maximaler Herzfrequenz und Ruheherzfrequenz. Der errechnete Prozentsatz der HF-Reserve wird zur Ruheherzfrequenz addiert, um die Vorgabe für das Ausdauertraining zu erhalten. Betätigt sich ein Individuum gar nicht im Intensitätsbereich von mindestens 60 % HF-Reserve, so ist sein KHK-Risiko sehr stark erhöht (174). Umgekehrt ist dieses Risiko bei 90 min wöchentlicher Aktivität mit 60 % HF-Reserve als gering und bei 120 min als sehr gering einzustufen (174). Paffenbarger et al. (164) leiten aus der Harvard-Alumni-Studie ab, dass mindestens 2000 kcal pro Woche zusätzlich durch körperliche Aktivität verbraucht werden sollten, um

das Mortalitätsrisiko deutlich zu senken. Das entspricht etwa 200 bis 230 min wöchentlicher Aktivität mit 60 % HF-Reserve. Die aktuellen gemeinsamen Empfehlungen des ACSM und der American Heart Association (AHA) schlagen einen Verbrauch von mindestens 450 bis 750 MET·min·Woche<sup>-1</sup> zur Förderung der Gesundheit vor, was ungefähr dreimal wöchentlich 45 min Walking entspricht (73).

Da die Entstehung von Plaques im Rahmen der Entwicklung einer Atherosklerose von inflammatorischen Prozessen begleitet wird, gilt ein erhöhter Spiegel des unspezifischen Entzündungsmarkers CRP als Risikoindikator (137). CRP scheint außerdem über verschiedene Mechanismen die Verletzlichkeit der Gefäße zu beeinflussen, bei Mäusen hat eine Expression von CRP sogar zu Thrombosen geführt (180). Aktuelle Richtlinien der AHA zufolge sind CRP-Spiegel von  $< 1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  als geringes, von 1 bis  $3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  als mittleres und von  $> 3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  als hohes kardiovaskuläres Risiko zu interpretieren (180). Querschnittstudien zeigen einen inversen Zusammenhang von körperlicher Aktivität und CRP-Konzentration (106). Bislang existieren allerdings erst wenige Längsschnittuntersuchungen, von denen die meisten mit Risikogruppen, PAVK-Patienten, Adipösen, Diabetikern oder Insulinresistenten arbeiteten und nicht übereinstimmend positive Effekte nachweisen konnten. Kasapis und Thompson (106) fordern daher in einem Übersichtsartikel weitere prospektive Untersuchungen zum Einfluss von Ausdauertraining auf die CRP-Konzentration.

Ein Zusammenhang zwischen erhöhter Harnsäurekonzentration im Serum und der Auftretenswahrscheinlichkeit einer KHK wurde erstmals 1951 hergestellt. Bislang existiert keine plausible pathophysiologische Erklärung für diese Korrelation, und es bestand lange Unklarheit darüber, ob es sich um einen eigenständigen Risikofaktor oder um eine Begleiterscheinung anderer Risikofaktoren handelt (97). Da Harnsäure auch ein Antioxidans ist, wurde sie von einigen Autoren sogar als vorteilhaft bewertet (79). Neuere Untersuchungen belegen jedoch, dass eine erhöhte Harnsäurekonzentration einen unabhängigen kardiovaskulären Risikofaktor darstellt (79, 97). Sie ist außerdem ein Indikator für zahlreiche Nieren- und Stoffwechselerkrankungen wie beispielsweise Gicht. Die Obergrenze des Normwerts für Harnsäure liegt im Labor des Instituts für Sport- und Präventivmedizin der Universität des Saarlandes bei einer Plasmakonzentration von  $5,7 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$  für Frauen bzw.  $7,2 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$  für Männer (16). Ein Querschnittvergleich von trainierten und untrainierten Bewohnern der Insel Mauritius ergab bei trainierten Frauen signifikant niedrigere Harnsäurekonzentrationen als bei untrainierten (228). Obwohl der Unterschied bei den Männern nicht signifikant war, deuten die Ergebnisse auf einen möglichen senkenden Effekt von Ausdauertraining auf die Harnsäurekonzentration hin.

### **2.2.3 Sonstige kardioprotektive Trainingsadaptationen**

Unabhängig vom Einfluss des Ausdauertrainings auf den atherosklerotischen Prozess und die kardiovaskulären Risikofaktoren wirken einige leistungsphysiologische Trainingsadaptationen kardioprotektiv. Aus der in Ruhe und während submaximaler Belastung reduzierten Herzfrequenz ergibt sich eine längere Diastolendauer und damit eine längere Durchblutungsphase des Herzens. Die führt – zusammen mit der stärker ausgeprägten Kapillarisation des Herzmuskels und den verbesserten Fließeigenschaften des Bluts – zu einer besseren Sauerstoffversorgung des Myokards. Dabei spielen auch eine reduzierte Thrombozytenaggregabilität und eine verbesserte Fibrinolyse eine Rolle. Gleichzeitig wird der myokardiale Sauerstoffbedarf in Ruhe und während gegebener submaximaler Belastung durch die geringere Herzarbeit reduziert. Dafür sind im Wesentlichen die Adaptationen in der Körperperipherie und die veränderte autonome Regulation verantwortlich. Insgesamt verbessert sich also das Verhältnis von Sauerstoffbedarf und Sauerstoffangebot des Herzens (180). Ein weiterer kardioprotektiver Faktor ist die Steigerung der elektrischen Stabilität des Herzens, die auf eine reduzierte Ischämie infolge der besseren Blutversorgung, die reduzierte Katecholaminkonzentration in Ruhe und während submaximaler Belastung sowie eine Erhöhung der Kammerflimmergrenze durch Reduzierung des zyklischen Adenosinmonophosphats zurückzuführen ist (10, 88, 220).

### **2.2.4 Ausdauertraining und Gewichtskontrolle**

Studien an Pima-Indianern, einer Population in Arizona mit außergewöhnlich hoher Adipositas-Prävalenz, haben gezeigt, dass ein geringer mittlerer Fettstoffwechselanteil am Tagesenergieverbrauch ein starker Prädiktor für große Gewichtszunahme ist (177). Eine niedrige Fettstoffwechselrate wird zudem mit der Entwicklung von Diabetes mellitus Typ II in Zusammenhang gebracht (32). Anpassungen des Fettstoffwechsels an Ausdauertraining scheinen daher für die Gewichtskontrolle durch Sport von Bedeutung zu sein (204). Ein weiterer potenzieller und häufig kontrovers diskutierter Effekt von Ausdauertraining auf die Gewichtskontrolle ist die Veränderung des Ruheumsatzes (RU). Eine Steigerung des Ruheumsatzes wäre zum Ausgleich des Missverhältnisses von Kalorienzufuhr und Kalorienverbrauch vorteilhaft. Außerdem steht auch ein niedriger Ruheumsatz mit einem erhöhten Risiko für eine Gewichtszunahme in Zusammenhang (177). Im Folgenden sind die Einflüsse von Ausdauertraining auf den Fettstoffwechsel und auf den Ruheumsatz genauer dargestellt.

#### **2.2.4.1 Einfluss von Ausdauertraining auf den Fettstoffwechsel**

Die Verstoffwechslung von Lipiden während gegebener submaximaler Belastung kann durch Ausdauertraining erhöht werden (130). Bisher ist die Anzahl an Trainingsstudien zum Fett-

stoffwechsel jedoch relativ gering. Eine Medline-Literaturrecherche ergab insgesamt zehn Trainingsstudien, die den Einfluss von Ausdauertraining auf den Fettstoffwechsel an unter 60-jährigen untersuchten (19, 58, 59, 90, 93, 95, 131, 142, 169, 190). Die Ergebnisse der Fettoxidationsraten wurden – falls nötig – mit Hilfe des atomaren Gewichts von 1 mol Fettsäuren (272,4 g) von  $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$  in  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$  umgerechnet (101). Entsprechend erfolgte gegebenenfalls eine Bestimmung des Fettstoffwechselanteils aus dem RQ nach Péronnet und Massicotte (167). Die zehn Studien testeten jeweils sechs bis 13 Probanden vor und nach vier bis zwölf Wochen Ausdauertraining und verglichen den Fettstoffwechsel während submaximaler Dauerbelastungen bei 50 bis 65 % der initialen  $\text{VO}_{2\text{max}}$  bzw. maximalen Leistung. Es ergaben sich teils signifikante, teils nicht signifikante Steigerungen des prozentualen Fettstoffwechselanteils an der Gesamtenergiebereitstellung um 3 bis 20 %. Die Fettflussraten der Studienteilnehmer verbesserten sich um 0,01 bis 0,10  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$  und die gefundenen Anstiege waren überwiegend signifikant. In diese Übersicht gingen die Ergebnisse von Messio-ner et al. (142) nicht ein, weil die Studienteilnehmer beim ersten Dauertest einen  $\text{RQ} > 1,00$  aufwiesen, was einem Fettstoffwechselanteil von 0 % entspricht und damit nicht auswertbar ist. Ebenfalls ausgeschlossen wurde die Studie von Phillips et al. (169), da die Autoren keine Absolutwerte präsentieren und die Ergebnisse in Abstract und Ergebnisteil nicht übereinstimmen.

An den bisherigen Untersuchungen müssen sowohl die kurzen Studiendauern als auch die geringen Fallzahlen kritisiert werden. Außerdem fällt auf, dass der Fettstoffwechsel bislang nur bei einzelnen Belastungsintensitäten im Dauertest erfasst wurde. Untersuchungen zur Fettstoffwechselrate auf verschiedenen Belastungsstufen eines ansteigenden Tests liegen bislang nur als Querschnittvergleiche von Trainierten und Untrainierten vor. Stisen et al. (206) beobachteten bei trainierten Frauen auf höheren Belastungsstufen signifikant höhere Fettflussraten als bei untrainierten Frauen, während auf niedrigen Belastungsstufen keine Unterschiede bestanden. Es ist anzunehmen, dass die trainingsbedingte Verbesserung des Fettstoffwechsels im Zeitverlauf eine ähnliche Charakteristik aufweist. Da Anpassungen des Fettstoffwechsels an ein einjähriges gesundheitssportliches Ausdauertraining bislang nicht untersucht sind, sollten das Verhalten von Fettstoffwechselanteil und Fettflussrate auf verschiedenen Belastungsstufen im Verlauf der vorliegenden Studie erfasst werden.

#### 2.2.4.2 Einfluss von Ausdauertraining auf den Ruheumsatz

Der Ruheumsatz stellt mit 60 bis 75 % des Tagesenergieumsatzes die größte Komponente des täglichen Energieverbrauchs dar. Weitere Bestandteile sind der Arbeitsumsatz, der 15 bis 30 % des Tagesenergieumsatzes ausmacht, und der thermische Effekt der Nahrungsaufnahme, der sich auf etwa 10 % des Tagesenergieumsatzes beläuft (134). Der Ruheum-

satz weist eine interindividuelle Varianz auf, die sich zu 83 % durch die fettfreie Körpermasse, das Alter und das Geschlecht aufklären lässt. Weitere Einflussfaktoren sind die Körperfettmasse, die Größe bzw. Körperoberfläche, der Hormonstatus von Testosteron, Thyroxin und Stresshormonen, zirkadiane Schwankungen, der Zykluszeitpunkt bei Frauen sowie die Wärmebildungsrate (74). Möglicherweise könnte Ausdauersport über eine Steigerung der fettfreien Körpermasse, des Substratflusses oder der Schilddrüsenhormonaktivität zu einer Steigerung des Ruheumsatzes führen (171).

Es existieren bereits zahlreiche Studien zum Einfluss von Ausdauertraining auf den Ruheumsatz, die jedoch kontroverse Ergebnisse hervorgebracht haben. Im Querschnitt wurden bei Leistungssportlern übereinstimmend höhere Ruheumsätze gemessen als bei Nichtsportlern. Von den Trainingsstudien wiesen einige einen Anstieg des Ruheumsatzes durch Ausdauertraining nach, während andere keinen Effekt feststellen konnten (171). Die Diskrepanz der Untersuchungsergebnisse könnte zumindest teilweise auf methodische Schwächen der Studien zurückzuführen sein. So bestand bei einigen Messungen Unklarheit über die Differenzierung akuter und chronischer Effekte der körperlichen Aktivität. Heute weiß man, dass der Energieumsatz je nach Dauer und Intensität der Belastung noch bis zu 48 Stunden nach Belastungsende erhöht sein kann (200). Bei zahlreichen Studien fielen die Ruheumsatzmessungen in diese so genannte „EPOC“ (excess post-exercise oxygen consumption)-Phase, was einen falsch zu hoch gemessenen Ruheumsatz zur Folge gehabt haben könnte. Ein Vergleich bisheriger Studienergebnisse wird außerdem dadurch erschwert, dass die Probanden mancher Untersuchungen zusätzlich eine Diät einhielten, während andere keine Ernährungsvorgaben hatten und wieder andere die Energiezufuhr um den zusätzlichen Energieverbrauch durch das Ausdauertraining oder mehr erhöhten. Eine negative Energiebilanz kann zur Reduktion des Ruheumsatzes führen, während übermäßige Energiezufuhr eine Steigerung des Ruheumsatzes zur Folge hat (68, 211). An den Studien nahmen zum Teil adipöse Probanden teil, deren Stoffwechsel im Vergleich zu Normalgewichtigen verändert sein kann. Auch Stichproben unterschiedlichen Alters könnten die Varianz der Studienergebnisse erhöht haben, da der Ruheumsatz bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren herabgesetzt ist (134). Bisherige Studien differieren auch hinsichtlich des Trainingsreizes und der Gesamtstudiendauer beträchtlich. Vor allem bei Studien, die von ernährungswissenschaftlichen Arbeitsgruppen durchgeführt wurden, sind Intensität und Umfang des Trainings oft unzureichend beschrieben.

Poehlman (171) vermutet in einem Übersichtsartikel, dass eine Mindestintensität des Trainings für Veränderungen des Ruheumsatzes notwendig sei. Allerdings wird nicht ersichtlich, ob diese oberhalb gesundheitssportlicher Intensitätsvorgaben liegt. Insgesamt lässt sich auf der Grundlage bisheriger Studien nicht eindeutig feststellen, ob längerfristiges gesundheits-

sportliches Ausdauertraining zu einer Erhöhung des Ruheumsatzes führt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollte daher der Effekt des einjährigen gesundheitssportlichen Ausdauertrainings auf den Ruheumsatz an normal- bis leicht übergewichtigen, initial untrainierten Probanden, die keine Vorgaben für eine Ernährungsmodifikation bekamen, erfasst werden.

## **2.3 Ausmaß, Variabilität und Zeitverlauf von Anpassungserscheinungen an gesundheitssportliches Ausdauertraining**

### **2.3.1 Das Ausmaß von Adaptationen an lange Ausdauertrainingsprogramme**

Bisherige Studien beschäftigten sich vornehmlich mit dem Einfluss der Belastungsnormative Trainingshäufigkeit, Trainingsdauer und Trainingsintensität auf das Ausmaß von Ausdauertrainingseffekten. In einem Übersichtsartikel fasst Pollock (173) die Ergebnisse verschiedener Ausdauertrainingsstudien zusammen und identifiziert eine größere Bedeutung von Dauer und Intensität im Vergleich zur Frequenz. Dabei stellt er fest, dass die meisten Studien nur einen kurzen Trainingszeitraum untersuchten und vermutet, dass die Probanden dieser Studien nach einem längeren Trainingszeitraum möglicherweise größere Fortschritte erzielt hätten. Schließlich folgert er im Bezug auf das Ausmaß der Trainingsadaptationen:

„The length of a training experiment also seems to be a factor. In view of the fact that improvement in many endurance fitness parameters continues over many months of training, it is reasonable to believe that short term studies conducted over a few weeks have certain limitations” (173).

Es erscheint daher interessant, das Ausmaß von Trainingsadaptationen an ein längerfristiges Ausdauertrainingsprogramm zu untersuchen. Um bisherige Erkenntnisse über das Ausmaß von Trainingsadaptationen zusammenzufassen, wurde eine Medline-Recherche nach Ausdauertrainingsstudien mit folgenden Einschlusskriterien durchgeführt: (i) gesunde männliche und/ oder weibliche Teilnehmer im Alter zwischen 18 und 60 Jahren, (ii) definiertes, nicht-leistungssportliches Ausgangsniveau der Studienteilnehmer, (iii) mindestens sechs Wochen Trainingsdauer, (iv) ausschließlich Lauf- oder fahrradergometrisches Training und (v) Angaben über Häufigkeit, Dauer und Intensität des Trainings. Insgesamt erfüllten 36 Studien die Einschlusskriterien. Fünf dieser Studien (13, 45, 52, 94, 215) untersuchten Trainingszeiträume von mindestens zehn Monaten und werden im Hinblick auf das Ausmaß der Trainingsadaptationen an ein längeres Ausdauertrainingsprogramm im Folgenden näher beleuchtet.

Atomi und Miyashita (13) publizierten 1980 eine Trainingsstudie, für die sieben untrainierte Frauen über 44 Wochen zu Beginn zwei- bis viermal wöchentlich 20 min bei 60 bis 65 %  $VO_{2max}$  fahrradergometrisch trainierten. Im Trainingsverlauf wurden die Einheiten kürzer und intensiver, bis sie sich in den letzten 13 Wochen aus 10 min bei 90 bis 95 %  $VO_{2max}$  und 3 bis 5 min bei 60 %  $VO_{2max}$  zusammensetzten. Alle zwei bis vier Wochen wurde die Trainingslast an die aktuelle  $VO_{2max}$  angepasst. Die Probandinnen, die initial eine sehr niedrige  $VO_{2max}$  von im Mittel  $29 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  aufwiesen und von denen drei adipös waren, steigerten ihre  $VO_{2max}$  signifikant um  $10,0 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Denis et al. (45) beobachteten nur wenige Jahre später fünf Probanden mit einer initialen  $VO_{2max}$  von durchschnittlich  $49 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  im Verlauf eines 40-wöchigen Ausdauertrainings. Die Studienteilnehmer absolvierten dreimal wöchentlich eine Stunde Fahrradergometertraining nach Herzfrequenzvorgabe entsprechend 80 bis 85 % ihrer  $VO_{2max}$  vor Trainingsbeginn. Sie verbesserten ihre  $VO_{2max}$  nicht signifikant um  $3,1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ , obwohl die maximale fahrradergometrische Leistung signifikant um 49 W bzw.  $0,7 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$  anstieg.

Im Rahmen einer einjährigen Trainingsstudie von Weltman et al. (215) aus dem Jahr 1992 wurde der Effekt von zwei verschiedenen Trainingsintensitäten verglichen. Eine Gruppe von neun untrainierten Frauen lief sechsmal wöchentlich mit der Geschwindigkeit entsprechend ihrer aeroben Schwelle ( $\sim 55\% \text{ } VO_{2max}$ ), die zweite Gruppe von acht untrainierten Frauen lief dreimal wöchentlich ebenfalls mit der Geschwindigkeit entsprechend ihrer aeroben Schwelle und dreimal wöchentlich mit der Geschwindigkeit, die genau zwischen ihrer aeroben Schwelle und ihrer Maximalgeschwindigkeit lag ( $\sim 81\% \text{ } VO_{2max}$ ). Beide Trainingsprogramme wurden so gestaltet, dass die wöchentlich zurückgelegte Strecke übereinstimmte und sich im Trainingsverlauf von etwa acht auf etwa 56 Kilometer steigerte. Alle vier Monate wurden die Geschwindigkeiten an die aktuelle Leistungsfähigkeit der Probandinnen angepasst. Weitere sieben Teilnehmerinnen dienten als Kontrolle. Die beiden Trainingsgruppen steigerten ihre  $VO_{2max}$  signifikant um 4,7 bzw.  $5,9 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ , die  $VO_{2max}$  der Kontrollgruppe veränderte sich nicht signifikant um  $-0,3 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Die maximale Laufgeschwindigkeit verbesserte sich in den Trainingsgruppen ebenfalls signifikant um 1,4 bzw.  $1,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  und veränderte sich in der Kontrollgruppe nicht signifikant um  $-0,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Im Jahr 2003 publizierten Iwasaki et al. (94) eine Trainingsstudie, für die sechs männliche und fünf weibliche untrainierte Probanden ein Jahr lang drei bis vier mal wöchentlich nach komplizierten Trainingsplänen mit verschiedenen Intensitätsbereichen von regenerativ bis intervallartig trainierten. Im Trainingsverlauf steigerten sie zunächst die Dauer und später auch die Intensität der Trainingseinheiten, bis die Probanden gegen Ende sieben bis neun Stunden pro Woche trainierten. Das Training bewirkte eine signifikante Steigerung der

$VO_{2max}$  um  $8,0 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  und eine signifikante Absenkung der Ruheherzfrequenz um  $9 \text{ min}^{-1}$ . Obwohl im Rahmen der Studie ausschließlich gelaufen wurde, bereiteten sich einige Studienteilnehmer auf ein 100 km-Radrennen oder einen Triathlon vor. Da zur Vorbereitung auf Wettkämpfe dieser Art sportartspezifisches Training üblich ist, muss am Ausschluss zusätzlicher sportlicher Aktivität gezweifelt werden.

Duncan et al. (52) veröffentlichten 2005 eine gesundheitssportliche Trainingsstudie über zwei Jahre, die Aufschluss darüber geben sollte, welcher Trainingsreiz zur Verbesserung von Risikofaktoren notwendig ist. Dreihundertzweiundvierzig männliche und weibliche untrainierte Teilnehmer wurden einer von vier Trainingsgruppen oder einer Vergleichsgruppe, die auch Sport trieb, zugeteilt. Die vier Trainingsprogramme wurden aus niedriger oder hoher Intensität von 45 bis 55 bzw. 65 bis 75 % HF-Reserve und geringem oder hohem Umfang von drei- bis vier- bzw. fünf- bis siebenmal wöchentlich 30 min Walking zusammengesetzt. Die Probanden trainierten selbständig ohne Trainingsbetreuung. Alle Versuchsgruppen bis auf die mit niedriger Intensität und geringem Umfang verbesserten ihre  $VO_{2max}$  innerhalb von zwei Jahren signifikant um etwa 3,0 bis 5,0 %. In den ersten sechs Trainingsmonaten waren die Verbesserungen mit etwa 3,5 bis 8,0 % etwas größer. Die geringen Gesamtverbesserungen und die Abnahme der Ausdauerleistungsfähigkeit vom sechsten zum 24. Trainingsmonat lassen auf unzureichende Mitarbeit der Studienteilnehmer schließen. Das Einhalten der Trainingsvorgaben erfassten Duncan et al. (52) nur in den ersten sechs Monaten durch von den Probanden selbst geführte und nur stichprobenartig mittels portabler Herzfrequenzmessgeräte überprüfte Trainingstagebücher. Den Tagebüchern zufolge absolvierten die vier Trainingsgruppen in den ersten sechs Monaten zwischen 58 und 66 % des vorgegebenen Trainings. Die Absolutwerte der Leistungsverbesserungen und weitere Ergebnisse sind ebenfalls nur für die ersten sechs Trainingsmonate dargestellt. Aus diesen Daten ist auch eine weitere Publikation entstanden (53). Streng genommen handelt es sich bei der Untersuchung von Duncan et al. (52) insgesamt um eine Trainingsstudie über nur sechs Monate.

Bei den vier vorliegenden Studien von tatsächlich mindestens zehn Monaten Dauer fällt auf, dass die meisten Trainingsprogramme hinsichtlich ihres Umfangs und/ oder ihrer Intensität nicht den Empfehlungen für Gesundheitssportler entsprachen und auch das Probandenkollektiv nicht immer aus Sparteinsteigern bestand. Die von Atomi und Miyashita (13) vorgegebenen Trainingseinheiten waren von Beginn an zu kurz und gegen Ende des Trainingsprogramms auch zu intensiv, um die Studie als für gesundheitssportliches Ausdauertraining repräsentativ heranziehen zu können (2). Die von Denis et al. (45) gewählte Trainingsvorgabe liegt an der oberen Grenze der ACSM-Empfehlungen für Gesundheitssportler von 1990 (1). Dieser Bereich wird für bereits fortgeschrittene Gesundheitssportler empfohlen. Aus der initialen  $VO_{2max}$  der Studienteilnehmer wird ersichtlich, dass es sich kaum um vollkommen

untrainierte Probanden gehandelt haben kann. Insofern lässt auch diese Studie keine präzisen Aussagen über die Trainingsadaptationen innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings zu. Die Probanden von Weltman et al. (215) und Iwasaki et al. (94) trainierten gegen Ende des Trainingsprogramms jeweils etwa sieben Stunden pro Woche, was die für Gesundheitssportler empfohlenen Umfänge bei weitem überschreitet (2). Insgesamt wird deutlich, dass über das Ausmaß von Adaptationen, die innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings auftreten, bislang keine wissenschaftlich gesicherten Informationen vorliegen.

Fasst man die Ergebnisse von kürzeren Trainingsstudien zusammen, deren Trainingsvorgaben entsprechend den ACSM-Empfehlungen (1, 2) im gesundheitssportlichen Spektrum einzuordnen sind, findet man bei Studien von viereinhalb bis acht Monaten Dauer Verbesserungen der  $VO_{2max}$  zwischen 3,7 und 12,3  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ , Absenkungen der Ruheherzfrequenz zwischen 0 und 9  $min^{-1}$  und der submaximalen Belastungsherzfrequenz zwischen 10 und 21  $min^{-1}$  (44, 61, 125, 187, 196, 222, 223). Noch kürzere gesundheitssportliche Trainingsprogramme von zwei bis drei Monaten Dauer bewirken Anstiege der  $VO_{2max}$  zwischen 0,4 und 9,0  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$  sowie Abnahmen der Ruheherzfrequenz zwischen 3 und 15  $min^{-1}$  und der submaximalen Belastungsherzfrequenz zwischen 6 und 19  $min^{-1}$  (41, 66, 69, 80, 81, 110, 119, 141, 144, 145, 175). Bei den kürzeren gesundheitssportlichen Trainingsstudien fällt auf, dass das Einhalten der Trainingsvorgaben nur selten sorgfältig überwacht wurde und auf die Compliance der Probanden kaum eingegangen wird. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollte daher auf eine strenge Überwachung des Trainings der Probanden besonderer Wert gelegt werden. Die notwendige Stichprobengröße sollte a priori abgeschätzt werden, denn auch die überwiegend sehr geringen Fallzahlen der aufgelisteten Untersuchungen erschweren generelle Aussagen über das Ausmaß der Trainingseffekte.

### **2.3.2 Die Variabilität von Ausdauertrainingseffekten**

Immer wieder stößt man in wissenschaftlichen Beiträgen auf Studienergebnisse, die nahe legen, dass einzelne Individuen keine Trainingsadaptationen zeigen, während sich andere extrem verbessern. Solche Unterschiede sind selbst bei standardisiertem Trainingsreiz und absolut gleicher Compliance zu beobachten (30). In der Literatur werden als mögliche Einflussfaktoren auf das Ausmaß von Trainingsadaptationen das Ausgangsniveau, das Alter und das Geschlecht sowie sonstige genetische Faktoren diskutiert (138, 220).

Im Allgemeinen geht man davon aus, dass zwischen Ausgangsniveau und Verbesserung ein inverser Zusammenhang besteht (138). Dies scheint jedoch nicht für alle Parameter gleichermaßen gültig zu sein, wie Ergebnisse der HERITAGE-Studie zeigen (30). Bei dieser

Studie handelt es sich um eine multizentrische Untersuchung aus den USA und Kanada, die Familien in 20-wöchige standardisierte Ausdauertrainingsprogramme einschloss. Die Studienergebnisse basieren je nach Parameter auf Daten von etwa 400 bis 1000 Personen und sind in verschiedenen Publikationen veröffentlicht. Die Verbesserung der  $VO_{2max}$  und der Anstieg der HDL-Cholesterinkonzentration hingen bei der HERITAGE-Studie nur in geringem Maße vom Ausgangsniveau ab, während die Absenkung der Herzfrequenz bei gegebener submaximaler Belastung und die Veränderung des submaximalen Belastungsblutdrucks in deutlicher Beziehung zum Ausgangsniveau standen (30). Ein Einfluss des Ausgangsniveaus auf trainingsbedingte Verbesserungen ist also möglich, er muss jedoch für verschiedene Parameter differenziert betrachtet werden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollten daher ebenfalls die Zusammenhänge von Verbesserungen verschiedener Parameter mit dem Ausgangsniveau der Studienteilnehmer überprüft werden.

Bis vor einigen Jahren wurde angenommen, dass die Trainierbarkeit mit dem Alter nachlässt (138, 220). Auf der Grundlage neuerer Studien muss diese Aussage jedoch hinterfragt werden, da sich der Trainingsreiz und die Studiendauern der frühen Untersuchungen im Nachhinein als inadäquat erwiesen und inzwischen mehrfach ähnlich große Fortschritte bei älteren und jüngeren Individuen gezeigt werden konnten (2, 201). Ähnlich verhält es sich auch mit geschlechtsspezifischen Unterschieden. Untrainierte Frauen weisen eine etwas niedrigere  $VO_{2max}$  auf als untrainierte Männer, trainingsinduzierte Verbesserungen scheinen sich jedoch nicht zwischen Männern und Frauen zu unterscheiden (2, 220). Bei gleichen absoluten Verbesserungen der  $VO_{2max}$  fanden Skinner et al. (197) sogar relativ gesehen größere Verbesserungen bei Frauen, die sich aus dem geringeren Ausgangsniveau ergaben. Die trainingsbedingte Zunahme der fettfreien Körpermasse scheint allerdings bei Frauen geringer zu sein als bei Männern (220). Da Zusammenhänge von Alter und Geschlecht mit dem Ausmaß der Trainingsadaptation nicht für alle Parameter ausgeschlossen werden können, sollten sie auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchung überprüft werden.

Genetischen Faktoren wird ein großer Einfluss auf die Ausdauerleistungsfähigkeit und deren Trainierbarkeit zugesprochen. Sie scheinen beispielsweise eine individuell durch Training erreichbare Obergrenze der  $VO_{2max}$  zu bestimmen, und die  $VO_{2max}$  von Untrainierten schwankt in Abhängigkeit von der genetischen Disposition beträchtlich. Zwillingstudien aus den 1980er Jahren ergaben, dass genetische Faktoren 25 bis 50 % der interindividuellen Variabilität der  $VO_{2max}$  aufklären (220). Das konnte in jüngerer Vergangenheit anhand von Daten der HERITAGE Studie bestätigt werden, die eine Erbllichkeit der  $VO_{2max}$  von bis zu 47 % ergaben (29).

Mit der Variabilität von Ausdauertrainingseffekten innerhalb homogener Gruppen beschäftigten sich bisher nur wenige Studien. In dem einzigen zu dieser Thematik vorliegenden Übersichtsartikel von Bouchard und Rankinen (30) begründen die Autoren das geringe Interesse damit, dass fehlende trainingsinduzierte Verbesserungen oder sehr große Veränderungen von vielen Physiologen als Bestimmungsfehler abgetan würden. Dabei lägen die Werte deutlich außerhalb des Messfehlers und träten überzufällig häufig auf. Über die tatsächliche Variabilität der Trainingseffekte täuschen die meisten Trainingsstudien dadurch hinweg, dass nur Mittelwerte und Standardabweichungen, aber keine Spannen der Veränderungen präsentiert werden (44, 45, 52, 61, 62, 69, 80, 81, 94, 119, 125, 141, 175, 187, 196, 198, 215). Individuen ohne erkennbare Trainingsadaptationen sind jedoch für die Betreuung von Gesundheitssportlern und aus wissenschaftlicher Sicht von besonderer Bedeutung. Daher sollte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung explizit auf fehlende trainingsbedingte Verbesserungen eingegangen werden.

In einer der frühesten Studien zur Variabilität von Trainingseffekten aus dem Jahr 1984 untersuchten Prud'homme et al. (176) den Effekt eines 20-wöchigen Ausdauertrainings auf die maximale Sauerstoffaufnahme, die Ventilatorische Schwelle und den Respiratorischen Kompensationspunkt von zehn eineiigen Zwillingspaaren. Sie beschreiben Anstiege dieser Parameter zwischen 0 und 41, 0 und 50 bzw. 2 und 32 %. Die Autoren gehen jedoch nicht darauf ein, wie viele Zwillingspaare sich nicht verbesserten und ob es sich jeweils um dieselben Zwillingspaare handelte, die hinsichtlich der drei untersuchten Parameter keine oder nur geringe Anpassungen an das Ausdauertraining zeigten. Kohrt et al. (118) berichten in einer Studie mit über 100 Probanden im Alter zwischen 60 und 70 Jahren, die neun bis zwölf Monate trainierten, von Anstiegen der  $VO_{2max}$  zwischen 0 und 42 % (im Ergebnisteil) bzw. 0 und 58 % (im Abstract). Auch hier werden keine Angaben zur Zahl oder zum Anteil der Studienteilnehmer gemacht, bei denen die Verbesserungen gering ausfielen. Hautala et al. (75) verglichen die Verbesserungen durch Ausdauer- und Krafttraining an 73 Probanden und stellten nach einer zweiwöchigen Ausdauertrainingsphase Veränderungen der  $VO_{2max}$  zwischen -5 und +22 % fest. Aus einer Ergebnisgrafik wird ersichtlich, dass sich etwa sechs der 73 Studienteilnehmer verschlechterten und die Verbesserung weiterer 23 Probanden geringer als 5 % war. Die Ergebnisse sollten allerdings mit Vorsicht interpretiert werden, da nach zwei Wochen Ausdauertraining keine großen Fortschritte zu erwarten sind und daher Ausbelastungseffekte angenommen werden müssen. In dem bereits erwähnten Übersichtsartikel von Bouchard und Rankinen (30) ist die Variabilität verschiedener Parameter zusammengefasst, wobei hierfür mangels weiterer Publikationen beinahe ausschließlich Daten der HERITAGE-Studie verwendet wurden. Ergebnisgrafiken des Übersichtsartikels zeigen, dass sich die  $VO_{2max}$  um etwa um -100 bis +1000  $ml \cdot min^{-1}$  veränderte. Die Herzfrequenz und der systolische Blutdruck bei 50 W veränderten sich um etwa -45 bis +15  $min^{-1}$  bzw. -55 bis

+20 mmHg (30). In einer anderen Publikation der HERITAGE-Studie wird die Spanne der  $VO_{2max}$ -Veränderungen mit -5 bis +56 % angegeben (197). Die Anzahl der Probanden, die keine Fortschritte zeigten, kann aus den Ergebnisgrafiken jedoch kaum abgeschätzt werden. In einer weiteren Arbeit, in der die Variabilität des  $VO_{2max}$ -Anstiegs bei der HERITAGE-Studie erstmals dargestellt ist, wird in der Diskussion von „high“, „medium“ und „low responders“ gesprochen (197). Allerdings werden die Begriffe weder qualitativ noch quantitativ genauer definiert. In Lehrbüchern wie „Exercise Physiology“ von McArdle et al. (138) oder „Physiology of Sport and Exercise“ von Wilmore und Costill (220) hat sich der Begriff „nonresponders“ für Individuen, die keine oder nur geringe Trainingsadaptationen zeigen, ebenfalls ohne genauere Definition etabliert.

Die beschriebenen Studien gehen auf die Variabilität der Trainingseffekte zumindest dadurch ein, dass sie die Spannen der Veränderungen angeben. Sie liefern damit Hinweise darauf, dass sich ein gewisser Teil von Gesundheitssportlern nicht verbessert. Wie groß dieser Teil ist und ob alle oder nur einzelne Variablen von diesem Phänomen betroffen sind, ist jedoch nicht bekannt. Auffällig ist außerdem, dass bei keiner der existierenden Studien untersucht wurde, ob einzelne Studienteilnehmer hinsichtlich mehrerer Parameter keine Trainingseffekte zeigten. Um Individuen zu identifizieren, die sich durch Ausdauertraining nicht verbessern, erscheint die isolierte Betrachtung eines einzigen Parameters nicht sinnvoll. Von Nonrespondern im eigentlichen Sinne kann nur dann gesprochen werden, wenn auf allen relevanten Anpassungs- und Messebenen keine Verbesserungen zu beobachten sind. Im Rahmen der vorliegenden Studie sollten daher zur Beschreibung der Variabilität der Trainingseffekte neben Standardabweichungen auch Spannen der Ergebnisse und die Anzahl bzw. der Anteil der Probanden, die sich nicht verbessern, angegeben werden. Außerdem sollte die Identifikation von möglichen Nonrespondern anhand von mehreren Parametern erfolgen.

### **2.3.3 Der Zeitverlauf von Adaptationen an lange Ausdauertrainingsprogramme**

Der Zeitverlauf von Adaptationen an längerfristige Ausdauertrainingsprogramme wird in verschiedenen Übersichtsartikeln erwähnt. Jones und Carter (103) gehen beispielsweise davon aus, dass sich die  $VO_{2max}$  im Verlauf von längeren Ausdauertrainingsprogrammen stabilisiert und Verbesserungen submaximaler Funktionen wie der anaeroben Schwelle oder der Bewegungsökonomie für weitere Steigerungen der Leistungsfähigkeit verantwortlich sind. Dieses Erkenntnis geht allerdings auf die Beobachtung einer Olympiateilnehmerin im 3000 m-Lauf über fünf Jahre zurück, was im Hinblick auf Gesundheitssportler wenig aufschlussreich erscheint (102). Wenger und Bell (216) beschreiben in einem Übersichtsartikel steil lineare Verbesserungen der  $VO_{2max}$  bis zur zehnten oder elften Trainingswoche, an die sich geringere Verbesserungen anschließen. Diese Aussage ist auf einen Vergleich verschiedener Trai-

ningsstudien von unterschiedlicher Dauer ohne Zwischenbilanzen gestützt. Die eingeschlossenen Studien sind dabei in Kategorien zusammengefasst, deren höchste alle Untersuchungen von mehr als 15 Wochen Dauer beinhaltet. Auch dieser Ansatz erscheint zur Beschreibung des Zeitverlaufs von Trainingsadaptationen an längerfristige Ausdauertrainingsprogramme wenig geeignet. Was die Verbesserung verschiedener Schwellen betrifft, beschreibt Londeree (124) in einem Übersichtsartikel einen asymptotischen Verlauf mit den deutlichsten Verbesserungen innerhalb der ersten acht bis zwölf Trainingswochen. Dieser Aussage liegen drei Originalarbeiten mit längeren Trainingsphasen und regelmäßigen Zwischentests zugrunde, von denen zwei die Trainingsvorgaben im Zeitverlauf jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten deutlich erhöhten.

Im Rahmen der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Literaturrecherche wurden elf Trainingsstudien identifiziert, die mindestens eine Zwischenbilanz erhoben (13, 45, 52, 61, 69, 94, 119, 175, 178, 198, 215). Bei vier der elf Studien wurde die Trainingsvorgabe im Verlauf des Ausdauertrainings deutlich verändert, weshalb sich die Arbeiten nicht zur Beschreibung des Zeitverlaufs eignen (13, 94, 198, 215). Die bereits dargestellte Studie von Duncan et al. (52) erscheint ebenfalls ungeeignet, da die Compliance der Probanden unzureichend war und sich im Trainingsverlauf zudem verschlechterte.

Die längste der verbleibenden sechs Trainingsstudien mit Zwischenbilanzen ist die Untersuchung von Denis et al. (45), im Rahmen derer fünf Probanden 40 Wochen nach Herzfrequenzvorgabe fahrradergometrisch trainierten. Die Verbesserung der  $VO_{2max}$  war zwar nicht signifikant und betrug nur  $3,1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ , nach zehn Trainingswochen waren allerdings bereits 87 % des Gesamtanstiegs erreicht. Im Rahmen der zweitlängsten Untersuchung von Gaesser et al. (61) trainierten zwei Probandengruppen aus 9 bzw. 7 Personen viereinhalb Monate lang fahrradergometrisch dreimal wöchentlich 50 min bei 45 %  $VO_{2max}$  bzw. 25 min bei 80 bis 85%  $VO_{2max}$  mit gleichem Gesamtenergieverbrauch. Alle drei Wochen wurde die Trainingsleistung an die aktuelle  $VO_{2max}$  angepasst, wodurch die Trainingsherzfrequenz im Studienverlauf um 6 bis  $10 \text{ min}^{-1}$  anstieg. Aus den in dreiwöchentlichen Abständen durchgeführten Zwischentests wird ersichtlich, dass in der niedrigintensiven Trainingsgruppe 40 % des signifikanten Gesamtanstiegs der  $VO_{2max}$  von  $4,8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  nach drei Wochen, 42 % nach sechs Wochen und 79 % nach neun Wochen erreicht waren. Die intensiver trainierende Gruppe, deren  $VO_{2max}$  sich insgesamt signifikant um  $6,8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  verbesserte, erreichte 57 % der gesamten Anpassung bereits nach drei und 84 % nach sechs Trainingswochen. Die vier weiteren Trainingsstudien mit Zwischenbilanzen und unveränderter Trainingsvorgabe beobachteten Trainingszeiträume von nur acht bis zwölf Wochen und zeigten weitgehend lineare Veränderungen von Ruhe- und Belastungsherzfrequenz, annähernd lineare oder zunächst steile und im weiteren Verlauf geringere bis keine Ansteige der  $VO_{2max}$  sowie deutli-

che Anstiege der Ventilatorischen Schwelle in der ersten Studienhälfte und geringere Anstiege im weiteren Studienverlauf (69, 119, 175, 178).

Zum Zeitverlauf von Trainingseffekten liegen also erst zwei Studien von mehr als zwölf Wochen Dauer vor, und mit dem Zeitverlauf von Ausdauertrainingseffekten über ein ganzes Jahr hat sich bislang noch keine Untersuchung beschäftigt. Die beiden genannten Studien zeigen, dass der Zuwachs der  $VO_{2max}$  beim Training mit konstanter Herzfrequenzvorgabe oder fixem Prozentsatz der  $VO_{2max}$  (und ansteigender Trainingsherzfrequenz) im Zeitverlauf geringer wird. Für die Herzfrequenz in Ruhe und während submaximaler Belastung konnte das nicht nachgewiesen werden, allerdings dauerte die längste Studie hierzu nur zehn Wochen. Es ist möglich, dass bei längerem Training auch die Herzfrequenz keine gleichmäßigen Absenkungen über die Zeit zeigt. Trifft diese Charakteristik auf mehrere Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit zu, so müssten Gesundheitssportler ihre Trainingsvorgaben eventuell im Zeitverlauf erhöhen, um weiterhin deutliche Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit zu erzielen. Wenn verschiedene Indikatoren für die Ausdauerleistungsfähigkeit unterschiedliche Zeitverläufe aufweisen, dann würden Kenntnisse darüber die Planung künftiger Trainingsstudien erleichtern, da je nach Studiendauer sensible Parameter ausgewählt werden könnten. Umgekehrt ließe sich auch die notwendige Mindestdauer einer Studie zur Demonstration signifikanter Verbesserungen einer bestimmten Zielvariablen abschätzen. Diesen Fragen sollte im Rahmen der vorliegenden Studie durch eine Beschreibung der Zeitverläufe verschiedener Trainingsadaptationen an das einjährige aerobe Ausdauertraining mit konstanter Herzfrequenzvorgabe nachgegangen werden.

## 2.4 Untersuchungsziel und Operationalisierung

Ziel der vorliegenden Studie war es, das Ausmaß, die interindividuelle Variabilität und den Zeitverlauf von leistungsphysiologischen und gesundheitsbezogenen Anpassungserscheinungen an ein einjähriges gesundheitssportliches Ausdauertraining nach konstanter Herzfrequenzvorgabe an initial untrainierten Probanden zu untersuchen. Diese Aspekte sind in der Literatur bislang unzureichend beschrieben und Kenntnisse darüber erscheinen notwendig, um Gesundheitssportler zu betreuen und zukünftige Ausdauertrainingsstudien zu planen.

Die Aufgabe sollte durch eine deskriptive Längsschnittuntersuchung über ein Jahr mit einem Ein-Gruppen-Design gelöst werden. Auf eine Kontrollgruppe sollte verzichtet werden, da die Existenz eines Trainingseffekts durch gesundheitssportliches Ausdauertraining an sich unstrittig ist und Sportverbot über ein Jahr aufgrund der zahlreichen nachgewiesenen gesundheitsförderlichen Effekte ethisch nicht vertretbar erschien. Kontrollgruppeneffekte sind auf

eine Gewöhnung der Probanden an die Testprozedur und an körperliche Anstrengung zurückzuführen. Daher sollte vor Studienbeginn eine Habituation der Teilnehmer erfolgen, um auch für gewöhnungsanfällige Parameter Aussagen über die Effektgröße zu ermöglichen. Das Probandenkollektiv sollte aus für Gesundheitssportler repräsentativen, untrainierten Männern und Frauen bestehen. Da verschiedene Erkrankungen und starkes Übergewicht Einflüsse auf den Metabolismus haben können und teilweise Kontraindikatoren für Ausdauertraining darstellen, sollten nur gesunde, nicht-adipöse Probanden ohne ausgeprägte Risikofaktoren in die Untersuchung eingeschlossen werden. Wegen einer höheren Inzidenz orthopädischer Beschwerden bei Älteren sollte außerdem eine Altersobergrenze von 50 Jahren eingehalten werden (192).

Als Trainingsdisziplin sollte Laufen bzw. Walking untersucht werden, weil es sich dabei um eine in der gesundheitssportlichen Praxis verbreitete Sportart handelt, für die nur ein geringer Materialaufwand notwendig ist und mit der bei verhältnismäßig geringem Zeitaufwand Trainingseffekte zu erzielen sind. Das Training sollte entsprechend den aktuellen ACSM-Richtlinien gestaltet werden (2). Die Empfehlungen geben eine relativ weite Spanne möglicher Trainingsintensitäten von 40 bzw. 50 bis 85 % HF-Reserve vor (2). Durch ein Training im unteren Bereich (40 bis 49 % HF-Reserve) können bereits potenzielle gesundheitliche Vorteile erlangt werden, ohne dass eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit zu erwarten ist (2). Um mit Sicherheit Trainingseffekte zu erzielen, sollte eine etwas höhere Intensität von 60 % HF-Reserve als Trainingsvorgabe dienen. Die Ableitung fixer Prozentsätze von Maximalwerten bzw. daraus errechneten Größen führt mitunter zu interindividuell unterschiedlichen metabolischen Reaktionen, weshalb zur Festlegung der Trainingsintensität zusätzlich ein metabolischer Parameter hinzugezogen werden sollte (148). Hierfür wurde die Basis-Laktat + 1 mmol-Schwelle nach Hagberg und Coyle (114) gewählt, die im aerob-anaeroben Übergangsbereich liegt und gut mit der Leistung im Wettkampfgehen korreliert. Daher scheint sie für Gesundheitssportler mit Walking- bis Laufgeschwindigkeiten gut geeignet. Das Ausdauertraining sollte analog zur Studie von Denis et al. (45) über die Herzfrequenz gesteuert werden, woraus sich eine konstante kardiozirkulatorische Beanspruchung im Studienverlauf ergibt. Bei Herzfrequenz gesteuertem Ausdauertraining ist davon auszugehen, dass die Laufgeschwindigkeit im Training über die Zeit ansteigt, da einer gegebenen Herzfrequenz mit zunehmender Ausdauerleistungsfähigkeit höhere Laufgeschwindigkeiten entsprechen. Die metabolische Beanspruchung durch das Ausdauertraining sollte durch stichprobenartige Laktatentnahmen während des Trainings erfasst werden. Der Trainingsumfang sollte entsprechend den Minimalanforderungen des ACSM dreimal wöchentlich 45 min betragen (2). Auf höhere Umfänge sollte verzichtet werden, da mit zunehmendem Umfang das Verletzungsrisiko und der Aufwand für die Studienteilnehmer steigen, was die Compliance negativ beeinflussen kann (20). Die Intensitätsvorgaben sollten mithilfe individuell pro-

grammierter portabler Herzfrequenzmessgeräte erfolgen, die gleichzeitig zur Aufzeichnung aller Trainingsdaten und zur Ermittlung der Compliance dienen sollten. Um die Dropout-Quote gering zu halten, sollten die Probanden wöchentlich bei einer ihrer drei Trainingseinheiten betreut werden.

Zur Messung der Ausdauerleistungsfähigkeit bzw. deren Veränderungen im Zeitverlauf sollte im Rahmen der zur Verfügung stehenden Messtechniken ein möglichst breites Spektrum an maximalen und submaximalen metabolischen und kardiozirkulatorischen Parametern herangezogen werden. Es handelte sich dabei um die klassischen Maximalparameter  $V_{\max}$  bzw.  $P_{\max}$  und  $VO_{2\max}$  sowie um die submaximalen Parameter  $HF_{\text{Ruhe}}$ , HF-Leistungskurve, Laktatleistungskurve, IAS, prozentualer Fettstoffwechselanteil, Fettstoffwechselrate und Bewegungsökonomie. Zusätzlich sollten die Hämoglobinkonzentration und der Eisenhaushalt wegen ihres potenziellen Einflusses auf die Ausdauerleistungsfähigkeit erfasst werden. Als Gesundheitsindikatoren dienen der Ruhe- und Belastungsblutdruck, die Gesamt-, HDL-, und LDL-Cholesterinkonzentration, die Harnsäurekonzentrationen sowie der Entzündungsmarker CRP. In Ergänzung zur Körpergewichtskontrolle sollten der Ruheumsatz, der Körperfettanteil und die fettfreie Körpermasse bestimmt werden.

Um die ausgewählten Parameter erfassen zu können, waren mehrere unterschiedliche Tests notwendig. Laufbandergometrien sollten Aufschluss über Maximalwerte, HF- und Laktatleistungskurve, Fettstoffwechsel und Laufökonomie geben. Daher musste ein Belastungsprotokoll gewählt werden, das aus mehreren Belastungsstufen mit anschließender Rampe bis zur Erschöpfung besteht. Da die IAS und der Belastungsblutdruck bei so einem Belastungsprotokoll nicht bestimmt werden können, sollten zusätzlich Fahrradergometrien durchgeführt werden. Fahrradergometrien stellen zudem das am weitesten verbreitete Testverfahren im deutschsprachigen Raum dar. Neben der IAS und dem Belastungsblutdruck sollten auch hier die maximale Leistung, die höchste Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2\text{peak}}$ ) sowie die Herzfrequenz- und die Laktatleistungskurve erfasst werden, um Rückschlüsse auf nicht sportartspezifische Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit ziehen zu können. Zur Messung des Ruheumsatzes und der Laborparameter sollten morgens nüchtern Ruheumsatzmessungen bzw. venöse Blutentnahmen erfolgen.

Das Ausmaß der Trainingsadaptationen sollte durch statistische Vergleiche der Tests vor und nach dem einjährigen Ausdauertraining beschrieben werden. Um die Variabilität der Trainingsadaptationen darzustellen, sollten für alle signifikanten Veränderungen vom Eingangszum Abschlusstest im Rahmen der deskriptiven Statistik Spannen angegeben werden. Bei ausgewählten Parametern sollten darüber hinaus Zusammenhänge mit den potenziellen Einflussfaktoren Compliance, Ausgangsniveau, Alter und Geschlecht überprüft und

der Anteil der Probanden ermittelt werden, der keine trainingsbedingten Veränderungen zeigt. Das Phänomen der Nonresponder sollte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung systematisch untersucht werden, indem für jeden Probanden überprüft werden sollte, wie viele Parameter sich durch das Ausdauertraining nicht verändern. Der Zeitverlauf der Trainingsadaptationen sollte durch verschiedene Zwischentests dokumentiert werden. Die Laufbandtests und Blutentnahmen sollten hierzu alle drei Monate wiederholt werden. Ruhezumatzmessungen sollten jedoch wegen des großen zusätzlichen Zeitaufwands für die Probanden nur alle sechs Monate stattfinden, und bei den Fahrradergometrien sollte aus demselben Grund und wegen der zusätzlichen körperlichen Belastung auf Zwischentests verzichtet werden. Verschiedene Trainingsstudien weisen darauf hin, dass der Zeitverlauf der Fortschritte besonders in den ersten Trainingsmonaten in höherer zeitlicher Auflösung interessant ist (119, 175, 178). Daher sollten in die betreuten Trainingseinheiten zusätzlich submaximale Feldstufentests integriert werden, die innerhalb der ersten drei Trainingsmonate 14-täglich und im weiteren Studienverlauf monatlich zusätzliche Informationen über den Verlauf der Veränderungen der Herzfrequenzleistungskurve liefern sollten.

Die genannten Auswertungsschritte wurden sämtlich a priori festgelegt. Zudem wurde die Studie – sofern das bei einem Studiendesign ohne Kontrollgruppe möglich war – entsprechend den CONSORT-Kriterien zur Verbesserung der Qualität von Studienberichten der Cochrane-Collaboration gestaltet und präsentiert (7, 17).

## 3 Methodik

### 3.1 Studiendesign

#### 3.1.1 Allgemeiner Studienablauf

Alle Studienteilnehmer absolvierten zeitgleich ein 50-wöchiges Ausdauertraining, das von verschiedenen Tests zur Dokumentation der Anpassungserscheinungen begleitet wurde. Die Zeitpunkte der einzelnen Tests werden im Folgenden durch die Trainingswoche, in der sie stattfanden, nach dem Schema  $W_0$  bis  $W_{50}$  abgekürzt. Der allgemeine Studienablauf ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Er gestaltete sich wie folgt:

- Eignungs- und Gewöhnungstest (vier bis acht Wochen vor dem Eingangstest), bestehend aus einer Gesundheitsuntersuchung und einem Laufbandtest (LB)
- Eingangstest, bestehend aus einem Laufbandtest, einer Fahrradergometrie (FS), einem submaximalen Feldstufentest (FST), einer Ruheumsatzmessung (RU) und einer venösen Nüchtern-Blutentnahme (BE)
- 50 Wochen Ausdauertraining (dreimal wöchentlich 45 min Laufen oder Walking nach HF-Vorgabe, davon einmal betreut und zweimal selbständig)
- während der ersten elf Wochen 14-täglich und später vierwöchentlich submaximale Feldstufentests
- alle zwölf Wochen Laufbandtests und venöse Nüchtern-Blutentnahmen
- nach 24 Wochen zusätzlich eine Ruheumsatzmessung
- stichprobenartige Laktatentnahmen während des betreuten Trainings
- Abschlusstest analog zum Eingangstest nach Beendigung des Trainings.

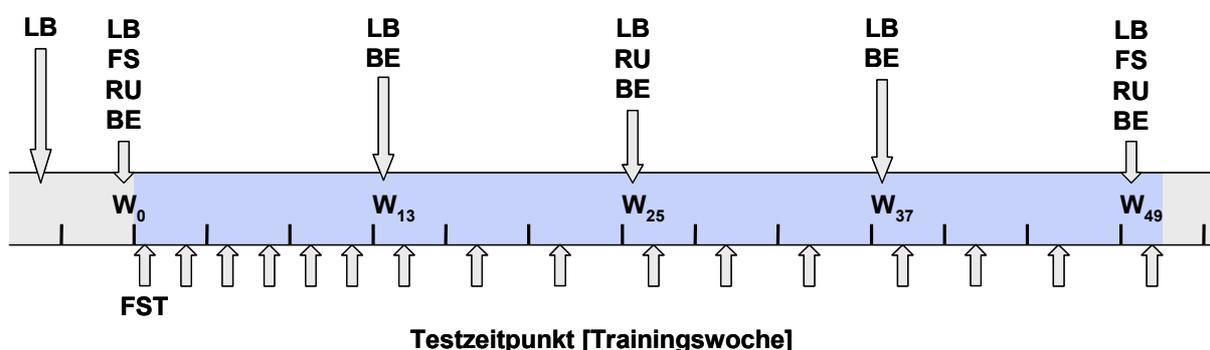


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Studiendesigns (Abkürzungen siehe Text).

Die Studie wurde im Januar 2006 von der Ethikkommission der Ärztekammer des Saarlandes unter der Kennnummer 36/06 bewilligt. Insgesamt dauerte die praktische Durchführung

der Studie von Januar 2006 bis März 2007. Die Rekrutierung der Probanden einschließlich aller Eignungs- und Gewöhnungstests erfolgte im Januar und Februar 2006. Die Eingangsuntersuchungen wurden im März 2006 durchgeführt. Sie erstreckten sich über zwei Wochen, wobei alle Laufbandtests innerhalb einer Woche stattfanden. Die 50-wöchige Trainingsphase dauerte von April 2006 bis März 2007. Sie begann für alle Teilnehmer zeitgleich zwei Wochen nach den Laufbandtests der Eingangsuntersuchung. Die Testphasen in der 13., 25. und 37. Trainingswoche erstreckten sich jeweils über eine Woche. Aufgrund von Krankheiten oder Verletzungen wurden die Tests in der 13. Trainingswoche von zwei Probanden, in der 25. Trainingswoche von drei und in der 37. Trainingswoche von einem Probanden mit ein bis zwei Wochen Verspätung absolviert. Der Abschlusstest wurde innerhalb von 14 Tagen im März 2007 durchgeführt. Dabei lagen die Laufbandtests in der 49. Trainingswoche und die Fahrradergometrien, Ruheumsatzmessungen und venösen Blutentnahmen in der 48. und 49. Trainingswoche. Wegen Krankheit trat ein Teilnehmer mit einer Woche Verspätung zum letzten Laufbandtest an. Die Datenaufnahme endete mit dem abschließenden submaximalen Feldstufentest in der 50. Trainingswoche.

Alle Laufbandbelastungen, Fahrradergometrien, Ruheumsatzmessungen, Blutentnahmen, Gesundheitsuntersuchungen, Laboranalysen und Schwellenbestimmungen wurden am Institut für Sport- und Präventivmedizin der Universität des Saarlandes in Saarbrücken durchgeführt. Die Feldstufentests erfolgten in der Leichtathletikhalle des Landessportverbandes für das Saarland in Saarbrücken auf einer 200 m-Tartanbahn. Das betreute Training fand von April bis Oktober 2006 im Saarbrücker Stadtwald auf einer 2,1 km langen Rundstrecke und von November 2006 bis März 2007 auf dem Universitätsgelände auf einer beleuchteten, ca. 2,5 km langen Rundstrecke statt.

Zwischen den Laufband- und den Fahrradergometrien lag für jeden Probanden mindestens ein Tag Pause. Die verschiedenen Testformen fanden für jeden Probanden jeweils zur gleichen Tageszeit statt, um zirkadiane Einflüsse konstant zu halten. Am Vortag und am Tag der Laufbandtests, Fahrradergometrien und Ruheumsatzmessungen durften die Probanden nicht trainieren, um entleerte Glykogenspeicher zum Testzeitpunkt und daraus resultierende RQ- oder Laktat-Veränderungen zu vermeiden. Um eine möglichst identische Ernährungssituation zu gewährleisten, protokollierten die Probanden am Vortag und am Tag des ersten Laufbandtests jeweils Uhrzeit, Speise und Menge in einer vorgegebenen Tabelle. Vor allen weiteren Tests ernährten sie sich entsprechend diesen Vorgaben. Dieses Procedere wurde bereits in früheren Studien erfolgreich angewendet (147, 183). Die Studienteilnehmer wurden an ihre Testtermine sowie an alle Testvorgaben jeweils eine Woche vor den Tests per E-Mail erinnert. Unmittelbar vor Testbeginn wurden sie zur Einhaltung der Vorgaben befragt. Bei allen Tests mit Atemgasmessungen trug jeder Proband jeweils dieselbe Maskengröße.

### 3.1.2 Probanden

An der Studie sollten gesunde, untrainierte männliche und weibliche Erwachsene unterschiedlichen Alters teilnehmen. Folgende Teilnahmevoraussetzungen wurden a priori festgelegt: (i) Alter: 30 bis 50 Jahre; (ii) BMI:  $< 30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ; (iii) Gesundheitszustand: keine behandlungsbedürftigen Herz-Kreislauf- oder Stoffwechselerkrankungen, keine ausgeprägten Risikofaktoren, keine regelmäßige Medikamenteneinnahme (ausgenommen Anti-Baby-Pille); (iv) Trainingszustand: mindestens sechs Monate ausdauertrainingsfrei, keine ausdauerleistungssportliche Vergangenheit; (v) Ausdauerleistungsfähigkeit:  $\text{VO}_{2\text{max}} < 50 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Die Probandensuche erfolgte über einen kurzen Bericht in der „Saarbrücker Zeitung“, der am 5. Januar 2006 auf der ersten Seite des lokalen Sportteils erschien. Innerhalb der einwöchigen Bewerbungsfrist meldeten sich 206 Interessenten telefonisch oder per E-Mail. Anhand der oben genannten Teilnahmevoraussetzungen erfolgte durch telefonische Befragung eine Vorauswahl der Bewerber. Dreiundsechzig Interessenten erwiesen sich anhand der oben genannten Kriterien als geeignet und wurden zu einem Informationsabend eingeladen, an dem das Studiendesign erläutert wurde. Fünf Interessenten zogen daraufhin ihre Bewerbung zurück. Die Vergabe der 25 freien Teilnehmerplätze erfolgte per Losverfahren. Allerdings wurden dabei nur Interessenten eingeschlossen, die eine gute Compliance vermuten ließen. Als zusätzliche Kriterien dienten hierfür die Nähe der Wohn- oder Arbeitsstätte, zeitliche Freiräume sowie – sofern bekannt – Unterstützung der Studienteilnahme durch das soziale Umfeld (8, 161, 162, 165).

### 3.1.3 Ausdauertraining

Die Studienteilnehmer trainierten über einen Zeitraum von 50 Wochen dreimal wöchentlich 45 min nach Herzfrequenzvorgabe. Für das Training erhielt jeder Proband ein kodierte Herzfrequenzmessgerät mit Speicherfunktion und einstellbaren Herzfrequenzgrenzen (Polar F6 oder Polar S610, Polar Electro, Kempele, Finnland). Die Uhren wurden für jeden Teilnehmer individuell so programmiert, dass bei Über- oder Unterschreiten der Herzfrequenzzone ein Alarm ertönte. Die Teilnehmer sollten versuchen, mindestens 70 % der Trainingszeit innerhalb ihrer Herzfrequenzzone zu bleiben. War bei einem Herzfrequenzmessgerät ein Batteriewechsel notwendig, wurde den Teilnehmern für diesen Zeitraum ein Ersatzgerät ausgehändigt.

Einmal wöchentlich nahmen die Probanden am betreuten Training teil, die verbleibenden beiden Trainingseinheiten (TE) absolvierten sie selbständig. Für das gemeinsame Training wurden drei Termine pro Woche angeboten. In jeder gemeinsamen Trainingseinheit wurden die aufgezeichneten Trainingseinheiten aus den Herzfrequenzmessgeräten ausgelesen. Da-

bei wurden Datum, Dauer, mittlere Herzfrequenz und Zeit in der Herzfrequenzzone jeder Trainingseinheit von der Versuchsleiterin in ein Trainingsprotokoll übertragen. In diesem Protokoll wurden auch Besonderheiten wie körperliche Beschwerden, Training im Urlaub unter abweichenden klimatischen Bedingungen oder Geländebedingungen sowie sportliche Betätigungen außerhalb der Studienteilnahme vermerkt. Zusätzlich führte jeder Teilnehmer ein eigenes Trainingstagebuch, um den Überblick über seine abgeleiteten Trainingseinheiten zu behalten. Das gemeinsame Training mit dem Auslesen der Herzfrequenzmessgeräte ermöglichte eine exakte Überwachung der Compliance und förderte die Bindung der Teilnehmer an das Projekt.

Einmal im Monat durften die Teilnehmer eine längere oder schnellere Trainingseinheit bzw. einen Wettkampf absolvieren, was nicht in die Auswertung der Compliance einfluss. Das wurde von drei Probanden unregelmäßig in Anspruch genommen. Begann das gemeinsame Training mit einem submaximalen Feldstufentest, wurden 15 min von der Trainingszeit abgezogen. Während der einwöchigen Testphasen fand kein betreutes Training statt. Die Laufbandtests ersetzen in diesen Wochen je eine Trainingseinheit. In der zehnten und 47. Trainingswoche erfolgten stichprobenartig Laktatentnahmen in Ruhe, nach etwa 30 min Laufzeit und am Ende der 45-minütigen betreuten Trainingseinheit.

### **3.1.4 Ausschlusskriterien**

Folgende Ausschlusskriterien wurden a priori festgelegt und den Teilnehmern am Informationsabend mitgeteilt:

- Überschreiten von insgesamt sechs Wochen Trainingspause
- Überschreiten von drei Wochen Trainingspause am Stück
- Überschreiten von 50 % der Gesamttrainingswochen mit nur zwei Trainingseinheiten pro Woche (einzelne fehlende Einheiten konnten dabei durch zusätzliche Einheiten in der unmittelbar vorangegangenen oder unmittelbar folgenden Trainingswoche ausgeglichen werden)
- Aufnahme von zusätzlicher regelmäßiger sportlicher Aktivität
- Einnahme von Medikamenten mit potenziellem Einfluss auf die Zielparameter.

Aufgrund des letzten Ausschlusskriteriums durften Teilnehmer mit niedrigem Ferritinspiegel kein Eisen substituieren. Die Betroffenen wurden über ihre niedrigen Ferritin-Werte informiert und vor die Wahl gestellt, die Studienteilnahme abzubrechen oder ihre Werte beobachten zu lassen, auf fleischreiche Kost zu achten und nach Beendigung der Studie mit einer Eisen substitution zu beginnen. Da sich alle Betroffenen für eine Fortsetzung der Studienteilnahme entschieden, sind im Ergebnisteil vereinzelt auffällig niedrige Werte für Ferritin zu finden.

Bei Fehlzeiten ab einer Woche Dauer wurde der Grund retrospektiv bei Wiederaufnahme des Trainings erfragt und protokolliert. Dabei wurden gesundheitliche Probleme internistischer und orthopädischer Art, ungünstige Witterungs- oder Geländebedingungen (z. B. im Urlaub) sowie Zeitmangel als Gründe für die Trainingspause unterschieden. Ergebnisse von Dropouts, die mindestens ein halbes Jahr an der Studie teilnahmen, wurden mit den Ergebnissen der ausgewerteten Stichprobe verglichen, um gegebenenfalls gerichtete Unterschiede der Leistungsverbesserung zwischen Aussteigern und ausgewerteten Studienteilnehmern aufzudecken.

### **3.1.5 Eignungs- und Gewöhnungstest**

Im Rahmen des Eignungs- und Gewöhnungstests wurden die Teilnehmer über mögliche Risiken der Studienteilnahme aufgeklärt und unterschrieben eine Einverständniserklärung zur Teilnahme. Sie wurden dazu angehalten, auch unregelmäßige sportliche Freizeitaktivitäten so gering wie möglich zu halten. Für das Testjahr geplante sportliche Freizeitaktivitäten der Probanden wie Skiurlaube oder Familien-Radtouren wurden besprochen und protokolliert. Alle Probanden wurden einer ausführlichen ärztlichen Gesundheitsuntersuchung unterzogen, welche aus Sport- und Gesundheitsanamnese, körperlicher Untersuchung, Erhebung anthropometrischer Daten, Ruhe-Elektrokardiogramm (EKG) und einer Laufbandbelastung mit EKG sowie Blutdruckmessungen in Ruhe und unter Belastung bestand. Der Laufbandtest erfolgte analog zu allen weiteren Laufbandtests, die in Kapitel 3.1.6 näher beschrieben sind. Allerdings bedingten die im Rahmen der Gesundheitsuntersuchung durchgeführten EKG-Ableitungen und Blutdruckmessungen eine etwa 20 s längere Pausendauer zwischen den Belastungsstufen.

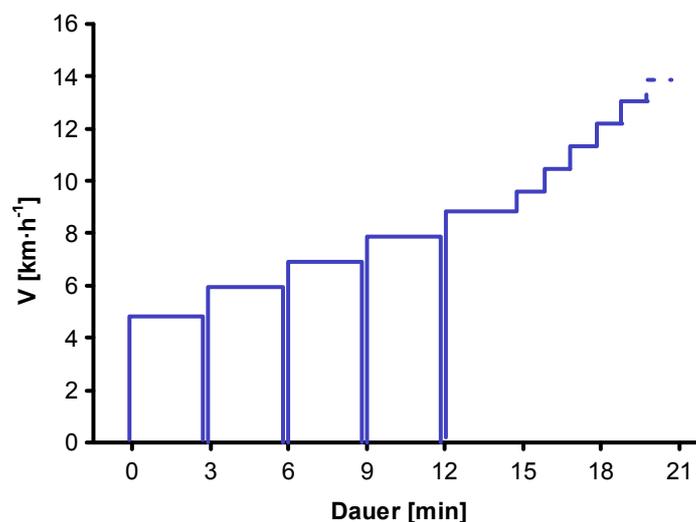
Neben der Eignungsprüfung und Gesundheitsbeurteilung der Probanden diente die Laufbandbelastung der Gewöhnung an die spiroergometrische Testprozedur. Da es sich um eine Längsschnittstudie ohne Kontrollgruppe handelte, war die Gewöhnung der Probanden an die Testsituation von großer Bedeutung. Aufgrund des großen Zeitaufwands konnten jedoch nicht für alle Testformen Gewöhnungstests durchgeführt werden. Weil Laufbandtests die höchsten koordinativen Anforderungen an die Versuchspersonen stellen und Atemgasmessungen bei allen Tests ähnlich ablaufen, wurden Laufbandtests für den Gewöhnungstest gewählt (113).

### **3.1.6 Laufbandtests**

Den Laufbandtests gingen jeweils zehnmünütige Liegephasen zur Bestimmung von  $HF_{\text{Ruhe}}$  und  $RR_{\text{Ruhe}}$  voraus. Bei jedem Laufbandtest wurden Messungen des Körpergewichts durch-

geführt. Beim Eingangstest, in der 25. Trainingswoche und beim Abschlusstest erfolgten zusätzlich Bestimmungen des Körperfettanteils. Ab dem Test in der 13. Trainingswoche wurden die Studienteilnehmer retrospektiv über ihre sportliche Betätigung außerhalb der Studie in den jeweils vergangenen drei Monaten befragt. Nach Abschluss des Trainings erfolgte ferner eine Befragung über eventuelle Veränderungen der Essgewohnheiten während des Trainingszeitraums.

Alle Laufbandtests wurden auf einem Laufband der Firma Woodway, Typ ELG 70 (Woodway GmbH, Weil am Rhein) durchgeführt. Die Studienteilnehmer absolvierten kombinierte Stufen-Rampen-Protokolle, um sowohl die Basis-Laktat + 1 mmol-Schwelle (71) als auch die  $VO_{2max}$  bestimmen zu können. Weitere Zielparameter waren die  $V_{max}$ , die HF-Leistungskurve, die La-Leistungskurve, die  $VO_2$  auf den submaximalen Belastungsstufen (Leistungskurve der  $VO_2$ ), der RQ auf den submaximalen Belastungsstufen (Leistungskurve des RQ) und die Fettflussrate auf den submaximalen Belastungsstufen (Leistungskurve der Fettflussrate). Die Tests begannen je nach trainingsanamnestischem Befund bei 4,0, 5,0 oder 6,0  $km \cdot h^{-1}$ . Die Geschwindigkeit wurde alle drei Minuten um 1,0  $km \cdot h^{-1}$  gesteigert, wobei auf jede Stufe ca. 15 s Pause zur Laktatentnahme folgten. Nach dem mutmaßlichen Überschreiten von Basis-Laktat + 1 mmol (Expertenurteil erfahrener Untersucher) wurde eine letzte 3 min-Stufe mit anschließender rampenförmiger Steigerung um 0,8  $km \cdot h^{-1}$  pro Minute ohne weitere Unterbrechungen bis zur subjektiven Erschöpfung angehängt. In Abbildung 2 ist exemplarisch ein Protokoll eines Laufbandtests dargestellt.



**Abbildung 2: Exemplarische Darstellung eines Laufbandtestprotokolls.**

Anhand der Ergebnisse des Laufbandtests zur Gesundheitsuntersuchung und Gewöhnung wurden die erste Stufe und der Rampen-Beginn gegebenenfalls so korrigiert, dass die La-Leistungskurve beim Eingangstest aus mindestens vier Messwerten bestand und mit Sicher-

heit Basis-Laktat + 1 mmol (71) abbildete. Die Rampe sollte die optimale Dauer für Tests zur Bestimmung der  $VO_{2max}$  von etwa 10 min (33) nicht überschreiten. Eine Untergrenze für die Dauer der Rampe wurde aufgrund der vorangegangenen stufenförmigen Belastung nicht festgelegt. Die Neigung des Laufbands betrug zum Ausgleich des fehlenden Luftwiderstands konstant 0,5 %, was in früheren Untersuchungen durch biologische Eichung ermittelt wurde. Ab dem Eingangstest blieb das Belastungsprotokoll intraindividuell für alle folgenden Tests gleich. Auch der Zeitpunkt des Übergangs vom Gehen zum Laufen wurde ab diesem Zeitpunkt bei jedem Probanden konstant gehalten.

Die Herzfrequenz wurde in der letzten Minute der zehninütigen Liegephase, in den letzten 10 s jeder dreiminütigen Belastungsstufe, in den letzten 10 s jeder Minute während der Rampe, bei Abbruch sowie am Ende der 1., 3. und 5. min der Nachbelastungszeit protokolliert. Laktatentnahmen erfolgten in Ruhe, in den Pausen zwischen den Belastungsstufen, nach Abbruch sowie am Ende der 1., 3. und 5. min der Nachbelastungszeit. Während der Laufbandtests wurden kontinuierlich Atemgasmessungen von der 3. min vor Testbeginn bis zum Abbruch der Belastung durchgeführt.

### 3.1.7 Fahrradergometrien

Alle Fahrradergometrien wurden auf einem elektronisch gebremsten, drehzahlunabhängigen Ergometer des Typs Ergofit 261 (Ergo-Fit GmbH, Pirmasens) durchgeführt. Als Belastungsprotokolle wurden institutsübliche Fahrradstufentests zur Bestimmung von La-Leistungskurve, HF-Leistungskurve, IAS, Belastungsblutdruck,  $P_{max}$  und  $VO_{2peak}$  gewählt. Die Tests begannen in Abhängigkeit von der Ausdauerleistungsfähigkeit der Probanden bei 25 oder 50 W und steigerten alle 3 min ohne Unterbrechung um jeweils 25 oder 50 W bis zur subjektiven Erschöpfung. Ein exemplarisches Testprotokoll ist in Abbildung 3 zu sehen.

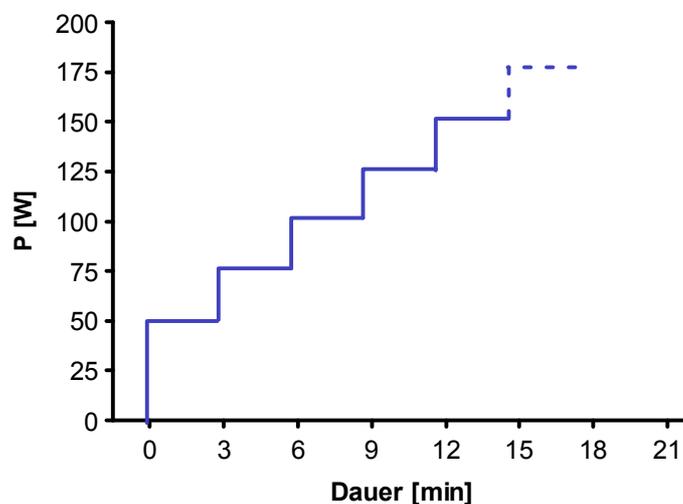


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung eines Fahrradergometrieprotokolls.

Laktatentnahmen und HF-Messungen fanden in Ruhe, am Ende jeder Belastungsstufe, bei Abbruch sowie am Ende der 1., 3., 5., 7. und 10. Minute der Nachbelastungszeit statt. Manuelle Blutdruckmessungen nach Riva-Rocci wurden in Ruhe, in der zweiten Minute jeder Belastungsstufe sowie 5 min nach Abbruch durchgeführt. Atemgasmessungen erfolgten kontinuierlich von der 3. min vor Belastungsbeginn bis zum Abbruch der Belastung. Das Belastungsprotokoll war intraindividuell für jeden Probanden beim Eingangs- und Abschlusstest gleich. Sattelleinstellungen und Trittfrequenzen wurden beim Eingangstest protokolliert und beim Abschlusstest entsprechend vorgegeben. Um die Studienteilnehmer für die Fahrradergometrien nicht extra einbestellen zu müssen, fanden die Tests morgens nach den Ruheumsatzmessungen nach einem kleinen Frühstück oder im Nüchternzustand statt. Die Nahrungsaufnahme wurde ebenfalls intraindividuell konstant gehalten.

### 3.1.8 Submaximale Feldstufentests

Bei den submaximalen Feldstufentests zur Bestimmung der HF-Leistungskurve absolvierte jeder Proband vier Stufen, beginnend mit 5,0, 6,0 oder 7,0  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Die Laufgeschwindigkeit steigerte sich alle 3 min um 1,0  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  mit jeweils 20 s Pause zwischen den Stufen. Die vier Stufen wurden für jeden Probanden anhand der Ergebnisse des Laufbandtests im Rahmen der Eingangsuntersuchung so gewählt, dass anfangs auf der letzten Stufe eine Herzfrequenz von mindestens  $160 \text{ min}^{-1}$  erreicht wurde. Gleichzeitig sollte die Laufgeschwindigkeit auf der letzten Stufe im Vergleich zum Laufbandtest submaximal sein, damit der Test keine zu große Beanspruchung für die Teilnehmer darstellt. Das Testprotokoll blieb für jeden Teilnehmer im Verlauf der Studie konstant. Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein Testprotokoll eines submaximalen Feldstufentests.

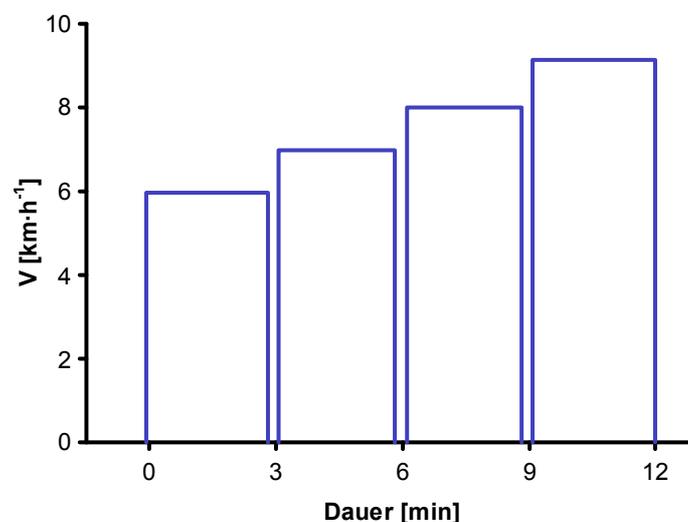


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung eines Feldstufentestprotokolls.

Die submaximalen Feldstufentests wurden in Gruppen von bis zu acht Teilnehmern durchgeführt. Der Test begann mit  $5,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , Teilnehmer mit höheren Anfangsgeschwindigkeiten stiegen bei der  $6,0$  oder  $7,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ -Stufe in den laufenden Test ein. Während der Tests wurde die Herzfrequenz kontinuierlich durch die kodierten Herzfrequenzmessgeräte (Polar F6 oder S610, Polar Electro GmbH, Kempele, Finnland) angezeigt und von den Teilnehmern auf den letzten Metern jeder Stufe abgelesen. In den Pausen zwischen den Stufen wurden die Werte der einzelnen Teilnehmer abgefragt und protokolliert. Registriert wurden außerdem die Raumtemperatur in der Leichtathletikhalle sowie anhand einer dreistufigen Skala (viel/ mittel/ wenig) die Trinkmenge der Probanden am Testtag, um bei auffälligen Messwerten retrospektiv den Hydrationsstatus abschätzen zu können.

Die Laufgeschwindigkeit der Probanden wurde über das Gerät GTC Sim-Rabbit (Dieter Gümbel, Ludwigshafen) gesteuert. In der Leichtathletikhalle sind entlang der 200 m-Bahn im Abstand von 5 m Lichter in den Boden eingelassen, die über das GTC Sim-Rabbit programmiert werden und zur Geschwindigkeitsvorgabe der Reihe nach aufleuchten. Ein aufleuchtendes Licht ist in Abbildung 5 am Rand der Tartanbahn zu sehen. Für die submaximalen Feldstufentests wurde das Testprotokoll auf einer Chipkarte gespeichert und vor jedem Test in das GTC Sim-Rabbit eingelesen.



**Abbildung 5: Studienteilnehmer beim submaximalen Feldstufentest (aufleuchtendes Licht zur Geschwindigkeitsvorgabe am Rand der Tartanbahn).**

Die Geschwindigkeitsvorgaben der Lichtanlage gelten für die Innenbahn der 200 m-Laufstrecke. Da die Teilnehmer in der Gruppe liefen, bewegten sich einige von ihnen auf der zweiten Bahn. Die Laufgeschwindigkeit beträgt bei konstanter Nutzung der zweiten Bahn  $5,18$  statt  $5,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  auf der niedrigsten bzw.  $10,31$  statt  $10,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  auf der höchsten Belas-

tungsstufe der submaximalen Feldstufentests. Der Einfluss auf die Herzfrequenz erscheint bei Abweichungen dieser Größenordnung vernachlässigbar gering, zumal die Probanden kaum konstant auf der zweiten Bahn liefen und der Fehler bei allen Tests vergleichbar sein dürfte.

Während der ersten elf Wochen fanden die submaximalen Feldstufentests 14-tägig in den ungeraden Trainingswochen statt ( $W_1$  bis  $W_{11}$ ). Anschließend wurden sie alle vier Wochen fortgeführt. Allerdings mussten die Tests ab diesem Zeitpunkt auf die geraden Trainingswochen ( $W_{14}$  bis  $W_{50}$ ) verlegt werden, da die Durchführung während der Laufbandtest-Wochen aufgrund des großen zeitlichen Aufwands der Laufbandtests nicht möglich war. So ergab sich eine Rhythmusverschiebung der submaximalen Feldstufentests nach der elften Trainingswoche um eine Woche.

### 3.1.9 Ruheumsatzmessungen

Der Grundumsatz ist als Energieumsatz zur Aufrechterhaltung der Vitalfunktionen im ruhenden Wachzustand definiert und wird unter strengen Ruhebedingungen (ohne vorangegangene körperliche Aktivität) in thermoneutraler Umgebung gemessen (135). Im Gegensatz dazu wird der Ruheumsatz unter etwas weniger strengen Testbedingungen erfasst und liegt daher etwa 5 bis 15 % über dem Grundumsatz (135). Der Ruheumsatz und der prozentuale Anteil der Fett- und Kohlenhydratverstoffwechslung an der Energiebereitstellung wurden unter strengst möglichen Ruhebedingungen mittels indirekter Kalorimetrie bestimmt. Hierzu wurden während 30-minütiger Messungen im Liegen kontinuierlich Atemgasparameter über das Mischkammer-Spiroergometriegerät MetaMax I (Cortex Biophysik, Leipzig) aufgezeichnet. Die Ruheumsatzmessungen fanden morgens nüchtern im abgedunkelten Raum bei Raumtemperaturen  $> 20\text{ °C}$  statt (5, 107, 207). Die Studienteilnehmer durften mindestens 12 h keine Nahrung oder nährstoffhaltigen Getränke, keinen Alkohol, kein Koffein oder Teein und kein Nikotin aufgenommen haben (5, 34, 166, 172, 207, 213, 217). Eine Stunde vor Messbeginn durfte darüber hinaus kein Wasser getrunken werden (27). Die körperliche Aktivität vom Aufstehen bis zur Messung sollte so gering wie möglich gehalten werden. Am Vortag der Tests durfte nicht trainiert werden und sonstige körperliche Anstrengungen sollten vermieden werden (5). Die Probanden durften keinen Infekt haben oder Medikamente mit Einfluss auf den Energiestoffwechsel einnehmen. Auch psychische Belastungen am Vortag und am Testtag sollten möglichst vermieden werden.

Vor Messbeginn wurden die Probanden mit Hilfe einer Checkliste zur Einhaltung dieser Vorgaben befragt. Dabei wurden zusätzlich besondere Ernährungsformen, der Zeitpunkt der letzten Trainingseinheit, Bekleidung der Testpersonen sowie die Schlafdauer und Schlafqua-

lität der letzten Nacht erfasst (78, 208, 210, 211). Die Probanden erhielten die Anweisung sich zu entspannen, aber nicht einzuschlafen. Die Untersuchungsliege wurde so eingestellt, dass die Testpersonen die Position angenehm empfanden. Während der Ruheumsatzmessungen wurden die Studienteilnehmer allein gelassen. Nach der Messung wurde notiert, ob sie die Raumtemperatur angenehm empfanden, ob sie eingeschlafen waren und ob es zu Ruhestörungen gekommen war. Bei den folgenden Messungen wurden die Rahmenbedingungen anhand der Protokolle so ähnlich wie möglich gestaltet. Insbesondere die Raumtemperatur wurde mittels Heizlüfter an die Ausgangstemperatur angepasst.

### 3.1.10 Venöse Blutentnahmen

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollten die Entwicklungen von Hämatokrit, Hämoglobin, Ferritin, CRP, Harnsäure, Gesamtcholesterin sowie HDL- und LDL-Cholesterin untersucht werden. Ferritin wurde sowohl für die Gesamtstichprobe als auch separat für Probanden mit und ohne Eisenmangel ausgewertet. Neben diesen Parametern wurden weitere Routinelaborparameter zur Gesundheitsbeurteilung der Studienteilnehmer sowie immunologische Parameter bestimmt, die jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind und auf die daher nicht weiter eingegangen werden soll.

Die venösen Blutentnahmen erfolgten morgens nüchtern in liegender Körperposition durch Punktion einer Unterarmvene. Beim Eingangstest, in der 25. Trainingswoche und beim Abschlusstest schlossen sich die Blutentnahmen unmittelbar an die 30-minütigen Ruheumsatzmessungen an, zu den anderen Testzeitpunkten ging der Entnahme eine mindestens fünfminütige Liegezeit voraus. Es wurden jeweils zwei 9 ml-Serumröhrchen, drei 2,7 ml-Röhrchen mit Ethylen-Diamin-Tetra-Acetat (EDTA), ein 2 ml-Röhrchen zur Bestimmung der Blutkörperchensenkungsgeschwindigkeit (BSG) sowie ein 4,5 ml-Röhrchen mit Lithium-Heparin abgenommen.

### 3.1.11 Festlegung der Hauptzielparameter

Als Hauptzielparameter der Studie wurden die folgenden sieben abhängigen Variablen definiert:

- $HF_{\text{Ruhe}}$  [ $\text{min}^{-1}$ ] als einfach zu erhebender und damit allen Gesundheits- und Freizeitsportlern zugänglicher Parameter
- $VO_{2\text{max}}$  beim Laufbandtest ( $VO_{2\text{maxLB}}$ ) [ $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] als aus internationaler Sicht am besten etabliertes Maß für die Ausdauerleistungsfähigkeit
- HF-Leistungskurve beim Laufbandtest ( $HF\text{-}LK_{\text{LB}}$ ) [ $\text{min}^{-1}$ ] als submaximaler Parameter für die Ausdauerleistungsfähigkeit

- IAS bei der Fahrradergometrie ( $IAS_{FS}$ ) [W] als submaximaler Parameter für die Ausdauerleistungsfähigkeit bei anderer Belastungsform
- Leistungskurve des RQ beim Laufbandtest ( $RQ-LK_{LB}$ ) [ ] als Fettstoffwechselformparameter
- Ruheumsatz [ $kcal \cdot d^{-1}$ ]
- Gesamtcholesterinspiegel [ $mg \cdot dl^{-1}$ ] als potenziell durch Ausdauertraining veränderbarer Risikofaktor.

Für diese Hauptzielparameter wurden zusätzlich zur Analyse der Verbesserungen im Trainingsverlauf weitere Auswertungen vorgenommen, die in den Kapiteln 3.3.8 und 3.4.2 näher beschrieben sind.

## 3.2 Messmethodik

### 3.2.1 Anthropometrische Daten

Größe und Gewicht der Probanden wurden mit Messlatte und Wasserwaage bzw. mit immer derselben Personenwaage bestimmt. Der Körperfettanteil wurde über die Messung der Hautfaldendicke mit einer Caliperzange nach der Vier-Punkt-Methode mit den Messpunkten *Biceps*, *Triceps*, *Angulus scapulae* und *Spina iliaca anterior superior* ermittelt (54).

### 3.2.2 EKG und Herzfrequenzmessung

Ruhe- und Belastungs-EKG wurden mit einem Q710 Elektrokardiographen (Quinton Instrument Company, Bothell, USA) durchgeführt. In Ruhe wurde ein Zwölfkanal-EKG (Extremitätenableitungen I bis aVF und Brustwandableitungen  $V_1$  bis  $V_6$ ) und unter Belastung ein Sechskanal-EKG (Brustwandableitungen  $V_1$  bis  $V_6$ ) abgeleitet. Aus dem während Belastung minütlich geschriebenen EKG wurden die Herzfrequenzen beim Laufbandtest im Rahmen des Eignungs- und Gewöhnungstests ausgelesen.

Bei allen weiteren Tests wurde die Herzfrequenz mit einem Polar F6 oder Polar S 610 Herzfrequenzmessgerät (Polar Electro, Kempele, Finnland) erfasst. Bei den Laufband- und Fahrradergometrien wurde der Empfänger so befestigt, dass er vom Versuchsleiter abgelesen werden konnte. Während der submaximalen Feldstufentests trugen die Probanden den Empfänger am Handgelenk und lasen ihre Herzfrequenz selbst ab. Die Angaben wurden stichprobenartig überprüft. Bei der Messung der Ruheherzfrequenz lag der Empfänger neben dem Probanden auf der Liege und wurde vom Versuchsleiter abgelesen, ohne dass sich der Proband bewegte.

### 3.2.3 Laktatbestimmung

Zur Bestimmung der Blutlaktatkonzentration wurde Kapillarblut aus dem mit Finalgon forte hyperämisierten und mit Desinfektionsmittel gereinigten Ohrläppchen entnommen. Für jede Laktatbestimmung wurde eine 20 µl end-to-end Kapillare mit Blut gefüllt und in einem Laktat-töpfchen in 1 ml Hämolyselösung gelöst. Im Labor erfolgte die Analyse enzymatisch-amperometrisch (Super GL, Rolf Greiner Biochemica, Flacht).

### 3.2.4 Spiroergometrie

Die spiroergometrischen Daten, der Luftdruck und die Umgebungstemperatur wurden während der Laufband- und Fahrradergometrien mit dem portablen Mischkammer-Spiroergometriegerät MetaMax II (Cortex Biophysik, Leipzig) und während der Ruheumsatzmessungen mit dem stationären Mischkammer-Spiroergometriegerät MetaMax I (Cortex Biophysik, Leipzig) kontinuierlich gemessen. Die Geräte wurden an jedem Testtag nach Herstellerangaben kalibriert. Die Kalibrierung der Volumensensoren erfolgte mithilfe einer Dreiliter-Pumpe. Die Gassensoren wurden durch eine Zwei-Punkt-Kalibration mit Umgebungsluft und Eichgas (CO<sub>2</sub>-Konzentration: 5,09 Vol%, O<sub>2</sub>-Konzentration: 12,00 Vol%;) kalibriert.

Zu Beginn jedes Tests wurde eine Raumluftmessung von mindestens 3 min Dauer bis zur Konstanz der Werte durchgeführt, da die Umgebungsluftzusammensetzung als Berechnungsgrundlage für VO<sub>2</sub> und Kohlendioxidabgabe (VCO<sub>2</sub>) der Testperson dient. Die Atmung der Testpersonen erfolgte durch eine Hans-Rudolph-Gesichtsmaske, an die ein Mundstück mit Triple-V-Volumensensor und Absaugstrecke angeschlossen war. Das Atemminutenvolumen (V<sub>E</sub>) wurde durch die Umdrehungszahl der Triple-V-Turbine ermittelt, und die Expirationsluft wurde über die Absaugstrecke in eine Mischkammer gesaugt. Die Mischkammer fasst 30 ml Luft, deren O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentration mittels Zirkoniumzelle bzw. Infrarotmethode im Zehntelsekundentakt gemessen wurde. Das Gerät errechnet die VO<sub>2</sub> als Differenz aus dem O<sub>2</sub>-Gehalt der Umgebungsluft und dem O<sub>2</sub>-Gehalt der Expirationsluft, welche mit V<sub>E</sub> multipliziert wird. Entsprechend wird zur Berechnung der VCO<sub>2</sub> der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Expirationsluft subtrahiert und mit V<sub>E</sub> multipliziert. Der RQ wird als Quotient aus VCO<sub>2</sub> und VO<sub>2</sub> berechnet. Temperatur- und Luftdruckmessungen ermöglichen die Umrechnung der Messwerte auf definierte Standardbedingungen (STPD). In die Aufzeichnungen wurden während der Messungen Markierungen über einen Marker, der mit dem Spiroergometriegerät verbunden ist, gesetzt. Die Spiroergometriegeräte waren während der Messungen mit einem Notebook verbunden, das die erhobenen Daten mit dem Programm MetaMax Capture (Version 3.511) direkt abbildet und speichert. Die Auswertung der Daten erfolgte mit der dazugehörigen Software MetaMax Analyse (Version 3.500).



**Abbildung 6: Aufbau der spiroergometrischen Messplätze.**

Während der Laufbandtests waren das Spiroergometriegerät, die Batterie und der Marker mit dem Befestigungssystem „SnipSnap“ am horizontalen Gestänge des Laufbands befestigt. Volumensensorkabel und Absaugstrecke wurden bis auf Schulterhöhe des Probanden am vertikalen Gestänge des Laufbands entlang geführt und mit Klebeband fixiert. Von dort aus verliefen die Kabel über die Schulter des Probanden, wo sie gegebenenfalls zusätzlich befestigt wurden, zur Gesichtsmaske. Analog dazu waren Spiroergometriegerät, Batterie und Marker während der Fahrradergometrien frontal am Fahrradergometer befestigt. Volumensensorkabel und Absaugstrecke verliefen direkt zur Gesichtsmaske, die frei hängenden Kabel wurden mittels Klebeband auf die passende Länge reduziert. Der Aufbau der spiroergometrischen Messplätze ist in Abbildung 6 illustriert. Bei den Ruheumsatzmessungen stand das stationäre Spiroergometriegerät auf einem Tisch neben der Untersuchungsfläche, auf der sich der Proband befand. Die Kabel hingen frei bis zur Maske.

### 3.2.5 Blutanalysen

Aus dem Vollblut wurden mittels eines automatischen Zellzählgeräts (Sysmex, Microcell-Counter K-1000, Medical Electronics, Japan) die hämatologischen Parameter Hämatokrit und Hämoglobin bestimmt. Alle weiteren Daten wurden durch Analyse des Serums erhoben. Ferritin wurde durch einen enzymatischen Immunoassay (Access, Beckman Coulter, Krefeld) ermittelt. Die Bestimmung des CRP erfolgte turbidimetrisch mittels Beckman Synchron CX 5 Delta (Beckman Coulter, Krefeld). Ebenfalls mit diesem Gerät wurden die Substrate Harn-

säure, Gesamtcholesterin, HDL-Cholesterin und LDL-Cholesterin nach der Uricas-pap-Methode bzw. der Chod-pap-Methode ermittelt.

### 3.3 Abhängige und unabhängige Variablen

Alle Daten wurden vor ihrer Auswertung auf Plausibilität (offensichtliche Messfehler) überprüft, gegebenenfalls wurden einzelne Werte nicht berücksichtigt. Bei Nichteinhalten bestimmter Testvorgaben (z. B. kein Ruhetag vor dem Testtag oder Nichteinhalten des Ernährungsprotokolls) wurden die Daten auf Abweichungen vom allgemeinen Trend überprüft und gegebenenfalls von der Auswertung ausgeschlossen. Bei schwerwiegenderen Verstößen gegen die Vorgaben (z. B. nicht nüchternes Erscheinen zur Ruheumsatzmessung oder Training am Testtag) wurden die Probanden nicht getestet, und es wurde ein neuer Termin vereinbart.

#### 3.3.1 Herzfrequenzvorgaben für das Ausdauertraining

Die Herzfrequenzvorgaben für das Ausdauertraining wurden aus den Ergebnissen des Laufbandtests, der im Rahmen der Eingangsuntersuchung durchgeführt wurde, abgeleitet. Für jeden Teilnehmer wurde die Trainingsherzfrequenz redundant auf zwei verschiedenen Wegen ermittelt:

1. Ermittlung von 60 % HF-Reserve: Die HF-Reserve wurde als Differenz der  $HF_{max}$  beim Laufbandtest und der  $HF_{Ruhe}$  in der letzten Minute der zehnmütigen Liegephase im Rahmen des Eingangstests errechnet. Zur  $HF_{Ruhe}$  wurden 60 % dieses Werts addiert, um die aus der HF-Reserve abgeleitete Trainingsvorgabe zu erhalten.
2. Bestimmung der Basis-Laktat + 1 mmol-Schwelle, modifiziert nach Hagberg und Coyle (71): Zunächst wurde der Basis-Laktatwert nach Dickhuth et al. (47) als kleinstes Verhältnis von Blutlaktatkonzentration und Leistung ermittelt, indem für jeden gemessenen Laktatwert der Quotient aus Laktat und  $VO_2$  gebildet wurde. Der dem niedrigsten Quotienten zugeordnete Laktatwert galt als Basis-Laktat. Zu diesem Wert wurde nach Hagberg und Coyle (71) 1 mmol addiert, um die „Basis-Laktat + 1 mmol-Schwelle“ zu erhalten. Die HF an der Basis-Laktat + 1 mmol-Schwelle wurde aus der HF-Leistungskurve linear interpoliert und als durch Laktatdiagnostik ermittelte Trainings-HF herangezogen.

Durch beide Wege zur Ermittlung der Trainingsherzfrequenz waren Resultate im extensiven Ausdauertrainingsbereich zu erwarten. Um möglichst große Trainingseffekte zu erzielen, wurde jeweils die höhere der beiden resultierenden Herzfrequenzen als Trainingsvorgabe

herangezogen. Bei einer Probandin wurde die Herzfrequenzvorgabe nach einer Woche Training auf die niedrigere der beiden ermittelten Trainingsherzfrequenzen gesenkt, da sie die höhere Intensität (Basis-Laktat + 1 mmol-Schwelle) nicht über 45 min durchhielt.

Im Mittel unterschieden sich die durch Laktatdiagnostik ermittelte Trainingsherzfrequenz und die von der HF-Reserve abgeleitete Trainingsherzfrequenz um  $2 \pm 11 \text{ min}^{-1}$  (-20 bis  $+23 \text{ min}^{-1}$ ). Den Probanden wurde eine Herzfrequenzzone von  $\pm 5 \text{ min}^{-1}$  um die errechnete Trainingsherzfrequenz vorgegeben, um den Herzfrequenzdrift und wechselndes Geländeprofil im Verlauf der Trainingseinheit zu berücksichtigen. Die Trainingsherzfrequenz blieb über den gesamten Trainingszeitraum konstant. Zur approximativen Beschreibung des Ausdauertrainings wurde aus den Ergebnissen der Laufbandtests die Laufgeschwindigkeit mit Trainingsherzfrequenz ( $V_{\text{HF-Vorgabe}}$ ) abgeleitet und in die während einer 45-minütigen Trainingseinheit zurückgelegte Laufstrecke umgerechnet. Ferner wurden die der Trainingsvorgabe entsprechenden Prozentsätze von  $\text{HF}_{\text{max}}$ ,  $\text{VO}_{2\text{max}}$  und  $\text{VO}_2$ -Reserve errechnet, um die Intensität des Trainingsreizes durch alternative Beschreibungen zu charakterisieren.

### 3.3.2 Compliance

Als Berechnungsgrundlage für die Compliance dienten die Trainingsprotokolle, die von der Versuchsleiterin aus den Aufzeichnungen der Herzfrequenzmessgeräte erstellt wurden. Für jeden Studienteilnehmer wurden für die Zeiträume zwischen den Laufbandtests die Anzahl der durchschnittlich wöchentlich absolvierten Trainingseinheiten, deren durchschnittliche Dauer sowie die durchschnittliche Trainingszeit innerhalb der vorgegebenen Herzfrequenzzone (ausgedrückt in Prozent der Trainingszeit) errechnet und nach Trainingsende gemittelt. In die Mittelwertberechnungen flossen Einheiten, die aufgrund eines vorangegangenen submaximalen Feldstufentests nur 30 min dauerten, nicht ein. In Einzelfällen kam es zu technisch bedingten kurzzeitigen Ausfällen der Herzfrequenzmessgeräte während des Trainings, was in den Trainingsprotokollen vermerkt wurde. Einheiten, bei denen das der Fall war, wurden bei den Berechnungen ebenfalls ausgeklammert.

Einzelne ausgesetzte Trainingseinheiten und ausgesetzte ganze Trainingswochen wurden bei jedem Studienteilnehmer für die Zeiträume zwischen den Laufbandtests zusammengezählt und nach Trainingsende zur Gesamtsumme addiert. Aus den ausgesetzten ganzen Trainingswochen aller Teilnehmer wurde die Summe ausgesetzter Personenwochen gebildet, welche wiederum nach verschiedenen Ursachen für den Trainingsausfall (gesundheitliche Ursachen internistischer und orthopädischer Art, ungeeignete Witterungs- oder Geländebedingungen oder Zeitmangel) unterteilt wurden.

### 3.3.3 Anthropometrische Daten

Aus Körpergewicht und Körpergröße wurde der BMI nach folgender Formel berechnet:

$$\text{BMI} = \text{Körpergewicht [kg]} / \text{Körpergröße [m]}^2$$

Die fettfreie Körpermasse wurde aus dem Körperfettanteil und dem Gewicht ermittelt, indem zunächst die Körperfettmasse durch Multiplikation von Körperfettanteil und Gewicht berechnet und dann vom Körpergewicht abgezogen wurde.

### 3.3.4 Maximale Parameter

Alle maximalen Parameter wurden für die Laufband- und Fahrradergometrien analog ermittelt. Die maximale Laufgeschwindigkeit während des Laufbandtests wurde interpoliert, indem die durchgehaltene Laufzeit auf der maximalen Stufe durch die Gesamtstufendauer (1 min) dividiert, mit der Geschwindigkeitserhöhung ( $0,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) multipliziert und zur Laufgeschwindigkeit auf der vorigen Stufe addiert wurde. Entsprechend wurde zur Ermittlung der maximalen Leistung während der Fahrradergometrien die durchgehaltene Fahrzeit auf der höchsten Stufe durch die Gesamtstufendauer (3 min) dividiert, mit der Widerstandserhöhung (25 oder 50 W) multipliziert und zur Leistung der vorangegangenen Stufe addiert. Als  $\text{VO}_{2\text{max}}$  beim Laufbandtest bzw.  $\text{VO}_{2\text{peak}}$  bei der Fahrradergometrie wurde jeweils der Mittelwert der drei höchsten aufeinander folgenden Messwerte während des Tests herangezogen, wobei aufgrund der Messverzögerung durch die Mischkammer der letzte dieser drei Werte bereits in der Nachbelastungszeit liegen durfte. Vom Vorhandensein eines Levelling-offs der  $\text{VO}_2$  wurde dann ausgegangen, wenn der Anstieg der  $\text{VO}_2$  in den letzten 60 s der Belastung  $< 100 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  war (29). Als  $\text{HF}_{\text{max}}$  wurde jeweils die bei Belastungsabbruch gemessene Herzfrequenz herangezogen. Die maximale Blutlaktatkonzentration ( $\text{La}_{\text{max}}$ ) wurde als höchster gemessener Laktatwert bei Abbruch oder in der Nachbelastungsphase definiert. Als maximaler Respiratorischer Quotient ( $\text{RQ}_{\text{max}}$ ) wurde jeweils der Mittelwert der drei höchsten aufeinander folgenden Einzelwerte vor Abbruch herangezogen, da der RQ durch den raschen  $\text{VO}_2$ -Abfall und den weiteren Anstieg der  $\text{VCO}_2$  infolge der verzögerten Laktatausschwemmung nach Belastungsende weiter ansteigt.

Maximale Parameter werden üblicherweise absolut und in Relation zum Körpergewicht angegeben. Da eine Gewichtung des Körpergewichts mit einem Exponenten von  $2/3$  Körpergewichtsunterschieden besser Rechnung trägt als lineare Modelle, werden ausgewählte Maximalparameter zusätzlich in dieser „allometrischen“ Skalierung angegeben (86, 157).

### 3.3.5 Leistungskurven

Die Leistungskurven bei den Laufband-, Fahrradergometer- und submaximalen Feldstufentests wurden jeweils aus den Messwerten der einzelnen Stufen gebildet. Atemgasparameter wurden dazu über die letzten 30 s jeder Stufe gemittelt. In den Abbildungen sind zu jeder Leistungskurve Ruhewerte dargestellt, die jedoch nicht in die Auswertung der Leistungskurven einfließen. Bei der Darstellung der HF-Leistungskurve beim Laufbandtest wurde als Ruhewert die HF in der letzten Minute der zehnminütigen Liegephase herangezogen, alle anderen Ruhewerte wurden stehend bzw. sitzend auf dem Laufband bzw. der Laufbahn bzw. dem Fahrradergometer erhoben. Bei den Atemgasparametern wurden für die Ruhewerte die letzten 30 s vor Belastungsbeginn gemittelt.

Beim Laufbandtest sind die HF-Leistungskurve und die Leistungskurve der  $VO_2$  über fünf Stufen ermittelt, weil für diese Messzeitpunkte vollständige Datensätze vorhanden waren. Dem kombinierten Stufen-Rampen-Protokoll entsprechend erfolgten beim Laufbandtest mindestens vier Laktatentnahmen, weshalb die La-Leistungskurve aus den ersten vier Stufen errechnet ist. Die Leistungskurve des RQ sowie die daraus errechneten Leistungskurven des prozentualen Fettstoffwechselanteils und der Fettflussrate beim Laufbandtest wurden aus den ersten vier Belastungsstufen gebildet. Mit zunehmender Belastungsintensität wird der Anteil der anaeroben Energiebereitstellung größer und es kommt zur Bikarbonat-Pufferung von bei der Milchsäuredissoziation anfallenden Wasserstoff-Ionen. Dabei wird zusätzliches  $CO_2$  frei, das den RQ nicht-metabolisch beeinflusst und einen Fehler bei der Berechnung des Substratumsatzes zur Folge hat. Jeukendrup und Wallis konnten durch Vergleiche der indirekten Kalorimetrie mit der Stabilen-Isotopen-Methode zeigen, dass die indirekte Kalorimetrie ab einer Intensität von etwa 75 %  $VO_{2max}$  mit diesem Fehler behaftet ist (101). Im Mittel entsprachen die vierte Belastungsstufe weniger und die fünfte Belastungsstufe mehr als 75 %  $VO_{2max}$ , so dass der RQ und die daraus berechneten Parameter bis zur vierten Belastungsstufe ausgewertet wurden. Aus dem RQ wurde unter Vernachlässigung des Proteinanteils der prozentuale Anteil der Fettstoffwechslung an der Energiebereitstellung auf den einzelnen Belastungsstufen nach Lusk mit Hilfe folgender Formel ermittelt (128):

$$\text{Fettanteil [\%]} = (468,6 \cdot (1 - RQ)) / (5,047 \cdot (RQ - 0,707) + 4,686 \cdot (1 - RQ))$$

Die Fettflussrate auf den einzelnen Belastungsstufen wurde nach Jeukendrup und Wallis (101), deren Formel von einer intensitätsunabhängigen Energieproduktion von 9,75 kcal pro Gramm Fett ausgeht und den aktuellen Standard zur Bestimmung der Fettoxidationsrate darstellt, wie folgt berechnet:

$$\text{Fettflussrate [g} \cdot \text{min}^{-1}] = 1,695 \cdot VO_2 - 1,701 \cdot VCO_2$$

Bei der Fahrradergometrie brachen einige Studienteilnehmer auf der vierten Stufe ab, weshalb die HF-Leistungskurve und die La-Leistungskurve aus den ersten drei Belastungsstufen errechnet wurden. In den Abbildungen sind die Leistungskurven zur besseren Übersicht als unterbrochene Linien bis zur vierten Belastungsstufe fortgesetzt. Die submaximalen Feldstufentests bestanden aus vier Stufen, die alle zur Bildung der HF-Leistungskurve herangezogen wurden. Fehlte ein Proband bei einem submaximalen Feldstufentest, wurden die Herzfrequenzen auf den einzelnen Stufen aus dem vorangegangenen und dem nachfolgenden Test interpoliert, um vollständige Datensätze zu erhalten. Im Schnitt fehlte jeder Proband bei  $2 \pm 1$  (0 bis 4) der insgesamt 16 submaximalen Feldstufentests ( $n = 18$ ).

Verschiebungen der Leistungskurven im Zeitverlauf wurden berechnet, indem zunächst Mittelwerte der Leistungskurven zu den einzelnen Testzeitpunkten aus den Werten der verschiedenen Belastungsstufen gebildet wurden. Anschließend wurden die Unterschiede ( $\Delta$ ) der Mittelwerte bestimmt.

### **3.3.6 Individuelle anaerobe Schwelle**

Die Bestimmung der IAS erfolgte auf der Grundlage der bei der Fahrradergometrie ermittelten Laktatleistungskurve. Mithilfe der Software „Ergometrie – Berechnung von Laktatschwellen“ (H. Heck, Bochum) wurden die Schwellen nach der Methode von Stegmann et al. (205) bestimmt. Bei diesem grafisch-mathematischen Verfahren wird die Laktatleistungskurve vom Belastungsbeginn bis zur zehnten Minute der Nachbelastungszeit aufgetragen. Vom Abbruchlaktatwert aus wird eine Parallele zur x-Achse gezogen, welche die Kurve der Nachbelastungslaktatwerte in einem Punkt schneidet, von dem aus eine Tangente an die Kurve der Belastungslaktatwerte angelegt wird. Die IAS wird als erbrachte Leistung, Laktatkonzentration und Herzfrequenz am Berührungspunkt von Tangente und Laktatleistungskurve bestimmt. Alle Schwellenbestimmungen wurden nach Abschluss der Datenaufnahme blind von einem erfahrenen Laktatdiagnostiker durchgeführt.

### **3.3.7 Ruheumsatz**

Von den über 30 min aufgezeichneten Atemgasparametern wurden die  $VO_2$  und der RQ von der 5. bis zur letzten Testminute gemittelt. Zur Berechnung des Ruheumsatzes wurde eine Tabelle von Péronnet und Massicotte (167) herangezogen, die eine Utilisation von 100 % Glukose beim Kohlenhydratstoffwechsel und eine Verstoffwechslung des gewichteten Mittels der 13 Fettsäuren, die 99 % aller Fettsäuren im menschlichen Fettgewebe ausmachen, zugrunde legt. Da als Kohlenhydrat (KH) in Ruhe ausschließlich Glukose verstoffwechselt wird und die Tabelle von Péronnet und Massicotte (167) die genaueste bekannte Analyse

von Fettquellen verwendet, schlagen Jeukendrup und Wallis (101) die Anwendung dieser Formel für Ruheumsatzmessungen vor. Aus der Tabelle wurde anhand des mittleren RQ der prozentuale Anteil der Kohlenhydrat- und Fettverstoffwechslung an der Gesamtenergiebereitstellung sowie das entsprechende kalorische Äquivalent für einen Liter Sauerstoff abgelesen. Um den Ruheumsatz pro Tag zu erhalten, wurde die gemessene Menge aufgenommenen Sauerstoffs auf 24 h hochgerechnet und mit dem kalorischen Äquivalent multipliziert. Der Ruheumsatz wurde absolut, pro kg Körpergewicht und pro kg fettfreie Körpermasse angegeben.

### 3.3.8 Ermittlung von Nonrespondern

Um die Anzahl der Probanden zu ermitteln, die keine Trainingsadaptationen zeigten, wurden bei jedem Studienteilnehmer die individuellen Veränderungen vom Eingangs- zum Abschlusstest bei den Hauptzielparametern überprüft, die sich im Mittel signifikant veränderten. Kriterium für das Vorhandensein von Trainingsadaptationen war eine Verbesserung vom Eingangs- zum Abschlusstest um mehr als die intraindividuelle Variabilität des jeweiligen Messwerts. Als Nonresponder galt nur, wer bei keinem der überprüften Parameter Ausdauertrainingseffekte aufwies. Als Maß für die intraindividuelle Variabilität der einzelnen Parameter sollten durch Messwiederholungen ermittelte Variationskoeffizienten herangezogen werden. Aus der Literatur wurden folgende Variationskoeffizienten für die intraindividuelle Variabilität der Parameter ermittelt:

- $HF_{\text{Ruhe}}$ : 7,5 % (202)
- $VO_{2\text{max}}$ : 5,6 % (108)
- $HF\text{-}LK_{\text{LB}}$ : 2,7 % (14)
- $IAS_{\text{FS}}$ : 1,9 % (168)
- $RQ\text{-}LK_{\text{LB}}$ : 3,6 % (14)

Die Tag-zu-Tag-Schwankung der  $HF_{\text{Ruhe}}$  stammt aus Daten der HERITAGE-Studie und wurde durch Herzfrequenzmessungen an 515 Probanden an zwei separaten Tagen nach fünfminütigen Ruhephasen erhoben (202). Sie liegt innerhalb der von Scott et al. angegebenen Spanne für die Variabilität von Ruheparametern von 5,3 bis 8,5 % (191). Für die  $VO_{2\text{max}}$  wurden Ergebnisse einer Studie zur intraindividuellen Variabilität der  $VO_{2\text{max}}$  von Katch et al. (108) herangezogen, bei der fünf Probanden je acht bis 20  $VO_{2\text{max}}$ -Tests innerhalb von zwei bis vier Wochen absolvierten. Die Referenzwerte für die HF-Leistungskurve und die Leistungskurve des RQ sind aus Daten konstanter submaximaler Belastungen abgeleitet, die Bagger et al. (14) im Rahmen einer Studie über die intraindividuelle Variabilität von mit Ausdauertraining assoziierten Parametern an 15 Probanden durch jeweils drei Tests erhoben.

Die Ergebnisse stimmen gut mit den Daten von Saunders et al. (188) überein, der die submaximale HF und den submaximalen RQ von elf Elite-Langstreckenläufern bei drei verschiedenen Laufgeschwindigkeiten bestimmte. Da in der Literatur für die IAS nach Stegmann et al. (205) kein Variationskoeffizient der intraindividuellen Variabilität publiziert ist, wurde ein Mittelwert aus den Variationskoeffizienten der 2-, 2,5- und 4-mmol-Schwelle, der Basis-Laktat +1 mmol-Schwelle, der Ruhelaktat +1 mmol-Schwelle und der aeroben Laktatschwelle gebildet, die von Pfitzinger et al. (168) an zwölf Probanden an drei Testtagen gemessen wurden.

## 3.4 Statistik

### 3.4.1 Abschätzung der notwendigen Stichprobengröße

A priori wurde abgeschätzt, wie groß der Stichprobenumfang mindestens sein muss, um eine signifikante Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit zu erfassen. Entsprechend des Längsschnitt-Studiendesigns wurden hierzu das Signifikanzniveau, die Teststärke, der als bedeutsam anzusehende Mindestzuwachs der  $VO_{2max}$  sowie die Test-Reliabilität von  $VO_{2max}$ -Messungen herangezogen (89).

Ein Anstieg der  $VO_{2max}$  sollte als relevant erachtet werden, wenn er die intraindividuelle Variabilität der Messungen überschreitet. Nach Katch et al. (108) beträgt die intraindividuelle Gesamtvariabilität von  $VO_{2max}$ -Messungen 5,6 %, weshalb 6 % als Grenze für eine bedeutsame Verbesserung definiert wurden. Denis et al. beobachteten nach 40 Wochen dreimal wöchentlich 60 min Fahrradergometertraining mit konstanter Herzfrequenzvorgabe von 80 bis 85 %  $VO_{2max}$  eine Verbesserung der  $VO_{2max}$  um 6 % (45). Ein Anstieg in dieser Größenordnung konnte auch für die vorliegende Studie erwartet werden.

Mit fünfprozentigem Signifikanzniveau, einer Teststärke von 0,8, der als bedeutsam definierten Minstdifferenz der  $VO_{2max}$  von 6 % und der intraindividuellen Gesamtvariabilität von  $VO_{2max}$ -Messungen von 5,6 % wurde der Stichprobenumfang nach Hopkins (89) mit folgender Formel berechnet:

$$n = 16 \cdot v^2 / \text{diff}^2 \quad \text{mit} \quad v = \text{intraindividuelle Variabilität} \\ \text{diff} = \text{bedeutsame Minstdifferenz}$$
$$n = 14$$

Der Dropout-Forschung zufolge muss bei gesundheitssportlichen Trainingsprogrammen mit Ausstiegsquoten von 40 bis 60 % gerechnet werden (163). Aufgrund der sorgfältigen Aus-

wahl der Probanden nach Bindungsfaktoren (siehe Kapitel 3.1.2) und der umfassenden Betreuung wurde eine Dropout-Quote von nur 40 % angenommen. Um am Ende der zwölfmonatigen Trainingsphase mindestens 14 auswertbare Datensätze zu erhalten, sollte die Studie mit 25 Teilnehmern begonnen werden.

### 3.4.2 Statistische Untersuchung des Datenmaterials

Alle Rechengänge und statistischen Prozeduren wurden mithilfe des Computerprogramms Statistica (Version 6, Edition '02) durchgeführt.

Unterschiede der Auftretenshäufigkeit eines Levelling-offs der Sauerstoffaufnahme bei den einzelnen Laufband- und Fahrradergometrien wurden entsprechend der Dichotomie des Merkmals und der Abhängigkeit der Stichproben mit dem McNemar-Test überprüft. Alle anderen Daten wurden zunächst mit dem Shapiro-Wilks W-Test auf Normalverteilung untersucht. Dem Intervallskalenniveau entsprechend, erfolgte die deskriptive Statistik bei parametrischen Daten in Form von Mittelwerten (MW), Standardabweichungen (SD) und Spannen (Min – Max) und bei nonparametrischen Daten in Form von Medianen, Quartilen (25 %/75 %) und Spannen. Die Überprüfung zweier Mittelwertunterschiede von abhängigen Stichproben (z. B. Maximalparameter oder IAS bei den Fahrradergometrien) erfolgte bei parametrischen Daten mittels t-Test für Paardifferenzen (Prüfgröße: t) und bei nonparametrischen Daten mit dem Wilcoxon-Test (Prüfgröße: T).

Mittelwertunterschiede von mehr als zwei Tests (z.B. Maximalparameter bei den Laufbandtests oder Ruhumsatzdaten) wurden bei parametrischen Daten mittels einfaktorieller Varianzanalyse (ANOVA; Faktor: Zeit (drei- oder fünffach gestuft); Prüfgröße: F) verglichen. Bei signifikanten Ergebnissen wurde post hoc der Scheffé-Test angewendet. Bei nonparametrischen Daten wurde eine Friedmann-ANOVA (Faktor: Zeit (drei- oder fünffach gestuft); Prüfgröße:  $\text{Chi}^2$ ) durchgeführt. Hier wurden post hoc bei signifikanten Ergebnissen Wilcoxon-Tests mit sequenzieller Bonferroni-Korrektur angewendet. Vergleiche von Leistungskurven (z. B. bei den Fahrradergometrien, Laufband- und Feldstufentests) erfolgten mittels zweifaktorieller ANOVA (Faktoren: Zeit (zwei- bis 13-fach gestuft) und Belastungsstufe (zwei- bis fünffach gestuft); Prüfgröße F). Im Ergebnisteil sind jeweils der Zeiteffekt und der Interaktionseffekt der Faktoren Zeit und Belastungsstufe beschrieben. Post hoc kam bei signifikanten Ergebnissen der Scheffé-Tests zur Anwendung. Da kein nonparametrisches Testverfahren für mehrfaktorielle Varianzanalysen etabliert ist, wurden nicht normalverteilte Daten ebenfalls mittels zweifaktorieller ANOVA getestet (z. B. Laktat-Leistungskurve beim Laufbandtest). Insbesondere F-Tests, zu denen auch die ANOVA gehört, gelten jedoch als robust gegen Vernachlässigung dieser Anwendungsvoraussetzung (194). Sind bei nicht normalver-

teilten Daten auch die Voraussetzungen der Varianzhomogenität bzw. der Homogenität der Korrelationen zwischen den Faktorstufen verletzt, führt das allerdings zu progressiven Entscheidungen (26).

Die Variabilität der Anpassungserscheinungen an das Ausdauertraining wurde statistisch durch Mittelwerte, Standardabweichungen und Spannen beschrieben. Außerdem wurden für Hauptzielparameter mit signifikanten Veränderungen über die Zeit jeweils die Anzahl der Probanden angegeben, bei denen keine trainingsbedingten Verbesserungen festzustellen waren (siehe Kapitel 3.3.8). Der Zusammenhang der potenziellen Einflussfaktoren Alter, Ausgangsniveau und Compliance mit den Verbesserungen der Hauptzielparameter wurde durch Korrelationen überprüft. Sie erfolgten bei parametrischen Daten mittels Pearsonscher Produkt-Moment Korrelation (Korrelationskoeffizient:  $r$ ) und bei nonparametrischen Daten mittels Spearmanscher Rangkorrelation (Korrelationskoeffizient:  $R$ ). Unterschiede des Ausmaßes der Trainingsadaptationen zwischen männlichen und weiblichen Studienteilnehmern wurden bei gegebener Normalverteilung mittels t-Test für unabhängige Stichproben (Prüfgröße:  $t$ ) und bei Nichtnormalverteilung mittels Mann-Whitney-Test (Prüfgröße  $U$ ) überprüft. Um die Stärke des Vorhersagewerts der potenziellen Einflussfaktoren Alter, Geschlecht, Ausgangsniveau und Compliance auf die Verbesserungen der Hauptzielparameter zu überprüfen und zu vergleichen, wurden darüber hinaus für jeden Hauptzielparameter multiple Regressionsanalysen (multipler Korrelationskoeffizient:  $R$ ; Regressionskoeffizient:  $\beta$ ) mit den vier potenziellen Einflussfaktoren als unabhängige Variablen durchgeführt. Die Voraussetzung der Normalverteilung wurde dabei gegebenenfalls vernachlässigt. Aber auch die multiple Regressionsanalyse gehört zur Gruppe der F-Tests, die als robust gegen Verletzung der Normalverteilungsvoraussetzung gilt (195).

Den Konventionen der Sportwissenschaft entsprechend, wurden für normalverteilte Hauptzielparameter, die sich vom Eingangs- zum Abschlusstest signifikant veränderten, zusätzlich Effektgrößen (ES) genannt. Hierfür wurde die Formel zur Berechnung von Effektgrößen von Mittelwertsdifferenzen abhängiger Stichproben nach Bortz (25) verwendet. Für die Hauptzielparameter wurden außerdem 95 % Konfidenzintervalle (95 % KI) der Veränderungen vom Eingangs- zum Abschlusstest angegeben, sofern diese signifikant waren und Normalverteilung vorlag.

Das Signifikanzniveau wurde auf  $\alpha = 0,05$  festgelegt. Die Signifikanz von Unterschieden ist in den Abstufungen  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  und  $p < 0,001$  angegeben. Bei  $0,1 > p \geq 0,05$  gilt ein Unterschied als „tendenziell“. Von Gleichheit zweier oder mehrerer Mittelwerte (z. B. der Ausbelastungsparameter bei den einzelnen Tests) wird ausgegangen, wenn  $p > 0,20$  ist. In Abbildungen, die Vergleiche von zwei Testzeitpunkten zeigen, beziehen sich die Angaben von

Signifikanzen auf Unterschiede zwischen den beiden Tests. In Abbildungen, in denen mehr als zwei Messzeitpunkte dargestellt sind, beziehen sich die Angaben von Signifikanzen jeweils auf Unterschiede vom Eingangstest zu den folgenden Tests. Im Folgenden bedeuten in den Abbildungen:

(\*)  $0,1 > p \geq 0,05$

\*  $p < 0,05$

\*\*  $p < 0,01$

\*\*\*  $p < 0,001$ .

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Probanden

#### 4.1.1 Dropouts

Initial wurden zwölf männliche und 13 weibliche Probanden zum Eignungs- und Gewöhnungstest einbestellt. Für einen männlichen Teilnehmer, der unentschuldig fehlte und damit von der Teilnahme ausgeschlossen wurde, rückte aus terminlichen Gründen eine weibliche Testperson nach. Alle 25 Absolventen des Eignungs- und Gewöhnungstests erfüllten die Teilnahmevoraussetzungen, so dass die Studie mit elf männlichen und 14 weiblichen Teilnehmern begann.

Im Verlauf der Studie kam es zu sieben Dropouts. Ein Proband beendete seine Teilnahme nach 13 Wochen wegen Umzugs. Zwei Probanden stiegen wegen Verletzungen und zwei wegen Erkrankungen, die zu Trainingspausen über drei Wochen am Stück oder sechs Wochen insgesamt führten, nach neun, 30, 33 und 40 Trainingswochen aus. Ein Teilnehmer wurde in der 47. Woche wegen Überschreitens der maximal erlaubten Anzahl von Trainingswochen mit nur zwei Einheiten ausgeschlossen. Eine Studienteilnehmerin wurde nicht ausgewertet, weil offensichtlicher Alkoholkonsum vor mehreren Tests ihre Belastungsbereitschaft und möglicherweise ihre Stoffwechsellage beeinflusst hatte. Ihr Ruheumsatz lag bis zu  $490 \text{ kcal}\cdot\text{d}^{-1}$  über dem nach Faustformel errechneten Wert, und die Durchhaltezeit auf dem Laufband war einmal gegenüber den vorangegangenen und folgenden Tests um 3 bzw. 3,5 min reduziert. Aus sozialen Gründen durfte die Probandin weiterhin am gemeinsamen Training und an den Tests teilnehmen. Der Verständlichkeit halber sind die Ergebnisse der Dropouts im Vergleich zu den Ergebnissen der ausgewerteten Studienteilnehmer am Ende des Ergebnisteils in Kapitel 4.11 dargestellt. Die Dropoutquote betrug 28 % und lag damit unterhalb der erwarteten Quote von 40 %.

#### 4.1.2 Anthropometrische Daten, Arbeits- und Sportanamnese der Probanden

Die Studienergebnisse basieren, sofern nichts Abweichendes angegeben ist, auf den Daten der verbleibenden sieben männlichen und elf weiblichen Versuchspersonen, deren anthropometrische Daten Tabelle 1 zu entnehmen sind.

Alle männlichen Studienteilnehmer waren berufstätig. Sechs übten überwiegend sitzende Tätigkeiten aus, und ein Teilnehmer arbeitete handwerklich. Von den Teilnehmerinnen arbeiteten zehn in Berufen mit überwiegend sitzender Tätigkeit, und eine war nicht berufstätig.

**Tabelle 1: Anthropometrische Daten der Versuchspersonen beim Eingangstest (n = 18).**

	<b>Alter</b> [Jahre]	<b>Größe</b> [cm]	<b>Gewicht</b> [kg]	<b>BMI</b> [kg·m <sup>-2</sup> ]	<b>KF</b> [%]
MW ± SD	42 ± 5	173 ± 9	73 ± 13	24,3 ± 2,5	30,8 ± 5,3
Min – Max	32 – 50	159 – 190	52 – 98	19,4 – 27,9	19,2 – 39,7

Vier der männlichen Probanden hatten in ihrer Jugend Fußball gespielt, und einer hatte sowohl Fußball als auch Tennis gespielt. Zwei gaben an, bis vor wenigen Jahren sporadisch gelaufen zu sein, und zwei betrieben vor Studienbeginn gelegentlich Freizeitsport, was während der Studie nicht fortgeführt wurde. Ein Proband spielte regelmäßig Tischtennis und einer war als Schiedsrichter im Jugend-Fußball aktiv. Diese beiden Tätigkeiten wurden im Studienverlauf unverändert beibehalten. Vier der Teilnehmerinnen waren in ihrer Jugend geschwommen, eine war regelmäßig gelaufen, und eine hatte Fußball gespielt. Sechs Teilnehmerinnen hatten in den vergangenen Jahren sporadisch kurze Dauerläufe absolviert. Eine Teilnehmerin betrieb vor Studienbeginn gelegentlich Freizeitsport. Zwei Teilnehmerinnen gaben an, noch niemals in ihrem Leben außerhalb des Sportunterrichts in der Schule sportlich aktiv gewesen zu sein.

#### 4.1.3 Compliance

Die Studienteilnehmer absolvierten im Verlauf des 50-wöchigen Trainings durchschnittlich  $2,8 \pm 0,2$  (2,4 – 3,1) Trainingseinheiten pro Woche. Die Dauer der Trainingseinheiten betrug im Mittel  $48 \pm 2$  min (45 – 52 min), und die Herzfrequenzen der Teilnehmer lagen durchschnittlich  $73,6 \pm 10,4$  % (56,5 – 89,2 %) dieser Zeit innerhalb der individuell vorgegebenen Herzfrequenzzone (n = 18). Die mittleren Trainingsherzfrequenzen lagen durchschnittlich  $1,0$  (0,5/1,8) min<sup>-1</sup> (0,5 – 4,3 min<sup>-1</sup>) über der errechneten Vorgabe. Trainingshäufigkeit, Dauer der einzelnen Trainingseinheiten und Zeitanteil innerhalb der Herzfrequenzzone sind in Tabelle 2 für die Zeiträume zwischen den Testphasen dargestellt. Die Compliance war in den vier Zeiträumen zwischen den Laufbandtests jeweils gleich (Trainingseinheiten pro Woche: p = 0,53; F(3, 51) = 0,75; Dauer der Trainingseinheiten: p = 0,45; F(3, 51) = 0,90; Zeitanteil innerhalb der Herzfrequenzzone: p = 0,95, F(3, 51) = 0,12; n = 18).

Im Mittel setzten die Studienteilnehmer das Training für  $2,4 \pm 1,8$  ganze Wochen (0 – 6 ganze Wochen) aus. Hinzu kamen einzelne ausgesetzte Trainingseinheiten. Ursachen für einzelne ausgesetzte Einheiten waren überwiegend Zeitmangel und leichte, nicht genauer beschriebene körperliche Beschwerden. Gründe für die insgesamt 43 ausgesetzten ganzen Personenwochen waren nach Angaben der Probanden:

- Gesundheitliche Ursachen: 34 Personenwochen (79 %)
  - Internistisch: 29 Personenwochen (Erkältungskrankheiten/ grippale Infekte 13 und sonstige Erkrankungen 16 Personenwochen)
  - Orthopädisch: 5 Personenwochen (Wadenverhärtungen 1, Achillessehnenreizungen 2 und Fußgewölbesenkungen 2 Personenwochen)
- Ungeeignete Witterungs- oder Geländebedingungen (im Urlaub): 5 Personenwochen (12 %)
- Zeitmangel: 4 Personenwochen (9 %).

**Tabelle 2: Mittlere Anzahl der wöchentlich absolvierten Trainingseinheiten (TE pro Woche), deren durchschnittliche Dauer (Dauer TE) sowie mittlerer prozentualer Anteil der Trainingszeit innerhalb der vorgegebenen Herzfrequenzzone (Anteil in Zone) in den vier Zeiträumen zwischen den Laufbandtests (MW  $\pm$  SD, Min – Max; n = 18).**

	Zeitraum			
	W <sub>0</sub> – W <sub>12</sub>	W <sub>13</sub> – W <sub>24</sub>	W <sub>25</sub> – W <sub>36</sub>	W <sub>37</sub> – W <sub>48</sub>
<b>TE pro Woche</b> [ ]	2,8 $\pm$ 0,2 2,3 – 3,2	2,7 $\pm$ 0,3 2,3 – 3,3	2,7 $\pm$ 0,3 2,2 – 3,5	2,7 $\pm$ 0,2 2,3 – 3,1
<b>Dauer TE</b> [min]	48 $\pm$ 3 43 – 54	48 $\pm$ 3 44 – 56	48 $\pm$ 4 44 – 57	47 $\pm$ 3 43 – 55
<b>Anteil in Zone</b> [%]	73,2 $\pm$ 10,6 53,2 – 88,4	73,6 $\pm$ 11,1 53,7 – 92,4	74,3 $\pm$ 12,8 48,1 – 91,9	73,5 $\pm$ 12,0 53,5 – 91,6

## 4.2 Charakterisierung des Ausdauertrainings

Die Herzfrequenzvorgaben für das Ausdauertraining lagen initial im Mittel beim Basis-Laktatwert zuzüglich  $1,3 \pm 0,5$  mmol ( $0,4 - 2,3$  mmol, n = 18). In Tabelle 3 ist das Ausdauertraining durch die entsprechenden Prozentsätze der HF-Reserve, der HF<sub>max</sub>, der VO<sub>2max</sub> und der VO<sub>2</sub>-Reserve näher charakterisiert. Als Faustformel ausgedrückt, entsprach die Trainingsherzfrequenz 181 (175/186) minus Lebensalter (173 – 203 minus Lebensalter, n = 18).

**Tabelle 3: Charakterisierung des Ausdauertrainings (MW  $\pm$  SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 18).**

% HF-Reserve	% HF <sub>max</sub>	% VO <sub>2max</sub>	% VO <sub>2</sub> -Reserve
60 (60/61)	76 (75/77)	62 $\pm$ 8	59 $\pm$ 9
60 – 77	73 – 85	49 – 78	45 – 75

Abbildung 7 zeigt die mittleren Blutlaktatkonzentrationen der Probanden während einer Trainingseinheit im ersten ( $W_{11}$ ) und einer im letzten Viertel ( $W_{47}$ ) des 50-wöchigen Trainings. Elf Studienteilnehmer waren bei beiden Terminen anwesend. Eine Teilnehmerin wurde von der Auswertung ausgeklammert, weil sie bei einem der Termine ihre Herzfrequenzvorgabe im Mittel um mehr als  $10 \text{ min}^{-1}$  überschritt. Die Blutlaktatkonzentration während des Trainings war in der 47. Woche signifikant niedriger als in der elften ( $p < 0,01$ ;  $F(1, 9) = 12,56$ ;  $n = 10$ ). Im Mittel lag sie in der elften Woche bei  $1,37 \pm 0,18 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $1,10 - 1,68 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und in der 47. Woche bei  $1,15 \pm 0,24 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $0,80 - 1,52 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ). Das Ausdauertraining ist damit als aerob mit im Trainingsverlauf geringfügig abnehmender metabolischer Beanspruchung einzustufen (114).

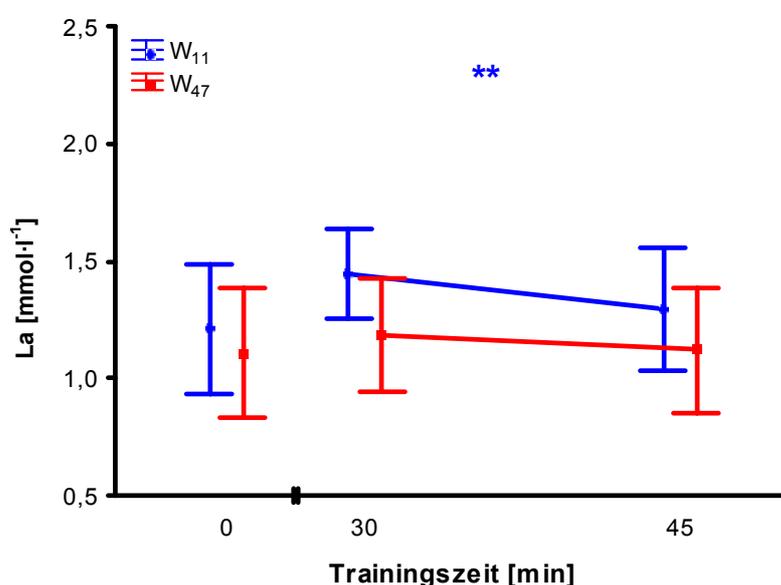


Abbildung 7: Blutlaktatkonzentrationen während des Ausdauertrainings in der elften und 47. Trainingswoche (MW ± SD;  $n = 10$ ).

Tabelle 4: Laufgeschwindigkeit mit Trainingsherzfrequenz ( $V_{\text{HF-Vorgabe}}$ ) und die daraus errechnete Strecke, die von den Probanden während einer 45-minütigen Trainingseinheit zurückgelegt wurde, zu den einzelnen Testzeitpunkten (MW ± SD, Min – Max;  $n = 18$ ).

	Testzeitpunkt				
	$W_0$	$W_{13}$	$W_{25}$	$W_{37}$	$W_{49}$
$V_{\text{HF-Vorgabe}}$ [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	$7,3 \pm 0,7$ 6,2 – 8,4	$8,0 \pm 0,9$ 6,7 – 9,6	$8,0 \pm 1,0$ 7,0 – 9,9	$7,8 \pm 0,9$ 6,5 – 9,6	$8,0 \pm 1,0$ 6,7 – 9,8
Strecke [km]	$5,5 \pm 0,5$ 4,6 – 6,3	$6,0 \pm 0,7$ 5,0 – 7,2	$6,0 \pm 0,7$ 5,2 – 7,4	$5,9 \pm 0,7$ 4,9 – 7,2	$6,0 \pm 0,7$ 5,0 – 7,4

In Tabelle 4 sind die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit mit Trainingsherzfrequenz und die daraus errechnete Laufstrecke, die von den Probanden in einer 45-minütigen Trainingseinheit zurückgelegt wurde, zu den Zeitpunkten der fünf Laufbandtests angegeben. Laufgeschwindigkeit und Laufstrecke veränderten sich im Trainingsverlauf signifikant (jeweils:  $p < 0,001$ ;  $F(4, 68) = 12,37$ ;  $n = 18$ ). Beide stiegen in den ersten zwölf Wochen signifikant an ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ) und veränderten sich dann nicht mehr (jeweils:  $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 1,00$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,62$ ;  $W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,54$ ).

### 4.3 Umgebungsbedingungen während der Datenaufnahme

Ein Überblick über die Temperatur in den Untersuchungsräumen zu den verschiedenen Testzeitpunkten ist in Tabelle 5 gegeben.

**Tabelle 5: Temperatur in den Untersuchungsräumen während der Laufbandtests (LB), Fahrradergometrien (FS) und Ruheumsatzmessungen (RU; MW  $\pm$  SD, Min – Max; LB und FS:  $n = 18$ ; RU:  $n = 17$ ).**

		Testzeitpunkt				
		$W_0$	$W_{13}$	$W_{25}$	$W_{37}$	$W_{49}$
<b>LB</b>	Temperatur	$22,8 \pm 0,7$	$27,6 \pm 0,8$	$25,0 \pm 1,0$	$24,8 \pm 0,5$	$24,2 \pm 0,6$
	[°C]	21,1 – 24,3	26,3 – 28,8	22,8 – 26,6	23,6 – 25,6	23,3 – 25,5
<b>FS</b>	Temperatur	$22,5 \pm 0,9$				$24,1 \pm 0,6$
	[°C]	21,0 – 23,9				23,1 – 25,3
<b>RU</b>	Temperatur	$23,1 \pm 1,0$		$23,0 \pm 0,4$		$21,8 \pm 0,5$
	[°C]	21,6 – 24,3		22,6 – 23,9		20,9 – 22,7

Während der Laufbandtests variierte die Umgebungstemperatur signifikant ( $p < 0,001$ ;  $F(4, 68) = 113,21$ ;  $n = 18$ ). Beim Eingangstest war es signifikant kälter ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ) und beim ersten Zwischentest signifikant wärmer ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ) als zu allen anderen Testzeitpunkten. In der 25. Woche war die Raumtemperatur darüber hinaus signifikant höher als beim Abschlusstest ( $p < 0,05$ ). Bei den Laufbandtests in der 25. und 37. ( $p = 0,93$ ) sowie in der 37. und 49. Trainingswoche ( $p = 0,19$ ) unterschied sich die Raumtemperatur nicht signifikant. Während der Fahrradergometrien war die Raumtemperatur beim Abschlusstest signifikant höher als beim Eingangstest ( $p < 0,001$ ;  $t(17) = 6,96$ ;  $n = 18$ ). Auch die Umgebungstemperatur bei den Ruheumsatzmessungen schwankte signifikant ( $p < 0,001$ ;  $F(2, 32) = 19,97$ ;  $n = 17$ ). Zwischen Eingangs- und Zwischentest bestand kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,97$ ), aber beim Abschlusstest war es signifikant kälter als bei den beiden vorangegan-

genen Tests ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ). Die Hallentemperatur während der submaximalen Feldstufentests betrug im Mittel  $23,3 \pm 2,2$  °C ( $21,0 - 29,0$  °C).

## 4.4 Laufbandtests

### 4.4.1 Körpergewicht, Körperfettanteil und fettfreie Körpermasse

Körpergewicht, Körperfettanteil und fettfreie Körpermasse der Probanden zu den einzelnen Testzeitpunkten sind in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Körpergewicht (Gewicht), Körperfettanteil (KF) und fettfreie Körpermasse (FFM) der Probanden zu den einzelnen Testzeitpunkten (MW  $\pm$  SD, Min – Max;  $n = 18$ ).**

	Testzeitpunkt				
	W <sub>0</sub>	W <sub>13</sub>	W <sub>25</sub>	W <sub>37</sub>	W <sub>49</sub>
<b>Gewicht</b>	73,0 $\pm$ 13,0	72,0 $\pm$ 12,6	71,2 $\pm$ 11,7	71,3 $\pm$ 11,3	71,7 $\pm$ 11,6
[kg]	52,4 – 98,4	49,4 – 94,8	49,4 – 93,6	52,2 – 93,4	52,6 – 94,8
<b>KF</b>	30,8 $\pm$ 5,3		28,5 $\pm$ 5,6		27,1 $\pm$ 5,4
[%]	19,2 – 39,7		17,7 – 39,0		16,2 – 36,7
<b>FFM</b>	50,8 $\pm$ 11,6		51,1 $\pm$ 10,6		52,5 $\pm$ 10,7
[kg]	36,6 – 73,7		37,3 – 72,5		38,1 – 74,0

Das Gewicht der Studienteilnehmer schwankte im Trainingsverlauf signifikant ( $p < 0,01$ ;  $F(4, 68) = 3,88$ ;  $n = 18$ ). Zwischen Eingangs- und Abschlusstest bestand kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,17$ ), aber in der 25. und 37. Trainingswoche war das Körpergewicht signifikant niedriger als zu Studienbeginn ( $p$  jeweils  $< 0,05$ ). Der Körperfettanteil nahm im Studienverlauf signifikant ab ( $p < 0,001$ ;  $F(2, 34) = 23,04$ ;  $n = 18$ ). Er veränderte sich insgesamt um im Mittel  $-3,7 \pm 2,3$  % ( $-7,8$  bis  $+1,8$  %;  $p < 0,001$ ). Die Abnahme war in der ersten Studienhälfte signifikant ( $p < 0,001$ ), in der zweiten Studienhälfte tendierte der Körperfettanteil zu einer weiteren Abnahme ( $p = 0,06$ ). Die fettfreie Körpermasse der Studienteilnehmer stieg im Studienverlauf signifikant an ( $p < 0,01$ ;  $F(2, 34) = 6,00$ ;  $n = 18$ ). Die Veränderung betrug insgesamt im Mittel  $+1,6 \pm 2,1$  kg ( $-3,4$  bis  $+4,0$  kg;  $p < 0,01$ ). Während sich die fettfreie Körpermasse in den ersten sechs Monaten nicht veränderte ( $p = 0,83$ ), war der Anstieg in den letzten sechs Monaten signifikant ( $p < 0,05$ ).

Bei der abschließenden retrospektiven Befragung gaben zehn Studienteilnehmer an, ihre Essgewohnheiten im Verlauf des Ausdauertrainings nicht geändert zu haben. Drei ernährten sich eigenen Angaben zufolge bewusst gesünder und zwei achteten auf mehr Fleischzufuhr

wegen ihrer niedrigen Ferritinspiegel. Drei Teilnehmer verspürten durch das Lauftraining größeren Hunger und aßen daher ihrer eigenen Einschätzung nach mehr als zuvor.

#### 4.4.2 Ruheherzfrequenz und Ruheblutdruck

Abbildung 8 und Tabelle 7 zeigen die mittlere Ruheherzfrequenz der Probanden zu den einzelnen Testzeitpunkten. Die Ruheherzfrequenz sank im Trainingsverlauf signifikant ( $p < 0,001$ ;  $F(4, 68) = 11,17$ ;  $n = 18$ ). Insgesamt veränderte sich die  $HF_{\text{Ruhe}}$  um  $-9 \pm 6 \text{ min}^{-1}$  ( $-24$  bis  $+1 \text{ min}^{-1}$ ; 95 % KI:  $(-12; -6 \text{ min}^{-1})$ ;  $p < 0,001$ ; ES: 2,27). Während der ersten sechs Trainingsmonate sank die  $HF_{\text{Ruhe}}$  signifikant ( $W_0$  vs.  $W_{25}$ :  $p < 0,001$ ), in der zweiten Studienhälfte veränderte sie sich nicht mehr ( $W_{25}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 1,00$ ). Die Veränderung von einem Testzeitpunkt zum nächsten war nicht signifikant bzw. lediglich tendenziell ( $W_0$  vs.  $W_{13}$ :  $p = 0,18$ ;  $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 0,07$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,90$ ;  $W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,94$ ). Vier der 18 Studienteilnehmer (22 %) zeigten keine trainingsbedingten Veränderungen der Ruheherzfrequenz.

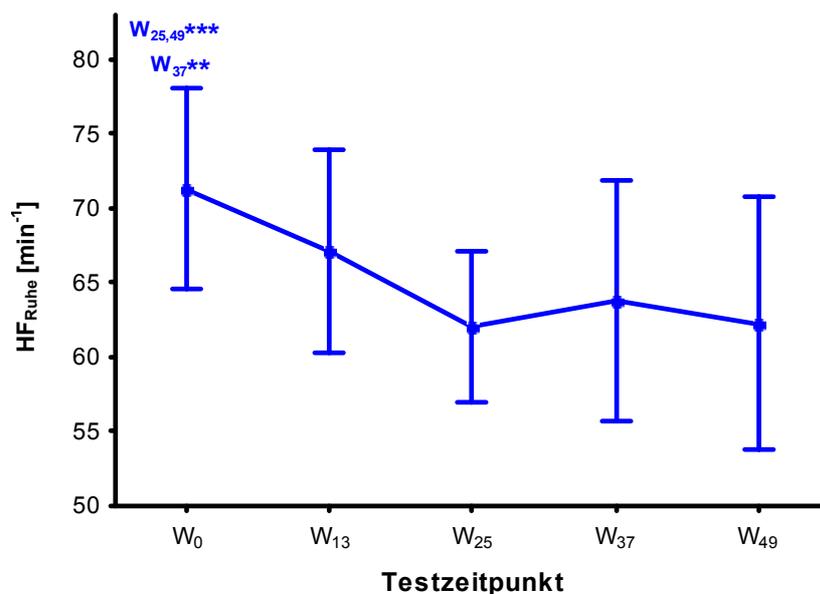


Abbildung 8: Entwicklung der  $HF_{\text{Ruhe}}$  im Trainingsverlauf (MW ± SD;  $n = 18$ ).

Tabelle 7:  $HF_{\text{Ruhe}}$  und  $RR_{\text{Ruhe}}$  (systolisch/diastolisch) zu den einzelnen Testzeitpunkten ( $HF_{\text{Ruhe}}$ : MW ± SD, Min – Max;  $RR_{\text{Ruhe}}$ : Mediane, Min – Max;  $n = 18$ ).

	Testzeitpunkt				
	$W_0$	$W_{13}$	$W_{25}$	$W_{37}$	$W_{49}$
$HF_{\text{Ruhe}}$	71 ± 7	67 ± 7	62 ± 5	64 ± 8	62 ± 8
[min <sup>-1</sup> ]	57 – 84	55 – 81	53 – 71	49 – 79	46 – 76
$RR_{\text{Ruhe}}$	120/80	110/70	117/80	120/80	115/80
[mmHg]	100/60 – 160/90	100/60 – 130/95	100/70 – 140/80	110/70 – 130/90	105/70 – 150/90

Der Ruheblutdruck der Probanden ist Tabelle 7 zu entnehmen. Weder der systolische noch der diastolische Ruheblutdruck veränderte sich im Verlauf des Ausdauertrainings signifikant (systolisch:  $p = 0,23$ ;  $\text{Chi}^2(4, 18) = 5,57$ ; diastolisch:  $p = 0,15$ ;  $\text{Chi}^2(4, 18) = 6,79$ ;  $n = 18$ ).

#### 4.4.3 Ausbelastung

Zur Beurteilung der Ausbelastung sind in Tabelle 8 die Anzahl der Probanden mit Levelling-off der Sauerstoffaufnahme, die maximale Herzfrequenz, die maximale Blutlaktatkonzentration und der maximale Respiratorische Quotient der Probanden während der fünf Laufbandtests dargestellt. Darüber hinaus sind zur Charakterisierung der Tests die Gesamtdauer sowie die Dauer des rampenförmig ansteigenden Teils der Belastung aufgelistet. Eine Probandin gab nach den Laufbandtests an, sich wegen mangelnder Anstrengungsbereitschaft nicht ausbelastet zu haben. Sie wurde bei den Laufbandtests von der Auswertung aller Maximalparameter ausgeschlossen, weshalb die Ergebnisse auf den Daten von 17 Teilnehmern basieren. Eine interne Batterie des Spiroergometrieegeräts, die zur Messung der  $\text{VCO}_2$  notwendig ist, war bei einem Test eines Probanden leer. Der maximale RQ ist daher nur für 16 Probanden angegeben.

**Tabelle 8: Levelling-off der  $\text{VO}_2$ ,  $\text{HF}_{\text{max}}$ ,  $\text{La}_{\text{max}}$  und  $\text{RQ}_{\text{max}}$  sowie Belastungsdauer (Dauer Test) und Rampendauer (Dauer Rampe) bei den Laufbandtests (n oder MW  $\pm$  SD, Min – Max;  $\text{RQ}_{\text{max}}$ :  $n = 16$ , ansonsten:  $n = 17$ ).**

	Testzeitpunkt				
	$W_0$	$W_{13}$	$W_{25}$	$W_{37}$	$W_{49}$
<b>Levelling-off</b> [n]	9	7	7	10	9
<b><math>\text{HF}_{\text{max}}</math></b> [ $\text{min}^{-1}$ ]	$183 \pm 8$ 162 – 195	$177 \pm 7$ 159 – 186	$179 \pm 10$ 160 – 197	$181 \pm 10$ 161 – 200	$180 \pm 7$ 165 – 192
<b><math>\text{La}_{\text{max}}</math></b> [ $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ]	$8,59 \pm 2,64$ 4,78 – 13,3	$8,23 \pm 3,37$ 3,85 – 17,6	$7,98 \pm 2,85$ 4,43 – 14,0	$7,92 \pm 2,59$ 3,96 – 13,3	$8,48 \pm 2,10$ 5,72 – 13,2
<b><math>\text{RQ}_{\text{max}}</math></b> [ ]	$1,11 \pm 0,05$ 1,02 – 1,23	$1,05 \pm 0,05$ 0,97 – 1,12	$1,05 \pm 0,04$ 0,98 – 1,12	$1,03 \pm 0,04$ 0,91 – 1,09	$1,04 \pm 0,03$ 0,99 – 1,11
<b>Dauer Test</b> [min]	$19,8 \pm 2,1$ 16,0 – 24,0	$20,8 \pm 2,1$ 18,0 – 25,0	$21,4 \pm 2,1$ 18,0 – 26,0	$21,4 \pm 2,1$ 18,5 – 25,7	$21,7 \pm 2,3$ 18,2 – 25,8
<b>Dauer Rampe</b> [min]	$6,4 \pm 1,4$ 4,0 – 9,0	$7,4 \pm 1,6$ 5,0 – 11,0	$8,0 \pm 1,5$ 6,0 – 11,0	$8,0 \pm 1,7$ 5,5 – 11,5	$8,3 \pm 1,7$ 5,5 – 12,0

Als Abbruchgründe nannten die 17 Studienteilnehmer, deren Maximalwerte bei den Laufbandtests ausgewertet wurden, entweder allgemeine Erschöpfung, das Gefühl eingeschränkter Luftzufuhr durch die Maske oder beide Gründe. Im Mittel war bei  $8 \pm 1$  von 17 Probanden bzw.  $47 \pm 6$  % ein Levelling-off der  $VO_2$  zu beobachten. Die  $HF_{\max}$  lag im Mittel bei  $180 \pm 8 \text{ min}^{-1}$  ( $164 - 194 \text{ min}^{-1}$ ),  $La_{\max}$  betrug im Mittel  $8,24 \pm 2,57 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $4,85 - 14,28 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und der  $RQ_{\max}$  lag durchschnittlich bei  $1,06 \pm 0,04$  ( $0,99 - 1,13$ ).

Die Anzahl der Probanden, bei denen ein Levelling-off auftrat, war bei den fünf Tests gleich ( $p$  jeweils  $> 0,20$ ;  $\text{Chi}^2(1) \leq 1,33$ ). Während  $La_{\max}$  bei den fünf Laufbandtests ebenfalls gleich war ( $p > 0,20$ ;  $F(4, 64) = 1,35$ ;  $n = 17$ ), variierten  $HF_{\max}$  und  $RQ_{\max}$  signifikant ( $HF_{\max}$ :  $p < 0,01$ ;  $F(4, 64) = 4,61$ ;  $n = 17$ ;  $RQ_{\max}$ :  $p < 0,001$ ;  $F(4, 60) = 18,72$ ;  $n = 16$ ). Die maximale Herzfrequenz war beim Eingangstest signifikant höher als beim ersten Zwischentest ( $p < 0,01$ ) und tendenziell höher als in der 25. Trainingswoche ( $p = 0,06$ ). Bei den anderen Tests war die  $HF_{\max}$  gleich ( $p$  jeweils  $> 0,20$ ). Der maximale RQ war beim Eingangstest signifikant höher als bei allen folgenden Tests ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ), bei den anderen Tests war er gleich ( $p$  jeweils  $> 0,20$ ).

#### 4.4.4 Maximale Laufgeschwindigkeit und maximale Sauerstoffaufnahme

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der maximalen Laufgeschwindigkeit im Trainingsverlauf. In Abbildung 10 ist die Entwicklung der maximalen Sauerstoffaufnahme der Studienteilnehmer dargestellt. Die dazugehörigen Daten sind Tabelle 9 zu entnehmen. Da das Körpergewicht im Studienverlauf signifikant variierte, sind neben absoluten und gängigen körpergewichtsbezogenen auch allometrisch skalierte Daten angegeben.

Die maximale Laufgeschwindigkeit steigerte sich im Verlauf des Ausdauertrainings signifikant ( $p < 0,001$ ;  $F(4, 64) = 43,57$ ;  $n = 17$ ). Im Mittel betrug die Veränderung insgesamt  $+1,5 \pm 0,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $-0,4$  bis  $+2,4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ). Die Steigerung von einem Messzeitpunkt zum nächsten war während des ersten halben Jahres signifikant ( $W_0$  vs.  $W_{13}$ :  $p < 0,001$ ;  $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p < 0,05$ ), während des zweiten halben Jahres jedoch nicht mehr ( $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 1,00$ ;  $W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,61$ ). Ab der 25. Trainingswoche verbesserte sich  $V_{\max}$  nicht mehr signifikant ( $W_{25}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,45$ ).

Die absolute  $VO_{2\max}$  der Probanden stieg im Trainingsverlauf signifikant an ( $p < 0,001$ ;  $F(4, 64) = 12,00$ ;  $n = 17$ ). Insgesamt betrug die Veränderung im Mittel  $+0,36 \pm 0,33 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $-0,38$  bis  $+0,87 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) bzw.  $+14,2 \pm 11,3$  % ( $-9,4$  bis  $+30,1$  %;  $p < 0,001$ ). Die Verbesserung war dabei nur vom Eingangstest zum ersten Zwischentest signifikant ( $p < 0,05$ ) und im weiteren Trainingsverlauf von Test zu Test nicht mehr ( $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 0,96$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,94$ ;

$W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,75$ ). Ab der 13. Trainingswoche verbesserte sich die absolute  $VO_{2max}$  nicht mehr signifikant bzw. nur noch tendenziell ( $p \geq 0,06$ ).

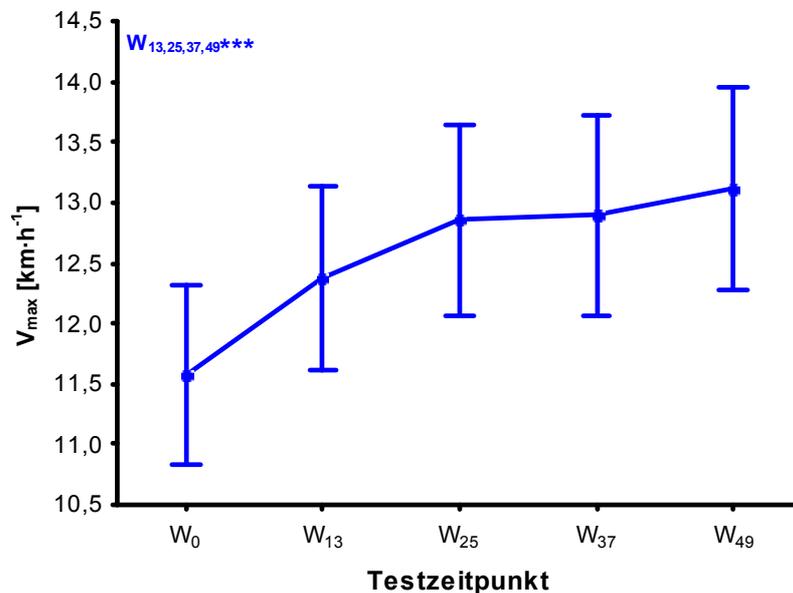


Abbildung 9: Entwicklung der  $V_{max}$  bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW  $\pm$  SD; n = 17).

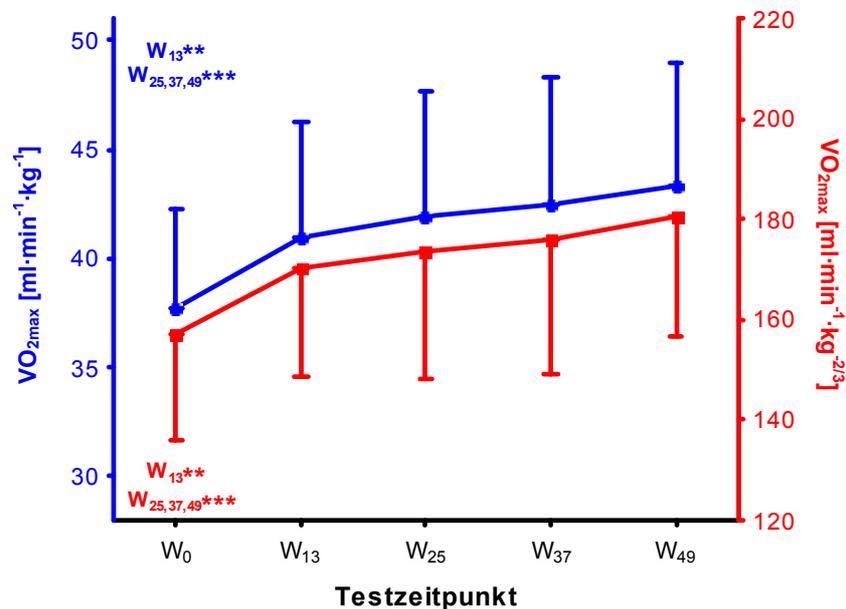


Abbildung 10: Entwicklung der  $VO_{2max}$  bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW und SD; n = 17).

Pro kg Körpergewicht verbesserte sich die  $VO_{2max}$  ebenfalls signifikant ( $p < 0,001$ ;  $F(4, 64) = 15,94$ ;  $n = 17$ ). Die Gesamtveränderung betrug durchschnittlich  $+5,7 \pm 4,1$  ml·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> (-1,1 bis +13,8 ml·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>) bzw.  $+15,6 \pm 11,6$  % (-2,7 bis +36,9 %; 95 % KI: (+3,8; +7,7 ml·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>);  $p < 0,001$ ; ES: 2,11). Der Zuwachs war wiederum vom Eingangstest zum

ersten Zwischentest signifikant ( $p < 0,01$ ) und im weiteren Trainingsverlauf von Test zu Test nicht mehr ( $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 0,82$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,98$ ;  $W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,83$ ). Nach der 13. Trainingswoche stieg die körpergewichtsbezogene  $VO_{2max}$  im Mittel nicht mehr signifikant bzw. höchstens noch tendenziell an ( $p \geq 0,06$ ). Bei vier der 17 Probanden (24 %) verbesserte sich die  $VO_{2max}$  [ $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ ] im Trainingsverlauf nicht.

Die allometrisch skalierten Daten ergaben gleichfalls eine signifikante Verbesserung der  $VO_{2max}$  ( $p < 0,001$ ;  $F(4, 64) = 15,47$ ;  $n = 17$ ). Die Veränderung betrug insgesamt  $+23 \pm 17 ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-2/3}$  (-9 bis  $+55 ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-2/3}$ ;  $p < 0,001$ ). Auch hier war die Anstiege vom ersten zum zweiten Test signifikant ( $p < 0,01$ ) und im weiteren Trainingsverlauf von einem Test zum nächsten nicht mehr ( $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 0,86$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,97$ ;  $W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,75$ ). Die allometrisch skalierte  $VO_{2max}$  veränderte sich ab der 25. Trainingswoche nicht mehr signifikant ( $p \geq 0,35$ ).

**Tabelle 9:**  $V_{max}$  und  $VO_{2max}$  bei den Laufbandtests (MW  $\pm$  SD, Min – Max;  $n = 17$ ).

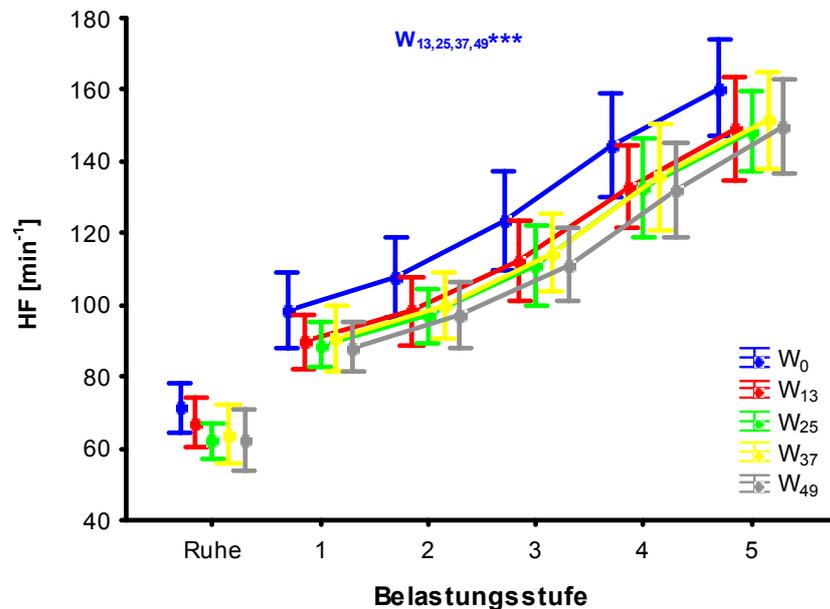
	Testzeitpunkt				
	$W_0$	$W_{13}$	$W_{25}$	$W_{37}$	$W_{49}$
$V_{max}$ [ $km \cdot h^{-1}$ ]	$11,6 \pm 1,5$ 8,8 – 14,8	$12,4 \pm 1,5$ 10,4 – 15,6	$12,9 \pm 1,5$ 10,4 – 16,4	$12,9 \pm 1,6$ 10,8 – 16,1	$13,1 \pm 1,6$ 10,5 – 16,2
$VO_{2max}$ [ $l \cdot min^{-1}$ ]	$2,77 \pm 0,61$ 1,66 – 4,05	$2,96 \pm 0,58$ 2,10 – 3,86	$3,00 \pm 0,64$ 2,06 – 3,92	$3,05 \pm 0,69$ 1,97 – 4,06	$3,13 \pm 0,63$ 2,16 – 4,19
$VO_{2max}$ [ $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ ]	$37,7 \pm 4,6$ 25,7 – 47,1	$41,0 \pm 5,2$ 30,7 – 51,5	$42,0 \pm 5,8$ 32,7 – 50,9	$42,5 \pm 5,8$ 32,0 – 49,9	$43,4 \pm 5,5$ 34,7 – 54,4
$VO_{2max}$ [ $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-2/3}$ ]	$157 \pm 21$ 103 – 190	$170 \pm 22$ 130 – 210	$174 \pm 25$ 130 – 211	$176 \pm 27$ 126 – 216	$180 \pm 24$ 138 – 221

#### 4.4.5 Herzfrequenzleistungskurve

Abbildung 11 zeigt die Entwicklung der Herzfrequenzleistungskurve bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf. Die Verschiebung der HF-Leistungskurve von einem Messzeitpunkt zum nächsten ist in Tabelle 10 aufgelistet.

Die HF-Leistungskurve verschob sich im Trainingsverlauf signifikant (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(4, 68) = 22,27$ ;  $n = 18$ ). Insgesamt verschob sie sich im Mittel um  $-11 \pm 7 min^{-1}$  (-22 bis  $+2 min^{-1}$ ; 95 % KI: (-8;  $-14 min^{-1}$ );  $p < 0,001$ ; ES: 2,40). In den ersten zwölf Trainingswochen war die Absenkung der HF-Leistungskurve signifikant ( $p < 0,001$ ), im weiteren Trainingsverlauf jedoch von Tests zu Test nicht mehr ( $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 0,99$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,43$ ;  $W_{37}$

vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,46$ ). Ab der 13. Trainingswoche verschob sich die HF-Leistungskurve nicht mehr signifikant ( $p \geq 0,76$ ). Drei der 18 Studienteilnehmer (17 %) zeigten im Trainingsverlauf keine Absenkung der HF-Leistungskurve. Die Kurvenverläufe der HF-Leistungskurven unterschieden sich nicht signifikant zwischen den fünf Tests (Interaktionseffekt:  $p = 0,99$ ;  $F(16, 272) = 0,32$ ;  $n = 18$ ).



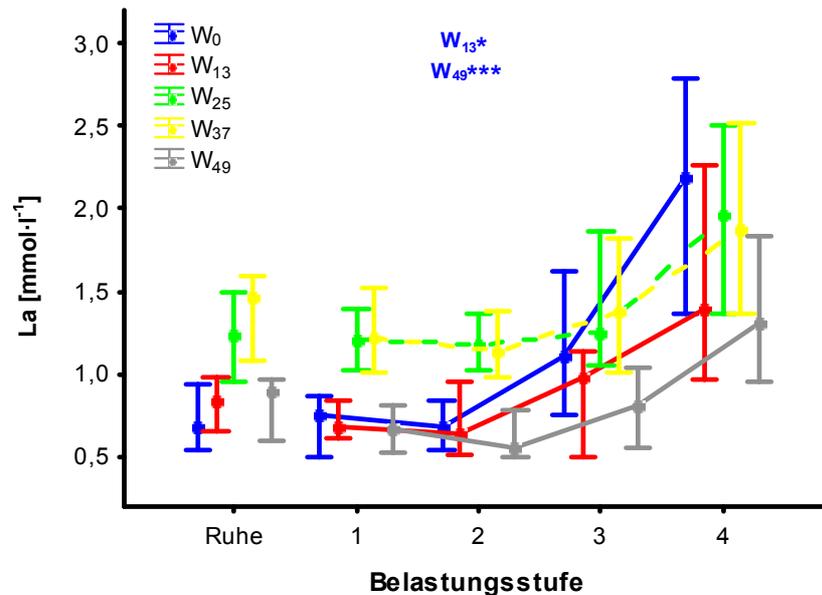
**Abbildung 11:** Entwicklung der HF-Leistungskurve bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW  $\pm$  SD;  $n = 18$ ).

**Tabelle 10:** Verschiebung der HF-Leistungskurve ( $\Delta$  HF-LK) bei den Laufbandtests von einem Test zum nächsten (MW  $\pm$  SD, Spannen;  $n = 18$ ).

	Zeitraum			
	$W_0 - W_{13}$	$W_{13} - W_{25}$	$W_{25} - W_{37}$	$W_{37} - W_{49}$
<b><math>\Delta</math> HF-LK</b>	$-10 \pm 6$	$-1 \pm 4$	$+3 \pm 7$	$-3 \pm 4$
[ $\text{min}^{-1}$ ]	-18 bis +6	-10 bis +6	-8 bis +16	-16 bis +2

#### 4.4.6 Laktatleistungskurve

In Abbildung 12 ist die Entwicklung der Laktatleistungskurve während der Laufbandtests im Trainingsverlauf zu sehen. Die Laktatkonzentration in der 25. und 37. Trainingswoche waren unplausibel hoch. Sie unterschieden sich in Ruhe und auf den ersten beiden Belastungsstufen signifikant von den Laktatkonzentrationen bei den anderen Tests ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ). Andere metabolische Parameter wie der RQ (siehe Kapitel 4.4.7) zeigten dieses Verhalten nicht, weshalb ein Bestimmungsfehler (z. B. im Labor) in Betracht gezogen werden muss und die beiden Tests von der Auswertung ausgeklammert wurden.



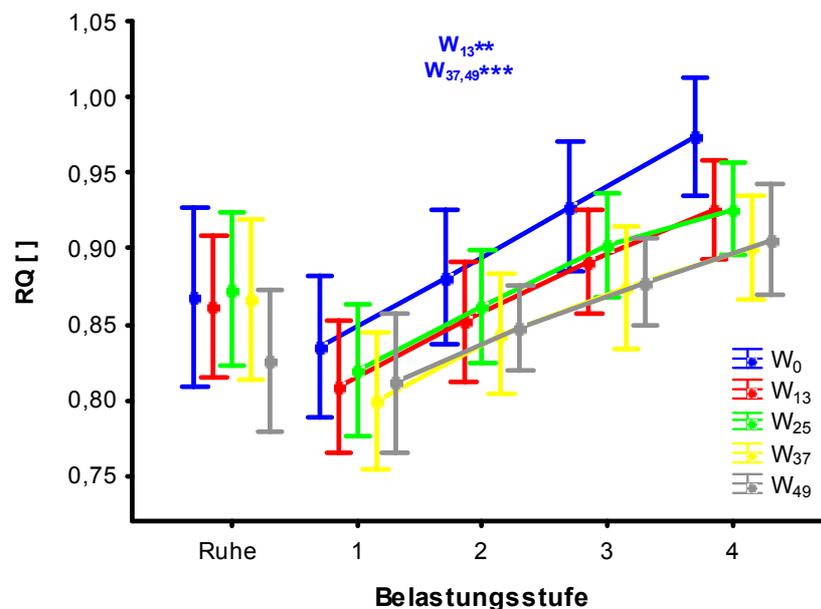
**Abbildung 12: Entwicklung der La-Leistungskurve bei den Laufbandtests im Trainingsverlauf (Mediane und Quartile; n = 18). Die Tests in der 25. und 37. Trainingswoche (unterbrochene Linien) sind nicht in die Auswertung eingegangen.**

Eine trotz nonparametrischer Daten durchgeführte ANOVA für die La-Leistungskurven beim Eingangstest, beim Test in der 13. Trainingswoche und beim Abschlusstest ergab eine signifikante Verschiebung der La-Leistungskurve im Trainingsverlauf (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ,  $F(2, 34) = 11,21$ ;  $n = 18$ ). Sie verschob sich insgesamt um im Mittel  $-0,28 \pm 0,28 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $-0,73$  bis  $+0,24 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ), wobei der Unterschied zwischen Eingangstest und erstem Zwischentest signifikant war ( $p < 0,05$ ), zwischen erstem Zwischentest und Abschlusstest jedoch nicht ( $p = 0,13$ ). Die ANOVA ergab darüber hinaus signifikant unterschiedliche Kurvenverläufe der La-Leistungskurven (Interaktionseffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(6, 102) = 13,77$ ;  $n = 18$ ). Auf den ersten beiden Belastungsstufen bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Tests ( $p \geq 0,95$ ). Auf der dritten Belastungsstufe war die Laktatkonzentration beim Abschlusstest signifikant niedriger als beim Eingangstest ( $p < 0,01$ ), zwischen dem ersten Zwischentest und dem Abschlusstest bestand kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,94$ ). Auf der vierten Stufe war die Laktatkonzentration bereits ab der 13. Woche signifikant niedriger als beim Eingangstest ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ) und zwischen dem ersten Zwischentest und dem Abschlusstest bestand ein tendenzieller Unterschied ( $p = 0,05$ ).

#### 4.4.7 Submaximaler Respiratorischer Quotient und Fettstoffwechsel

Die Entwicklung des Respiratorischen Quotienten auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf ist in Abbildung 13 dargestellt. Abbildung 14 zeigt den prozentualen Anteil der Fettstoffwechslung an der Gesamtenergiebereitstellung auf den ersten vier Stu-

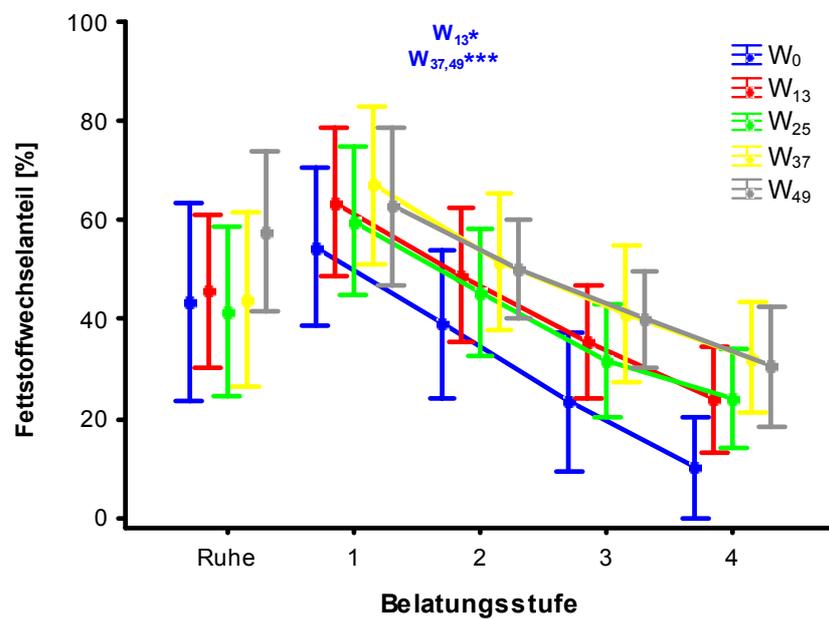
fen der Laufbandtests. In Abbildung 15 ist die Entwicklung der Fettflussrate auf den ersten vier Belastungsstufen im Zeitverlauf zu sehen. Die Verschiebungen der Leistungskurven von RQ, prozentualem Fettstoffwechselanteil und Fettflussrate von Test zu Test sind Tabelle 11 zu entnehmen. Da die  $VCO_2$  aufgrund einer leeren internen Batterie des Spiroergometriege-  
rats bei einem Test eines Probanden nicht gemessen werden konnte, sind der RQ und die daraus errechneten Parameter nur für 17 Probanden angegeben.



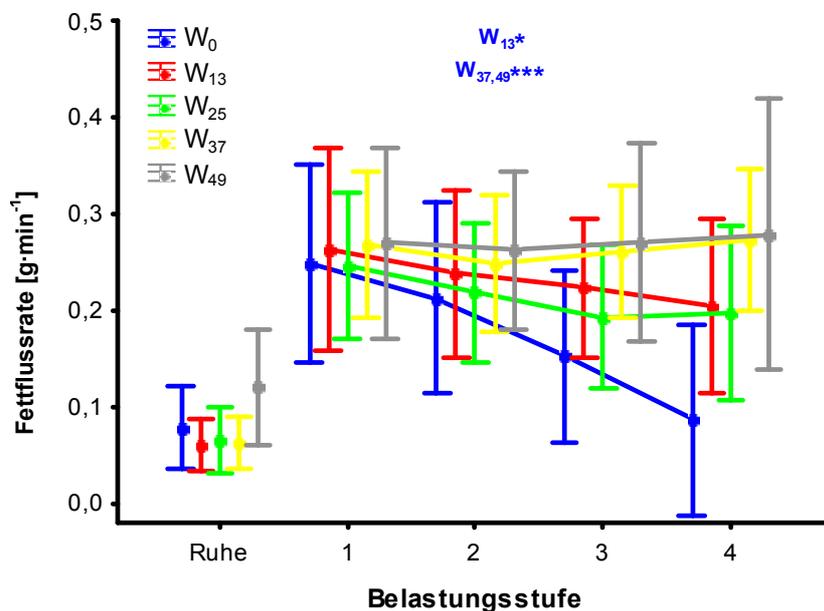
**Abbildung 13: Entwicklung des RQ auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW  $\pm$  SD; n = 17).**

Die Leistungskurve des RQ verschob sich im Trainingsverlauf signifikant (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(4, 64) = 9,20$ ;  $n = 17$ ). Vom Eingangs- bis zum Abschlusstest verschob sich der mittlere RQ auf den ersten vier Belastungsstufen um durchschnittlich  $-0,04 \pm 0,04$  ( $-0,14$  bis  $+0,04$ ; 95 % KI:  $(-0,02; -0,06)$ ;  $p < 0,001$ ; ES: 1,37). Die Abnahme war vom Eingangstest zum ersten Zwischentest signifikant ( $p < 0,01$ ), im weiteren Trainingsverlauf von Test zu Test jedoch nicht mehr ( $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 0,94$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,17$ ;  $W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,97$ ). Ab der 13. Trainingswoche verschob sich die Leistungskurve des RQ nicht mehr signifikant ( $p \geq 0,60$ ). Bei sechs der 17 Probanden (35 %) war keine trainingsinduzierte Veränderung des mittleren RQ auf den ersten vier Belastungsstufen zu beobachten. Auch die Verläufe der Leistungskurven des RQ unterschieden sich signifikant zwischen den fünf Tests (Interaktionseffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(12, 192) = 4,29$ ;  $n = 17$ ). Während auf der ersten Belastungsstufe nur ein signifikanter Unterschied zwischen dem Eingangstest und dem Test in der 37. Trainingswoche bestand ( $p < 0,01$ ), unterschied sich auf der zweiten Stufe der Eingangstest signifikant von den Tests in der 37. und 49. Woche ( $p < 0,01$  bzw.  $p < 0,05$ ), auf der dritten Stu-

fe von den Tests in der 13., 37. und 49. Woche ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ) und auf der letzten Stufe von allen anderen Tests ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ).



**Abbildung 14:** Entwicklung des prozentualen Fettstoffwechselanteils auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW  $\pm$  SD;  $n = 17$ ).



**Abbildung 15:** Entwicklung der Fettflussrate auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (MW  $\pm$  SD;  $n = 17$ ).

Entsprechend veränderte sich auch der prozentuale Anteil der Fettstoffwechslung an der Gesamtenergiebereitstellung auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf signifikant (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(4, 64) = 8,64$ ;  $n = 17$ ). Insgesamt veränderte sich der mittlere prozentuale Anteil der Fettstoffwechslung der ersten vier Belastungsstufen um

durchschnittlich  $+14,1 \pm 13,9 \%$  ( $-12,8$  bis  $+42,8 \%$ ;  $p < 0,001$ ). Der Anstieg war wiederum vom Eingangstest zum ersten Zwischentest signifikant ( $p < 0,05$ ) und im weiteren Verlauf von Test zu Test nicht mehr ( $W_{13}$  vs.  $W_{25}$ :  $p = 0,93$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{37}$ :  $p = 0,16$ ;  $W_{37}$  vs.  $W_{49}$ :  $p = 0,97$ ). Ab der 13. Trainingswoche veränderte sich auch der prozentuale Anteil der Fettstoffwechslung an der Energiebereitstellung nicht mehr signifikant ( $p \geq 0,59$ ). Die Verläufe der Leistungskurven des prozentualen Fettstoffwechselanteils verhielten sich spiegelbildlich zu den Verläufen der Leistungskurven des RQ signifikant unterschiedlich zwischen den einzelnen Testzeitpunkten (Interaktionseffekt:  $p < 0,01$ ;  $F(12, 192) = 2,82$ ;  $n = 17$ ). Die Signifikanzen der Unterschiede waren die gleichen wie beim RQ.

Die Leistungskurve der Fettflussrate verschob sich im Zeitverlauf ebenfalls signifikant (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(4, 64) = 9,63$ ;  $n = 17$ ). Der Mittelwert der Fettflussrate auf den ersten vier Belastungsstufen verschob sich durch das Ausdauertraining durchschnittlich um insgesamt  $+0,10 \pm 0,08 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $-0,03$  bis  $+0,22 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ). Die Veränderung war vom Eingangstest zum ersten Zwischentest signifikant ( $p < 0,05$ ), im weiteren Verlauf von einem Messzeitpunkt zum nächsten jedoch nicht mehr. Ab der 37. Trainingswoche verschob sich die Leistungskurve der Fettflussrate nicht mehr signifikant ( $p = 0,99$ ). Auch die Kurvenverläufe unterschieden sich signifikant zwischen den fünf Tests (Interaktionseffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(12, 192) = 11,28$ ;  $n = 17$ ). Auf den ersten beiden Belastungsstufen veränderte sich die Fettflussrate im Laufe des Ausdauertrainings nicht ( $p$  jeweils  $\geq 0,80$ ). Auf der dritten Belastungsstufe war sie ab der 37. Woche signifikant höher als vor Trainingsbeginn ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ) und auf der vierten Belastungsstufe bereits ab der 13. Woche ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ).

**Tabelle 11: Verschiebungen der Leistungskurven von RQ ( $\Delta$  RQ-LK), prozentualem Fettstoffwechselanteil ( $\Delta$  Fettanteil-LK) und Fettflussrate ( $\Delta$  Fettfluss-LK) bei den Laufbandtests von einem Test zum nächsten (MW  $\pm$  SD, Spannen;  $n = 17$ ).**

	Zeitraum			
	$W_0 - W_{13}$	$W_{13} - W_{25}$	$W_{25} - W_{37}$	$W_{37} - W_{49}$
<b><math>\Delta</math> RQ-LK</b> [ ]	$-0,04 \pm 0,04$ -0,11 bis +0,04	$+0,01 \pm 0,03$ -0,05 bis +0,06	$-0,02 \pm 0,03$ -0,07 bis +0,04	$+0,01 \pm 0,04$ -0,08 bis +0,07
<b><math>\Delta</math> Fettanteil-LK</b> [%]	$+11,2 \pm 12,8$ -11,5 bis +35,0	$-2,8 \pm 9,8$ -19,5 bis +18,0	$+7,9 \pm 9,3$ -11,8 bis +21,9	$-2,2 \pm 14,8$ -25,1 bis +26,8
<b><math>\Delta</math> Fettfluss-LK</b> [g·min <sup>-1</sup> ]	$+0,06 \pm 0,07$ -0,08 bis +0,18	$-0,02 \pm 0,06$ -0,13 bis +0,07	$+0,05 \pm 0,06$ -0,09 bis +0,13	$+0,01 \pm 0,09$ -0,12 bis +0,24

#### 4.4.8 Submaximale Sauerstoffaufnahme

Zur Beurteilung der Bewegungsökonomie ist die Sauerstoffaufnahme auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests in Abbildung 16 im Studienverlauf dargestellt. Die Verschiebung der Leistungskurve der  $VO_2$  von einem Messzeitpunkt zum nächsten ist in Tabelle 12 zu sehen.

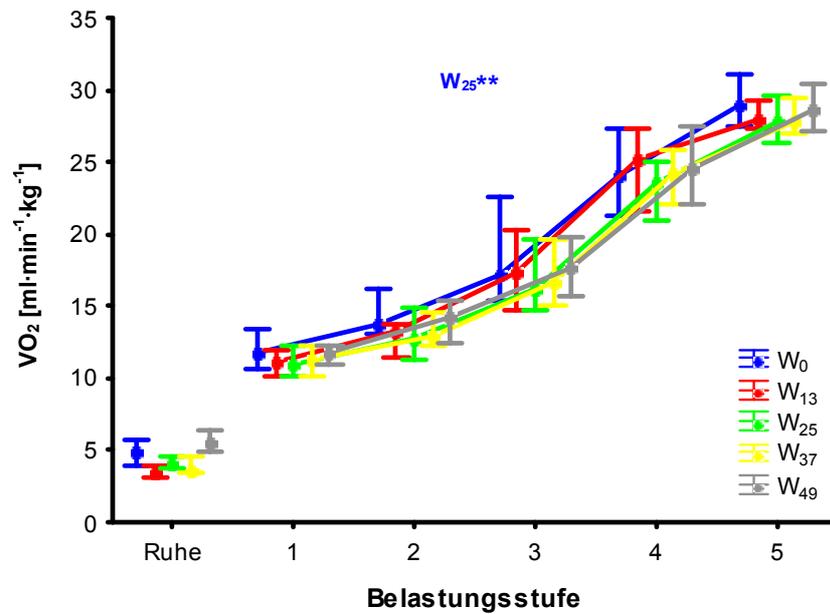


Abbildung 16: Entwicklung der  $VO_2$  auf den ersten vier Stufen der Laufbandtests im Trainingsverlauf (Mediane und Quartile;  $n = 18$ ).

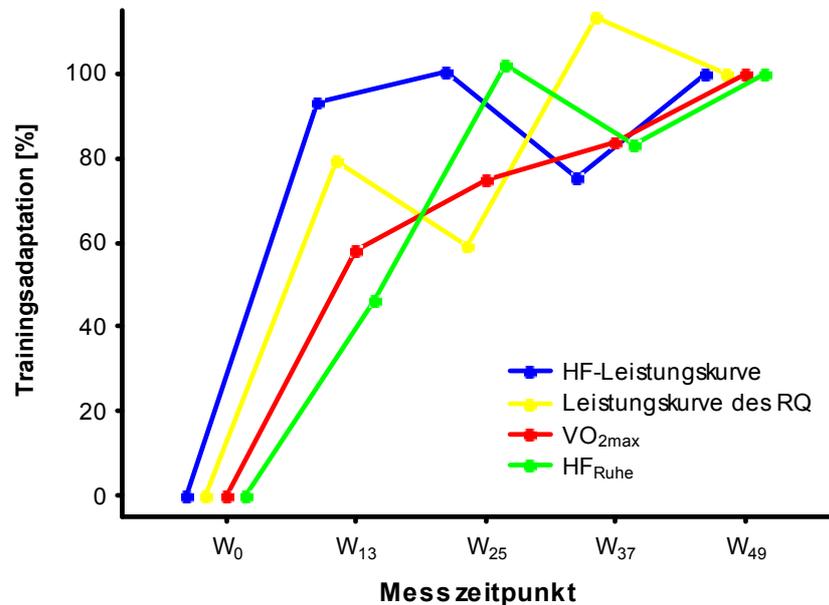
Tabelle 12: Verschiebung der Leistungskurve der  $VO_2$  ( $\Delta VO_2$ -LK) bei den Laufbandtests von einem Test zum nächsten (MW  $\pm$  SD, Spannen;  $n = 18$ ).

	Zeitraum			
	$W_0 - W_{13}$	$W_{13} - W_{25}$	$W_{25} - W_{37}$	$W_{37} - W_{49}$
<b><math>\Delta VO_2</math>-LK</b>	$-0,75 \pm 1,51$	$-0,52 \pm 1,60$	$+0,48 \pm 0,92$	$+0,65 \pm 1,03$
[ml·min <sup>-1</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	-2,76 bis +3,07	-5,22 bis +2,05	-1,22 bis +2,47	-1,13 bis +2,92

Eine trotz nonparametrischer Daten durchgeführte ANOVA ergab eine signifikante Verschiebung der Leistungskurve der  $VO_2$  im Trainingsverlauf (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(4, 68) = 5,52$ ;  $n = 18$ ). In der 25. Trainingswoche war die  $VO_2$  auf den ersten vier Stufen des Laufbandtests signifikant niedriger als beim Eingangs- und beim Abschlusstest ( $W_0$  vs.  $W_{25}$ :  $p < 0,01$ ;  $W_{25}$  vs.  $W_{49}$ :  $p < 0,05$ ). Ansonsten unterschieden sich die Leistungskurven der  $VO_2$  bei den Tests nicht signifikant voneinander ( $p \geq 0,18$ ). Die Kurvenverläufe der Leistungskurven der  $VO_2$  waren bei den Tests nicht signifikant unterschiedlich (Interaktionseffekt:  $p = 0,32$ ;  $F(16, 272) = 1,13$ ;  $n = 18$ ).

#### 4.4.9 Übersicht über die Zeitverläufe der Trainingsadaptationen

In Abbildung 17 sind die Zeitverläufe der Trainingsadaptationen der vier bei den Laufbandtests untersuchten Hauptzielparameter zusammengefasst. Die Veränderungen vom Eingangs- zum Abschlusstest entsprechen dabei jeweils 100 %.

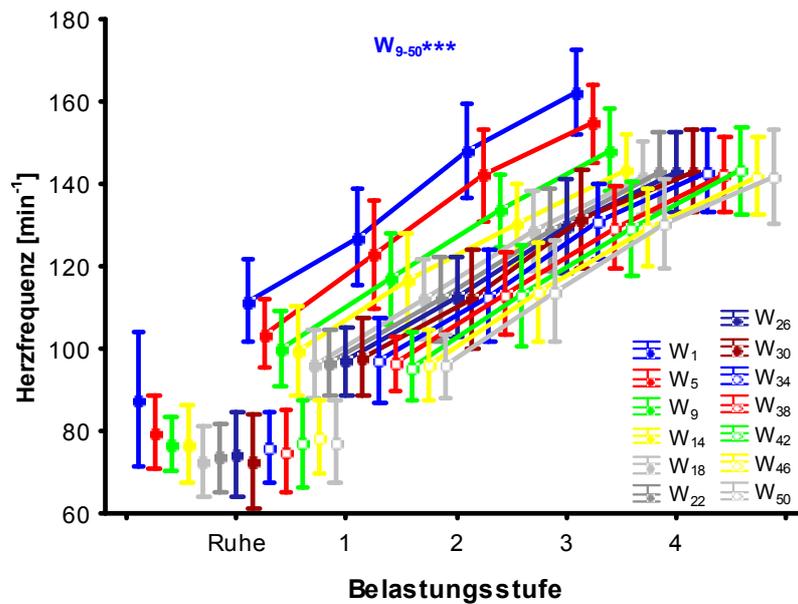


**Abbildung 17: Übersicht über die Zeitverläufe der Trainingsadaptationen von HF-Leistungskurve, Leistungskurve des RQ, VO<sub>2max</sub> und HFRuhe (MW; VO<sub>2max</sub> und Leistungskurve des RQ: n = 17, ansonsten: n = 18).**

Innerhalb der ersten sechs Trainingsmonate waren bei allen Parametern mindestens 75 % der Ein-Jahres-Gesamtveränderung erfolgt, die Veränderungen von HFRuhe und HF-Leistungskurve hatten zu diesem Zeitpunkt bereits ihr Maximum erreicht.

#### 4.5 Submaximale Feldstufentests

Die submaximalen Feldstufentests fanden in den ersten elf Trainingswochen 14-tägig und im weiteren Studienverlauf vierwöchentlich statt. Beim Übergang von den 14-tägigen zu den vierwöchentlichen Messintervallen verschob sich der Rhythmus um eine Woche, weil die submaximalen Feldstufentests aus organisatorischen Gründen nicht gleichzeitig mit den Laufbandtests durchgeführt werden konnten. Die Entwicklung der HF-Leistungskurve bei den submaximalen Feldstufentests ist in Abbildung 18 im vierwöchentlichen Testrhythmus dargestellt. Abbildung 19 zeigt die Entwicklung der HF-Leistungskurve in den ersten elf Trainingswochen im 14-tägigen Testrhythmus. Die entsprechenden Daten sind den Tabellen 13 und 14 zu entnehmen.



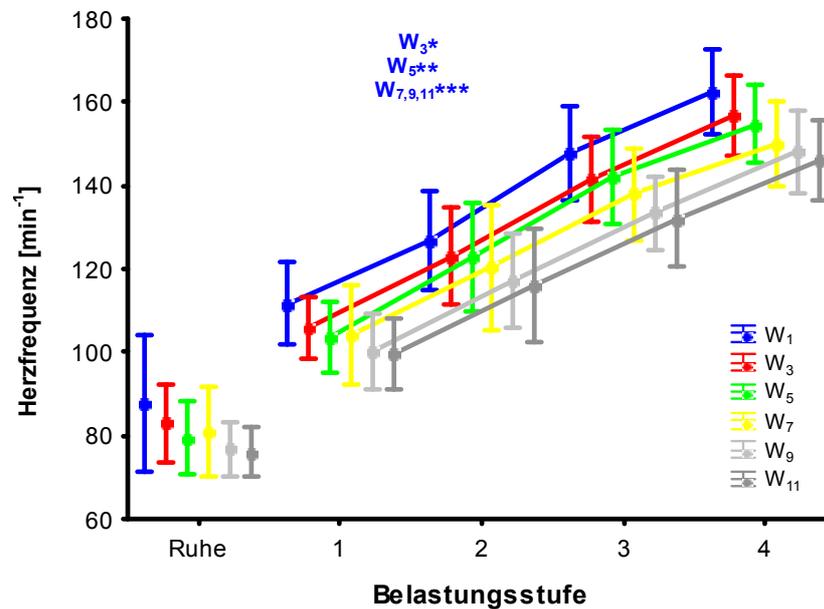
**Abbildung 18:** Entwicklung der HF-Leistungskurve bei den submaximalen Feldstufentests im vierwöchentlichen Testrhythmus (MW  $\pm$  SD; n = 18).

**Tabelle 13:** Verschiebung der HF-Leistungskurve ( $\Delta$  HF-LK) während der submaximalen Feldstufentests im vierwöchentlichen Testrhythmus (MW  $\pm$  SD, Spannen; n = 18).

	Zeitraum					
	W <sub>1</sub> – W <sub>5</sub>	W <sub>5</sub> – W <sub>9</sub>	W <sub>9</sub> – W <sub>14</sub>	W <sub>14</sub> – W <sub>18</sub>	W <sub>18</sub> – W <sub>22</sub>	W <sub>22</sub> – W <sub>26</sub>
<b><math>\Delta</math> HF-LK</b> [min <sup>-1</sup> ]	-6 $\pm$ 9 -20 bis +9	-6 $\pm$ 6 -19 bis +3	-2 $\pm$ 5 -12 bis +6	-3 $\pm$ 6 -13 bis +12	+1 $\pm$ 6 -13 bis +10	0 $\pm$ 5 -9 bis +10
	W <sub>26</sub> – W <sub>30</sub>	W <sub>30</sub> – W <sub>34</sub>	W <sub>34</sub> – W <sub>38</sub>	W <sub>38</sub> – W <sub>42</sub>	W <sub>42</sub> – W <sub>46</sub>	W <sub>46</sub> – W <sub>50</sub>
<b><math>\Delta</math> HF-LK</b> [min <sup>-1</sup> ]	+1 $\pm$ 5 -12 bis +9	0 $\pm$ 6 -8 bis +17	-1 $\pm$ 7 -16 bis +11	0 $\pm$ 6 -15 bis +8	0 $\pm$ 3 -7 bis +5	0 $\pm$ 6 -9 bis +20

Im Verlauf des Ausdauertrainings verschob sich die HF-Leistungskurve bei den submaximalen Feldstufentests signifikant (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ,  $F(12, 204) = 21,54$ ; n = 18). Insgesamt lag sie nach 50 Wochen Ausdauertraining im Mittel  $17 \pm 8 \text{ min}^{-1}$  (2 bis  $29 \text{ min}^{-1}$ ) unter dem Ausgangswert ( $p < 0,001$ ). Die Absenkung war von Test zu Test nicht signifikant ( $p \geq 0,20$ ). Ab der neunten Woche war die HF-Leistungskurve signifikant niedriger als zu Studienbeginn ( $p < 0,001$ ) und nach der neunten Woche verschob sie sich nicht mehr signifikant ( $p \geq 0,59$ ). Auch die Kurvenverläufe der HF-Leistungskurven unterschieden sich signifikant zwischen den 13 Tests (Interaktionseffekt:  $p < 0,05$ ,  $F(36, 612) = 1,55$ ; n = 18). Auf der ersten Belastungsstufe war die HF ab der 14. Trainingswoche signifikant niedriger als beim Eingangstest ( $W_1$  vs.  $W_{14}$ :  $p < 0,05$ ;  $W_1$  vs.  $W_{18-50}$ : p jeweils  $< 0,001$ ). Auf der zweiten Stufe war die Absenkung vom Eingangstest zum Test in der 18. Trainingswoche und allen folgenden Tests signi-

fikant ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ). Auf der dritten und vierten Belastungsstufe war die HF bereits ab der neunten Woche signifikant niedriger als zu Studienbeginn ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ).



**Abbildung 19:** Entwicklung der HF-Leistungskurve bei den submaximalen Feldstufentests in den ersten elf Trainingswochen im 14-täglichen Testrhythmus (MW  $\pm$  SD;  $n = 18$ ).

**Tabelle 14:** Verschiebung der HF-Leistungskurve ( $\Delta$  HF-LK) während der submaximalen Feldstufentests in den ersten elf Trainingswochen im 14-täglichen Testrhythmus (MW  $\pm$  SD, Spannen;  $n = 18$ ).

	Zeitraum				
	$W_1 - W_3$	$W_3 - W_5$	$W_5 - W_7$	$W_7 - W_9$	$W_9 - W_{11}$
<b><math>\Delta</math> HF-LK</b>	$-5 \pm 7$	$-1 \pm 6$	$-3 \pm 6$	$-3 \pm 5$	$-1 \pm 5$
$[\text{min}^{-1}]$	-21 bis +5	-12 bis +10	-15 bis +11	-13 bis +6	-10 bis +8

In den ersten elf Trainingswochen verschob sich die HF-Leistungskurve ebenfalls signifikant (Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(5, 85) = 20,81$ ;  $n = 18$ ). Sie verschob sich von Studienbeginn zur elften Trainingswoche um im Mittel  $-14 \pm 9 \text{ min}^{-1}$  ( $-32$  bis  $+1 \text{ min}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ). Die Verschiebung war vom Eingangstest zur dritten Trainingswoche signifikant ( $p < 0,05$ ), danach von Test zu Test nicht mehr ( $p \geq 0,44$ ). Ab der siebten Woche veränderte sich die HF-Leistungskurve nicht mehr signifikant ( $p \geq 0,12$ ). Auch hier waren die Kurvenverläufe bei den Tests signifikant unterschiedlich (Interaktionseffekt:  $p < 0,05$ ;  $F(15, 255) = 1,87$ ;  $n = 18$ ). Auf den ersten beiden Belastungsstufen war die HF ab der neunten Trainingswoche signifikant niedriger als beim Eingangstest ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ), auf der dritten und vierten Belastungsstufe bereits ab der siebten Woche ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ).

## 4.6 Fahrradergometrien

### 4.6.1 Ausbelastung

Für die Fahrradergometrien sind in Tabelle 15 zur Beurteilung der Ausbelastung die Anzahl der Probanden mit Levelling-off der Sauerstoffaufnahme, die maximale Herzfrequenz, die maximale Blutlaktatkonzentration und der maximale Respiratorische Quotient der Studienteilnehmer dargestellt.

**Tabelle 15:** Levelling-off der  $VO_2$ ,  $HF_{max}$ ,  $La_{max}$  und  $RQ_{max}$  bei den Fahrradergometrien (n oder MW  $\pm$  SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 18).

	Levelling-off [n]	$HF_{max}$ [min <sup>-1</sup> ]	$La_{max}$ [mmol·l <sup>-1</sup> ]	$RQ_{max}$ [ ]
$W_0$	7	168 $\pm$ 11 143 – 184	7,28 $\pm$ 2,16 4,49 – 11,9	1,08 (1,05/1,11) 1,04 – 1,20
$W_{49}$	7	167 $\pm$ 14 134 – 185	7,78 $\pm$ 1,93 3,80 – 12,5	1,04 (1,02/1,05) 0,99 – 1,09

Während die Anzahl der Probanden mit Levelling-off der  $VO_2$  und die  $HF_{max}$  beim Eingangs- und Abschlusstest jeweils gleich waren (Levelling-off:  $p = 0,77$ ;  $\chi^2(1) = 0,08$ ;  $n = 18$ ;  $HF_{max}$ :  $p = 0,61$ ;  $t(17) = 0,52$ ;  $n = 18$ ), war  $La_{max}$  beim Eingangstest tendenziell niedriger ( $p = 0,08$ ;  $t(17) = 1,84$ ;  $n = 18$ ) und  $RQ_{max}$  signifikant höher ( $p < 0,001$ ;  $T = 0,00$ ;  $n = 18$ ) als beim Abschlusstest. Die Eingangstests dauerten im Schnitt 13,0 (13,0/15,5) min (9,5 – 25,0 min) und die Abschlusstests 15,8 (14,5/19,0) min (13,0 – 28,0 min).

### 4.6.2 Maximale Leistung und höchste Sauerstoffaufnahme

In Abbildung 20 und 21 sind die maximale Leistung und die höchste Sauerstoffaufnahme bei den Fahrradergometrien abgebildet. Tabelle 16 zeigt die dazugehörigen Daten.

Die maximale Leistung verbesserte sich signifikant um im Mittel  $0,4 \pm 0,2 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$  (0,1 bis  $0,9 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ;  $t(17) = 8,30$ ;  $n = 18$ ). Auch die absolute  $VO_{2peak}$  veränderte sich signifikant um durchschnittlich  $+0,24 \pm 0,25 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  (-0,23 bis  $+0,68 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) bzw.  $+12,5 \pm 12,2 \%$  (-7,0 bis  $+40,3 \%$ ;  $p < 0,001$ ;  $T = 11,5$ ;  $n = 18$ ). Pro kg Körpergewicht stieg die  $VO_{2peak}$  signifikant um  $3,7 \pm 2,9 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  (0,0 bis  $9,5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) bzw.  $13,9 \pm 11,8 \%$  (0,0 bis  $38,9 \%$ ;  $p < 0,001$ ;  $t(17) = 5,36$ ;  $n = 18$ ). Die Auswertung der allometrisch skalierten  $VO_{2peak}$  ergab eine tendenzielle Veränderung vom Eingangs- zum Abschlusstest um im Mittel  $+9 \pm 18 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-2/3}$  (-16 bis  $+39 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-2/3}$ ;  $p = 0,06$ ;  $t(17) = 2,06$ ;  $n = 18$ ).

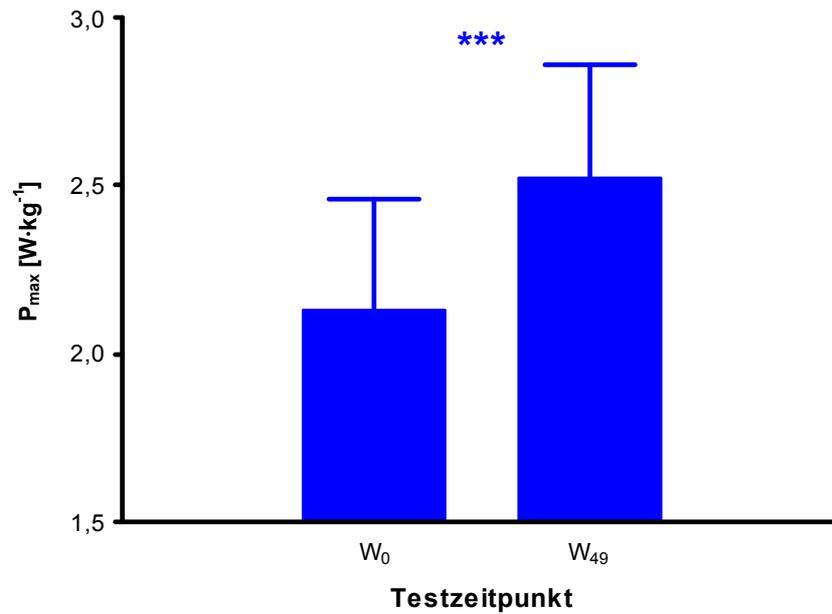


Abbildung 20:  $P_{\max}$  bei den Fahrradergometrien (MW und SD; n = 18).

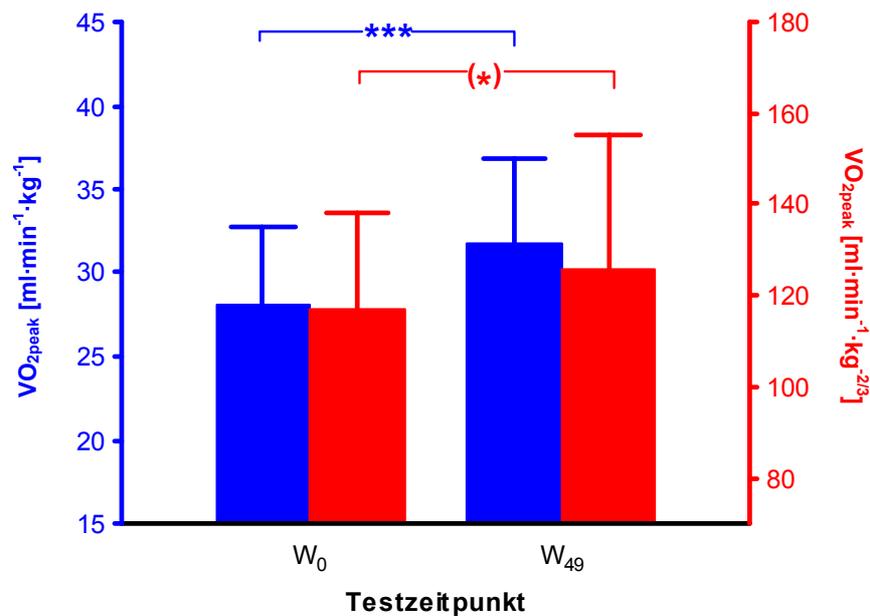


Abbildung 21:  $VO_{2peak}$  bei den Fahrradergometrien (MW und SD; n = 18).

Tabelle 16:  $P_{\max}$  und  $VO_{2peak}$  bei den Fahrradergometrien (MW ± SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 18).

	$P_{\max}$ [W·kg <sup>-1</sup> ]	$VO_{2peak}$ [l·min <sup>-1</sup> ]	$VO_{2peak}$ [ml·min <sup>-1</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	$VO_{2peak}$ [ml·min <sup>-1</sup> ·kg <sup>-2/3</sup> ]
W <sub>0</sub>	2,1 ± 0,3	1,88 (1,69/2,35)	28,1 ± 4,7	117 ± 21
	1,5 – 2,8	1,39 – 3,27	20,6 – 38,5	88 – 156
W <sub>49</sub>	2,5 ± 0,3	2,15 (1,82/2,60)	31,8 ± 5,0	126 ± 29
	2,0 – 3,2	1,55 – 3,47	23,6 – 40,8	77 – 173

### 4.6.3 Herzfrequenzleistungskurve

Die Herzfrequenzleistungskurve während der Fahrradergometrien ist in Abbildung 22 zu sehen. Sie hat sich durch das Ausdauertraining signifikant um im Mittel  $-7 \pm 9 \text{ min}^{-1}$  ( $-23$  bis  $+13 \text{ min}^{-1}$ ) verschoben (Zeiteffekt:  $p < 0,01$ ,  $F(1, 17) = 12,17$ ;  $n = 18$ ). Auch der Kurvenverlauf der HF-Leistungskurve war bei Eingangs- und Abschlusstest signifikant unterschiedlich (Interaktionseffekt:  $p < 0,01$ ;  $F(2, 34) = 5,32$ ;  $n = 18$ ). Auf der ersten Belastungsstufe unterschied sich die Herzfrequenz tendenziell zwischen Eingangs- und Abschlusstest ( $p = 0,08$ ), auf der zweiten und dritten Stufe war sie beim Abschlusstest signifikant niedriger ( $p$  jeweils  $< 0,001$ ).

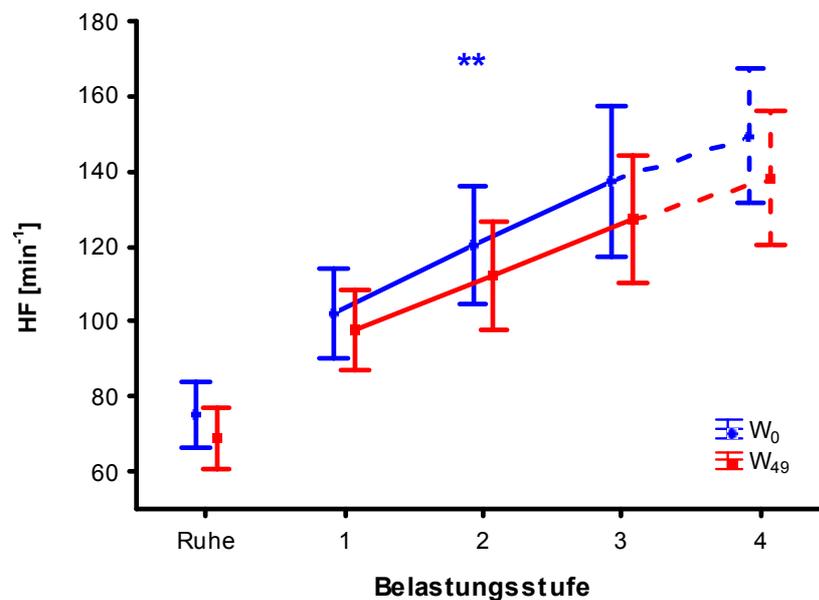


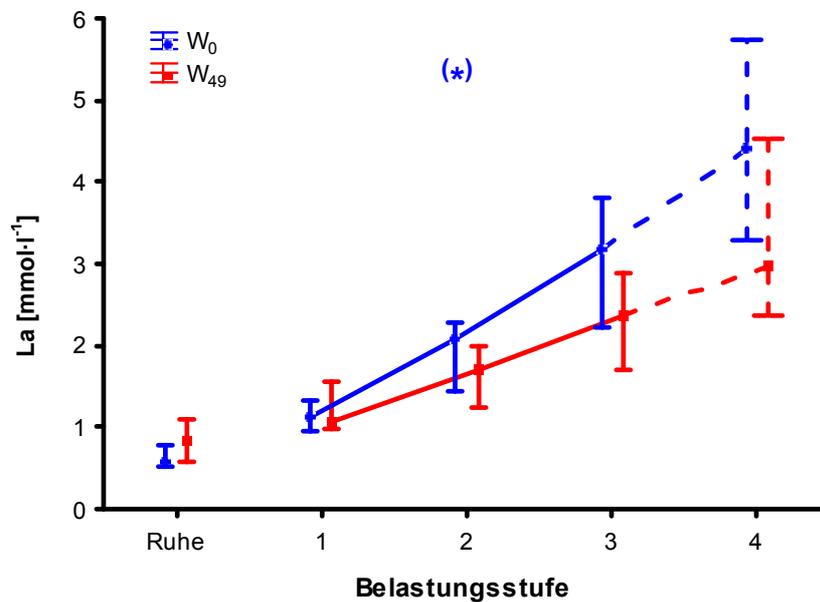
Abbildung 22: HF-Leistungskurve bei den Fahrradergometrien (MW  $\pm$  SD; Stufe 1 bis 3:  $n = 18$ ; Stufe 4 (nicht in die Auswertung eingegangen):  $n = 15$ ).

### 4.6.4 Laktatleistungskurve und individuelle anaerobe Schwelle

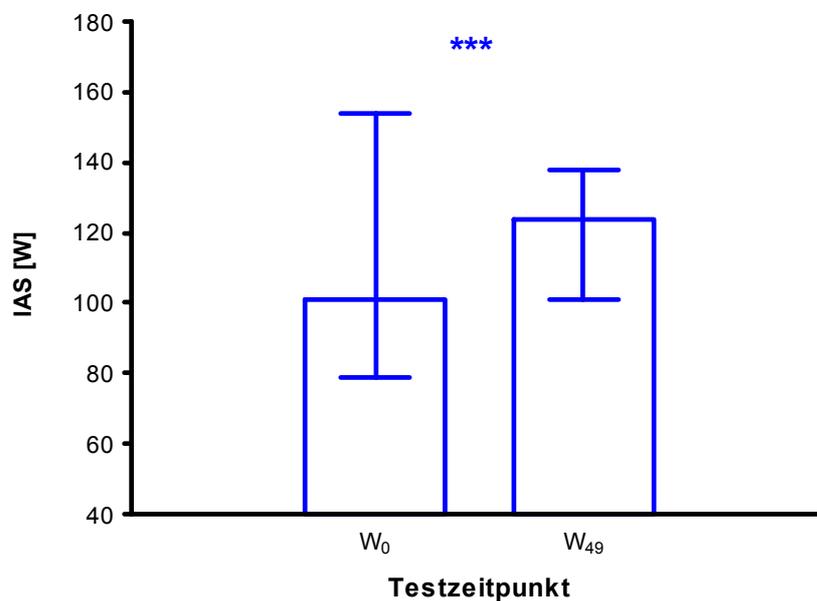
Abbildung 23 zeigt die Laktatleistungskurve der Probanden während der Fahrradergometrien. Die individuelle anaerobe Schwelle war für 15 Studienteilnehmer bei beiden Tests bestimmbar. In Abbildung 24 ist die Leistung an der IAS beim Eingangs- und Abschlusstest dargestellt. Tabelle 17 sind die dazugehörigen Daten zu entnehmen.

Eine trotz nonparametrischer Daten durchgeführte ANOVA ergab eine tendenzielle Verschiebung der La-Leistungskurve vom Eingangs- zum Abschlusstest um durchschnittlich  $-0,25 \pm 0,53 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $-1,26$  bis  $+0,74 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ; Zeiteffekt:  $p = 0,06$ ;  $F(1, 17) = 3,98$ ;  $n = 18$ ). Es ergaben sich außerdem signifikant unterschiedliche Verläufe der La-Leistungskurve bei Eingangs- und Abschlusstest (Interaktionseffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(2, 34) = 12,55$ ;  $n = 18$ ). Während sich die Laktatwerte beim Eingangs- und Abschlusstest auf den ersten beiden Stufen

nicht signifikant unterschieden ( $p = 0,92$  bzw.  $p = 0,68$ ), waren sie beim Abschlusstest auf der dritten Belastungsstufe signifikant niedriger als beim Eingangstest ( $p < 0,001$ ).



**Abbildung 23:** La-Leistungskurve bei den Fahrradergometrien (Mediane und Quartile; Stufe 1 bis 3:  $n = 18$ ; Stufe 4 (nicht in die Auswertung eingegangen):  $n = 15$ ).



**Abbildung 24:** IAS bei den Fahrradergometrien (Mediane und Quartile;  $n = 15$ ).

Die Leistung an der IAS veränderte sich signifikant um durchschnittlich  $+16 \pm 9$  W (-1 bis +35 W, 95 % KI: (+11; +20 W);  $p < 0,001$ ;  $T = 1,00$ ;  $n = 15$ ). Bei einem von 15 Studienteilnehmern (7 %) verbesserte sich die Leistung an der IAS nicht signifikant. Auch die Leistung pro kg Körpergewicht an der IAS war beim Abschlusstest signifikant um im Mittel  $0,25 \pm 0,14$  W·kg<sup>-1</sup> (0,00 bis 0,50 W·kg<sup>-1</sup>) höher als beim Eingangstest ( $p < 0,001$ ;  $t(14) = 7,20$ ;  $n =$

15). Die Blutlaktatkonzentration an der IAS unterschied sich nicht signifikant zwischen Eingangs- und Abschlusstest ( $p = 0,39$ ;  $t(14) = 0,88$ ;  $n = 15$ ). Ebenso veränderte sich die Herzfrequenz an der IAS im Verlauf des Ausdauertrainings nicht signifikant ( $p = 0,44$ ;  $t(14) = 0,80$ ;  $n = 15$ ).

**Tabelle 17: IAS bei den Fahrradergometrien (MW  $\pm$  SD oder Mediane (Quartile), Min – Max; n = 15).**

	IAS			
	Leistung [W]	Leistung [ $W \cdot kg^{-1}$ ]	La [ $mmol \cdot l^{-1}$ ]	HF [ $min^{-1}$ ]
<b>W<sub>0</sub></b>	101 (85/137)	1,46 $\pm$ 0,22	2,65 $\pm$ 0,46	133 $\pm$ 13
	79 – 154	1,15 – 1,86	1,90 – 3,50	110 – 150
<b>W<sub>49</sub></b>	124 (101/138)	1,71 $\pm$ 0,28	2,78 $\pm$ 0,57	135 $\pm$ 13
	86 – 177	1,35 – 2,23	1,90 – 3,90	101 – 151

#### 4.6.5 Belastungsblutdruck

Das Blutdruckverhalten während der Fahrradergometrien ist in Tabelle 18 beschrieben. Da bei einem Proband der Blutdruck nur auf den ersten beiden Belastungsstufen gemessen wurde, sind nur 17 Datensätze dargestellt.

**Tabelle 18: Systolischer und diastolischer Belastungsblutdruck während der Fahrradergometrien (Mediane (Quartile), Min – Max; n = 17).**

	RR systolisch			
	Ruhe	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
<b>W<sub>0</sub></b>	120 (110/130)	140 (130/150)	150 (145/160)	160 (150/180)
	105 – 150	120 – 190	130 – 190	135 – 220
<b>W<sub>49</sub></b>	120 (115/120)	130 (125/140)	140 (140/150)	160 (155/180)
	105 – 150	120 – 170	125 – 185	140 – 200
	RR diastolisch			
	Ruhe	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
<b>W<sub>0</sub></b>	80 (80/90)	90 (80/100)	90 (80/100)	90 (80/100)
	80 – 100	70 – 100	80 – 110	80 – 110
<b>W<sub>49</sub></b>	80 (80/80)	80 (80/90)	80 (80/90)	80 (80/90)
	70 – 90	70 – 90	70 – 100	70 – 100

Eine trotz nonparametrischer Daten durchgeführte ANOVA ergab einen tendenziellen Unterschied des systolischen Belastungsblutdrucks auf den ersten drei Belastungsstufen zwi-

schen Eingangs- und Abschlusstest (Zeiteffekt:  $p = 0,05$ ;  $F(1, 16) = 4,29$ ;  $n = 17$ ). Nominell veränderte sich der systolische Belastungsblutdruck um im Mittel  $-7 \pm 14$  mmHg ( $-37$  bis  $+17$  mmHg). Auch der Verlauf des systolischen Belastungsblutdrucks auf den ersten drei Stufen der Fahrradergometrien unterschied sich signifikant zwischen Eingangs- und Abschlusstest (Interaktionseffekt:  $p < 0,05$ ;  $F(2, 32) = 3,41$ ;  $n = 17$ ). Während der systolische Blutdruck auf den ersten beiden Belastungsstufen beim Abschlusstest signifikant niedriger war als beim Eingangstest ( $p$  jeweils  $< 0,01$ ), bestand auf der dritten Belastungsstufe kein signifikanter Unterschied zwischen den Tests ( $p = 0,78$ ). Der diastolische Belastungsblutdruck veränderte sich vom Eingangs- zum Abschlusstest signifikant um durchschnittlich  $-6 \pm 6$  mmHg ( $-15$  bis  $+5$  mmHg; Zeiteffekt:  $p < 0,001$ ;  $F(1, 16) = 17,10$ ;  $n = 17$ ). Der Verlauf des diastolischen Belastungsblutdrucks auf den ersten drei Stufen der Fahrradergometrien unterschied sich nicht signifikant zwischen Eingangs- und Abschlusstest (Interaktionseffekt:  $p = 0,66$ ;  $F(2, 32) = 0,41$ ;  $n = 17$ ).

## 4.7 Ruheumsatzmessungen

Eine Ruheumsatzmessung eines Studienteilnehmers war wegen zahlreicher Messausfälle nicht auswertbar, so dass die Ergebnisse auf den Daten von 17 Studienteilnehmern basieren. Abbildung 25 zeigt den Ruheumsatz der Studienteilnehmer im Trainingsverlauf. Der Ruheumsatz pro kg Körpergewicht und pro kg fettfreie Körpermasse ist in Abbildung 26 zu sehen. Abbildung 27 zeigt die prozentualen Anteile der Fett- und Kohlenhydratverstoffwechslung an der Gesamtenergiebereitstellung in Ruhe zu den drei Messzeitpunkten. Die dazugehörigen Daten sind Tabelle 19 zu entnehmen.

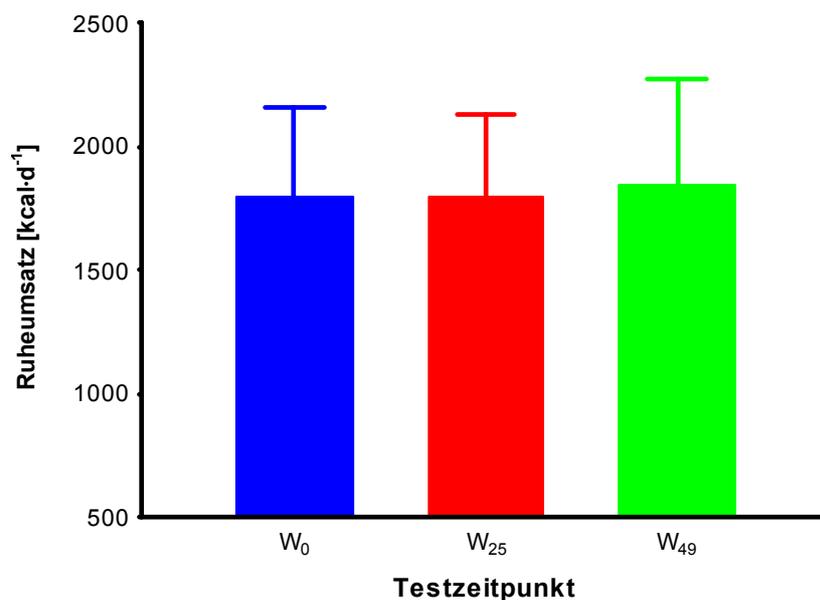


Abbildung 25: Entwicklung des Ruheumsatzes im Trainingsverlauf (MW und SD;  $n = 17$ ).

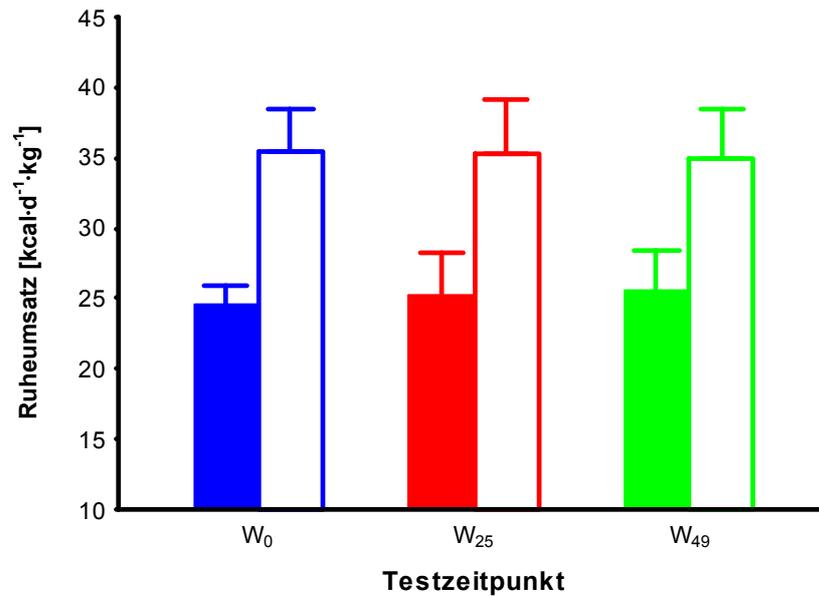


Abbildung 26: Entwicklung des Ruheumsatzes pro kg Körpergewicht (ausgefüllte Balken) und pro kg fettfreie Körpermasse (leere Balken) im Trainingsverlauf (MW und SD; n = 17).

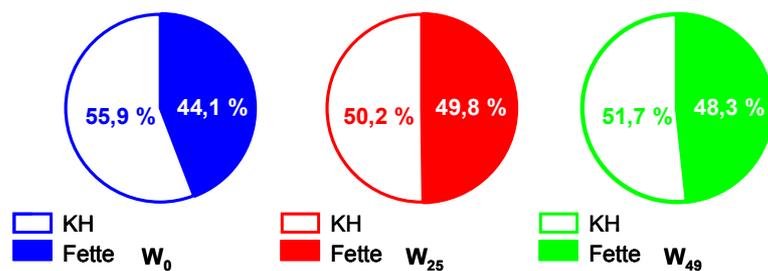


Abbildung 27: Entwicklung des mittleren prozentualen Anteils der Kohlenhydrat- (KH) und Fettstoffwechselung (Fette) am Ruheumsatz im Trainingsverlauf (MW; n = 17).

Tabelle 19: Ruheumsatz und prozentualer Fettstoffwechselanteil (Fettanteil) in Ruhe zu den drei Messzeitpunkten (MW  $\pm$  SD, Min – Max; n = 17).

	Testzeitpunkt		
	W <sub>0</sub>	W <sub>25</sub>	W <sub>49</sub>
<b>Ruheumsatz</b> [kcal·d <sup>-1</sup> ]	1792 $\pm$ 368 1322 – 2621	1796 $\pm$ 335 1301 – 2579	1841 $\pm$ 426 1089 – 2632
<b>Ruheumsatz</b> [kcal·d <sup>-1</sup> ·kg KG <sup>-1</sup> ]	24,5 $\pm$ 1,4 21,9 – 26,6	25,3 $\pm$ 2,9 20,2 – 33,6	25,5 $\pm$ 2,9 19,7 – 30,2
<b>Ruheumsatz</b> [kcal·d <sup>-1</sup> ·kg FFM <sup>-1</sup> ]	35,4 $\pm$ 3,1 29,6 – 41,4	35,3 $\pm$ 4,0 28,6 – 43,2	35,0 $\pm$ 3,5 28,6 – 41,7
<b>Fettanteil</b> [%]	44,1 $\pm$ 18,0 11,6 – 72,6	49,8 $\pm$ 11,8 28,1 – 79,6	48,3 $\pm$ 11,0 24,7 – 72,6

Der Ruheumsatz unterschied sich weder absolut ( $p = 0,43$ ;  $F(2, 32) = 0,87$ ;  $n = 17$ ), noch pro kg Körpergewicht ( $p = 0,27$ ;  $F(2, 32) = 1,35$ ;  $n = 17$ ), noch pro kg fettfreie Körpermasse ( $p = 0,86$ ,  $F(2, 32) = 0,15$ ;  $n = 17$ ) zwischen den drei Messzeitpunkten. Auch auf den prozentualen Anteil der Fettstoffwechslung am Ruheumsatz hatte das Ausdauertraining keinen signifikanten Einfluss ( $p = 0,25$ ;  $F(2, 32) = 1,46$ ;  $n = 17$ ).

## 4.8 Laborparameter

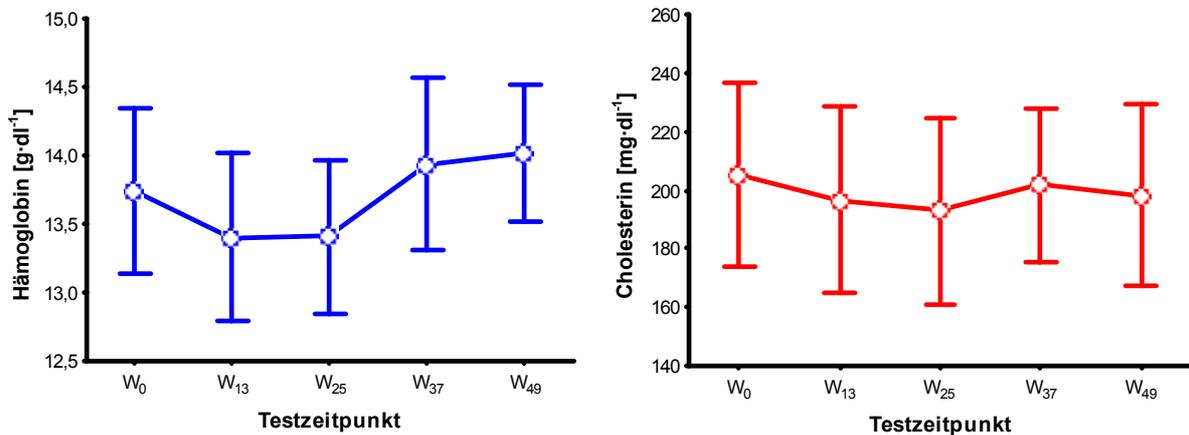
In Tabelle 20 sind die Laborparameter im Verlauf des 50-wöchigen Ausdauertrainings dargestellt. Die Zeitverläufe von Hämoglobinkonzentration und Gesamtcholesterin sind in Abbildung 28 veranschaulicht.

**Tabelle 20: Laborparameter zu den einzelnen Testzeitpunkten (MW  $\pm$  SD oder Mediane (Quartile), Min – Max;  $n = 18$ ).**

	Testzeitpunkt				
	W <sub>0</sub>	W <sub>13</sub>	W <sub>25</sub>	W <sub>37</sub>	W <sub>49</sub>
<b>Hämatokrit</b> [%]	41 $\pm$ 3 36 – 46	40 $\pm$ 3 34 – 47	40 $\pm$ 3 34 – 48	41 $\pm$ 4 35 – 48	41 $\pm$ 3 37 – 45
<b>Hämoglobin</b> [g·dl <sup>-1</sup> ]	13,7 $\pm$ 1,2 11,9 – 15,4	13,4 $\pm$ 1,2 11,4 – 16,0	13,4 $\pm$ 1,1 11,9 – 15,7	13,9 $\pm$ 1,3 12,0 – 16,8	14,0 $\pm$ 1,0 12,5 – 15,6
<b>Ferritin</b> [ng·ml <sup>-1</sup> ]	72 (18/177) 5 – 548	53 (17/114) 4 – 597	57 (24/101) 5 – 474	60 (18/93) 7 – 434	63 (16/146) 5 – 543
<b>CRP</b> [mg·l <sup>-1</sup> ]	$\leq 0,9$ ( $\leq 0,9/2,8$ ) $\leq 0,9$ – 26,5	$\leq 0,9$ ( $\leq 0,9/1,1$ ) $\leq 0,9$ – 6,4	$\leq 0,9$ ( $\leq 0,9/1,1$ ) $\leq 0,9$ – 4,5	$\leq 0,9$ ( $\leq 0,9/1,7$ ) $\leq 0,9$ – 6,5	$\leq 0,9$ ( $\leq 0,9/1,4$ ) $\leq 0,9$ – 7,1
<b>Harnsäure</b> [mg·dl <sup>-1</sup> ]	4,7 (4,0/5,7) 3,2 – 9,5	4,6 (4,1/5,8) 3,2 – 8,1	4,8 (4,2/5,4) 3,2 – 6,9	4,6 (4,1/5,3) 3,4 – 7,9	4,6 (4,0/4,9) 3,6 – 8,0
<b>Cholesterin</b> [mg·dl <sup>-1</sup> ]	205 $\pm$ 31 161 – 271	197 $\pm$ 32 133 – 273	193 $\pm$ 32 128 – 279	202 $\pm$ 26 155 – 252	198 $\pm$ 31 155 – 267
<b>HDL-Chol.</b> [mg·dl <sup>-1</sup> ]	60 $\pm$ 18 28 – 100	55 $\pm$ 15 34 – 89	54 $\pm$ 17 28 – 91	58 $\pm$ 17 30 – 94	57 $\pm$ 16 31 – 89
<b>LDL-Chol.</b> [mg·dl <sup>-1</sup> ]	118 $\pm$ 23 84 – 169	119 $\pm$ 26 79 – 158	114 $\pm$ 23 71 – 164	122 $\pm$ 23 86 – 170	123 $\pm$ 24 94 – 168

Hinsichtlich des Hämatokrits bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Testzeitpunkten (ANOVA:  $p < 0,05$ ;  $F(4, 68) = 3,07$ ; Scheffé-Test post hoc:  $p \geq 0,15$ ;  $n = 18$ ). Die Hämoglobinkonzentration schwankte im Trainingsverlauf signifikant ( $p < 0,001$ ;

$F(4, 68) = 5,91$ ;  $n = 18$ ). Sie war beim Abschlusstest signifikant höher als in der 13. und 25. Trainingswoche ( $p$  jeweils  $< 0,05$ ) und in der 37. Trainingswoche signifikant höher als in der 13. ( $p < 0,05$ ). Dadurch könnte die Sauerstofftransportkapazität als eine wesentliche Determinante der Ausdauerleistungsfähigkeit in der 13. und 25. Trainingswoche im Vergleich zur 37. und 49. Trainingswoche reduziert gewesen sein.



**Abbildung 28: Entwicklung von Hämoglobin und Cholesterin im Trainingsverlauf (MW  $\pm$  SD;  $n = 18$ ).**

Auch die Werte für Ferritin waren zu verschiedenen Messzeitpunkten signifikant unterschiedlich ( $p < 0,05$ ;  $\text{Chi}^2(4) = 10,53$ ). In der 25., 37. und 49. Trainingswoche lagen sie signifikant unter dem Ausgangswert ( $p$  jeweils  $< 0,0125$ ). Ferritin wurde zusätzlich für Probanden mit Eisenmangel (Ferritinkonzentration  $< 20 \text{ ng}\cdot\text{ml}^{-1}$ ;  $n = 5$ ) und für Probanden ohne Eisenmangel (Ferritinkonzentration  $\geq 20 \text{ ng}\cdot\text{ml}^{-1}$ ;  $n = 13$ ) separat ausgewertet (37, 60). Während sich die Werte für Ferritin bei den Studienteilnehmern mit Eisenmangel im Studienverlauf nicht signifikant veränderten ( $p = 0,84$ ;  $\text{Chi}^2(4) = 1,44$ ;  $n = 5$ ), sanken sie bei den Probanden ohne Eisenmangel im Studienverlauf signifikant ( $p < 0,01$ ;  $\text{Chi}^2(4) = 16,06$ ;  $n = 13$ ). Wie auch bei der Gesamtstichprobe war die Ferritinkonzentration der Studienteilnehmer ohne Eisenmangel beim Eingangstest signifikant höher als bei den Tests in der 25., 37. und 49. Trainingswoche ( $p$  jeweils  $< 0,0125$ ).

Die CRP-Werte ( $p = 0,59$ ;  $\text{Chi}^2(4) = 2,82$ ;  $n = 18$ ), Harnsäurekonzentrationen ( $p = 0,82$ ;  $\text{Chi}^2(4) = 1,54$ ;  $n = 18$ ), Gesamtcholesterinspiegel ( $p = 0,21$ ;  $F(4, 68) = 1,50$ ;  $n = 18$ ) sowie HDL- ( $p = 0,22$ ;  $F(4, 68) = 1,46$ ;  $n = 18$ ) und LDL-Cholesterinwerte ( $p = 0,16$ ;  $F(4, 68) = 1,71$ ;  $n = 18$ ) unterschieden sich nicht signifikant zwischen den einzelnen Testzeitpunkten.

## 4.9 Nonresponder

Tabelle 21 gibt eine Übersicht darüber, bei welchen Probanden welche Hauptzielparameter keine trainingsinduzierten Veränderungen zeigten. Überprüft wurden der Maximalparameter  $VO_{2max}$ , die submaximalen kardiozirkulatorischen Parameter  $HF_{Ruhe}$  und HF-Leistungskurve sowie die submaximalen metabolischen Parameter Leistungskurve des RQ und IAS, da sich deren Mittelwerte im Trainingsverlauf signifikant veränderten.

Fünf Probanden (28 %) zeigten bei allen überprüften Parametern Trainingsadaptationen. Bei neun Studienteilnehmern (50 %) reagierte ein Parameter nicht auf das Ausdauertraining und bei drei Probanden (17 %) blieben zwei der überprüften Parameter unverändert. Bei einem Probanden (5 %) veränderten sich drei Parameter im Trainingsverlauf nicht. Da bei keinem Probanden alle überprüften Parameter unverändert blieben, gab es unter den Studienteilnehmern keine Nonresponder.

**Tabelle 21:** Schematische Übersicht darüber, bei welchen Probanden welche Hauptzielparameter keine Trainingsadaptationen zeigten (weiße Felder: Verbesserung; schwarze Felder: keine Verbesserung; graue Felder: Proband ist nicht in die Auswertung eingegangen;  $HF_{Ruhe}$  und  $HF-LK_{LB}$ : n = 18;  $VO_{2maxLB}$  und  $RQ-LK_{LB}$ : n = 17;  $IAS_{FS}$ : n = 15).

Proband Nr.	$VO_{2maxLB}$	$HF_{Ruhe}$	$HF-LK_{LB}$	$RQ-LK_{LB}$	$IAS_{FS}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
gesamt	n = 4 (24 %)	n = 4 (22 %)	n = 3 (17 %)	n = 6 (35 %)	n = 1 (7 %)

Es erschien interessant nachzuvollziehen, ob der Ausdauertrainingsreiz bei den Probanden, die hinsichtlich einzelner Parameter nicht auf das Ausdauertraining reagierten, Auffälligkeiten

aufwies. Daher wurde bei jeder ausbleibenden Veränderung jedes Probanden überprüft, ob dessen Trainingsreiz nach mindestens einer der Intensitätsbeschreibungen (i) Höhe des Trainings-Laktatwerts über dem Basis-Laktatwert, (ii) Prozentsatz der HF-Reserve, (iii) Prozentsatz der  $VO_{2max}$  und (iv) Prozentsatz der  $VO_2$ -Reserve (vgl. Kapitel 4.2) im unteren oder oberen Quartil ( $< 25\%$  oder  $> 75\%$ ) der Gesamtstichprobe lag. Ergaben die Intensitätsbeschreibungen widersprüchliche Informationen darüber (in dem Sinne, dass eine oder mehrere Intensitätsbeschreibungen im oberen Quartil und gleichzeitig eine oder mehrere im unteren Quartil lagen), zählte die Mehrheit. Das war bei zwei Probanden der Fall. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 dargestellt. Lediglich die Probanden, deren Fettstoffwechsel durch das Ausdauertraining unverändert blieb, scheinen gehäuft eine verhältnismäßig intensive Trainingsvorgabe bekommen zu haben.

**Tabelle 22: Aufteilung der Probanden, bei denen sich einzelne Hauptzielparameter nicht veränderten, nach der Intensität ihres Trainingsreizes ins obere Quartil, in den Interquartilsbereich oder ins untere Quartil der Gesamtstichprobe.**

<b><math>VO_{2maxLB}</math> unverändert (n = 4)</b>			<b><math>HF_{Ruhe}</math> unverändert (n = 4)</b>			<b><math>HF-LK_{LB}</math> unverändert (n = 3)</b>		
Trainingsintensität [Quartile]			Trainingsintensität [Quartile]			Trainingsintensität [Quartile]		
< 25 %	25–75 %	> 75 %	< 25 %	25–75 %	> 75 %	< 25 %	25–75 %	> 75 %
n = 2	n = 1	n = 1	n = 1	n = 0	n = 3	n = 2	n = 0	n = 1
<b>RQ-LK<sub>LB</sub> unverändert (n = 6)</b>				<b>IAS<sub>FS</sub> unverändert (n = 1)</b>				
Trainingsintensität [Quartile]				Trainingsintensität [Quartile]				
< 25 %	25–75 %	> 75 %	< 25 %	25–75 %	> 75 %	< 25 %	25–75 %	> 75 %
n = 1	n = 0	n = 5	n = 0	n = 1	n = 0	n = 0	n = 1	n = 0

## 4.10 Einflussfaktoren auf die Trainingsadaptationen

### 4.10.1 Alter

Um den Zusammenhang des Alters der Studienteilnehmer mit dem Ausmaß der Trainingsadaptationen zu überprüfen, wurden die Veränderungen der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest mit dem Alter korreliert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 23 dargestellt. Es bestand ein tendenzieller Zusammenhang zwischen Alter und trainingsinduzierter Senkung der Ruheherzfrequenz. Die Senkung der  $HF_{Ruhe}$  war umso größer, je höher das Alter der Studienteilnehmer war. Die Veränderungen der anderen Parameter standen in keinem signifikanten Zusammenhang mit dem Alter der Probanden.

**Tabelle 23: Ergebnisse der Korrelationen des Alters der Probanden mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest.**

Alter [Jahre] & $\Delta$ HF <sub>Ruhe</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>p = 0,08</b>	r = -0,42	n = 18
Alter [Jahre] & $\Delta$ VO <sub>2maxLB</sub> [ $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	p = 0,28	r = 0,28	n = 17
Alter [Jahre] & $\Delta$ HF-LK <sub>LB</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ]	p = 0,32	r = -0,25	n = 18
Alter [Jahre] & $\Delta$ IAS <sub>FS</sub> [W]	p = 0,41	r = -0,23	n = 15
Alter [Jahre] & $\Delta$ RQ-LK <sub>LB</sub> [ ]	p = 0,74	r = -0,09	n = 17
Alter [Jahre] & $\Delta$ RU [ $\text{kcal}\cdot\text{d}^{-1}$ ]	p = 0,49	r = 0,18	n = 17
Alter [Jahre] & $\Delta$ Cholesterin [ $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ ]	p = 0,51	R = 0,17	n = 18

#### 4.10.2 Geschlecht

Geschlechtsspezifische Unterschiede der trainingsinduzierten Veränderungen wurden untersucht, indem die Veränderungen der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest zwischen den männlichen und weiblichen Studienteilnehmern verglichen wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 24 dargestellt.

**Tabelle 24: Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest bei den männlichen vs. den weiblichen Studienteilnehmern.**

$\Delta$ HF <sub>Ruhe</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ] ♂ vs. ♀	p = 0,85	t(16) = 0,19	n = 7 ♂	n = 11 ♀
$\Delta$ VO <sub>2maxLB</sub> [ $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] ♂ vs. ♀	p = 0,93	t(15) = 0,09	n = 7 ♂	n = 10 ♀
$\Delta$ HF-LK <sub>LB</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ] ♂ vs. ♀	p = 0,41	t(16) = -0,85	n = 7 ♂	n = 11 ♀
$\Delta$ IAS <sub>FS</sub> [W] ♂ vs. ♀	p = 0,64	U(13) = 23	n = 6 ♂	n = 9 ♀
$\Delta$ RQ-LK <sub>LB</sub> [ ] ♂ vs. ♀	p = 0,92	t(15) = 0,10	n = 7 ♂	n = 10 ♀
$\Delta$ RU [ $\text{kcal}\cdot\text{d}^{-1}$ ] ♂ vs. ♀	<b>p &lt; 0,05</b>	t(15) = 2,27	n = 7 ♂	n = 10 ♀
$\Delta$ Cholesterin [ $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ ] ♂ vs. ♀	<b>p = 0,06</b>	U(16) = 18	n = 7 ♂	n = 11 ♀

Die Veränderung des Ruheumsatzes vom Eingangs- zum Abschlusstest war bei den männlichen und weiblichen Studienteilnehmern signifikant unterschiedlich. Der Ruheumsatz veränderte sich bei den Männern im Trainingsverlauf tendenziell um im Mittel  $+137 \pm 151 \text{ kcal}\cdot\text{d}^{-1}$  (-23 bis  $+347 \text{ kcal}\cdot\text{d}^{-1}$ ; p = 0,05; t(6) = 2,40; n = 7), während er sich bei den Frauen nicht signifikant um im Mittel  $-13 \pm 121 \text{ kcal}\cdot\text{d}^{-1}$  (-233 bis  $+223 \text{ kcal}\cdot\text{d}^{-1}$ ) veränderte (p = 0,75; t(9) = 0,33; n = 10). Ein tendenzieller Unterschied bestand zwischen den männlichen und weiblichen Probanden hinsichtlich der Entwicklung der Cholesterinwerte. Der Cholesterinspiegel der Männer veränderte sich im Mittel tendenziell um  $-20 \pm 29 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$  (-80 bis  $+10 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ ; p = 0,09; T = 4,0; n = 7), während er bei den Frauen mit einer mittleren Differenz zwischen Ein-

gangs- und Abschlusstest von  $+1 \pm 15 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$  (-22 bis  $+25 \text{ mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ ) quasi unverändert blieb ( $p = 0,89$ ;  $T = 31,5$ ;  $n = 11$ ). Ansonsten unterschieden sich die Veränderungen der Hauptzielparameter nicht signifikant zwischen den männlichen und weiblichen Studienteilnehmern.

#### 4.10.3 Ausgangsniveau

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse von Korrelationen des Ausgangsniveaus mit den Veränderungen der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest dargestellt.

**Tabelle 25: Ergebnisse der Korrelationen des Ausgangsniveaus mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest.**

$\text{HF}_{\text{Ruhe}} W_0 [\text{min}^{-1}]$ & $\Delta \text{HF}_{\text{Ruhe}} [\text{min}^{-1}]$	$p = 0,70$	$r = -0,10$	$n = 18$
$\text{VO}_{2\text{maxLB}} W_0 [\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}]$ & $\Delta \text{VO}_{2\text{maxLB}} [\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}]$	$p = 0,48$	$r = -0,18$	$n = 17$
$\text{HF-LK}_{\text{LB}} W_0 [\text{min}^{-1}]$ & $\Delta \text{HF-LK}_{\text{LB}} [\text{min}^{-1}]$	<b><math>p &lt; 0,05</math></b>	$r = -0,57$	$n = 18$
$\text{IAS}_{\text{FS}} W_0 [\text{W}]$ & $\Delta \text{IAS}_{\text{FS}} [\text{W}]$	$p = 0,61$	$R = 0,14$	$n = 15$
$\text{RQ-LK}_{\text{LB}} W_0 [ ]$ & $\Delta \text{RQ-LK}_{\text{LB}} [ ]$	<b><math>p &lt; 0,001</math></b>	$r = -0,76$	$n = 17$
$\text{RU} W_0 [\text{kcal}\cdot\text{d}^{-1}]$ & $\Delta \text{RU} [\text{kcal}\cdot\text{d}^{-1}]$	$p = 0,41$	$r = 0,21$	$n = 17$
Cholesterin $W_0 [\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}]$ & $\Delta \text{Cholesterin} [\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}]$	<b><math>p = 0,08</math></b>	$R = -0,42$	$n = 18$

Die Verschiebung der HF-Leistungskurve korrelierte signifikant mit dem Ausgangsniveau. Je höher die HF-Leistungskurve vor dem Ausdauertraining war, desto stärker verschob sie sich im Trainingsverlauf nach unten. Auch zwischen der Verschiebung der Leistungskurve des Respiratorischen Quotienten und dem Ausgangsniveau bestand ein signifikanter Zusammenhang. Bei Probanden mit hohem RQ auf den ersten vier Belastungsstufen im Eingangstest, also geringem prozentualen Fettstoffwechselanteil, waren die stärkste Absenkung der Leistungskurve des RQ und damit der größte Zuwachs an prozentualen Fettstoffwechselanteil zu beobachten. Zwischen dem Ausgangsniveau des Cholesterinspiegels und der Veränderung der Cholesterinwerte im Trainingsverlauf bestand ein tendenzieller Zusammenhang. Auch hier zeigte sich bei den Studienteilnehmern mit den höchsten Ausgangswerten die größte Absenkung. Bei den anderen Parametern stand die Veränderung vom Eingangs- zum Abschlusstest in keinem signifikanten Zusammenhang mit dem Ausgangsniveau.

#### 4.10.4 Compliance

Als Ausdruck der Compliance wurden die im Mittel absolvierten Trainingseinheiten pro Woche mit den Veränderungen der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest korreliert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 dargestellt. Für keinen der untersuchten Parameter

ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Trainingshäufigkeit und Trainingsadaptation.

**Tabelle 26: Ergebnisse der Korrelationen der im Mittel absolvierten Trainingseinheiten pro Woche (TE pro Woche) mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest.**

TE pro Woche & $\Delta$ HF <sub>Ruhe</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ]	$p = 0,40$	$r = 0,21$	$n = 18$
TE pro Woche & $\Delta$ VO <sub>2maxLB</sub> [ $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	$p = 0,92$	$r = -0,03$	$n = 17$
TE pro Woche & $\Delta$ HF-LK <sub>LB</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ]	$p = 0,88$	$r = -0,04$	$n = 18$
TE pro Woche & $\Delta$ IAS <sub>FS</sub> [W]	$p = 0,75$	$r = 0,09$	$n = 15$
TE pro Woche & $\Delta$ RQ-LK <sub>LB</sub> [ ]	$p = 0,40$	$r = 0,22$	$n = 17$
TE pro Woche & $\Delta$ RU [ $\text{kcal}\cdot\text{d}^{-1}$ ]	$p = 0,23$	$r = 0,31$	$n = 17$
TE pro Woche & $\Delta$ Cholesterin [ $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ ]	$p = 0,76$	$R = -0,08$	$n = 18$

#### 4.10.5 Vorhersagewert der potenziellen Einflussfaktoren

Der Vorhersagewert der potenziellen Einflussfaktoren Alter, Geschlecht, Ausgangsniveau und Compliance für die Veränderungen der Hauptzielparameter vom Eingangs- zum Abschlusstest wurde mittels multipler Regressionsanalysen überprüft. Dabei wurden die vier Einflussfaktoren als unabhängige Variablen und der jeweilige Hauptzielparameter als abhängige Variable eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 27 dargestellt.

**Tabelle 27: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen der potenziellen Einflussfaktoren Alter, Geschlecht, Ausgangsniveau und Compliance mit den Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter von Eingangs- zum Abschlusstest.**

$\Delta$ HF <sub>Ruhe</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ] & Einflussfaktoren	$p = 0,51$	$R = 0,46$	$n = 18$
$\Delta$ VO <sub>2maxLB</sub> [ $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] & Einflussfaktoren	$p = 0,83$	$R = 0,33$	$n = 17$
$\Delta$ HF-LK <sub>LB</sub> [ $\text{min}^{-1}$ ] & Einflussfaktoren	$p = 0,21$	$R = 0,59$	$n = 18$
$\Delta$ IAS <sub>FS</sub> [W] & Einflussfaktoren	$p = 0,87$	$R = 0,33$	$n = 15$
$\Delta$ RQ-LK <sub>LB</sub> [ ] & Einflussfaktoren	<b><math>p &lt; 0,05</math></b>	$R = 0,79$	$n = 17$
$\Delta$ RU [ $\text{kcal}\cdot\text{d}^{-1}$ ] & Einflussfaktoren	<b><math>p = 0,08</math></b>	$R = 0,69$	$n = 17$
$\Delta$ Cholesterin [ $\text{mg}\cdot\text{dl}^{-1}$ ] & Einflussfaktoren	$p = 0,20$	$R = 0,59$	$n = 18$

Lediglich für die Veränderung des Fettstoffwechsels war das Modell der multiplen Regression signifikant. Der stärkste und einzig signifikante Prädiktor für die Veränderung des RQ auf den ersten vier Belastungsstufen durch das Ausdauertraining war das Ausgangsniveau (Alter:  $p = 0,88$ ; Beta =  $-0,03$ ; Geschlecht:  $p = 0,72$ ; Beta =  $-0,07$ ; Ausgangsniveau:  $p <$

0,001; Beta = -0,77; Compliance:  $p = 0,28$ ; Beta = 0,21). Wie die Korrelation bereits zeigte, stieg der prozentuale Fettstoffwechselanteil umso stärker durch das Ausdauertraining an, je niedriger er beim Eingangstest war. Einen tendenziellen Effekt ergab die multiple Regressionsanalyse ferner für den Vorhersagewert der potenziellen Einflussfaktoren auf die Veränderungen des Ruheumsatzes. Das Geschlecht erwies sich als stärkster und einzig signifikanter Prädiktor für die Veränderungen des Ruheumsatzes im Trainingsverlauf (Alter:  $p = 0,07$ ; Beta = 0,44; Geschlecht:  $p < 0,05$ ; Beta = -0,89; Ausgangsniveau:  $p = 0,31$ ; Beta = -0,33; Compliance:  $p = 0,79$ ; Beta = 0,06). Wie ebenfalls bereits durch die Korrelation erfasst, kam es bei den männlichen Studienteilnehmern eher zu einem Anstieg des Ruheumsatzes im Trainingsverlauf als bei den weiblichen. Der zweitstärkste und lediglich tendenzielle Prädiktor für Veränderungen des Ruheumsatzes durch das Ausdauertraining war das Alter. Je älter die Studienteilnehmer waren, desto eher stieg der Ruheumsatz durch das Ausdauertraining an. Für die Veränderungen der anderen Hauptzielparameter im Trainingsverlauf hatten die untersuchten Einflussfaktoren keinen signifikanten Vorhersagewert.

#### 4.11 Ergebnisse der Dropouts

Die Veränderungen der Hauptzielparameter wurden bei den Dropouts, die nach der 25. Trainingswoche ausstiegen ( $n = 4$ ), mit den Veränderungen der ausgewerteten Probanden im selben Zeitraum verglichen. In Tabelle 28 sind die Ergebnisse dargestellt.

**Tabelle 28:** Vergleich der Veränderungen ( $\Delta$ ) der Hauptzielparameter vom Eingangstest zum Test in der 25. Trainingswoche von den vier Dropouts, die bis zu mindestens diesem Test teilnahmen, mit den ausgewerteten Studienteilnehmern.

Parameter	$\Delta$ Dropouts $W_0$ bis $W_{25}$				$\Delta$ Ausgewertete Probanden $W_0$ bis $W_{25}$		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	MW $\pm$ SD	Spannen	n
$HF_{Ruhe} [min^{-1}]$	0	-22	-12	-24	$-9 \pm 6$	-20 bis 0	18
$VO_{2maxLB} [ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}]$	+1,5	+4,7	+8,4	-3,8	$+4,3 \pm 3,7$	-1,7 bis +12,2	17
$HF-LK_{LB} [min^{-1}]$	-1	-18	-15	-23	$-11 \pm 6$	-23 bis +4	18
$RQ-LK_{LB} [ ]$	+0,02	-0,04	-0,03	-0,03	$-0,03 \pm 0,03$	-0,10 bis +0,02	17
$RU [kcal \cdot d^{-1}]$	-15		-69	-287	$+4 \pm 170$	-218 bis +291	17
Cholesterin $[mg \cdot dl^{-1}]$	+2	+28	-11	+77	$-12 \pm 24$	-61 bis +37	18

Die Dropouts Nr. 1, 2 und 3 wurden wegen zu langer verletzungsbedingter Trainingspause, zu häufigen krankheitsbedingten Trainingspausen bzw. zu vielen Trainingswochen mit nur zwei abgeleisteten Trainingseinheiten in der 30., 33. bzw. 47. Trainingswoche von der Stu-

dienteilnahme ausgeschlossen (vgl. Kapitel 4.1.1). Bis auf die Absenkung der Ruheherzfrequenz von Dropout Nr. 2 lagen alle Veränderungen der Hauptzielparameter dieser Dropouts innerhalb der Spanne der Veränderungen der ausgewerteten Stichprobe. Die Ruheherzfrequenz sank bei Dropout Nr. 2 innerhalb der ersten sechs Trainingsmonate etwas stärker als bei den ausgewerteten Probanden. Dropout Nr. 4 überschritt in der 40. Trainingswoche wegen Krankheit die maximal erlaubte Pausenzeit von drei Wochen am Stück (vgl. Kapitel 4.1.1). Seine Ruheherzfrequenz sank bis zur 25. Trainingswoche etwas stärker als die der ausgewerteten Probanden, was auf verhältnismäßig große Trainingsadaptationen hinweist. Dem entgegen fielen die  $VO_{2max}$  und der Ruheumsatz ab und die Cholesterinkonzentration stieg an. Die drei Parameter reagierten entgegen der erwarteten Weise auf das Ausdauertraining, was in solcher Ausprägung bei keinem ausgewerteten Probanden zu beobachteten war.

## 5 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, das Ausmaß, die interindividuelle Variabilität und den Zeitverlauf verschiedener leistungsphysiologischer und gesundheitsbezogener Anpassungserscheinungen innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings mit konstanter Herzfrequenzvorgabe zu beschreiben. Bisher liegen darüber kaum wissenschaftlich gesicherte Informationen vor, obwohl sie für die Betreuung von Gesundheitssportlern und die Planung zukünftiger Ausdauertrainingsstudien interessant erscheinen.

Das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining führte erwartungsgemäß zu einer Verbesserung aller untersuchten leistungsphysiologischen Parameter außer der Laufökonomie. Von den erfassten Gesundheitsindikatoren veränderten sich nur die Körperzusammensetzung und der Fettstoffwechsel während Belastung signifikant. Das Ausmaß der Veränderungen wies bei allen untersuchten Parametern beträchtliche Spannen auf, und jeder Indikator der Ausdauerleistungsfähigkeit blieb bei einem Teil der Probanden unverändert. Allerdings gab es unter den Studienteilnehmern keine Nonresponder, die als Individuen ohne jegliche Trainingsadaptationen definiert waren. Die Veränderungen der verschiedenen Parameter folgten zum Teil unterschiedlichen Zeitverläufen. Innerhalb der ersten sechs Trainingsmonate waren aber bei allen Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit bereits mindestens 75 % der Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht.

An der vorliegenden Ausdauertrainingsstudie sollten für Gesundheitssportler repräsentative untrainierte weibliche und männliche Probanden teilnehmen. Der Literatur zufolge weisen untrainierte Frauen und Männer eine maximale Sauerstoffaufnahme zwischen 32 und 38 bzw. 40 und 55  $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  auf (77, 87). Die initiale  $\text{VO}_{2\text{max}}$  der Studienteilnehmer betrug im Mittel  $37,7 \pm 4,6 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ , was innerhalb dieses Rahmens liegt. Mit einem mittleren Alter von 42 Jahren und einem BMI im oberen Normbereich erscheint das Probandenkollektiv für Gesundheitssportler repräsentativ.

Das Ausdauertraining erfolgte nach einer Herzfrequenzvorgabe, die im Trainingsverlauf unverändert blieb. Dadurch wurde die kardiozirkulatorische Beanspruchung etwa konstant gehalten, was zu einer Zunahme der Laufgeschwindigkeit während des Ausdauertrainings um im Mittel  $0,7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  führte. Dieser Effekt kann als zumindest partielle Anpassung des Trainingsreizes an die Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit angesehen werden (126). Allerdings weisen die signifikant niedrigeren Blutlaktatkonzentrationen während des Ausdauertrainings gegen Studienende auf eine geringfügige Abnahme der metabolischen Beanspruchung hin. Mit Laktatkonzentrationen von Mittel  $1,4$  und  $1,2 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  war das Ausdauertraining sowohl zu Beginn als auch gegen Ende der Studie im unteren Teil des aerob-

anaeroben Übergangsbereichs, also im extensiven und damit für Gesundheitssportler geeigneten Ausdauertrainingsbereich einzuordnen.

Im Mittel absolvierten die Teilnehmer dieser Studie etwa 91 % der vorgegebenen Trainingseinheiten. Von den fünf einleitend beschriebenen Ausdauertrainingsstudien, die mindestens zehn Monate dauerten, machen drei keine Angaben zur Compliance ihrer Probanden (13, 45, 215). Iwasaki et al. (94) definierten ihre Trainingsvorgaben offensichtlich als zu erfüllende Mindestanforderung, allerdings ist das nur ungenau beschrieben. Im Rahmen der zweijährigen Ausdauertrainingsstudie von Duncan et al. (52) wurde die Compliance nur im ersten halben Jahr erfasst. Je nach Trainingsgruppe leisteten die Probanden eigenen Angaben zufolge zwischen 58 und 66 % des vorgegebenen Trainings ab, was bedeutend weniger ist als bei der vorliegenden Untersuchung. Die sieben kürzeren recherchierten Ausdauertrainingsstudien von viereinhalb bis acht Monaten Dauer verzichteten ebenfalls zum Teil auf Angaben zur Compliance (44, 125, 196). Auf die HERITAGE-Studie soll in diesem Zusammenhang nicht eingegangen werden, weil eine multizentrische Studie mit insgesamt über 1000 Probanden nicht mit der vorliegenden Untersuchung vergleichbar erscheint (222, 223). Gaesser et al. (61) berichten, dass ihre 16 Probanden 97 % aller vorgegebenen Trainingseinheiten absolvierten. Allerdings war die Studie mit 18 Wochen Dauer nur etwas mehr als ein Drittel so lang wie die vorliegende Untersuchung, was eine gute Compliance mit Sicherheit begünstigt. Santiago et al. (187) werteten für ihre 20-wöchige Studie nur Probanden aus, die 100 % der vorgegebenen Trainingseinheiten absolvierten. Bei diesem Vorgehen dürfen versäumte Trainingseinheiten an die vorgesehene Studiendauer angehängt werden, was bei der vorliegenden Untersuchung wegen der gemeinsamen Testzeitpunkte für die Zwischen- und Abschlusstests nicht möglich war. Verglichen mit anderen Trainingsstudien ist die Compliance der Teilnehmer bei der vorliegenden Untersuchung insgesamt als gut bis sehr gut einzustufen, was vermutlich auf die sorgfältige Auswahl der Probanden, die strengen Ausschlusskriterien während des Trainingsprogramms und die intensive Trainingsbetreuung zurückzuführen ist.

Die Teilnehmer der vorliegenden Untersuchung sollten mindestens 70 % ihrer Trainingszeit innerhalb der vorgegebenen Herzfrequenzzone absolvieren. Im Mittel lag die Zeit innerhalb der Zone bei etwa 74 %, allerdings reichte die Spanne von 57 bis 89 %. Nach Angaben der Teilnehmer war es bei unebenem Geländeprofil nicht möglich, die Vorgaben genauer einzuhalten. Angesichts der zielgenauen mittleren Trainingsherzfrequenz, die im Schnitt  $1 \text{ min}^{-1}$  und maximal  $4 \text{ min}^{-1}$  von der Vorgabe abwich, erscheint die zum Teil etwas geringe Zeit innerhalb der Herzfrequenzzone jedoch irrelevant.

Bei den ausgewerteten Probanden von Längsschnittuntersuchungen kann es sich um eine bestimmte Selektion handeln, die am Ende der Studie von der initialen Stichprobe übrig bleibt. Würden in erster Linie Teilnehmer im Studienverlauf abbrechen, deren Trainingsadaptationen besonders gering ausfallen oder ganz ausbleiben, käme es dadurch zu einer Verzerrung der Studienergebnisse. Um das zu überprüfen, wurden die Verbesserungen der Dropouts mit den Verbesserungen der ausgewerteten Studienteilnehmer innerhalb der ersten sechs Trainingsmonate verglichen. Drei der vier untersuchten Dropouts zeigten Veränderungen, die innerhalb des Spektrums der Veränderungen der ausgewerteten Stichprobe lagen. Nur ein Parameter veränderte sich bei einem dieser drei Dropouts stärker im Sinne größerer Trainingsadaptationen. Beim vierten untersuchten Dropout wies ein Indikator auf verhältnismäßig große Anpassungen hin, während drei andere Parameter das Gegenteil anzeigten und sich zwei im Vergleich zur ausgewerteten Stichprobe unauffällig verhielten. Insgesamt scheinen sich die Trainingsadaptationen der Dropouts nicht systematisch von denen der ausgewerteten Stichprobe zu unterscheiden, so dass nicht von einer Verzerrung der Studienergebnisse durch die Dropouts auszugehen ist.

## 5.1 Ausmaß der Trainingsadaptationen

### 5.1.1 Maximale Sauerstoffaufnahme, Ruheherzfrequenz, Herzfrequenzleistungskurve und Laktatleistungskurve

Die vorliegende Untersuchung beschreibt erstmals das Ausmaß verschiedener leistungsphysiologischer und gesundheitsbezogener Trainingsadaptationen, die innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings mit konstanter Herzfrequenzvorgabe auftreten.

Um die Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme beim Laufbandtest beurteilen zu können, müssen zunächst die Ausbelastungsparameter interpretiert werden. Ein Levelling-off der Sauerstoffaufnahme stellt einen sicheren, aber nicht notwendigen Indikator für das Vorhandensein von Ausbelastung dar (91, 92). Die maximale Herzfrequenz indiziert ab dem Erreichen ihres Maximalwerts nach Faustformel „ $HF_{\max} = 220$  minus Lebensalter“ Ausbelastung, was bei der vorliegenden Studie einer mittleren  $HF_{\max}$  beim Laufbandtest von  $178 \text{ min}^{-1}$  entspricht (113, 152). Die erforderlichen Werte für die maximale Blutlaktatkonzentration und den maximalen Respiratorischen Quotienten als Ausbelastungskriterien werden in der Literatur weniger einheitlich angegeben. Die Spanne für  $La_{\max}$  reicht von 5,5 bis  $10,0 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ , wobei für gesunde Erwachsene üblicherweise  $8,0 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  als Grenzwert verwendet wird (51, 113, 152). Werte darunter gelten eher für Ältere, Herzkranke und Kinder, die eine geringere Azidose-toleranz aufweisen. Die in der Literatur beschriebenen Mindestan-

forderungen an den  $RQ_{\max}$  liegen zwischen 1,0 und 1,15, wobei 1,0 wiederum eher für Personen mit geringer Azidosetoleranz gilt, und 1,15 selbst von eindeutig ausbelasteten Sportlern nicht immer erreicht wird (91, 152). An den klassischen Ausbelastungskriterien muss kritisiert werden, dass die Parameter eine große interindividuelle Variabilität aufweisen und viele Grenzwerte vor über 40 Jahren unter Verwendung anderer Belastungsprotokolle definiert wurden (153). Es sind daher aktuell individuellere Kriterien wie eine Verifikation der  $VO_{2\max}$  durch einen supramaximalen Test im Anschluss an das eigentliche Testprotokoll oder die Berücksichtigung der Steigung der Sauerstoffaufnahme zur Definition des Levelling-offs im Gespräch (153). Allerdings hat sich bislang keiner dieser Ansätze durchgesetzt, so dass bei der vorliegenden Untersuchung auf die klassischen Ausbelastungskriterien zurückgegriffen wurde.

Im Mittel erreichten die Studienteilnehmer bei den fünf Laufbandtests maximale Herzfrequenzen zwischen 177 und 183  $\text{min}^{-1}$ , maximale Blutlaktatkonzentrationen zwischen 7,92 und 8,59  $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  und maximale Respiratorische Quotienten zwischen 1,03 und 1,11. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Studienteilnehmer als Sparteinsteiger Anstrengung nicht gewohnt und insofern eventuell etwas unterdurchschnittlich azidosetolerant waren, kann von ausreichender Ausbelastung zur Annahme von tatsächlichen Maximalwerten ausgegangen werden. Eine alternative Herangehensweise läge darin, bei der Auswertung von Maximalparametern ausschließlich Probanden zu berücksichtigen, die eine vordefinierte Anzahl an Ausbelastungskriterien erfüllen. Diese vergleichsweise harte Alternative erscheint jedoch bei einem Längsschnittstudiendesign nicht notwendig, denn die Vergleichbarkeit des Grades der Ausbelastung bei den einzelnen Tests ist hier von größerer Bedeutung als das Überschreiten bestimmter Cut-off-Werte (143).

Statistische Vergleiche der Ausbelastungsparameter beim Eingangs- und Abschlusstest ergaben die Annahme einer Gleichheitshypothese für die Anzahl der Levelling-offs der  $VO_2$ , die maximale Blutlaktatkonzentration und die maximale Herzfrequenz. Allerdings war der maximale RQ beim Eingangstest signifikant höher als beim Abschlusstest. Da drei von vier Ausbelastungsparameter auf gleiche Ausbelastung hinwiesen, ist nicht von einem Einfluss unterschiedlicher Ausbelastung auf die Gesamtveränderungen der Maximalparameter auszugehen. Zudem war der RQ beim Eingangstest am höchsten, so dass die trainingsinduzierten Verbesserungen theoretisch unterschätzt, aber nicht überschätzt sein könnten.

Das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining führte zu einem Gesamtanstieg der maximalen Sauerstoffaufnahme um im Mittel 5,7  $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Wie einleitend beschrieben, liegen bereits vier Ausdauertrainingsstudien vor, die vergleichbare Trainingszeiträume von mindestens zehn Monaten Dauer sorgfältig untersuchten (13, 45, 94, 215). Die Probanden

der vier Studien steigerten durch intensiveres und/ oder umfangreicheres Ausdauertraining, als es im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführt wurde, ihre  $VO_{2max}$  um im Mittel 3,1 bis 10,0  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ . Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liegen innerhalb dieser Spanne und erscheinen somit plausibel. Das von Denis et al. (45) gewählte Trainingsprogramm lag mit dreimal wöchentlich 60 min Fahrradergometertraining bei 80 bis 85 %  $VO_{2max}$  als einziges innerhalb der ACSM-Empfehlungen für Gesundheitssportler (1). Es bewirkte einen nicht signifikanten Anstieg der  $VO_{2max}$  um 3,1  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ . Im Vergleich dazu erscheint das Ausdauertraining der vorliegenden Untersuchung, das aus dreimal wöchentlich 45 min Laufen bzw. Walken mit etwa 62 %  $VO_{2max}$  bestand, trotz geringerer Intensität etwas effektiver. Allerdings untersuchten Denis et al. (45) bereits körperlich aktive Probanden, was die Vergleichbarkeit der Studien schmälert.

Die in Kapitel 2.3.1 beschriebene Literaturrecherche brachte sieben Trainingsstudien von viereinhalb bis acht Monaten Dauer hervor, deren Trainingsvorgaben im für Gesundheitssportler geeigneten Bereich lagen (44, 61, 125, 187, 190, 222, 223). Diese Studien fanden, ähnlich wie die vier längeren Ausdauertrainingsstudien, Verbesserungen der  $VO_{2max}$  zwischen 3,7 und 12,3  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ . Betrachtet man die einzelnen Trainingsstudien genauer, so kommt die Gestaltung des Ausdauertrainings von Santiago et al. (187) den Trainingsvorgaben der vorliegenden Untersuchung am nächsten. Santiago et al. (187) ließen eine Trainingsgruppe fünf Monate lang viermal wöchentlich mit 71 %  $HF_{max}$  auf einem Laufband mit 6 % Steigung etwa 5 km walken, wobei der Energieverbrauch während des Trainings im Verlauf der Studie um 1 MET gesteigert wurde. Sie verzeichneten eine Steigerung der  $VO_{2max}$  um 7,2  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ . Die Probanden der vorliegenden Untersuchung liefen bzw. walkten dreimal wöchentlich etwa 6 km mit etwa 76 %  $HF_{max}$ . Ihre  $VO_{2max}$  verbesserte sich in ähnlichem Maße wie die der Probanden von Santiago et al. (187).

Durch das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining sank die Ruheherzfrequenz der Studienteilnehmer insgesamt um im Mittel 9  $min^{-1}$ . Die recherchierten sieben gesundheitssportlichen Trainingsstudien von viereinhalb bis acht Monaten Dauer berichten von Abnahmen der  $HF_{Ruhe}$  zwischen 0 und 9  $min^{-1}$  (44, 61, 125, 187, 196, 222, 223). Das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung liegt somit am oberen Ende dieses Spektrums. Auch von den noch kürzeren Trainingsstudien fand lediglich eine, die insgesamt zehn Wochen dauerte, eine größere Abnahme der  $HF_{Ruhe}$  um 15  $min^{-1}$  (119). Da die Veränderung der  $HF_{Ruhe}$  bei der vorliegenden Untersuchung nach sechs Monaten stagnierte, kann die verhältnismäßig große Adaptation nicht ohne Weiteres auf die lange Studiendauer zurückgeführt werden. Die  $HF_{Ruhe}$  wurde nach einer standardisierten zehnminütigen Liegephase gemessen, was in vielen anderen Studien nicht der Fall war. Möglicherweise sind Veränderungen der  $HF_{Ruhe}$  unter Ruhebedingungen besser abbildbar als unmittelbar vor Beginn einer Belastung, weil der bevor-

stehende Test zu Aufregung führen könnte und die Körperposition auf dem Fahrradergometer sitzend oder auf dem Laufband stehend weniger gut standardisiert ist. Interessanterweise argumentieren Wilmore et al. (222) genau umgekehrt. Daten der HERITAGE-Studie hatten wider Erwarten nur eine minimale, nicht signifikante Absenkung der  $HF_{\text{Ruhe}}$  ergeben. Die Autoren stellten bei der Durchsicht der Literatur fest, dass Studien, die vor der Messung Ruhebedingungen herstellten, geringere Effekte auf die  $HF_{\text{Ruhe}}$  verzeichneten als Studien, bei denen die  $HF_{\text{Ruhe}}$  unmittelbar vor Belastungsbeginn erfasst wurde. Dafür werden fünf Studien zitiert, die keine oder nur geringe Veränderungen der Ruheherzfrequenz durch Messungen unter standardisierten Ruhebedingungen fanden. Untersuchungen ohne geeignete Ruhebedingungen werden nicht explizit aufgezählt. Wilmore et al. (222) vermuten einen Gewöhnungseffekt an die Belastungstests, der zu geringerer Aufregung und damit zu einer zunehmend niedrigeren Herzfrequenz vor Testbeginn führt. Diese Argumentation bedeutet, dass Ausdauertraining gar keinen wirklichen Effekt auf die  $HF_{\text{Ruhe}}$  hat, was allerdings weder mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung noch mit der allgemeinen Datenlage vereinbar ist und daher zurückgewiesen werden muss.

Die Absenkung der  $HF_{\text{Ruhe}}$  zeigte bei der vorliegenden Studie einen tendenziellen Zusammenhang mit dem Alter der Probanden. Dieser Befund erstaunt insofern, als in der Literatur aktuell nicht von Altersunterschieden der Trainierbarkeit ausgegangen wird (2, 201). Da es sich lediglich um einen tendenziellen Zusammenhang handelt und bei Parametern mit ähnlichem physiologischen Hintergrund wie beispielsweise der HF-Leistungskurve kein solcher Zusammenhang festgestellt wurde, muss hier eher ein Zufallsbefund angenommen werden.

Im Verlauf des einjährigen gesundheitssportlichen Ausdauertrainings verschob sich die Herzfrequenzleistungskurve der Probanden um insgesamt  $-11 \text{ min}^{-1}$  beim Laufbandtest bzw.  $-17 \text{ min}^{-1}$  beim submaximalen Feldstufentest. Die recherchierten sieben gesundheitssportlichen Trainingsstudien von viereinhalb bis acht Monaten Dauer fanden Absenkungen der submaximalen Belastungsherzfrequenz zwischen  $10$  und  $21 \text{ min}^{-1}$  (44, 61, 125, 187, 196, 222, 223), was gut mit der Größenordnung der in der vorliegenden Untersuchung gefundenen Veränderungen übereinstimmt. Dass sich die HF-Leistungskurve beim Laufbandtest und beim submaximalen Feldstufentest unterschiedlich stark veränderte, könnte an der fehlenden initialen Gewöhnung der Probanden an den submaximalen Feldstufentest liegen. Während alle Probanden einen Laufbandtest zur Gewöhnung absolvierten, wurde beim submaximalen Feldstufentest auf einen Gewöhnungstest verzichtet, was theoretisch zum Überschätzen des Trainingseffekts bei dieser Testform geführt haben könnte. Erwartungsgemäß stand die Absenkung der submaximalen Belastungsherzfrequenz mit dem Ausgangsniveau in Zusammenhang, was auch schon bei der HERITAGE-Studie beobachtet wurde (30).

Das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining führte insgesamt zu einer Verschiebung der Laktatleistungskurve um im Mittel  $-0,28 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ . Diese Verschiebung wurde als Differenz der Mittelwerte der Laktatleistungskurven beim Eingangs- und Abschlusstest berechnet. Durch Ausdauertraining verändern sich insbesondere die Laktatwerte auf den höheren submaximalen Belastungsstufen, was als „Rechtsverschiebung“ der Laktatleistungskurve zum Ausdruck kommt. Da in die Mittelwertberechnung auch die ersten Belastungsstufen einfließen, auf denen geringere trainingsbedingte Veränderungen zu erwarten sind, unterschätzt dieses Vorgehen die tatsächlichen Trainingseffekte. Die Bestimmung von Schwellen schafft hier normalerweise Abhilfe. Allerdings konnten bei dem gewählten Belastungsprotokoll weder die IAS noch eine andere Laktatschwelle bestimmt werden, da auf der höchsten Belastungsstufe vor Beginn der Rampe keine ausreichend hohen Blutlaktatkonzentrationen erreicht wurden (205). Betrachtet man nur die letzte Stufe der Laufbandtests, so beträgt die Absenkung der Blutlaktatkonzentration im Mittel  $0,7 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $n = 18$ ). Verglichen mit Ergebnissen von Meyer et al. (145), die nach drei Monaten gesundheitssportlichem Ausdauertraining mit initial untrainierten Probanden in der zwölften Minute eines ähnlichen gestapelten Laufbandtests eine nicht signifikante Absenkung der Blutlaktatkonzentration um  $0,4 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  fanden, erscheinen die Verbesserungen bei der vorliegenden Untersuchung nach zwölf Monaten Training plausibel.

### 5.1.2 Fettstoffwechsel und Laufökonomie

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde erstmals der Einfluss von mehr als zwölf Wochen Ausdauertraining auf den Fettstoffwechsel untersucht. Der Mittelwert des prozentualen Fettstoffwechselanteils auf den ersten vier Stufen des Laufbandtests nahm durch das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining durchschnittlich um  $14,1 \%$  zu. Die mittlere Fettflussrate auf den ersten vier Belastungsstufen stieg insgesamt um durchschnittlich  $0,10 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  an. Aus der einleitend beschriebenen Literaturrecherche bisheriger Längsschnittstudien zum Einfluss von Ausdauertraining auf den Fettstoffwechsel gingen insgesamt zehn Studien hervor, von denen zwei wegen unzureichender Methodik bzw. Ergebnisdarstellung nicht auswertbar waren. Die verbleibenden acht Untersuchungen dauerten vier bis zwölf Wochen und dokumentierten Anstiege des Fettstoffwechselanteils bei submaximalen Dauertests um  $3$  bis  $20 \%$  bzw. der Fettflussrate um  $0,01$  bis  $0,10 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  (19, 58, 59, 90, 93, 95, 131, 190). Somit liegen die in der vorliegenden Untersuchung gemessenen Verbesserungen von Fettstoffwechselanteil und Fettflussrate innerhalb des bisher gemessenen Spektrums und erscheinen plausibel. Allerdings entspricht die Verbesserung der Fettflussrate dem höchsten bisher beobachteten Wert und wird daher näher beleuchtet.

Die Fettstoffwechselrate hat sich bei der vorliegenden Untersuchung erst ab dem neunten Trainingsmonat nicht mehr signifikant verbessert. Es ist daher anzunehmen, dass die bisherigen Fettstoffwechsel-Trainingsstudien bei längerer Gesamtdauer größere Effekte gefunden hätten. Betrachtet man die Trainingsprogramme der bisherigen Studien genauer fällt auf, dass die meisten intensiver und umfangreicher waren als in der vorliegenden Untersuchung. Das am häufigsten verwendete Protokoll umfasst fünf- bis sechsmal wöchentlich eine Stunde Fahrradergometertraining bei 75 %  $VO_{2max}$  (19, 58, 59, 95). Hurley et al. (93) ließen ihre Studienteilnehmer sogar dreimal wöchentlich fahrradergometrisches Intervalltraining und dreimal wöchentlich Dauerläufe mit maximal möglicher Geschwindigkeit absolvieren. Martin et al. (131) verordneten dreimal wöchentlich entweder intensives Intervalltraining oder 45-minütiges Dauertraining bei 80%  $VO_{2max}$  auf dem Fahrradergometer und zusätzlich dreimal wöchentlich 40-minütige Dauerläufe bei mindestens 75%  $VO_{2max}$ . Lediglich die Trainingsvorgaben bei den Untersuchungen von Horowitz et al. (90) und Schrauwen et al. (190) waren etwas moderater. Horowitz et al. (90) steigerten den Trainingsreiz im Studienverlauf von viermal wöchentlich 35 min Fahrradergometertraining bei 70 %  $HF_{max}$  auf 45 min bei 85 %  $HF_{max}$ . Die (ebenfalls gesunden) Probanden von Schrauwen et al. (190) trainierten dreimal wöchentlich 45 min bei 40 %  $VO_{2max}$ . Diese beiden Studien verzeichneten die beiden höchsten Anstiege der Fettflussrate von 0,06 und 0,10  $g \cdot min^{-1}$  (90, 190). Verschiedenen Untersuchungen der Arbeitsgruppe um Jeukendrup zufolge liegt die maximale Fettflussrate von Untrainierten um 50 %  $VO_{2max}$  (98). Bei höheren Intensitäten fällt die Fettflussrate rasch gegen null ab. Man geht davon aus, dass Intensitäten mit der höchsten Fettflussrate auch den besten Trainingsreiz für den Fettstoffwechsel darstellen, was Venables und Jeukendrup (212) jüngst durch eine Trainingsstudie mit Adipösen nachweisen konnten. Insofern ist es wenig erstaunlich, dass Horowitz et al. (90) und Schrauwen et al. (190) die größten Verbesserungen der Fettflussrate fanden. Auch die Trainingsintensität der vorliegenden Untersuchung erscheint mit im Mittel 62 %  $VO_{2max}$  günstiger als bei vielen bisherigen Fettstoffwechsel-Trainingsstudien, was die verhältnismäßig großen Anstiege der Fettstoffwechselrate erklären könnte.

Von den acht Fettstoffwechsel-Trainingsstudien untersuchten sechs Adaptationen an fahrradergometrisches Training (19, 58, 59, 90, 95, 190). Sowohl Achten et al. (4) als auch Knechtle et al. (117) zeigten, dass die Fettstoffwechselrate beim Laufen über eine weite Spanne von Intensitäten höher ist als beim Radfahren, weshalb Laufen möglicherweise einen besseren Trainingseffekt mit sich bringt. Tatsächlich verzeichneten die beiden Studien, deren Probanden nicht rein fahrradergometrisch trainierten, sondern zusätzlich zum Fahrradergometertraining dreimal wöchentlich liefen, die beiden höchsten berichteten Verbesserungen des Fettstoffwechselanteils von jeweils 20 % (93, 131). Fettflussraten sind in diesen Studien nicht angegeben. Insgesamt könnte neben der langen Studiendauer und der mögli-

cherweise gut geeigneten Trainingsintensität daher auch die Belastungsform für die im Vergleich zur Literatur recht großen Verbesserungen des Fettstoffwechsels verantwortlich sein.

Die Verbesserung des RQ bzw. des prozentualen Stoffwechselanteils wies einen signifikanten Zusammenhang mit dem Ausgangsniveau auf. Für andere gesundheitsbezogene Parameter wie z. B. den Blutdruck ist bereits bekannt, dass Individuen mit den schlechtesten Ausgangswerten am meisten vom Ausdauertraining profitieren (40). Offensichtlich ist das auch bei Verbesserungen des Fettstoffwechsels der Fall.

Durch die vorliegende Studie wurden erstmals trainingsbedingte Veränderungen des Fettstoffwechsels im Längsschnitt auf mehreren Belastungsstufen untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Fettstoffwechselrate nur auf den höheren submaximalen Belastungsstufen zunimmt. Ähnliche Unterschiede des Fettstoffwechsels beschreiben Stisen et al. (206) beim Querschnittvergleich trainierter und untrainierter Frauen. Während auch sie auf den ersten Belastungsstufen keine signifikanten Unterschiede fanden, lag die Fettoxidationsrate der Trainierten auf den höheren absoluten Belastungsstufen signifikant höher als die der Untrainierten. Durch die vorliegende Untersuchung konnte diese Charakteristik der Veränderungen des Fettstoffwechsels durch Ausdauertraining erstmals im Längsschnitt bestätigt werden. Möglicherweise besteht bei der Fettflussrate eine Art „Deckeleffekt“, der dazu führt, dass auf der ersten Belastungsstufe nur wenig Verbesserungspotenzial besteht, während sich die initial niedrigere Fettflussrate auf den höheren Belastungsstufen bis zu einer individuellen Obergrenze deutlicher verbessern kann.

Der Sauerstoffverbrauch der Probanden unterschied sich bei gegebener submaximaler Geschwindigkeit nicht zwischen Eingangs- und Abschlusstest. Es konnte also kein Effekt des einjährigen gesundheitssportlichen Ausdauertrainings auf die Laufökonomie nachgewiesen werden. Die von Jones und Carter (103) angestellte Vermutung, dass längere Trainingsstudien Verbesserungen aufdecken könnten, wird durch die vorliegenden Daten zumindest für gesundheitssportliches Ausdauertraining über ein Jahr nicht bestätigt. Allerdings fällt auf, dass die Laufökonomie nach drei Monaten Training besser war als zu Studienbeginn. Die statistische Signifikanz muss mit Vorsicht interpretiert werden, da trotz nicht normalverteilter Daten eine ANOVA durchgeführt wurde. Bei zusätzlicher Verletzung der Varianzhomogenität führt das zu progressiven Entscheidungen (26). Einer der wenigen Autoren, der Verbesserungen der Laufökonomie durch Ausdauertraining fand, beschreibt eine Reduzierung der Sauerstoffaufnahme bei  $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  um  $3 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  (103). Dagegen erscheint die in der vorliegenden Studie beobachtete Abnahme der Sauerstoffaufnahme auf den ersten vier Belastungsstufen vom Eingangstest zum Test nach drei Monaten um im Mittel  $0,75 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  gering. Insgesamt muss daher eher von einem Zufallseffekt ausgegangen werden.

Ergebnisse einer Trainingsstudie von Beneke und Hutler (18) legen nahe, dass sich die Laufökonomie besonders bei der Trainingsgeschwindigkeit und weniger bei anderen Geschwindigkeiten verbessern könnte. Dasselbe berichten Jones und Carter (103) in ihrem Übersichtsartikel über eigene unveröffentlichte Beobachtungen. Zwar lässt sich das bei den vorliegenden Daten insofern nicht detailliert nachvollziehen, als die Belastungsstufen interindividuell unterschiedlichen Laufgeschwindigkeiten entsprachen und die Trainingslaufgeschwindigkeiten eine Spanne von etwa 6 bis 10 km·h<sup>-1</sup> aufwiesen. Allerdings unterschieden sich die Verläufe der VO<sub>2</sub>-Leistungskurven zu den einzelnen Testzeitpunkten nicht, und auch die Standardabweichung wurde im Studienverlauf nicht größer. Das spricht gegen das Vorhandensein dieses Phänomens bei der vorliegenden Untersuchung.

### **5.1.3 Maximale fahrradergometrische Leistung, individuelle anaerobe Schwelle und sonstige nicht sportartspezifische leistungsphysiologische Trainingsadaptationen**

Bei Fahrradergometrien gelten bezüglich der maximalen Blutlaktatkonzentration und des maximalen Respiratorischen Quotienten gleiche Grenzwerte für die Annahme von Ausbelastung wie beim Laufbandtest. Auch ein Levelling-off der Sauerstoffaufnahme indiziert bei der Fahrradergometrie Ausbelastung, ist aber kein notwendiges Kriterium. Lediglich die Faustformel für die maximale Herzfrequenz ist aufgrund der eher lokal-metabolischen Beanspruchung bei der Fahrradergometrie anders. Sie lautet „HF<sub>max</sub> = 200 minus Lebensalter“, was bei der vorliegenden Studie einer mittleren HF<sub>max</sub> von 158 min<sup>-1</sup> entspricht (113). Vergleicht man die Ausbelastungsparameter beim fahrradergometrischen Eingangs- und Abschlusstest, so waren die Anzahl der Levelling-offs der VO<sub>2</sub> und die HF<sub>max</sub> nach Faustformel jeweils gleich. Die maximale Blutlaktatkonzentration war jedoch beim Eingangstest tendenziell höher und der RQ<sub>max</sub> signifikant niedriger als beim Abschlusstest. Da zwei Ausbelastungsparameter Gleichheit indizieren und die beiden metabolischen Parameter La<sub>max</sub> und RQ<sub>max</sub> widersprüchliche Informationen über die Veränderung der Ausbelastung liefern, ist nicht von einem unterschiedlich hohem Grad an Ausbelastung beim Eingangs- und Abschlusstest auszugehen.

Durch das einjährige gesundheitssportliche Lauf- bzw. Walkingtraining verbesserte sich die maximale fahrradergometrische Leistung der Studienteilnehmer um im Mittel 0,4 W·kg<sup>-1</sup>. Denis et al. (45) verzeichneten nach 40 Wochen dreimal wöchentlich einer Stunde Fahrradergometertraining bei 80 bis 85 % VO<sub>2max</sub> einen Anstieg um im Mittel 0,7 W·kg<sup>-1</sup>. In Anbetracht der geringeren Trainingsintensität von etwa 62 % VO<sub>2max</sub> und der (im Gegensatz zur Studie von Denis et al.) nicht trainingspezifischen Testung erscheint das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung plausibel.

Die individuelle anaerobe Schwelle verbesserte sich durch das einjährige Ausdauertraining im Mittel um 16 W. In einer fünf Monate langen Ausdauertrainingsstudie stellten Denis et al. (44) nach dreimal wöchentlich 60 min Fahrradergometertraining bei 80 bis 85 %  $HF_{max}$  wesentlich größere Verbesserungen der fixen 4 mmol-Schwelle um 59 W bei sechs im Mittel 37-jährigen Probanden und um 70 W bei sechs im Mittel 20-jährigen Probanden fest. Mayes et al. (133) fanden bereits nach 6 Wochen dreimal wöchentlich 30 min Fahrradergometertraining bei 80 %  $VO_{2max}$  Anstiege der 4 mmol-Schwelle um im Mittel 28 W. Im Vergleich zu in der Literatur beschriebenen Veränderungen der fixen 4 mmol-Schwelle sind die Verbesserungen der IAS bei den Probanden der vorliegenden Studie gering, was zum einen auf die etwas geringere Trainingsintensität und zum anderen auf die nicht sportartspezifische Testform zurückzuführen sein dürfte.

Erwartungsgemäß fielen die anderen nicht sportartspezifischen Verbesserungen bei den Fahrradergometrien etwas geringer aus als die sportartspezifischen Verbesserungen bei den Laufbandtests. Einer Verbesserung  $VO_{2max}$  beim Laufbandtests um durchschnittlich  $5,7 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  stand eine Verbesserung der  $VO_{2peak}$  bei der Fahrradergometrie um im Mittel  $3,7 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  gegenüber. Die Absenkung der Herzfrequenzleistungskurve betrug bei den Fahrradergometrien im Mittel 7 und bei den Laufbandtests  $11 \text{ min}^{-1}$ . Die Laktatleistungskurve sank im Mittel bei den Fahrradergometrien tendenziell um  $0,25 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ , während sie bei den Laufbandergometrien signifikant um durchschnittlich  $0,28 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  sank. Drückt man die Unterschiede zwischen den fahrradergometrischen und den laufbandergometrischen Verbesserungen prozentual aus, so ergeben sich Unterschiede der Verbesserungen zwischen sportartspezifischer und nicht sportartspezifischer Testung zwischen 11 und 36 %.

#### 5.1.4 Anthropometrische Daten, Blutdruck, Ruheumsatz und Laborwerte

Das Körpergewicht der Probanden veränderte sich im Verlauf des einjährigen gesundheitssportlichen Ausdauertrainings nicht. Bei insgesamt 3936 in eine Metaanalyse von Cornelissen und Fagard (40) eingeschlossenen Probanden waren nach unterschiedlich langen und intensiven Trainingsphasen im Mittel signifikante Reduktionen des Körpergewichts um 1,2 kg zu beobachten. Dies stimmt nominell gut mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung überein, bei der die Gewichtsabnahme 1,3 kg betrug, aber nicht signifikant war. In den USA nehmen 20- bis 40-Jährige im Schnitt pro Jahr 0,8 bis 0,9 kg zu (84). Studien zur Gewichtskontrolle durch Sport interpretieren ein stabiles Körpergewicht daher häufig positiv im Sinne einer verhinderten Gewichtszunahme, was auch für die vorliegende Untersuchung angenommen werden kann (204). Durch das Ausdauertraining sank der Körperfettanteil der Probanden im Mittel um 3,7 %, während die fettfreie Körpermasse um durchschnittlich 1,6 kg anstieg. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Cornelissen und Fagard (40), die eine mittlere

Abnahme des Körperfettanteils um 1,4 % errechneten, erscheint das recht hoch. In einem Übersichtsartikel identifiziert Stefanick (204) neben Art, Intensität, Häufigkeit und Dauer der Trainingseinheiten auch die Gesamtdauer des Ausdauertrainingsprogramms als Einflussfaktor auf Veränderungen der Körperzusammensetzung. Dafür spricht auch, dass sich Körperfettanteil und fettfreie Körpermasse in der zweiten Studienhälfte noch tendenziell bzw. signifikant veränderten. Die vorliegende Untersuchung war mit einem Jahr außergewöhnlich lang, was insofern den relativ großen Effekt auf die Körperzusammensetzung erklären könnte.

Das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining hatte keinen Einfluss auf den Ruheblutdruck. Zwei Metaanalysen zum Einfluss von Ausdauertraining auf den Ruheblutdruck mit 72 (40) und 47 (111) eingeschlossenen Studien fanden übereinstimmend eine trainingsbedingte Absenkung des Ruheblutdrucks. Sowohl Cornelissen und Fagard (40) als auch Kelley et al. (111) berichten, dass der Effekt von Ausdauertraining auf den Ruheblutdruck bei Hypertonikern größer ist als bei Normotensiven. Hypertonie war jedoch ein Ausschlusskriterium für die Teilnahme an der vorliegenden Untersuchung. Für Normotensive errechneten die beiden Metaanalysen signifikante Absenkungen des systolischen Blutdrucks um jeweils 2 mmHg und des diastolischen Ruheblutdrucks um 1 bzw. 2 mmHg (40, 111). Bei der vorliegenden Untersuchung sank der systolische Ruheblutdruck im Mittel um 5 mmHg. Angesichts der großen Stichproben der beiden Metaanalysen waren die geringen Effekte signifikant. Nominell erscheint das Ergebnis der vorliegenden Studie jedoch mit bisherigen Befunden vergleichbar.

Der Belastungsblutdruck nahm durch das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining systolisch tendenziell um im Mittel 7 mmHg und diastolisch signifikant um im Mittel 6 mmHg ab. Diese Veränderungen müssen jedoch mit Vorsicht interpretiert werden, weil der Blutdruck manuell mittels Auskultationsmethode gemessen wurde und sich die Messung nicht verblinden ließ. Die gemessenen Werte könnten somit durch die Erwartungshaltung der Untersucherin beeinflusst worden sein. Die HERITAGE-Studie fand bei gegebener submaximaler Belastung Blutdrucksenkungen um systolisch 8 und diastolisch 4 mmHg (223). Auch diese Größenordnung stimmt mit den in der vorliegenden Studie beobachteten Veränderungen gut überein. Bei der Interpretation von Veränderungen des Blutdrucks muss beachtet werden, dass selbst kleine Unterschiede einen Einfluss auf das Risiko einer koronaren Herzerkrankung haben (129). Die Absenkung des systolischen Belastungsblutdrucks mag insofern trotz des lediglich tendenziellen statistischen Effekts als gesundheitsprotektiv betrachtet werden können.

Bei den Probanden veränderte sich der Ruheumsatz durch das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining nicht. Nach zwölf Monaten Training war ein minimaler und nicht signi-

fikanter Anstieg des absoluten Ruheumsatzes erkennbar. Dieser lag jedoch erstens mit 2,7 % unterhalb des in der Literatur mit 3 bis 8 % angegebenen intraindividuellen Variationskoeffizienten von Ruheumsatzmessungen (50), zweitens fand er sich in den körperrgewichtbezogenen Daten nicht wieder und drittens ist er möglicherweise durch die um 1,3 °C niedrigere Umgebungstemperatur zu diesem Messzeitpunkt zu erklären. Speakman und Selman (200) fassen in einem Übersichtartikel zusammen, dass die Mehrheit der Studien zum Einfluss von Ausdauertraining auf den Ruheumsatz, die alle Ruheumsatzmessungen methodisch korrekt mit ausreichendem Abstand zur letzten Trainingseinheit durchführten, keinen Effekt fand. Diese Annahme wird durch die vorliegenden Daten bestätigt. Poehlman (171) vermutet in einem Übersichtsartikel, dass eine Mindestintensität des Ausdauertrainings zur Steigerung des Ruheumsatzes notwendig sei. Die liegt aber offensichtlich – sofern sie überhaupt vorhanden ist – oberhalb der bei der vorliegenden Studie vorgegebenen Trainingsintensität. Insgesamt erscheinen gesundheitssportliche Ausdauertrainingsintensitäten auch bei langfristigem Training für Probanden im Alter zwischen 30 und 50 Jahren nicht geeignet, um den Ruheumsatz zu verändern.

Bei den vorliegenden Daten fallen unterschiedliche Entwicklungen des Ruheumsatzes zwischen den sieben männlichen und den elf weiblichen Studienteilnehmern auf. Während der Ruheumsatz bei den Frauen unverändert blieb, stieg er bei den Männern tendenziell an. In der Literatur finden sich nur wenige Untersuchungen des Ruheumsatzes mit gemischtgeschlechtlichem Probandenkollektiv, weil der Ruheumsatz im Verlauf des Menstruationszyklus schwanken kann (50). Aus den Daten der HERITAGE-Studie, die insgesamt keine trainingsbedingte Veränderung des Ruheumsatzes fand, konnten keine Geschlechtsunterschiede hinsichtlich der Entwicklung des Ruheumsatzes abgeleitet werden (224). Poehlman (171) berichtet, dass bisherige Vergleiche trainierter und untrainierter Frauen keine Unterschiede des Ruheumsatzes ergaben, während bei gut trainierten Männern höhere Werte gemessen wurden als bei untrainierten. Allerdings handelt es sich dabei um Gegenüberstellungen verschiedener Studien, die unterschiedliche Fitness-Definitionen für ihre trainierten und untrainierten Stichproben verwendeten. Meijer et al. (140) stellten fest, dass durch ein 40-wöchiges Ausdauertraining zur Vorbereitung auf einen Halbmarathon der durchschnittliche Gesamttagesenergieverbrauch unter Einschluss aller körperlichen Aktivitäten bei den Männern anstieg, während er bei den Frauen unverändert blieb. Die Autoren vermuten als Ursache einen deutlicheren Anstieg der nicht-sportlichen Aktivität ihrer männlichen Studienteilnehmer. Der Ruheumsatz der Probanden ist nicht angegeben. Ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Ruheumsatz ist die aktive Muskelmasse (171). In der Literatur wird erwähnt, dass Männer durch Training mehr Muskelmasse aufbauen als Frauen (220). Das könnte möglicherweise dazu führen, dass sie ihren Ruheumsatz durch Ausdauertraining eher steigern. In der vorliegenden Studie wurde bei den Männern jedoch eine geringere Zunahme der fettfrei-

en Körpermasse gemessen als bei den Frauen ( $1,3 \pm 2,7$  vs.  $2,3 \pm 1,2$  kg). Allerdings muss angemerkt werden, dass die Messung der Hautfaldendicke, insbesondere bei weniger schlanken Individuen, nicht einfach in reliabler Weise durchführbar ist. Åstrand et al. (9) geben für sorgfältige Messungen der Hautfaldendicke Messfehler des prozentualen Körperfettanteils von 3 bis 4 % bzw. der fettfreien Körpermasse von 2,5 bis 3,5 kg an. Die hier gemessenen Unterschiede sind deshalb mit Vorsicht zu interpretieren. Insgesamt können die an den wenigen Probanden dieser Untersuchung beobachteten Geschlechtsunterschiede der Entwicklung des Ruheumsatzes weder durch die Literatur eindeutig bestätigt noch anhand weiterer vorliegender Daten erklärt werden. Studien mit präziser Ausrichtung auf genau diese Fragestellung sind notwendig, um Unterschiede des Einflusses von Sport auf den Ruheumsatz zwischen Männern und Frauen zu klären.

Das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining führte weder zu einer Veränderung des Gesamtcholesterinspiegels noch zu einer Veränderung der Unterfraktionen HDL- und LDL-Cholesterin. Da bisherige Studien zum Einfluss von Ausdauertraining auf das Blutlipidprofil widersprüchliche Ergebnisse hervorbrachten, definierten verschiedene Autoren einen Mindestenergieverbrauch durch Sport, der zur Verbesserung des HDL-Cholesterinspiegels notwendig sei (55, 121). Selbst die höchste dieser Grenzen von 1200 kcal pro Woche wurde von den Probanden der vorliegenden Untersuchung überschritten (55). Sie hatten einen Kalorienmehrverbrauch durch das Training von etwa 1320 kcal pro Woche. Die in der Literatur beschriebenen Mindestenergieumsätze zur Steigerung des HDL-Cholesterinspiegels können durch die vorliegenden Daten insofern nicht bestätigt werden. Über den Einfluss der Gesamtdauer des Trainingsprogramms auf Veränderungen des Cholesterinspiegels liegen bislang kaum Informationen vor. Leon und Sanchez (121) recherchierten insgesamt zwölf Studien mit normalgewichtigen, übergewichtigen oder adipösen Probanden, die Trainingsprogramme von mindestens einem Jahr Dauer untersuchten. Von diesen Studien fanden sieben keine trainingsbedingten Veränderungen des Cholesterinprofils. Ein Jahr Ausdauertraining scheint den Autoren zufolge also entweder nicht lang genug zu sein, um zuverlässig Veränderungen des Cholesterinspiegels hervorzurufen, oder die Länge des Ausdauertrainingsprogramms ist kein entscheidender Faktor. Das bestätigen auch die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung.

Im Allgemeinen werden bereits geringe Veränderungen des Cholesterinprofils mit gesundheitlichen Vorteilen in Zusammenhang gebracht. So wird durch eine Senkung des LDL-Cholesterinspiegels um 1 % eine Reduzierung des KHK-Risikos um 2 bis 3 % angenommen, ein Anstieg des HDL-Cholesterinspiegels um  $1 \text{ mg} \cdot \text{dl}^{-1}$  soll das KHK-Risiko bei Männern um 2 und bei Frauen um mindestens 3 % reduzieren (121). Bei den Probanden der vorliegenden Studie stieg entgegen den Erwartungen die LDL-Cholesterinkonzentration geringfügig an,

während die HDL-Cholesterinkonzentration minimal abnahm. So waren auch unabhängig von statistischer Signifikanz keine positiven Effekte des durchgeführten Ausdauertrainings auf das Cholesterinprofil zu beobachten. Damit reiht sich die vorliegende Untersuchung in die große Gruppe von Trainingsstudien ein, die keinen Effekt von Ausdauertraining auf das Cholesterinprofil fanden (55).

Die Veränderungen des Gesamtcholesterinspiegels durch das Ausdauertraining korrelierten tendenziell mit dem Ausgangsniveau und unterschieden sich tendenziell zwischen den Geschlechtern. Durstine et al. (55) berichten in ihrem Übersichtsartikel von widersprüchlichen Befunden über den Einfluss des Ausgangsniveaus auf Veränderungen des Cholesterinspiegels durch Ausdauersport. Eine dort zitierte Metaanalyse von Halbert et al. (72) fand keinen Einfluss des Ausgangsniveaus auf Veränderungen der Blutfettwerte durch Sport, weshalb Durstine et al. (55) zu der Annahme tendieren, dass das Ausgangsniveau keine Rolle spielt. Leon und Sanchez (121) folgern in ihrem Übersichtartikel hingegen einen deutlichen Einfluss des Ausgangsniveaus von HDL- und LDL-Cholesterin auf die Veränderungen der beiden Cholesterin-Unterfraktionen durch Ausdauersport. Da die vorliegenden Daten nur einen tendenziellen Zusammenhang ergaben und in der Literatur keine einheitliche Meinung besteht, kann der Einfluss des Ausgangsniveaus nicht vollständig geklärt werden. Noch unklarer scheint der Einfluss des Geschlechts auf Veränderungen des Cholesterinprofils zu sein: Hier fanden zwei Studien einen geringeren Einfluss von Ausdauertraining auf die Cholesterinkonzentration bei Frauen im Vergleich zu Männern, eine Studie stellte keinen Unterschied zwischen Frauen und Männern fest und eine berichtet von geringeren Trainingseffekten bei Männern (55). Einige ältere Übersichtsartikel fassen hinsichtlich eines Anstiegs der HDL-Cholesterinkonzentration durch Sport einen Trend zu geringeren Trainingseffekten bei Frauen zusammen, was von Leon und Sanchez (121) jedoch nicht bestätigt werden konnte. Tendenziell unterstützen die vorliegenden Ergebnisse die Annahme, dass Frauen geringere trainingsinduzierte Adaptationen des Cholesterinspiegels zeigen als Männer, allerdings basieren die Daten auf sehr geringen Stichprobengrößen und sind daher mit großer Vorsicht zu interpretieren. Um den Einfluss des Geschlechts auf Veränderungen des Cholesterinspiegels durch Sport zu klären, sind weitere Studien mit größeren Fallzahlen notwendig.

Auch die Plasmakonzentration des inflammatorischen Markers CRP veränderte sich durch das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining nicht. Das ist insofern wenig erstaunlich, als der Median beim Eingangstest mit  $\leq 0,9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  bereits an der Nachweisgrenze lag. Möglicherweise kann die Absenkung der oberen Quartilsgrenze im Trainingsverlauf als positiver Trainingseffekt gedeutet werden, der sich allerdings statistisch nicht auswirkte. Matusch et al. (132) stellten bei einer Trainingsstudie mit 14 Freizeitsportlern, die sich innerhalb von neun Monaten auf einen Marathon vorbereiteten, einen signifikanten Abfall des Medians

der CRP-Plasmakonzentration von 1,19 auf 0,82 mg·l<sup>-1</sup> fest. Die Praxisrelevanz eines so geringen Unterschieds bei unauffälligen Ausgangswerten ist jedoch fraglich. Insgesamt werfen sowohl die vorliegende Untersuchung als auch die Studie von Mattusch et al. (132) Zweifel am Nutzen der Bestimmung von CRP bei Trainingsstudien an Gesunden mit normalen Ausgangswerten auf. Ähnliches gilt für die Harnsäurekonzentration, die sich durch das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertrainingsprogramm nicht veränderte. Auch hier lag der Median zu Beginn der Studie bereits im Normbereich und schwankte im Studienverlauf nicht signifikant um 0,2 mg·dl<sup>-1</sup>. Zimmet et al. (228) fanden beim Vergleich von 291 aktiven und 2176 inaktiven Bewohnerinnen der Insel Mauritius signifikant unterschiedliche Harnsäurekonzentrationen von 5,0 und 5,2 mg·dl<sup>-1</sup>. Der Unterschied erscheint ebenfalls marginal. Die vorliegenden Ergebnisse legen keine Verbesserung der Harnsäurekonzentration bei Probanden mit Ausgangswerten im Normbereich nahe, was auch die Bestimmung der Harnsäurekonzentration bei einem solchen Probandenkollektiv verzichtbar erscheinen lässt.

### **5.1.5 Effekt des Ausdauertrainings auf die Langlebigkeit – Vergleiche mit der Literatur**

Theoretisch lässt sich durch Vergleiche mit der Literatur der Effekt des einjährigen gesundheitssportlichen Ausdauertrainings auf die Langlebigkeit abschätzen. Die „Cooper-Clinic-Studie“, eine epidemiologische Untersuchung aus den 1970er und 80er Jahren, zeigte, dass jede Steigerung der Durchhaltezeit beim Laufbandtest um 1 min mit einer Senkung des Mortalitätsrisikos um 7,9 % einher geht (21). Vergleicht man die im Mittel 1,9 min längere Durchhaltezeit beim Laufbandtest in der vorliegenden Untersuchung mit dem Ergebnis der Cooper-Clinic-Studie (21), so ergibt sich eine Reduktion des Sterberisikos um etwa 15 % im Vergleich zum Vortrainingszustand. Myers et al. (156) publizierten 2002 eine epidemiologische Studie, derzufolge jede Verbesserung der maximalen Laufbandleistung um 1 MET – also jeder VO<sub>2max</sub>-Anstieg von etwa 3,5 ml·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> – eine um 12 % reduzierte Sterbewahrscheinlichkeit mit sich bringt. Die Teilnehmer der vorliegenden Untersuchung verbesserten ihre VO<sub>2max</sub> um im Mittel 5,7 ml·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>, was verglichen mit der Studie von Myers et al. (156) eine Reduktion des Sterberisikos durch das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining um etwa 20 % bedeutet. Bei diesen Effekten auf die Langlebigkeit handelt es sich lediglich um Mittelwertvergleiche mit Angaben aus der Literatur und nicht um gemessene Daten, weshalb sie *cum grano salis* genommen werden müssen.

## **5.2 Variabilität der Trainingsadaptationen**

Bei fast allen Parametern, deren Mittelwerte sich im Verlauf der vorliegenden Studie signifikant veränderten, waren im Einzelfall auch Verschlechterungen oder keine Unterschiede

zum Eingangstest zu beobachten. Das war beim Körperfettanteil, der Ruheherzfrequenz, der Herzfrequenzleistungskurve bei den Laufbandtests und den Fahrradergometrien, der maximalen Laufgeschwindigkeit, der maximalen bzw. höchsten Sauerstoffaufnahme bei den Laufbandtests bzw. den Fahrradergometrien, der Laktatleistungskurve bei den Laufbandtests und Fahrradergometrien, der individuellen anaeroben Schwelle sowie dem prozentualen Fettstoffwechselanteil und der Fettflussrate der Fall. Lediglich die fettfreie Körpermasse, die maximale fahrradergometrische Leistung und die Herzfrequenzleistungskurve beim submaximalen Feldstufentest verbesserten sich bei allen Teilnehmern, allerdings waren die minimalen Veränderungen auch hier äußerst gering.

Die wenigen Autoren, die sich bisher mit der Variabilität von Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit durch Ausdauertraining auseinandersetzten, geben Spannen der  $VO_{2max}$ -Veränderung von 0 bis +42 % (118), 0 bis +41 % (176), -5 bis +56 % (197) und -5 bis +22 % (75) an. Die untersuchten Ausdauertrainingsprogramme waren alle kürzer als das der vorliegenden Studie. Hier wurde eine Spanne der  $VO_{2max}$ -Veränderung von -9 bis +30 % bei Angaben in  $l \cdot \text{min}^{-1}$  bzw. von -3 bis +37 % bei körperrgewichtbezogenen Daten gemessen, was gut mit den Ergebnissen der bisherigen Studien übereinstimmt. Bouchard und Rankinen (30) beobachteten an der wesentlich größeren Stichprobe der HERITAGE-Studie (400 bis 1000 Probanden) Spannen der Veränderung der  $VO_{2max}$  von -100 bis +1000  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ , der Belastungsherzfrequenz bei 50 W fahrradergometrischer Leistung von -45 bis +15  $\text{min}^{-1}$  und des systolischen Belastungsblutdrucks bei 50 Watt von -55 bis +20 mmHg. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden Spannen der  $VO_{2max}$ -Veränderung von -380 bis +870  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ , der Verschiebung der HF-Leistungskurve von -22 bis +3  $\text{min}^{-1}$  und der Veränderung des systolischen Belastungsblutdrucks auf den ersten drei Belastungsstufen bei der Fahrradergometrie von -37 bis +17 mmHg gemessen. Auch diese Ergebnisse entsprechen den in der Literatur beschriebenen Veränderungen.

Von den a priori festgelegten potenziellen Einflussfaktoren Alter, Geschlecht, Ausgangsniveau und Compliance wiesen die Veränderungen der Herzfrequenzleistungskurve und der Leistungskurve des RQ Zusammenhänge mit dem Ausgangsniveau auf. Ferner war die Veränderung des Ruheumsatzes bei den männlichen und weiblichen Studienteilnehmern unterschiedlich. Das Modell der vier potenziellen Einflussfaktoren hatte jedoch nur für die Veränderung der Leistungskurve des RQ durch das Ausdauertraining einen signifikanten Vorhersagewert, wobei das Ausgangsniveau der stärkste und einzig signifikante Prädiktor war. Für die Veränderungen des Ruheumsatzes durch das Ausdauertraining ergab sich ein tendenzieller Vorhersagewert des Modells. Der stärkste und einzig signifikante Prädiktor war dabei das Geschlecht. Insofern scheint zumindest ein Teil der Variabilität der trainingsbedingten Veränderungen des Fettstoffwechsels und des Ruheumsatzes mit dem etwas unterschiedli-

chen Ausgangsniveau der Studienteilnehmer bzw. der gemischtgeschlechtlichen Stichprobe in Zusammenhang zu stehen.

Die Studienteilnehmer trainierten nach der höheren der beiden Intensitätsvorgaben „60 % Herzfrequenzreserve“ oder „Basis-Laktat + 1 mmol“ (2, 71). Bei Trainingsvorgaben lässt sich generell nicht vermeiden, dass andere Beschreibungen derselben Intensitätsvorgabe interindividuell unterschiedlich ausfallen. So entsprach der Trainingsreiz beispielsweise zwischen 73 und 85 %  $HF_{\max}$ , zwischen 49 und 78 %  $VO_{2\max}$  und zwischen 45 und 75 %  $VO_2$ -Reserve. Verschiedenen Autoren zufolge sind bei Dauerläufen mit moderater Intensität primär periphere Trainingsadaptation zu erwarten, weil das Herzzeitvolumen im Training weit unterhalb seines Maximums liegt und insofern in erster Linie die Sauerstoff utilisierenden Systeme gefordert sind (41, 80). Intensives Training bzw. Intervalltraining führt nach diesem Modell zusätzlich vermehrt zu zentralen Adaptationen – genauer gesagt zu einer größeren Steigerung des Schlagvolumens – und damit zu größeren Verbesserungen der  $VO_{2\max}$  als weniger intensives Training. Auch wenn zentrale und periphere Anpassungen vermutlich kaum so streng voneinander getrennt werden können wie Helgerud et al. (80) und Daussin et al. (41) schreiben, führen verschiedene Trainingsintensitäten zu etwas unterschiedlichen Ausdauertrainingsadaptation. In der interindividuellen Variabilität des Trainingsreizes könnte daher eine weitere Ursache für die große Streuung der Leistungsverbesserungen liegen.

Bei wie vielen Probanden sich durch Ausdauertraining bestimmte Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit nicht verbessern, wurde bislang in der Literatur erst einmal genau dokumentiert. Hautala et al. (75) beobachteten bei etwa 40 % ihrer Studienteilnehmer Verbesserungen der  $VO_{2\max}$  unter 5 %, während sich bei der vorliegenden Untersuchung 24 % der Probanden um weniger als 5,6 % verbesserten. Allerdings dauerte die Trainingsphase in der Studie von Hautala et al. (75) nur zwei Wochen und der mittlere  $VO_{2\max}$ -Anstieg lag entsprechend nur bei  $8 \pm 6$  %, was den weitaus größeren Teil der Probanden, die sich um weniger als 5 % verbesserten, erklärt. Insofern beschreibt die vorliegende Studie erstmals nach einer ausreichend langen Ausdauertrainingsphase, bei wie vielen Probanden die einzelnen Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit stabil bleiben. Jeweils einer bis sechs von den 15 bis 18 ausgewerteten Studienteilnehmern zeigten bei den fünf untersuchten Hauptzielparametern keine Verbesserungen. Das entspricht je nach Parameter zwischen 7 und 35 % der Probanden. In Anbetracht der geringen Stichprobengröße sind diese Prozentwerte allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, da ein Proband mehr oder weniger ohne Trainingsadaptation den errechneten Prozentwert stark beeinflusst. Bei zukünftigen Ausdauertrainingsstudien sollte einkalkuliert werden, dass alle Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit bei einem Teil der Individuen stabil zu bleiben scheinen. Das ist insbesondere für die Abschätzung der

notwendigen Stichprobengröße von Bedeutung. Wie groß dieser Anteil an Individuen genau ist, muss durch weitere Ausdauertrainingsstudien mit größeren Stichproben ermittelt werden.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich erstmals systematisch mit dem Phänomen der Nonresponder, die als Individuen ohne jegliche Adaptationen an Ausdauertraining definiert wurden. Der Begriff „nonresponders“ hat sich in der Literatur bereits ohne allgemeingültige Definition etabliert, und Nonresponder wurden bislang nur anhand des Veraltens ihrer  $VO_{2max}$  identifiziert (197, 220). Ob sich bei ihnen mehrere oder alle Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit nicht verändern, wurde noch nicht untersucht. Als individuelle Verbesserungen wurden bei der vorliegenden Untersuchung Veränderungen um mehr als den intraindividuellen Variationskoeffizienten des jeweiligen Parameters definiert. Der doppelte Variationskoeffizient hätte vermutlich zu viele Nonresponder hervorgebracht, wohingegen ein halber Variationskoeffizient nicht streng genug erschien. Ein Überblick über die Parameter ohne erkennbare Trainingsadaptation bei den einzelnen Teilnehmern der vorliegenden Studie zeigte, dass pro Individuum höchstens drei der fünf untersuchten Parameter unverändert blieben. Insofern gab es unter den Studienteilnehmern keine „kompletten“ Nonresponder. Bei 13 der 18 Probanden bzw. bei etwa 70 % der Studienteilnehmer verbesserte sich mindestens ein Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit nicht, weshalb die Identifikation von Nonrespondern anhand eines einzelnen Parameters – wie sie bisher üblich ist – nicht sinnvoll erscheint. Durch das Erfassen eines maximalen Parameters ( $VO_{2max}$ ), eines submaximalen kardiozirkulatorischen Parameters ( $HF_{Ruhe}$  oder HF-Leistungskurve) und eines submaximalen metabolischen Parameters (IAS oder Leistungskurve des RQ) wären bei jedem Probanden Trainingsadaptationen erkennbar gewesen. Zur Dokumentation und Charakterisierung individueller Leistungsverbesserungen sollten daher Parameter unterschiedlicher Anpassungs- und Messebenen erfasst werden. Insgesamt wirft die vorliegende Untersuchung Zweifel auf an der Existenz von Nonrespondern, die als Individuen ohne jegliche Ausdauertrainingsadaptation definiert sind. Weitere Ausdauertrainingsstudien mit großen Fallzahlen sind notwendig, um diese Frage endgültig zu beantworten.

Wie die beobachteten großen Spannen der Trainingsadaptationen könnten auch fehlende trainingsbedingte Veränderungen einzelner Parameter mit der Intensität des Trainingsreizes zusammenhängen. Bei der Aufteilung der Probanden in Quartile der Trainingsintensität fiel auf, dass Teilnehmer ohne messbare Veränderungen des Fettstoffwechsels gehäuft im oberen Quartil des Intensitätsspektrums angesiedelt waren – also verhältnismäßig intensiv trainierten. Das passt gut zu den Ergebnissen einer aktuellen Trainingsstudie von Venables und Jeukendrup (212). Sie stellten bei adipösen Probanden nach intensivem Intervalltraining keine Veränderung des Fettstoffwechsels fest, wohingegen Training mit der Intensität, die der höchsten Fettflussrate entsprach ( $Fat_{max}$ ; in diesem Fall im Mittel 44 %  $VO_{2max}$ ), zu einer Zu-

nahme der Fettoxidationsrate während Belastung führte. Es erscheint daher ferner interessant zu klären, ob durch maßgeschneiderte Trainingsprogramme im Einzelfall auch Effekte bei den ansonsten stabilen Parametern hervorgerufen werden können. So könnte man Probanden ohne Veränderungen des Fettstoffwechsels beispielsweise  $Fat_{\max}$  als Trainingsintensität vorgeben, oder Studienteilnehmern ohne Veränderungen der  $VO_{2\max}$  ein Intervalltrainingsprogramm verordnen, dem größere Effekte auf Verbesserungen der  $VO_{2\max}$  zugesprochen werden als der Dauertrainingsmethode (41, 80).

### 5.3 Zeitverläufe der Trainingsadaptationen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden erstmals die Zeitverläufe von Veränderungen verschiedener Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings erfasst. Um die Zeitverläufe der Parameter, die sich durch das Training signifikant veränderten, interpretieren zu können, müssen zunächst potenzielle Einflussfaktoren beleuchtet werden.

Eine gleichmäßige Compliance in den einzelnen Zeitabschnitten zwischen den fünf Laufbandtests stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Interpretation der Zeitverläufe der Anpassungserscheinungen dar. In der Literatur wird berichtet, dass Gesundheits- und Freizeitsportler in den Wintermonaten wegen nasskaltem Wetter und früh einsetzender Dunkelheit weniger aktiv sind als in den Sommermonaten (179). Die Compliance der Probanden war jedoch in den vier Zeitabschnitten zwischen den Laufbandtests jeweils gleich. Da sportliche Aktivitäten außerhalb des vorgeschriebenen Ausdauertrainings streng ausgeschlossen wurden, können saisonale Schwankungen des einwirkenden Trainingsreizes insgesamt weitgehend ausgeschlossen werden.

Einen weiteren möglichen Einflussfaktor auf die Adaptationen von vermutlich insbesondere der Herzfrequenz und der Maximalleistung stellen die Umgebungsbedingungen dar. Bei den fünf Laufbandtests wurden signifikante Unterschiede der Temperatur im Untersuchungsraum festgestellt. Der Mittelwert der Umgebungstemperatur schwankte zwischen 22,8 und 27,6 °C, was einer maximalen Differenz zwischen den Tests von fast 5 °C entspricht. Die meisten Studien zum Einfluss von Hitze auf die Leistungsfähigkeit untersuchten größere Temperaturunterschiede und führten Dauerbelastungen durch. Bei Temperaturen von 20 und 31 °C ließen Rowland et al. (184) jugendliche und erwachsene Probanden Dauertests mit 65 %  $VO_{2\max}$  bis zur Erschöpfung absolvieren. Die Durchhaltezeit war bei den Erwachsenen durch die heiße Umgebung um 29 % reduziert und die Herzfrequenz war signifikant erhöht. Allerdings sind Ergebnisse langer Belastungen nicht ohne Weiteres mit den sehr viel kürzeren Testprotokollen der vorliegenden Untersuchung vergleichbar. Galloway und Maughan (63)

stellten bei 31 im Vergleich zu 21 °C Umgebungstemperatur ebenfalls eine reduzierte Zeit bis zur Erschöpfung bei Dauertests mit 70 %  $\text{VO}_{2\text{max}}$  fest, innerhalb der ersten 30 min unterschieden aber sich weder das Atemminutenvolumen noch der RQ, die Fettstoffwechsel- oder die Kohlenhydratstoffwechselrate zwischen den Umgebungsbedingungen. Nielsen et al. (159) konnten zudem bezüglich der Herzfrequenz, der Körperkerntemperatur und der Durchhaltezeit im Dauertest eine gute Akklimatisierung durch wenige Tage Training in heißer Umgebung feststellen, was bei den Probanden der vorliegenden Studie gegeben war. Insgesamt ist daher von keinem relevanten Einfluss der schwankenden Raumtemperatur auf die Zielvariablen auszugehen.

Auch die Außentemperatur schwankte im Jahresverlauf beträchtlich. Der Einfluss der Umgebungstemperatur beim Ausdauertraining auf das Ausmaß der Trainingseffekte ist bislang kaum untersucht, was dafür spricht, dass diesem Faktor allgemein keine große Bedeutung beigemessen wird. Eine Studie mit Schwimmern, die den Effekt von kaltem und warmem Wasser auf das Ausmaß der Trainingsadaptation untersuchte, konnte keinen Temperatureinfluss feststellen (227). Vermutlich hatten also auch die Trainingsbedingungen keinen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse der vorliegenden Studie.

Schwieriger einzuschätzen sind mögliche Einflüsse der schwankenden Ferritin- und Hämoglobinspiegel im Trainingsverlauf. Die Plasmakonzentration des Eisenspeichers Ferritin nahm im Trainingsverlauf sowohl bei der Gesamtstichprobe als auch bei den Studienteilnehmern ohne Eisenmangel ab, was auf einen erhöhten Eisenverbrauch durch das Ausdauertraining hinweist. Durch die Schwankungen der Hämoglobinkonzentration könnte die Sauerstofftransportkapazität als eine wesentliche Determinante der Ausdauerleistungsfähigkeit im dritten und sechsten Monat im Vergleich zum neunten und zwölften Monat reduziert gewesen sein. Allerdings handelt es sich bei den Messwerten um Konzentrationen und nicht um Absolutmengen, die durch Veränderungen des Plasmavolumens im Sinne eines Verdünnungseffekts verfälscht sein könnten. Veränderungen des Hämatokrits, der das Verhältnis von festen Bestandteilen am Blutvolumen ausdrückt, waren zwar nicht signifikant, ähnelten im Verlauf aber denen der Hämoglobinkonzentration. Insofern könnten die Veränderungen der Gesamthämoglobinmenge geringer ausgefallen sein, als es die Hämoglobinkonzentration suggeriert. Letztlich können die vorliegenden Befunde jedoch ohne Kenntnis der absoluten Hämoglobinmenge als primär wichtigem Faktor nicht beurteilt werden.

Ein Vergleich der Ausbelastungsparameter bei den einzelnen Laufbandtests ist notwendig, um den Zeitverlauf der maximalen Sauerstoffaufnahme und der maximalen Laufgeschwindigkeit interpretieren zu können. Während die Anzahl der Levelling-offs der Sauerstoffaufnahme und die maximale Blutlaktatkonzentration bei den fünf Tests jeweils gleich waren, lag

die maximale Herzfrequenz beim Eingangstest signifikant höher als beim ersten Zwischentest und tendenziell höher als beim zweiten Zwischentest. Der maximale Respiratorische Quotient war beim Eingangstest sogar signifikant höher als zu allen anderen Messzeitpunkten. Da zwei der vier untersuchten Ausbelastungsparameter auf eine höhere Ausbelastung beim Eingangstest als beim folgenden bzw. bei allen folgenden Tests hinwiesen, muss von einem Unterschätzen der Verbesserung der Maximalparameter vom Eingangstest zum ersten Zwischentest ausgegangen werden.

Die  $VO_{2max}$  stieg in den ersten drei Monaten des einjährigen gesundheitssportlichen Ausdauertrainings signifikant an und erreichte beim ersten Zwischentest 58 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtveränderung. Im weiteren Trainingsverlauf war der Anstieg nicht mehr signifikant, aber die  $VO_{2max}$  zeigte mit 75 und 84 % ihrer beobachteten Gesamtveränderung nach sechs und neun Monaten im Verlauf des einjährigen Trainings kein „Plateau“. In Anbetracht der besseren Ausbelastung beim Eingangstest könnte der größte Anstieg in den ersten drei Trainingsmonaten noch unterschätzt worden sein. Bislang wurden nur im Rahmen der Ausdauertrainingsstudie von Denis et al. (45) Zwischenbilanzen in vergleichbaren zeitlichen Abständen von zehn Wochen bei einer vergleichbaren Gesamtstudiendauer von 40 Wochen erhoben. Zwar verbesserte sich die  $VO_{2max}$  der Studienteilnehmer durch das Ausdauertraining insgesamt nicht signifikant, 87 % des  $VO_{2max}$ -Anstiegs von insgesamt  $3,1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  waren aber bereits nach zehn der 40 Trainingswochen erreicht. Denis et al. (45) geben weder Ausbelastungskriterien noch Informationen über den Zeitverlauf der Compliance ihrer Studienteilnehmer an, weshalb der berichtete Zeitverlauf mit Vorsicht beurteilt werden muss. In einem Übersichtsartikel beschreiben Jones und Carter (103) eine Stabilisierung der  $VO_{2max}$  im Verlauf eines längerfristigen leistungssportlichen Trainings, was durch die vorliegenden Daten für Gesundheitssportler innerhalb des ersten Jahres nach Trainingsbeginn nicht bestätigt wird. Wenger und Bell (216) vermuten durch einen Vergleich unterschiedlich langer Trainingsstudien ohne Zwischenbilanzen, dass die  $VO_{2max}$  bis zur zehnten oder elften Trainingswoche steil und anschließend flacher ansteigt. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie unterstützen diese Vermutung erstmals durch im Längsschnitt erhobene Daten.

Mit dem Zeitverlauf von Veränderungen der Ruheherzfrequenz und der Herzfrequenzleistungskurve haben sich bislang keine längeren Ausdauertrainingsstudien beschäftigt. Die  $HF_{Ruhe}$  fiel mit 47 und 102 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtveränderung beim ersten und zweiten Zwischentest in den ersten sechs Trainingsmonaten annähernd linear ab. Im weiteren Trainingsverlauf zeigte sie keinerlei weitere Absenkung. Ähnlich verhielt sich die Herzfrequenzleistungskurve beim Laufbandtest im Zeitverlauf. Sie hatte nach drei Monaten Ausdauertraining 93 und nach sechs Monaten 101 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtverschiebung erreicht und veränderte sich im weiteren Trainingsverlauf nicht mehr. Bei den Laufbandtests sank die HF-

Leistungskurve ab dem Test nach drei Monaten Training nicht mehr signifikant. Die submaximalen Feldstufentests erlauben eine noch genauere Bestimmung des Zeitpunkts, ab dem sich die HF-Leistungskurve nicht mehr signifikant verschob. Betrachtet man die submaximalen Feldstufentests im vierwöchentlichen Testrhythmus im Verlauf des gesamten einjährigen Ausdauertrainings, so waren die Verschiebungen der HF-Leistungskurve ab der neunten Trainingswoche nicht mehr signifikant. Die 14-täglichen Tests, die innerhalb der ersten drei Trainingsmonate durchgeführt wurden, ergaben ab der siebten Trainingswoche keine signifikanten Veränderungen der HF-Leistungskurve mehr. Die vorliegende Untersuchung hat damit erstmals gezeigt, dass trainingsbedingte Veränderungen von  $HF_{\text{Ruhe}}$  und HF-Leistungskurve bereits etwa zwei Monate nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings nicht mehr signifikant sind. Aus diesem Grund erscheinen sowohl die  $HF_{\text{Ruhe}}$  als auch die HF-Leistungskurve nur bei Trainingsstudien von wenigen Wochen Dauer zur Abbildung der Ausdauertrainingseffekte geeignet.

Die Blutlaktatkonzentrationen der Studienteilnehmer waren bei den Tests nach sechs und neun Monaten Training unplausibel hoch. Dieses Verhalten war bei keinem anderen Parameter – und insbesondere auch nicht beim RQ, der ähnlich wie die Blutlaktatkonzentration Hinweise auf die metabolische Situation der Arbeitsmuskulatur liefert – zu erkennen. Auch die Testbedingungen waren hinsichtlich der Ernährung und der sportlichen Betätigung weitgehend standardisiert. Daher muss eine Schwankung der Analytik im Labor in Betracht gezogen werden. Das zur Laktatbestimmung verwendete Gerät Super GL (Rolf Greiner Biochemica, Flacht) wird mittels Zwei-Punkt-Kalibration kalibriert. Durch Bestimmung eines Messwerts im unteren und eines Messwerts im oberen Spektrum der möglichen Blutlaktatkonzentrationen werden bei der Zwei-Punkt-Kalibration ein Korrekturwert für die Höhe des niedrigsten Messwerts und ein Korrekturwert für die Steigung der Geraden, auf der alle höheren Laktatwerte liegen, ermittelt. Ein Kalibrationsfehler kann daher neben falschen Ausgangswerten auch einen falschen Anstieg der Laktatleistungskurve ergeben, so dass eine Korrekturrechnung der Blutlaktatkonzentrationen bei den Tests nach sechs und neun Monaten Training nicht möglich war. Der Zeitverlauf der Verschiebungen der Laktatleistungskurve konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung daher nicht lückenlos dargestellt werden. Er wurde deshalb auch nicht in die Übersicht der Zeitverläufe der Trainingsadaptation aufgenommen.

Da die Verschiebung der Laktatleistungskurve vom Test nach drei Monaten Training zum Abschlusstest nicht signifikant war, scheinen die wesentlichen Verschiebungen der Laktatleistungskurve durch die drei ausgewerteten Messzeitpunkte wiedergegeben worden zu sein. Die Laktatleistungskurve verschob sich in den ersten drei Trainingsmonaten signifikant nach unten und nahm im weiteren Trainingsverlauf nicht weiter ab. Der beobachtete Verlauf

stimmt gut mit den Beschreibungen von Londeree (124) überein, der in einem Übersichtsartikel das Verhalten verschiedener Schwellen im Trainingsverlauf so beschreibt, dass die deutlichsten Veränderungen innerhalb der ersten acht bis zwölf Trainingswochen auftreten und sich die Verschiebungen anschließend asymptotisch ihrem Maximum annähern.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde erstmals der Zeitverlauf von Verbesserungen des Fettstoffwechsels innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheits-sportlichen Ausdauertrainings beschrieben. Die aus den ersten vier Belastungsstufen des Laufbandtests gebildete Leistungskurve des Respiratorischen Quotienten (als Berechnungsgrundlage für den prozentualen Fettstoffwechselanteil) sank in den ersten drei Trainingsmonaten signifikant und erreichte beim ersten Zwischentest 80 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtveränderung. Vom dritten zum sechsten Trainingsmonat stieg die RQ-Leistungskurve zunächst noch einmal an. Dann fiel sie aber vom sechsten zum neunten Trainingsmonat wieder ab und erreichte beim Test nach neun Monaten ihren niedrigsten innerhalb des einjährigen Ausdauertrainings beobachteten Wert, der mit dem höchsten Fettstoffwechselanteil an der Energiebereitstellung einher geht. Die Verschiebungen der Leistungskurve des RQ waren nach dem dritten Trainingsmonat nicht mehr signifikant. Etwas anders verhielt sich die Leistungskurve der Fettflussrate auf den ersten vier Belastungsstufen des Laufbandtests. Zwar zeigte auch sie mit 60 % ihres Ein-Jahres-Gesamtanstiegs die größte Veränderung in den ersten drei Trainingsmonaten, die Veränderungen waren aber erst ab dem neunten Trainingsmonat nicht mehr signifikant. Die Leistungskurve der Fettflussrate zeigte damit von allen untersuchten Parametern am spätesten im Verlauf des einjährigen Ausdauertrainings keine signifikanten Veränderungen mehr.

Sowohl die Leistungskurve des RQ als auch die Leistungskurve der Fettflussrate wiesen Unregelmäßigkeiten im Zeitverlauf ihrer Veränderungen auf. Für beide Leistungskurven wurden zwischenzeitlich „Verschlechterungen“ verzeichnet. Erfahrungen mit bisherigen Fettstoffwechsel-Studien haben gezeigt, dass der RQ im Vergleich zu anderen Parametern außergewöhnlich sensibel auf Ernährungseinflüsse und möglicherweise auch auf Faktoren wie Tageszeit oder Umgebungsbedingungen reagiert (147, 149). Bei der vorliegenden Untersuchung blieb zwar die Uhrzeit der Tests konstant, und die Probanden aßen am Vortag und Testtag annähernd dasselbe, Uhrzeit und Menge der aufgenommenen Nahrung konnten jedoch nicht vollkommen standardisiert werden und auch die Umgebungsbedingungen variierten. Die Unregelmäßigkeiten der Veränderungen des Fettstoffwechsels im Zeitverlauf könnten insofern darauf zurückgehen, dass der RQ trotz an sich gut standardisierter Testbedingungen auf minimale Unterschiede empfindlich reagierte. Aufgrund des ungleichmäßigen Zeitverlaufs muss auch das Stagnieren der Fortschritte vom vorletzten Test zum Abschluss-test vorsichtig interpretiert werden. Möglicherweise erreichten die Leistungskurven von RQ

und Fettflussrate innerhalb des einjährigen Ausdauertrainings kein wirkliches Plateau, was im Rahmen weiterer Ausdauertrainingsstudien mit speziell auf Beobachtungen des Fettstoffwechsels ausgerichtetem Studiendesign geklärt werden muss.

Insgesamt fällt auf, dass die  $VO_{2max}$ , die Ruheherzfrequenz, die Herzfrequenzleistungskurve und die Leistungskurve des Respiratorischen Quotienten nach sechs Monaten Ausdauertraining bereits mindestens 75 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht hatten. Bei der  $HF_{Ruhe}$  und der HF-Leistungskurve war zu diesem Zeitpunkt sogar das volle Ausmaß der beobachteten Gesamtveränderung vollzogen. Daraus ergibt sich für die Betreuung von Gesundheitssportlern, dass sie ihren Trainingsreiz etwa sechs Monate nach Beginn des Trainings erhöhen sollten, um weiterhin deutliche Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit zu erzielen. Ob eine Steigerung des Trainingsumfangs oder der Trainingsintensität effektiver ist, kann aus den Daten der vorliegenden Untersuchung nicht abgeleitet werden. Ist allein die gesundheitsförderliche Wirkung Ziel des Ausdauertrainings, so sind der Literatur zufolge auch bei fehlenden Leistungsverbesserungen positive Effekte zu erwarten (2, 73). Allerdings besteht zwischen körperlicher Aktivität und gesundheitlichem Nutzen bis zu einem gewissen Maß ein positiver Dosis-Wirkungs-Zusammenhang, so dass eine Steigerung des Trainingsreizes nach sechs Monaten wohl auch größere gesundheitsprotektive Effekte mit sich bringt (2, 73). Schließlich ist das Mortalitätsrisiko verschiedenen Studien zufolge umso niedriger, je höher die Ausdauerleistungsfähigkeit ist, was ebenfalls für eine weitere Steigerung des Trainingsreizes spricht (156, 186).

Aus den Zeitverlaufs-Daten geht ferner hervor, dass bei langen Trainingsstudien von der Verwendung der Herzfrequenzleistungskurve zur Dokumentation von Trainingseffekten abzuraten ist. Ihre Veränderungen waren nämlich bereits nach etwa zwei Monaten Training nicht mehr signifikant und hatten nach drei Monaten 93 % der Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht. Weil die Verbesserung der  $VO_{2max}$  im Verlauf des einjährigen Ausdauertrainings kein Plateau erreichte, scheint sie zur Beschreibung langfristiger Trainingseffekte besser geeignet. Alle untersuchten Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit veränderten sich schon in den ersten drei Trainingsmonaten signifikant, so dass Trainingsstudien von drei Monaten Dauer ausreichend lang erscheinen, um die grundsätzliche Effektivität eines Trainingsprogramms zu überprüfen. Soll hingegen das volle Ausmaß der Trainingsadaptationen untersucht werden, sind zur Beobachtung der  $VO_{2max}$  oder der Fettstoffwechselrate während Belastung Studien von möglicherweise weit mehr als einem Jahr Dauer notwendig.

## 5.4 Methodenkritik

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden das Ausmaß, die Variabilität und der Zeitverlauf von Trainingsadaptationen an nur ein bestimmtes Ausdauertrainingsprogramm untersucht. Nach Pollock (173) wird das Ausmaß des Trainingseffekts in erster Linie durch das Produkt aus Dauer und Intensität – also durch die insgesamt geleistete Arbeit – bestimmt. Trainingsvorgaben, die sich von denen der vorliegenden Untersuchung unterscheiden, führen daher wahrscheinlich zu Gesamttrainingseffekten anderen Ausmaßes. Möglicherweise beeinflusst der Trainingsreiz auch die Variabilität der Trainingseffekte. Zum Beispiel könnten die einzelnen Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit bei einem geringeren Anteil der Probanden konstant bleiben, wenn der Trainingsreiz höher ist. Darüber liegen bislang allerdings keine Informationen vor. Auch ein Einfluss des Trainingsreizes auf den Zeitverlauf der Adaptationen ist denkbar. Bei einem höheren Trainingsreiz könnten die Adaptationen später stagnieren, allerdings ist auch das bislang nicht untersucht. Die Gültigkeit der vorliegenden Ergebnisse muss daher auf die gewählte Trainingsvorgabe von dreimal wöchentlich 45 min Walking oder Laufen mit etwa 60 % Herzfrequenzreserve nach gleich bleibender Trainingsherzfrequenz beschränkt werden. Ferner können die Ergebnisse nicht auf bereits trainierte Gesundheitssportler übertragen werden, weil bei verschiedenen Variablen Einflüsse des Ausgangsniveaus auf das Ausmaß der Trainingsadaptationen bekannt sind (2). Das Spektrum der für Gesundheitssport-Einsteiger in Frage kommenden Trainingsvorgaben ist allerdings nicht sehr groß, und die Stichprobe war für diese Personengruppe repräsentativ, so dass zumindest von für Gesundheitssportler allgemeingültigen Studienergebnissen ausgegangen werden kann.

Die vorliegende Untersuchung wurde ohne Kontrollgruppe durchgeführt, weil ein Trainingsverbot bei bekanntermaßen positiven Auswirkungen von Ausdauertraining auf die Gesundheit ethisch nicht vertretbar erschien. Die meisten anderen Trainingsstudien von vergleichbarer Dauer verzichteten ebenfalls auf Kontrollgruppen (13, 45, 94). Duncan et al. (52) untersuchten in ihrer Studie neben vier Versuchsgruppen eine so genannte aktive Vergleichsgruppe, die auch Ausdauertraining betreiben durfte. Im Unterschied zu den Teilnehmern der Versuchsgruppen nahmen die Teilnehmer der Vergleichsgruppe nicht an pädagogisch konzipierten Beratungstreffen zur Verbesserung der Compliance teil. Für die vorliegende Untersuchung hätte sich durch eine aktive Vergleichsgruppe kein Vorteil ergeben. Nur Weltman et al. (215) schlossen eine Kontrollgruppe ohne körperliche Aktivität in eine einjährige Ausdauertrainingsstudie ein. Sie fanden keine Kontrollgruppeneffekte hinsichtlich der Veränderungen von  $VO_{2max}$  und maximaler Geschwindigkeit beim Laufbandtest (Veränderung  $VO_{2max}$ :  $-0,3 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Veränderung  $V_{max}$ :  $-0,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Kürzere Trainingsstudien stellten bei ihren Kontrollgruppen teils signifikante, überwiegend aber nur geringfügige und nicht signifikante

Anstiege der  $VO_{2max}$  zwischen 0 und  $0,8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  bzw. 0 und  $0,2 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  fest (66, 69, 81, 133, 145, 170, 187). Sofern angegeben, sank die Ruheherzfrequenz der Kontrollgruppen nicht und die submaximale Belastungsherzfrequenz nahm um 0 bis  $4 \text{ min}^{-1}$  ab. Aus dem Rahmen fallen dabei die Ergebnisse von Ready und Quinney (178), die eine Verbesserung der  $VO_{2max}$  ihrer Kontrollgruppe um im Mittel  $8,4 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  fanden. Allerdings geben die Autoren keine Ausbelastungskriterien an und alle untersuchten submaximalen Parameter blieben bei der Kontrollgruppe unverändert, so dass von einer Überschätzung des Kontrollgruppeneffekts der  $VO_{2max}$  ausgegangen werden kann. Da Kontrollgruppeneffekte auf eine Gewöhnung der Probanden an die Testprozedur und an körperliche Anstrengung zurückzuführen sind, wurde im Rahmen der vorliegenden Studie ein Gewöhnungstest durchgeführt. Angesichts der geringen in der Literatur gefundenen Kontrollgruppeneffekte und des durchgeführten Gewöhnungstests ist durch das Fehlen einer Kontrollgruppe bei der vorliegenden Studie von keinem wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse auszugehen.

Am Design der vorliegenden Studie muss ferner kritisiert werden, dass alle Probanden gleichzeitig mit dem Trainingsprogramm begannen, und jahreszeitliche Schwankungen mancher Zielparame-ter so deren Zeitverläufe beeinflusst haben könnten. Einflüsse der Jahreszeit auf das Ausmaß und die Variabilität der Gesamttrainingseffekte sind hingegen ausgeschlossen, weil Eingangs- und Abschlusstests im gleichen Monat stattfanden. Theoretisch können systematische jahreszeitliche Einflüsse eliminiert werden, indem die Probanden zeitversetzt mit dem Trainingsprogramm beginnen. Das bringt allerdings neben zahlreichen anderen organisatorischen Nachteilen einen wesentlich größeren Zeitaufwand mit sich und war daher bei der vorliegenden Untersuchung nicht möglich. Deutliche saisonale Schwankungen sind in der Literatur insbesondere für Laborparameter und anthropometrische Daten beschrieben (22, 193). Die HDL-Cholesterinkonzentration verläuft im Jahresverlauf sinusförmig mit ihrem Maximum im Winter und ihrem Minimum im Sommer (22). Höhepunkte in den Wintermonaten sind auch für Gesamt- und LDL-Cholesterin nachgewiesen (193). In schwacher Ausprägung sind solche Schwankungen der Gesamt- und HDL-Cholesterinkonzentration auch bei den Daten der vorliegenden Untersuchung erkennbar. Da insgesamt keine signifikanten Veränderungen des Gesamtcholesterins und der Cholesterinunterfraktionen durch das Ausdauertraining gefunden wurden, haben die jahreszeitlichen Schwankungen allerdings für die Gesamtinterpretation keine Konsequenz. Einhergehend mit der vermehrten Zufuhr von Fleisch und anderen tierischen Fettsäuren im Winter werden in der Literatur auch BMI-Schwankungen im Jahresverlauf beschrieben (193). Möglicherweise erklärt das die ungleichmäßig verteilte Abnahme des Körperfettanteils im Studienverlauf, die von März bis September größer war als von September bis März. Auch das Körpergewicht nahm von März bis September signifikant ab und stieg von Dezember bis März wieder etwas an, so dass sich kein signifikanter Unterschied zwischen Eingangs- und Abschlusstest ergab. In

diesem Fall wurde durch die Studiendauer von einem Jahr möglicherweise ein durch jahreszeitliche Schwankungen verfälschter Gesamteffekt verhindert. Weitere potenzielle Einflüsse der Jahreszeiten auf den Zeitverlauf der Anpassungserscheinungen an das Ausdauertraining wurden bereits diskutiert und erscheinen insgesamt gering. Insgesamt ist daher nicht von einem negativen Einfluss des gleichzeitigen Trainingsbeginns aller Studienteilnehmer auf die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung auszugehen.

Eine Stichprobengröße von 18 Personen erscheint aus statistischer Perspektive recht gering. Trainingsstudien arbeiten aber häufig mit noch niedrigeren Versuchspersonenzahlen, da ihre Durchführung im Vergleich zu Querschnittuntersuchungen sehr aufwändig ist. Von den fünf bislang existierenden Ausdauertrainingsstudien, die mindestens zehn Monate dauerten, untersuchten vier Studien zwischen fünf und neun Probanden pro Trainingsgruppe (13, 45, 94, 215). Duncan et al. (52) schlossen 492 Probanden in ihre Untersuchung ein. Allerdings war durch die große Stichprobe keine Betreuung des Trainings möglich, was – wie einleitend bereits beschrieben – zu schlechter Compliance und wahrscheinlich daraus resultierenden ungewöhnlich geringen Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit führte. Generell muss bei der Planung von Trainingsstudien abgewogen werden, ob eine große Fallzahl oder eine gute und sorgfältig überprüfte Compliance der Probanden Priorität hat. Diese beiden Faktoren schließen sich angesichts der begrenzten personellen und materiellen Ressourcen ab einem gewissen Punkt gegenseitig aus. Weil durch die vorliegende Studie das Ausmaß, die Variabilität und der Zeitverlauf von Trainingsadaptationen untersucht werden sollten, erschien eine gute und gleichmäßige Compliance im Studienverlauf von übergeordneter Bedeutung. Deshalb wurde auf die Betreuung der Probanden besonderer Wert gelegt, und die notwendige Stichprobengröße wurde a priori abgeschätzt. Im Vergleich zu den vier zitierten Ausdauertrainingsstudien von mindestens zehn Monaten Dauer, die ebenfalls auf gute Compliance achteten, ist die Stichprobe der vorliegenden Untersuchung etwa doppelt so groß.

An dieser Studie nahmen sowohl männliche als auch weibliche Versuchspersonen teil. Bei der Terminierung der Tests konnte auf den Zeitpunkt im Menstruationszyklus der Teilnehmerinnen keine Rücksicht genommen werden. Janse de Jonge (96) fasst in einem Übersichtsartikel bisherige Erkenntnisse über den Einfluss des Menstruationszyklus auf die Leistungsfähigkeit zusammen. Sie stellt fest, dass die Mehrheit bisheriger Untersuchungen keine Veränderungen der  $VO_{2max}$ , der Ruheherzfrequenz, der Blutlaktatkonzentration und der Herzfrequenz während submaximaler Belastung im Zyklusverlauf fand, wenn auch einzelne Studien zu anderen Ergebnissen kamen. Den gleichen Schluss ziehen Lewis et al. (122) in einem Übersichtsartikel zu Unterschieden zwischen den Geschlechtern aus leistungsphysiologischer Sicht. Hinsichtlich des Zykluseinflusses auf den Fettstoffwechsel während körperlicher

Belastung ist die Studienlage weniger eindeutig. Janse de Jonge (96) fand insgesamt sechs Studien zu dieser Fragestellung. Drei der Studien dokumentierten Schwankungen des Fettstoffwechsels während Belastung im Zyklusverlauf (31, 49, 70) und zwei Studien stellten keine Veränderungen fest (42, 158). Die fünfte Studie fand nur nach Glukosegabe Unterschiede des Fettstoffwechsels während Belastung im Zyklusverlauf, wohingegen bei nüchternen Probandinnen und Kontrollprobandinnen ohne Ernährungsvorgaben keine Veränderungen zu beobachten waren (24). Als unsystematischer Einflussfaktor könnte der Zykluszeitpunkt bei der vorliegenden Untersuchung insofern möglicherweise die Streuung, aber nicht die Richtung der gemessenen Veränderungen des Fettstoffwechsels während Belastung beeinflusst haben. Tatsächlich wies die Entwicklung des Fettstoffwechsels während Belastung im Zeitverlauf eine große Standardabweichung auf. Die war jedoch bei den weiblichen Studienteilnehmern mit durchschnittlich  $0,06 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  nicht größer als bei den männlichen mit durchschnittlich  $0,08 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ . Insgesamt erscheint ein Einfluss des Menstruationszyklus der Teilnehmerinnen auf den Fettstoffwechsel während Belastung daher unwahrscheinlich. Auch der Ruheumsatz könnte durch den Zykluszeitpunkt beeinflusst worden sein, denn verschiedene Studien wiesen Schwankungen des Ruheumsatzes im Zyklusverlauf nach (82, 199). Donahoo et al. (50) gibt in einem Übersichtsartikel zur Variabilität des Energieverbrauchs jedoch zu bedenken, dass die gefundenen Schwankungen des Ruheumsatzes bei Frauen im Zyklusverlauf zum Teil nicht größer sind als die Tag-zu-Tag-Variabilität des Ruheumsatzes bei Männern. Ein möglicher Einfluss des Zykluszeitpunkts auf den Ruheumsatz erscheint bei der vorliegenden Untersuchung zudem nicht relevant, da die äußerst geringen Mittelwertunterschiede des Ruheumsatzes zwischen den drei Messzeitpunkten sicherlich auch bei geringeren Standardabweichungen statistisch nicht signifikant gewesen wären. Das Körpergewicht wird durch den Menstruationszyklus Janse de Jonge (96) zufolge nicht beeinflusst. Die meisten Studien stellten auch keinen Einfluss des Zykluszeitpunkts auf den Hämatokrit, die Hämoglobinkonzentration und das Plasmavolumen fest. Nur bei Frauen mit besonders großem Blutverlust während der Menstruation wurde eine reduzierte Hämoglobinkonzentration in dieser Zyklusphase beobachtet (96). Insgesamt wird aus der Literatur ersichtlich, dass bei den meisten leistungsphysiologischen Parametern nicht mit Einflüssen des Menstruationszyklus der Probandinnen gerechnet werden muss. Die wenigen potenziellen Einflüsse erscheinen ferner für die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung nicht relevant.

Sind weibliche Probanden in eine Untersuchung eingeschlossen, muss darüber hinaus mit Einflüssen durch die Einnahme von Hormonpräparaten auf die körperliche Leistungsfähigkeit gerechnet werden (35). Von den Teilnehmerinnen der vorliegenden Untersuchung nahmen einige Hormonpräparate zur Empfängnisverhütung oder gegen Wechseljahrsbeschwerden ein. Jegliche Veränderungen der Hormoneinnahme waren jedoch Ausschlusskriterium, so

dass weder das Ausmaß, noch die Variabilität oder der Zeitverlauf der Adaptationen an das einjährige gesundheitssportliche Ausdauertraining davon beeinflusst worden sein dürften.

Als Belastungsprotokolle wurden bei den Laufbandtests kombinierte Stufen-Rampen-Protokolle mit dreiminütiger Stufendauer gewählt. Diese Stufendauer ist für Messungen von Herzfrequenz, Laktat und Sauerstoffaufnahme validiert und wird daher bei Stufentests zur Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung häufig verwendet (205, 209, 214). Einige Arbeitsgruppen nutzen auch zur Beschreibung des Fettstoffwechsels während körperlicher Belastung Protokolle mit dreiminütigen Stufen (160, 206). Allerdings bevorzugen die meisten Arbeitsgruppen zur Bestimmung des Fettstoffwechsels längere Belastungsstufen von 4 bis 6 min Dauer (3, 67, 147) oder Dauertests (15, 104, 117, 182), weil der Anteil der Fettoxidation an der Energiebereitstellung mit zunehmender Belastungsdauer ansteigt (116). Achten et al. (3) verglichen Protokolle mit fünf- und dreiminütigen Stufen im Hinblick auf die Intensität mit der höchsten Fettstoffwechselrate ( $Fat_{max}$ ). Sie konnten keine Unterschiede der maximalen Fettoxidationsrate oder der Belastungsstufe, auf der sie zu beobachten war, feststellen. Um Veränderungen des Fettstoffwechsels im Trainingsverlauf zu dokumentieren, erscheinen die im Rahmen der vorliegenden Studie verwendeten Belastungsprotokolle insofern ausreichend gut geeignet. Bei Studien mit primärem Fokus auf den Fettstoffwechsel sind jedoch längere Belastungsstufen oder Dauertests zu bevorzugen.

Ein generelles Problem bei der Verwendung von Stufentests im Vergleich zu mehreren separaten Dauertests liegt darin, dass der Substratumsatz auf den höheren Stufen durch die vorangegangene Belastung beeinflusst sein kann. Diesen so genannten Carry-over-Effekt untersuchten Achten et al. (3), indem sie die Fettstoffwechselraten auf verschiedenen Belastungsstufen eines Stufentests mit denen bei einzelnen Dauertests verglichen. Die Dauertests fanden an verschiedenen Tagen statt und dauerten wie die einzelnen Stufen des Stufentests jeweils fünf Minuten. Sowohl beim Stufentest als auch bei den Dauertests trat die maximale Fettstoffwechselrate bei der gleichen Belastungsintensität auf. Die Autoren leiten aus ihren Daten ab, dass kein relevanter Effekt vorangegangener Stufen auf die Fettoxidationsrate besteht. Allerdings handelte es sich bei den Probanden von Achten et al. (3) um gut ausdauertrainierte Radfahrer, und es ist denkbar, dass Untrainierte durch vorangegangene Belastung stärker beeinflusst werden als Trainierte. Die gemessenen Adaptationen an ein Ausdauertrainingsprogramm wären allerdings nur dann durch Carry-over-Effekte verfälscht, wenn sich Carry-over-Effekte durch Ausdauertraining wesentlich veränderten. Hierzu liegen bislang keine Untersuchungen vor. Es erscheint aber zumindest möglich, dass sich die Carry-over-Effekte im Trainingsverlauf reduzieren und der Fettstoffwechselanteil auf den höheren Belastungsstufen größer wird, weil mit zunehmender Ausdauerleistungsfähigkeit auf den niedrigen Belastungsstufen immer weniger Laktat gebildet wird. Insofern kann nicht ausge-

geschlossen werden, dass mehrere separate Dauertests statt eines Stufentests zu etwas geringeren Verbesserungen des Fettstoffwechsels geführt hätten. Das Ausmaß, die Variabilität und der Zeitverlauf der Veränderungen des Fettstoffwechsels sind daher nicht über Stufentests hinaus generalisierbar.

Fettstoffwechselanteil und Fettstoffwechselrate können mittels indirekter Kalorimetrie nur dann fehlerfrei bestimmt werden, wenn der Anteil der anaeroben Energiebereitstellung nicht zu groß ist. Bei der Bikarbonat-Pufferung von bei der Laktatproduktion anfallenden Wasserstoff-Ionen wird Excess-CO<sub>2</sub> frei, das den Respiratorischen Quotienten als Berechnungsgrundlage für den Fettstoffwechsel nicht-metabolisch erhöht. Der Fettstoffwechsel wird dadurch falsch zu niedrig bestimmt. Einer Untersuchung von Jeukendrup und Wallis (101) zufolge wird der spiroergometrisch bestimmten Substratumsatz ab Belastungsintensitäten von 75 % VO<sub>2max</sub> durch Excess-CO<sub>2</sub> verfälscht. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden daher nur Belastungsstufen ausgewertet, die im Mittel weniger als 75 % VO<sub>2max</sub> entsprachen. Dabei wurde vernachlässigt, dass einzelne Individuen 75 % VO<sub>2max</sub> auf der höchsten ausgewerteten Stufe bereits überschritten hatten, und dadurch Fehler bei der Abschätzung des Fettstoffwechselanteils entstanden sein könnten. Die von Jeukendrup und Wallis (101) für korrekte Berechnungen des Substratumsatzes mittels indirekter Kalorimetrie angegebene Obergrenze ist der einzig existierende Anhaltspunkt, der für ansteigende Belastungsprotokolle ohne Kenntnis des maximalen Laktat-Steady-States herangezogen werden kann. Allerdings muss kritisiert werden, dass die Grenze als Prozentsatz eines Maximalparameters angegeben ist. Belastungen mit fixen Prozentsätzen von Maximalparametern führen nämlich zu interindividuell unterschiedlichen metabolischen Reaktionen, und daher auch zu unterschiedlicher Excess-CO<sub>2</sub>-Produktion (148). Im Einzelfall könnte der Fettstoffwechselanteil auch dadurch unterschätzt worden sein. Betrachtet man den RQ der Studienteilnehmer während der Stufentests genauer, findet man beim Eingangstest auf der vierten Belastungsstufe bei sechs von 17 Probanden einen RQ > 1,0. Bereits beim ersten Zwischentest war das bei keinem Probanden mehr der Fall. Da das metabolische Spektrum des RQ nur bis knapp unter 1,0 reicht, weisen RQ-Werte > 1,0 auf Berechnungsfehler des Fettstoffwechsels durch Excess-CO<sub>2</sub> hin. Umgekehrt kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass die Bestimmung bei niedrigerem RQ fehlerfrei ist, denn auch dann sind Excess-CO<sub>2</sub>-Einflüsse möglich. Die Blutlaktatkonzentration auf der vierten Belastungsstufe nahm im Verlauf des einjährigen Ausdauertrainings ab. Mit einem Berechnungsfehler des Fettstoffwechsels muss daher theoretisch insbesondere beim Eingangstest bzw. in der ersten Studienhälfte gerechnet werden. Für den Zeitverlauf der Verbesserung des Fettstoffwechsels ergibt sich daraus, dass die Fortschritte zu Studienbeginn möglicherweise überschätzt sein könnten. Ein Befund spricht allerdings gegen diese Vermutung: In der zweiten Studienhälfte, in der ein merklicher Einfluss von Excess-CO<sub>2</sub> wegen der niedrigen Laktatkonzentrationen nahezu ausgeschlossen

werden kann, waren die Veränderungen von Fettstoffwechselanteil und Fettflussrate beinahe genauso groß wie in der ersten. Insofern scheinen die Messungen durch Excess-CO<sub>2</sub> höchstens geringfügig im Sinne einer überschätzten Steigerung des Fettstoffwechsels in den ersten drei bis sechs Trainingsmonaten beeinflusst worden zu sein.

## 5.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden erstmals das Ausmaß, die Variabilität und der Zeitverlauf von Anpassungserscheinungen innerhalb des ersten Jahres nach Beginn eines gesundheitssportlichen Ausdauertrainings untersucht. Aus den Ergebnissen lässt sich für die Betreuung von Gesundheitssportlern und die Planung zukünftiger Ausdauertrainingsstudien Folgendes schließen:

- Da alle Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit nach sechs Monaten Training bereits mindestens 75 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtveränderung erreicht hatten, sollten Gesundheitssportler nach etwa diesem Zeitraum ihre Trainingsvorgabe erhöhen, um weiterhin deutliche Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit zu erzielen. Ob eine Steigerung der Trainingsintensität oder des Trainingsumfangs zu bevorzugen ist, geht aus der vorliegenden Untersuchung nicht hervor.
- Die Herzfrequenzleistungskurve veränderte sich nach etwa zwei Monaten Ausdauertraining nicht mehr signifikant und hatte nach drei Monaten bereits über 90 % ihrer Ein-Jahres-Gesamtverbesserung erreicht. Bei längeren Ausdauertrainingsstudien scheint sie insofern kein geeigneter Parameter zur Dokumentation von Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit zu sein. Die Verbesserung der  $VO_{2max}$  stagnierte hingegen innerhalb des einjährigen Trainings nicht und erscheint deshalb auch bei längeren Ausdauertrainingsstudien als geeigneter Indikator für Leistungsverbesserungen.
- Weil sich alle untersuchten Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit bereits nach drei Monaten Training signifikant verbessert hatten, erscheinen Ausdauertrainingsstudien von drei Monaten Dauer ausreichend lang, um die grundsätzliche Effektivität von Ausdauertrainingsprogrammen zu überprüfen. Soll hingegen das gesamte Ausmaß von Trainingsadaptationen beschrieben werden, müssen die  $VO_{2max}$  und die Fettflussrate während Belastung durch Studien von möglicherweise weit mehr als einem Jahr Dauer untersucht werden.
- Bei etwa 70 % der Studienteilnehmer blieb mindestens ein Indikator für die Ausdauerleistungsfähigkeit im Studienverlauf unverändert, weshalb die Identifikation von Nonrespondern anhand eines einzelnen Parameters nicht sinnvoll erscheint. Durch das Erfassen eines maximalen, eines submaximalen kardiozirkulatorischen und eines submaximalen metabolischen Indikators für die Ausdauerleistungsfähigkeit wären bei jedem

Probanden Trainingsadaptationen erkennbar gewesen. Zur kompletten Dokumentation und Charakterisierung individueller Leistungsverbesserungen sollten daher Parameter unterschiedlicher Anpassungs- und Messebenen erfasst werden.

- Die vorliegende Untersuchung wirft Zweifel an der Existenz von globalen Nonrespondern bei gesundheitssportlichem Ausdauertraining auf, weil sich bei jedem Probanden mindestens zwei von fünf untersuchten Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit veränderten. Wegen des geringen Stichprobenumfangs lässt sich deren Existenz durch die vorliegenden Daten jedoch nicht generell ausschließen.

Weitere Ausdauertrainingsstudien sind notwendig, um zu klären, wie Veränderungen der Ausdauertrainingsvorgaben für Gesundheitssportler nach sechs Monaten Training gestaltet werden sollten, um weitere Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit hervorzurufen. Ferner sollte durch Studien mit größeren Fallzahlen für jeden Indikator der Ausdauerleistungsfähigkeit der genaue Anteil an Individuen untersucht werden, der keine Trainingsadaptationen zeigt. Bei diesen Individuen erscheint es interessant zu überprüfen, ob spezielle Trainingsvorgaben zu Veränderungen der ansonsten stabilen Parameter führen. Schließlich kann nur durch Untersuchungen an großen Stichproben der Frage nachgegangen werden, ob es generelle Ausdauertrainings-Nonresponder überhaupt gibt.

## Literaturverzeichnis

1. American College of Sports Medicine position stand. The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc.* 22:265-274, 1990.
2. American College of Sports Medicine position stand. The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc.* 30:975-991, 1998.
3. Achten J, Gleeson M und Jeukendrup AE. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. *Med Sci Sports Exerc.* 34:92-97, 2002.
4. Achten J, Venables MC und Jeukendrup AE. Fat oxidation rates are higher during running compared with cycling over a wide range of intensities. *Metabolism.* 52:747-752, 2003.
5. Adriaens MP, Schoffelen PF und Westerterp KR. Intra-individual variation of basal metabolic rate and the influence of daily habitual physical activity before testing. *Br J Nutr.* 90:419-423, 2003.
6. Altekruze EB und Wilmore JH. Changes in blood chemistries following a controlled exercise program. *J Occup Med.* 15:110-113, 1973.
7. Altman DG, Schulz KF, Moher D, Egger M, Davidoff F, Elbourne D, Gotzsche PC und Lang T. The revised CONSORT statement for reporting randomized trials: explanation and elaboration. *Ann Intern Med.* 134:663-694, 2001.
8. Andrew GM, Oldridge NB, Parker JO, Cunningham DA, Rechnitzer PA, Jones NL, Buck C, Kavanagh T, Shephard RJ und Sutton JR. Reasons for dropout from exercise programs in post-coronary patients. *Med Sci Sports Exerc.* 13:164-168, 1981.
9. Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB. Nutrition and physical performance. In: *Textbook of work physiology. Physiological bases of exercise.* Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB (Hrsg.). 4. Auflage. Champaign: Human Kinetics, 2003, S. 369-394.
10. Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB. Physical activity and health. In: *Textbook of work physiology. Physiological bases of exercise.* Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB (Hrsg.). 4. Auflage. Champaign: Human Kinetics, 2003, S. 541-548.
11. Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB. Physical performance. In: *Textbook of work physiology. Physiological bases of exercise.* Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB (Hrsg.). 4. Auflage. Champaign: Human Kinetics, 2003, S. 237-272.
12. Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB. Physical training. In: *Textbook of work physiology. Physiological bases of exercise.* Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA und Strømme SB (Hrsg.). 4. Auflage. Champaign: Human Kinetics, 2003, S. 313-368.
13. Atomi Y und Miyashita M. Effect of training intensity in adult females. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 44:109-116, 1980.

14. Bagger M, Petersen PH und Pedersen PK. Biological variation in variables associated with exercise training. *Int J Sports Med.* 24:433-440, 2003.
15. Bassami M, Ahmadizad S, Doran D und MacLaren DP. Effects of exercise intensity and duration on fat metabolism in trained and untrained older males. *Eur J Appl Physiol.* 101:525-532, 2007.
16. Beckman Coulter (Hrsg.). *Synchron CX Kinische Systeme. Methodenhandbuch. Band 3 von 3 (M - Z).* Fullerton: Beckman Coulter Inc., 2001.
17. Begg C, Cho M, Eastwood S, Horton R, Moher D, Olkin I, Pitkin R, Rennie D, Schulz KF, Simel D und Stroup DF. Improving the quality of reporting of randomized controlled trials. The CONSORT statement. *Jama.* 276:637-639, 1996.
18. Beneke R und Hutler M. The effect of training on running economy and performance in recreational athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 37:1794-1799, 2005.
19. Bergman BC, Butterfield GE, Wolfel EE, Casazza GA, Lopaschuk GD und Brooks GA. Evaluation of exercise and training on muscle lipid metabolism. *Am J Physiol.* 276:E106-117, 1999.
20. Blair SN und Kohl HW. Rates and risks for running and exercise injuries: studies in three populations. *Res Q Exerc Sports.* 58:221-228, 1987.
21. Blair SN, Kohl HW, Barlow CE, Paffenbarger RS, Gibbons LW und Macera CA. Changes in physical fitness and all-cause mortality. A prospective study of healthy and unhealthy men. *Jama.* 273:1093-1098, 1995.
22. Bluher M, Hentschel B, Rassoul F und Richter V. Influence of dietary intake and physical activity on annual rhythm of human blood cholesterol concentrations. *Chronobiol Int.* 18:541-557, 2001.
23. Böhm M, Diet F, Flesch M, Laufs U, Nickenig G und Schnabel P. Fettstoffwechsel, Übergewicht und Ernährung, Diabetes. In: *Klinische Kardiologie. Krankheiten des Herzens, des Kreislaufs und der herznahen Gefäße.* Erdmann E, Beuckelmann DJ, Böhm M, Hanrath P, Meyer J und Steinbeck G (Hrsg.). 5. Auflage. Berlin/ Heidelberg: Springer, 2000, S. 239-257.
24. Bonen A, Haynes FJ, Watson-Wright W, Sopper MM, Pierce GN, Low MP und Graham TE. Effects of menstrual cycle on metabolic responses to exercise. *J Appl Physiol.* 55:1506-1513, 1983.
25. Bortz J. Verfahren zur Überprüfung von Unterschiedshypothesen. In: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* Bortz J (Hrsg.). 6. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2005, S. 135-179.
26. Bortz J. Versuchspläne mit Messwiederholungen. In: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* Bortz J (Hrsg.). 6. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2005, S. 331-360.
27. Boschmann M, Steiniger J, Hille U, Tank J, Adams F, Sharma AM, Klaus S, Luft FC und Jordan J. Water-induced thermogenesis. *J Clin Endocrinol Metab.* 88:6015-6019, 2003.
28. Bosquet L, Leger L und Legros P. Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med.* 32:675-700, 2002.

29. Bouchard C, An P, Rice T, Skinner JS, Wilmore JH, Gagnon J, Perusse L, Leon AS und Rao DC. Familial aggregation of  $VO_{2max}$  response to exercise training: results from the HERITAGE Family Study. *J Appl Physiol.* 87:1003-1008, 1999.
30. Bouchard C und Rankinen T. Individual differences in response to regular physical activity. *Med Sci Sports Exerc.* 33:S446-453, 2001.
31. Braun B, Mawson JT, Muza SR, Dominick SB, Brooks GA, Horning MA, Rock PB, Moore LG, Mazzeo RS, Ezeji-Okoye SC und Butterfield GE. Women at altitude: carbohydrate utilization during exercise at 4,300 m. *J Appl Physiol.* 88:246-256, 2000.
32. Bruce CR und Hawley JA. Improvements in insulin resistance with aerobic exercise training: a lipocentric approach. *Med Sci Sports Exerc.* 36:1196-1201, 2004.
33. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K und Whipp BJ. Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol.* 55:1558-1564, 1983.
34. Bullough RC und Melby CL. Effect of inpatient versus outpatient measurement protocol on resting metabolic rate and respiratory exchange ratio. *Ann Nutr Metab.* 37:24-32, 1993.
35. Burrows M und Peters CE. The influence of oral contraceptives on athletic performance in female athletes. *Sports Med.* 37:557-574, 2007.
36. Chalmers J, MacMahon S, Mancia G, Whitworth J, Beilin L, Hansson L, Neal B, Rodgers A, Ni Mhurchu C und Clark T. 1999 World Health Organization - International Society of Hypertension guidelines for the management of hypertension. Guidelines sub-committee of the World Health Organization. *Clin Exp Hypertens.* 21:1009-1060, 1999.
37. Chatard JC, Mujika I, Guy C und Lacour JR. Anaemia and iron deficiency in athletes. Practical recommendations for treatment. *Sports Med.* 27:229-240, 1999.
38. Convertino VA. Blood volume: its adaptation to endurance training. *Med Sci Sports Exerc.* 23:1338-1348, 1991.
39. Cordain L, Gotshall RW, Eaton SB und Eaton SB. Physical activity, energy expenditure and fitness: an evolutionary perspective. *Int J Sports Med.* 19:328-335, 1998.
40. Cornelissen VA und Fagard RH. Effects of endurance training on blood pressure, blood pressure-regulating mechanisms, and cardiovascular risk factors. *Hypertension.* 46:667-675, 2005.
41. Daussin FN, Ponsot E, Dufour SP, Lonsdorfer-Wolf E, Doutreleau S, Geny B, Piquard F und Richard R. Improvement of  $VO_{2max}$  by cardiac output and oxygen extraction adaptation during intermittent versus continuous endurance training. *Eur J Appl Physiol.* 101:377-383, 2007.
42. De Souza MJ, Maguire MS, Rubin KR und Maresh CM. Effects of menstrual phase and amenorrhea on exercise performance in runners. *Med Sci Sports Exerc.* 22:575-580, 1990.
43. Dempsey JA und Babcock MA. An integrative view of limitations to muscular performance. *Adv Exp Med Biol.* 384:393-399, 1995.

44. Denis C, Dormois D und Lacour JR. Endurance training,  $VO_{2max}$ , and OBLA: a longitudinal study of two different age groups. *Int J Sports Med.* 5:167-173, 1984.
45. Denis C, Fouquet R, Poty P, Geysant A und Lacour JR. Effect of 40 weeks of endurance training on the anaerobic threshold. *Int J Sports Med.* 3:208-214, 1982.
46. di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC und Moia C. The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 55:259-266, 1986.
47. Dickhuth HH, Yin L, Niess A, Röcker K, Mayer F, Heitkamp HC und Horstmann T. Ventilatory, lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: relationship and reproducibility. *Int J Sports Med.* 20:122-127, 1999.
48. Dinunno FA, Tanaka H, Monahan KD, Clevenger CM, Eskurza I, DeSouza CA und Seals DR. Regular endurance exercise induces expansive arterial remodelling in the trained limbs of healthy men. *J Physiol.* 534:287-295, 2001.
49. Dombrov ML, Bonekat HW, Williams TJ und Staats BA. Exercise performance and ventilatory response in the menstrual cycle. *Med Sci Sports Exerc.* 19:111-117, 1987.
50. Donahoo WT, Levine JA und Melanson EL. Variability in energy expenditure and its components. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 7:599-605, 2004.
51. Duncan G, Howley E und Johnson B. Applicability of  $VO_{2max}$  criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Med Sci Sports Exerc.* 29:273-278, 1997.
52. Duncan GE, Anton SD, Sydeman SJ, Newton RL, Corsica JA, Durning PE, Ketterson TU, Martin AD, Limacher MC und Perri MG. Prescribing exercise at varied levels of intensity and frequency: a randomized trial. *Arch Intern Med.* 165:2362-2369, 2005.
53. Duncan GE, Perri MG, Anton SD, Limacher MC, Martin AD, Lowenthal DT, Arning E, Bottiglieri T und Stacpoole PW. Effects of exercise on emerging and traditional cardiovascular risk factors. *Prev Med.* 39:894-902, 2004.
54. Durnin JV und Womersley J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br J Nutr.* 32:77-97, 1974.
55. Durstine JL, Grandjean PW, Davis PG, Ferguson MA, Alderson NL und DuBose KD. Blood lipid and lipoprotein adaptations to exercise: a quantitative analysis. *Sports Med.* 31:1033-1062, 2001.
56. Eaton SB, Konner M und Shostak M. Stone agers in the fast lane: chronic degenerative diseases in evolutionary perspective. *Am J Med.* 84:739-749, 1988.
57. Fellmann N. Hormonal and plasma volume alterations following endurance exercise. A brief review. *Sports Med.* 13:37-49, 1992.
58. Friedlander AL, Casazza GA, Horning MA, Buddinger TF und Brooks GA. Effects of exercise intensity and training on lipid metabolism in young women. *Am J Physiol.* 275:E853-863, 1998.
59. Friedlander AL, Casazza GA, Horning MA, Usaj A und Brooks GA. Endurance training increases fatty acid turnover, but not fat oxidation, in young men. *J Appl Physiol.* 86:2097-2105, 1999.

60. Friedmann B. Sportleranämie. *Dtsch Z Sportmed.* 52:262-263, 2001.
61. Gaesser GA und Rich RG. Effects of high- and low-intensity exercise training on aerobic capacity and blood lipids. *Med Sci Sports Exerc.* 16:269-274, 1984.
62. Gallo Júnior L, Maciel BC, Marin-Neto JA und Martins LE. Sympathetic and parasympathetic changes in heart rate control during dynamic exercise induced by endurance training in man. *Braz J Med Biol Res.* 22:631-643, 1989.
63. Galloway S und Maughan R. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc.* 29:1240-1249, 1997.
64. Gaziano JM. Global burden of cardiovascular disease. In: *Braunwald's heart disease: A textbook of cardiovascular medicine.* Zipes DP, Libby P, Bonow RO und Braunwald E (Hrsg.). 7. Auflage. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2005, S. 1-19.
65. Goldberg JH und King AC. Physical activity and weight management across the lifespan. *Annu Rev Public Health.* 28:145-170, 2007.
66. Golden HP und Vaccaro P. The effects of endurance training intensity on the anaerobic threshold. *J Sports Med Phys Fitness.* 24:205-211, 1984.
67. Gonzalez-Haro C, Galilea PA, Gonzalez-de-Suso JM, Drobic F und Escanero JF. Maximal lipidic power in high competitive level triathletes and cyclists. *Br J Sports Med.* 41:23-28, 2007.
68. Goran MI, Calles-Escandon J, Poehlman ET, O'Connell M und Danforth E. Effects of increased energy intake and/ or physical activity on energy expenditure in young healthy men. *J Appl Physiol.* 77:366-372, 1994.
69. Gossard D, Haskell WL, Taylor CB, Mueller JK, Rogers F, Chandler M, Ahn DK, Miller NH und DeBusk RF. Effects of low- and high-intensity home-based exercise training on functional capacity in healthy middle-aged men. *Am J Cardiol.* 57:446-449, 1986.
70. Hackney AC. Influence of oestrogen on muscle glycogen utilization during exercise. *Acta Physiol Scand.* 167:273-274, 1999.
71. Hagberg JM und Coyle EF. Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive racewalkers. *Med Sci Sports Exerc.* 15:287-289, 1983.
72. Halbert JA, Silagy CA, Finucane P, Withers RT und Hamdorf PA. Exercise training and blood lipids in hyperlipidemic and normolipidemic adults: a meta-analysis of randomized, controlled trials. *Eur J Clin Nutr.* 53:514-522, 1999.
73. Haskell WL, Lee IM, Pate RR, Powell KE, Blair SN, Franklin BA, Macera CA, Heath GW, Thompson PD und Bauman A. Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Med Sci Sports Exerc.* 39:1423-1434, 2007.
74. Haugen HA, Melanson EL, Tran ZV, Kearney JT und Hill JO. Variability of measured resting metabolic rate. *Am J Clin Nutr.* 78:1141-1145, 2003.
75. Hautala AJ, Kiviniemi AM, Makikallio TH, Kinnunen H, Nissila S, Huikuri HV und Tulppo MP. Individual differences in the responses to endurance and resistance training. *Eur J Appl Physiol.* 96:535-542, 2006.

76. Heck H und Bartmus U. Energiestoffwechsel. In: *Horst de Mareés: Sportphysiologie*. Heck H und Bartmus U (Hrsg.). 9. Auflage. Köln: Sportverlag Strauss, 2003, S. 341-378.
77. Heck H und Bartmus U. Herz und Kreislauf. In: *Horst de Mareés: Sportphysiologie*. Heck H und Bartmus U (Hrsg.). 9. Auflage. Köln: Sportverlag Strauss, 2003, S. 245-322.
78. Heilbronn LK, Smith SR, Martin CK, Anton SD und Ravussin E. Alternate-day fasting in nonobese subjects: effects on body weight, body composition, and energy metabolism. *Am J Clin Nutr.* 81:69-73, 2005.
79. Heinig M und Johnson RJ. Role of uric acid in hypertension, renal disease, and metabolic syndrome. *Cleve Clin J Med.* 73:1059-1064, 2006.
80. Helgerud J, Hoydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, Simonsen T, Helgesen C, Hjørth N, Bach R und Hoff J. Aerobic high-intensity intervals improve  $VO_{2max}$  more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc.* 39:665-671, 2007.
81. Henritze J, Weltman A, Schurrer RL und Barlow K. Effects of training at and above the lactate threshold on the lactate threshold and maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 54:84-88, 1985.
82. Henry CJ, Lightowler HJ und Marchini J. Intra-individual variation in resting metabolic rate during the menstrual cycle. *Br J Nutr.* 89:811-817, 2003.
83. Hill AV und Lupton H. Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of Oxygen. *Q J Med.* 16:135-171, 1923.
84. Hill JO, Wyatt HR, Reed GW und Peters JC. Obesity and the environment: where do we go from here? *Science.* 299:853-855, 2003.
85. Hoff J und Helgerud J. Endurance and strength training for soccer players: physiological considerations. *Sports Med.* 34:165-180, 2004.
86. Hoff J, Kemi OJ und Helgerud J. Strength and endurance differences between elite and junior elite ice hockey players. The importance of allometric scaling. *Int J Sports Med.* 26:537-541, 2005.
87. Hollmann W und Hettinger T. Motorische Beanspruchungsformen. In: *Sportmedizin: Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin*. Hollmann W und Hettinger T (Hrsg.). 4. Auflage. Stuttgart: Schattauer, 2000, S. 131-455.
88. Hollmann W und Hettinger T. Sportspezifische und sportärztliche Gesichtspunkte. In: *Sportmedizin: Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin*. Hollmann W und Hettinger T (Hrsg.). 4. Auflage. Stuttgart: Schattauer, 2000, S. 545-624.
89. Hopkins WG. A new view of statistics. <http://sportsci.org/resource/stats/>, 2007.
90. Horowitz JF, Leone TC, Feng W, Kelly DP und Klein S. Effect of endurance training on lipid metabolism in women: a potential role for PPARalpha in the metabolic response to training. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 279:E348-355, 2000.
91. Howley E, Bassett D und Welch H. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc.* 27:1292-1301, 1995.

92. Howley ET.  $VO_{2max}$  and the plateau - needed or not? *Med Sci Sports Exerc.* 39:101-102, 2007.
93. Hurley BF, Nemeth PM, Martin WH, Hagberg JM, Dalsky GP und Holloszy JO. Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. *J Appl Physiol.* 60:562-567, 1986.
94. Iwasaki K, Zhang R, Zuckerman JH und Levine BD. Dose-response relationship of the cardiovascular adaptation to endurance training in healthy adults: how much training for what benefit? *J Appl Physiol.* 95:1575-1583, 2003.
95. Jacobs KA, Krauss RM, Fattor JA, Horning MA, Friedlander AL, Bauer TA, Hagobian TA, Wolfel EE und Brooks GA. Endurance training has little effect on active muscle free fatty acid, lipoprotein cholesterol, or triglyceride net balances. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 291:E656-665, 2006.
96. Janse de Jonge XAK. Effects of the menstrual cycle on exercise performance. *Sports Med.* 33:833-851, 2003.
97. Jelic-Ivanovic Z, Memon L, Spasojevic-Kalimanovska V, Bogavac-Stanojevic N und Spasic S. Independent association of high serum uric acid concentration with angiographically defined coronary artery disease. *Tohoku J Exp Med.* 211:369-377, 2007.
98. Jeukendrup AE. Fettverbrennung und körperliche Aktivität. *Dtsch Z Sportmed.* 56:337-338, 2005.
99. Jeukendrup AE, Saris WH und Wagenmakers AJ. Fat metabolism during exercise: a review - part II: regulation of metabolism and the effects of training. *Int J Sports Med.* 19:293-302, 1998.
100. Jeukendrup AE, Saris WH und Wagenmakers AJ. Fat metabolism during exercise: a review. Part I: fatty acid mobilization and muscle metabolism. *Int J Sports Med.* 19:231-244, 1998.
101. Jeukendrup AE und Wallis GA. Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *Int J Sports Med.* 26 Suppl 1:S28-37, 2005.
102. Jones AM. A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med.* 32:39-43, 1998.
103. Jones AM und Carter H. The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Med.* 29:373-386, 2000.
104. Jones NL, Heigenhauser GJ, Kuksis A, Matsos CG, Sutton JR und Toews CJ. Fat metabolism in heavy exercise. *Clin Sci (Lond).* 59:469-478, 1980.
105. Kannel WB, Neaton JD, Wentworth D, Thomas HE, Stamler J, Hulley SB und Kjelsberg MO. Overall and coronary heart disease mortality rates in relation to major risk factors in 325,348 men screened for the MRFIT. Multiple Risk Factor Intervention Trial. *Am Heart J.* 112:825-836, 1986.
106. Kasapis C und Thompson PD. The effects of physical activity on serum C-reactive protein and inflammatory markers: a systematic review. *J Am Coll Cardiol.* 45:1563-1569, 2005.

107. Kashiwazaki H, Dejima Y und Suzuki T. Influence of upper and lower thermoneutral room temperatures (20 degrees C and 25 degrees C) on fasting and post-prandial resting metabolism under different outdoor temperatures. *Eur J Clin Nutr.* 44:405-413, 1990.
108. Katch VL, Sady SS und Freedson P. Biological variability in maximum aerobic power. *Med Sci Sports Exerc.* 14:21-25, 1982.
109. Kaye SA, Folsom AR, Prineas RJ, Potter JD und Gapstur SM. The association of body fat distribution with lifestyle and reproductive factors in a population study of postmenopausal women. *Int J Obes.* 14:583-591, 1990.
110. Kearney JT, Stull GA, Ewing JL und Strein JW. Cardiorespiratory responses of sedentary college women as a function of training intensity. *J Appl Physiol.* 41:822-825, 1976.
111. Kelley GA, Kelley KA und Tran ZV. Aerobic exercise and resting blood pressure: a meta-analytic review of randomized, controlled trials. *Prev Cardiol.* 4:73-80, 2001.
112. Keul J, Dickhuth H-H, Lehmann M und Staiger J. The athlete's heart - haemodynamics and structure. *Int J Sports Med.* 3 Suppl 1:33-43, 1982.
113. Kindermann W. Ergometrie-Empfehlungen für die ärztliche Praxis. *Dtsch Z Sportmed.* 38:244-267, 1987.
114. Kindermann W. Anaerobe Schwelle. *Dtsch Z Sportmed.* 55:161-162, 2004.
115. Kindermann W. Physiologische Anpassungen des Herz-Kreislauf-Systems an körperliche Belastung. In: *Sportkardiologie. Körperliche Aktivität bei Herzerkrankungen.* Kindermann W, Dickhuth H-H, Nieß A, Röcker K und Urhausen A (Hrsg.). 2. Auflage. Darmstadt: Steinkopff, 2007, S. 1-20.
116. Klein S, Coyle EF und Wolfe RR. Fat metabolism during low-intensity exercise in endurance-trained and untrained men. *Am J Physiol.* 267:E934-940, 1994.
117. Knechtle B, Müller G, Willmann F, Kotteck K, Eser P und Knecht H. Fat oxidation in men and women endurance athletes in running and cycling. *Int J Sports Med.* 25:38-44, 2004.
118. Kohrt WM, Malley MT, Coggan AR, Spina RJ, Ogawa T, Ehsani AA, Bourey RE, Martin WH und Holloszy JO. Effects of gender, age, and fitness level on response of  $VO_{2max}$  to training in 60-71 yr olds. *J Appl Physiol.* 71:2004-2011, 1991.
119. Krzeminski K, Nazar K, Cybulski G und Niewiadomski W. Endurance training slows down the kinetics of heart rate increase in the transition from moderate to heavier submaximal exercise intensities. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 62:297-300, 1991.
120. Kujala UM, Kaprio J, Sarna S und Koskenvuo M. Relationship of leisure-time physical activity and mortality: the Finnish twin cohort. *Jama.* 279:440-444, 1998.
121. Leon AS und Sanchez OA. Response of blood lipids to exercise training alone or combined with dietary intervention. *Med Sci Sports Exerc.* 33:S502-515, 2001.
122. Lewis DA, Kamon E und Hodgson JL. Physiological differences between genders. Implications for sports conditioning. *Sports Med.* 3:357-369, 1986.

123. Libby P. The vascular biology of atherosclerosis. In: *Braunwald's heart disease: A textbook of cardiovascular medicine*. Zipes DP, Libby P, Bonow RO und Braunwald E (Hrsg.). 7. Auflage. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2005, S. 921-939.
124. Londeree BR. Effect of training on lactate/ventilatory thresholds: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 29:837-843, 1997.
125. Lortie G, Simoneau JA, Hamel P, Boulay MR, Landry F und Bouchard C. Responses of maximal aerobic power and capacity to aerobic training. *Int J Sports Med.* 5:232-236, 1984.
126. Lucia A, Hoyos J, Perez M und Chicharro JL. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc.* 32:1777-1782, 2000.
127. Lucia A, Pardo J, Durantez A, Hoyos J und Chicharro JL. Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med.* 19:342-348, 1998.
128. Lusk G. Animal calorimetry. Analysis of the oxidation of mixtures of carbohydrate and fat. A correction. *J Biol Chem.* 59:41-42, 1924.
129. MacMahon S und Rodgers A. Blood pressure, antihypertensive treatment and stroke risk. *J Hypertens Suppl.* 12:S5-14, 1994.
130. Martin WH. Effects of acute and chronic exercise on fat metabolism. *Exerc Sport Sci Rev.* 24:203-231, 1996.
131. Martin WH, Dalsky GP, Hurley BF, Matthews DE, Bier DM, Hagberg JM, Rogers MA, King DS und Holloszy JO. Effect of endurance training on plasma free fatty acid turnover and oxidation during exercise. *Am J Physiol.* 265:E708-714, 1993.
132. Mattusch F, Dufaux B, Heine O, Mertens I und Rost R. Reduction of the plasma concentration of C-reactive protein following nine months of endurance training. *Int J Sports Med.* 21:21-24, 2000.
133. Mayes R, Hardman AE und Williams C. The influence of training on endurance and blood lactate concentration during submaximal exercise. *Br J Sports Med.* 21:119-124, 1987.
134. McArdle WD, Katch FI und Katch VL. Human energy expenditure during rest and physical activity. In: *Exercise physiology. Energy, nutrition, and human performance*. McArdle WD, Katch FI und Katch VL (Hrsg.). 6. Auflage. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2007, S. 195-208.
135. McArdle WD, Katch FI und Katch VL. Measurement of human energy expenditure. In: *Exercise physiology. Energy, nutrition, and human performance*. McArdle WD, Katch FI und Katch VL (Hrsg.). 6. Auflage. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2007, S. 183-194.
136. McArdle WD, Katch FI und Katch VL. Overweight, obesity, and weight control. In: *Exercise physiology. Energy, nutrition, and human performance*. McArdle WD, Katch FI und Katch VL (Hrsg.). 6. Auflage. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2007, S. 835-877.
137. McArdle WD, Katch FI und Katch VL. Physical activity, health, and aging. In: *Exercise physiology. Energy, nutrition, and human performance*. McArdle WD, Katch FI und Katch VL (Hrsg.). 6. Auflage. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2007, S. 883-924.

138. McArdle WD, Katch FI und Katch VL. Training for anaerobic and aerobic power. In: *Exercise physiology. Energy, nutrition, and human performance*. McArdle WD, Katch FI und Katch VL (Hrsg.). 6. Auflage. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2007, S. 469-507.
139. McLellan TM und Cheung KS. A comparative evaluation of the individual anaerobic threshold and the critical power. *Med Sci Sports Exerc.* 24:543-550, 1992.
140. Meijer GA, Janssen GM, Westerterp KR, Verhoeven F, Saris WH und ten Hoor F. The effect of a 5-month endurance-training programme on physical activity: evidence for a sex-difference in the metabolic response to exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 62:11-17, 1991.
141. Melanson EL, Freedson PS und Jungbluth S. Changes in  $VO_{2max}$  and maximal treadmill time after 9 wk of running or inline skate training. *Med Sci Sports Exerc.* 28:1422-1426, 1996.
142. Messonnier L, Denis C, Prieur F und Lacour JR. Are the effects of training on fat metabolism involved in the improvement of performance during high-intensity exercise? *Eur J Appl Physiol.* 94:434-441, 2005.
143. Meyer T. Belastungsuntersuchungen: Praktische Durchführung und Interpretation. In: *Sportkardiologie. Körperliche Aktivität bei Herzerkrankungen*. Kindermann W, Dickhuth H-H, Nieß A, Röcker K und Urhausen A (Hrsg.). 2. Auflage. Darmstadt: Steinkopff, 2007, S. 39-59.
144. Meyer T, Auracher M, Heeg K, Urhausen A und Kindermann W. Does cumulating endurance training at the weekends impair training effectiveness? *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil.* 13:578-584, 2006.
145. Meyer T, Auracher M, Heeg K, Urhausen A und Kindermann W. Effectiveness of low-intensity endurance training. *Int J Sports Med.* 28:33-39, 2007.
146. Meyer T, Davison R und Kindermann W. Ambulatory gas exchange measurements - current status and future options. *Int J Sports Med.* 26 Suppl 1:S19-27, 2005.
147. Meyer T, Folz C, Rosenberger F und Kindermann W. The reliability of  $Fat_{max}$ . *Scand J Med Sci Sports*, 2008 im Druck.
148. Meyer T, Gabriel H und Kindermann W. Is determination of exercise intensities as percentages of  $VO_{2max}$  or  $HR_{max}$  adequate? *Med Sci Sports Exerc.* 31:1342-1345, 1999.
149. Meyer T, Gässler N und Kindermann W. Determination of " $Fat_{max}$ " with 1 h cycling protocols of constant load. *Appl Physiol Nutr Metab.* 32:249-256, 2007.
150. Meyer T, Görge G, Schwaab B, Hildebrandt K, Walldorf J, Schäfer C, Kindermann I, Scharhag J und Kindermann W. An alternative approach for exercise prescription and efficacy testing in patients with chronic heart failure: a randomized controlled training study. *Am Heart J.* 149:e1-7, 2005.
151. Meyer T, Lucia A, Earnest CP und Kindermann W. A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters - theory and application. *Int J Sports Med.* 26 Suppl 1:S38-48, 2005.
152. Meyer T, Scharhag J und Kindermann W. Peak oxygen uptake. Myth and truth about an internationally accepted reference value. *Z Kardiol.* 94:255-264, 2005.

153. Midgley AW, McNaughton LR, Polman R und Marchant D. Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. *Sports Med.* 37:1019-1028, 2007.
154. Morris JN, Heady JA, Raffle PA, Roberts CG und Parks JW. Coronary heart-disease and physical activity of work. *Lancet.* 265:1053-1057, 1953.
155. Morris JN, Heady JA, Raffle PA, Roberts CG und Parks JW. Coronary heart-disease and physical activity of work. *Lancet.* 265:1111-1120, 1953.
156. Myers J, Prakash M, Froelicher V, Do D, Partington S und Atwood JE. Exercise capacity and mortality among men referred for exercise testing. *N Engl J Med.* 346:793-801, 2002.
157. Nevill AM, Ramsbottom R und Williams C. Scaling physiological measurements for individuals of different body size. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 65:110-117, 1992.
158. Nicklas BJ, Hackney AC und Sharp RL. The menstrual cycle and exercise: performance, muscle glycogen, and substrate responses. *Int J Sports Med.* 10:264-269, 1989.
159. Nielsen B, Hales JR, Strange S, Christensen NJ, Warberg J und Saltin B. Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J Physiol.* 460:467-485, 1993.
160. Nordby P, Saltin B und Helge JW. Whole-body fat oxidation determined by graded exercise and indirect calorimetry: a role for muscle oxidative capacity? *Scand J Med Sci Sports.* 16:209-214, 2006.
161. Oldridge NB, Donner AP, Buck CW, Jones NL, Andrew GM, Parker JO, Cunningham DA, Kavanagh T, Rechnitzer PA und Sutton JR. Predictors of dropout from cardiac exercise rehabilitation. Ontario Exercise-Heart Collaborative Study. *Am J Cardiol.* 51:70-74, 1983.
162. Oldridge NB und Jones NL. Improving patient compliance in cardiac exercise rehabilitation: effects of written agreement and self-monitoring. *J Cardiac Rehab.* 3:257-262, 1983.
163. Oldridge NB und Stoedefalke KG. Compliance and motivation in cardiac exercise programs. *Clin Sports Med.* 3:443-454, 1984.
164. Paffenbarger RS, Hyde RT, Wing AL und Hsieh CC. Physical activity, all-cause mortality, and longevity of college alumni. *N Engl J Med.* 314:605-613, 1986.
165. Pahmeier I. Drop-out und Bindung im Breiten- und Gesundheitssport. *Sportwissenschaft.* 23:117-150, 1994.
166. Perkins KA, Epstein LH, Stiller RL, Marks BL und Jacob RG. Acute effects of nicotine on resting metabolic rate in cigarette smokers. *Am J Clin Nutr.* 50:545-550, 1989.
167. Péronnet F und Massicotte D. Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Can J Sport Sci.* 16:23-29, 1991.
168. Pfitzinger P und Freedson PS. The reliability of lactate measurements during exercise. *Int J Sports Med.* 19:349-357, 1998.

169. Phillips SM, Green HJ, Tarnopolsky MA, Heigenhauser GF, Hill RE und Grant SM. Effects of training duration on substrate turnover and oxidation during exercise. *J Appl Physiol.* 81:2182-2191, 1996.
170. Pierce EF, Weltman A, Seip RL und Snead D. Effects of training specificity on the lactate threshold and  $VO_{2peak}$ . *Int J Sports Med.* 11:267-272, 1990.
171. Poehlman ET. A review: exercise and its influence on resting energy metabolism in man. *Med Sci Sports Exerc.* 21:515-525, 1989.
172. Poehlman ET, Despres JP, Bessette H, Fontaine E, Tremblay A und Bouchard C. Influence of caffeine on the resting metabolic rate of exercise-trained and inactive subjects. *Med Sci Sports Exerc.* 17:689-694, 1985.
173. Pollock ML. The quantification of endurance training programs. *Exerc Sport Sci Rev.* 1:155-188, 1973.
174. Pollock ML und Wilmore J. *Exercise in health and disease: Evaluation and prescription for prevention and rehabilitation.* 2. Auflage. Philadelphia: Saunders, 1990.
175. Poole DC und Gaesser GA. Response of ventilatory and lactate thresholds to continuous and interval training. *J Appl Physiol.* 58:1115-1121, 1985.
176. Prud'homme D, Bouchard C, Leblanc C, Landry F und Fontaine E. Sensitivity of maximal aerobic power to training is genotype-dependent. *Med Sci Sports Exerc.* 16:489-493, 1984.
177. Ravussin E und Gautier JF. Metabolic predictors of weight gain. *Int J Obes Relat Metab Disord.* 23 Suppl 1:37-41, 1999.
178. Ready AE und Quinney HA. Alterations in anaerobic threshold as the result of endurance training and detraining. *Med Sci Sports Exerc.* 14:292-296, 1982.
179. Reilly T und Peiser B. Seasonal variations in health-related human physical activity. *Sports Med.* 36:473-485, 2006.
180. Ridker PM und Libby P. Risk factors for atherothrombotic disease. In: *Braunwald's heart disease: A textbook of cardiovascular medicine.* Zipes DP, Libby P, Bonow RO und Braunwald E (Hrsg.). 7. Auflage. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2005, S. 939-958.
181. Riesen WF. Fettstoffwechsel. In: *Labor und Diagnose: Indikation und Bewertung von Laborbefunden für die medizinische Diagnostik.* Thomas L (Hrsg.). 5. Auflage. Frankfurt/ Main: TH-Books Verlagsgesellschaft, 1998, S. 171-190.
182. Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, Rosenblatt J und Wolfe RR. Substrate metabolism during different exercise intensities in endurance-trained women. *J Appl Physiol.* 88:1707-1714, 2000.
183. Rosenberger F, Meyer T und Kindermann W. Running 8000 m fast or slow: are there differences in energy cost and fat metabolism? *Med Sci Sports Exerc.* 37:1789-1793, 2005.
184. Rowland T, Hagenbuch S, Pober D und Garrison A. Exercise tolerance and thermoregulatory responses during cycling in boys and men. *Med Sci Sports Exerc.* 40:282-287, 2008.

185. Saltin B. Hemodynamic adaptations to exercise. *Am J Cardiol.* 55:42D-47D, 1985.
186. Sandvik L, Erikssen J, Thaulow E, Erikssen G, Mundal R und Rodahl K. Physical fitness as a predictor of mortality among healthy, middle-aged Norwegian men. *N Engl J Med.* 328:533-537, 1993.
187. Santiago M, Alexander J, Stull G, Serfass R, Hayday A und Leon AS. Physiological responses of sedentary women to a 20-week conditioning program of walking or jogging. *Scand J Sports Sci.* 9:33-39, 1987.
188. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD und Hawley JA. Reliability and variability of running economy in elite distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 36:1972-1976, 2004.
189. Sawka MN, Convertino VA, Eichner ER, Schnieder SM und Young AJ. Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. *Med Sci Sports Exerc.* 32:332-348, 2000.
190. Schrauwen P, van Aggel-Leijssen DP, Hul G, Wagenmakers AJ, Vidal H, Saris WH und van Baak MA. The effect of a 3-month low-intensity endurance training program on fat oxidation and acetyl-CoA carboxylase-2 expression. *Diabetes.* 51:2220-2226, 2002.
191. Scott MJ, Randolph PH und Leier CV. Reproducibility of systolic and diastolic time intervals in normal humans: an important issue in clinical cardiovascular pharmacology. *J Cardiovasc Pharmacol.* 13:125-130, 1989.
192. Seals DR, Hagberg JM, Hurley BF, Ehsani AA und Holloszy JO. Endurance training in older men and women. I. Cardiovascular responses to exercise. *J Appl Physiol.* 57:1024-1029, 1984.
193. Shahar DR, Yerushalmi N, Lubin F, Fromm P, Shahar A und Kristal-Boneh E. Seasonal variations in dietary intake affect the consistency of dietary assessment. *Eur J Epidemiol.* 17:129-133, 2001.
194. Sheskin D. Inferential statistical tests employed with two or more dependant samples (and related measures of association/ correlation). In: *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. Sheskin D (Hrsg.). 4. Auflage. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007, S. 1021-1116.
195. Sheskin D. Multivariate statistical analysis. In: *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. Sheskin D (Hrsg.). 4. Auflage. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007, S. 1417-1646.
196. Shi X, Stevens GH, Foresman BH, Stern SA und Raven PB. Autonomic nervous system control of the heart: endurance exercise training. *Med Sci Sports Exerc.* 27:1406-1413, 1995.
197. Skinner JS, Jaskólski A, Jaskólska A, Krasnoff J, Gagnon J, Leon AS, Rao DC, Wilmore JH und Bouchard C. Age, sex, race, initial fitness, and response to training: the HERITAGE Family Study. *J Appl Physiol.* 90:1770-1776, 2001.
198. Smith DA und O'Donnell TV. The time course during 36 weeks' endurance training of changes in  $VO_{2max}$  and anaerobic threshold as determined with a new computerized method. *Clin Sci (Lond).* 67:229-236, 1984.

199. Solomon SJ, Kurzer MS und Calloway DH. Menstrual cycle and basal metabolic rate in women. *Am J Clin Nutr.* 36:611-616, 1982.
200. Speakman JR und Selman C. Physical activity and resting metabolic rate. *Proc Nutr Soc.* 62:621-634, 2003.
201. Spina RJ. Cardiovascular adaptations to endurance exercise training in older men and women. *Exerc Sport Sci Rev.* 27:317-332, 1999.
202. Stanforth PR, Gagnon J, Rice T, Bouchard C, Leon AS, Rao DC, Skinner JS und Wilmore JH. Reproducibility of resting blood pressure and heart rate measurements. The HERITAGE Family Study. *Ann Epidemiol.* 10:271-277, 2000.
203. Statistisches Bundesamt (Hrsg.). *Fachserie 12/ Reihe 4, Gesundheitswesen, Todesursachen in Deutschland 2004.* Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2005.
204. Stefanick ML. Exercise and weight control. *Exerc Sport Sci Rev.* 21:363-396, 1993.
205. Stegmann H, Kindermann W und Schnabel A. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med.* 2:160-165, 1981.
206. Stisen AB, Stougaard O, Langfort J, Helge JW, Sahlin K und Madsen K. Maximal fat oxidation rates in endurance trained and untrained women. *Eur J Appl Physiol.* 98:497-506, 2006.
207. Stokes MA und Hill GL. A single, accurate measurement of resting metabolic expenditure. *JPEN J Parenter Enteral Nutr.* 15:281-287, 1991.
208. Tremblay A, Nadeau A, Fournier G und Bouchard C. Effect of a three-day interruption of exercise-training on resting metabolic rate and glucose-induced thermogenesis in training individuals. *Int J Obes.* 12:163-168, 1988.
209. Urhausen A, Coen B, Weiler B und Kindermann W. Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. *Int J Sports Med.* 14:134-139, 1993.
210. Van Marken Lichtenbelt WD, Mensink RP und Westerterp KR. The effect of fat composition of the diet on energy metabolism. *Z Ernährungswiss.* 36:303-305, 1997.
211. Van Zant RS. Influence of diet and exercise on energy expenditure - a review. *Int J Sport Nutr.* 2:1-19, 1992.
212. Venables MC und Jeukendrup AE. Endurance training and obesity: effect on substrate metabolism and insulin sensitivity. *Med Sci Sports Exerc.* 40:495-502, 2008.
213. Walker J, Collins LC, Nannini L und Stamford BA. Potentiating effects of cigarette smoking and moderate exercise on the thermic effect of a meal. *Int J Obes Relat Metab Disord.* 16:341-347, 1992.
214. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW und Whipp BJ. Physiology of exercise. In: *Principles of exercise testing and interpretation.* Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW und Whipp BJ (Hrsg.). 4. Auflage. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2005, S. 6-65.
215. Weltman A, Seip RL, Snead D, Weltman JY, Haskvitz EM, Evans WS, Veldhuis JD und Rogol AD. Exercise training at and above the lactate threshold in previously untrained women. *Int J Sports Med.* 13:257-263, 1992.

216. Wenger HA und Bell GJ. The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Med.* 3:346-356, 1986.
217. Weststrate JA, Wunnink I, Deurenberg P und Hautvast JG. Alcohol and its acute effects on resting metabolic rate and diet-induced thermogenesis. *Br J Nutr.* 64:413-425, 1990.
218. Williams PT. Physical fitness and activity as separate heart disease risk factors: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 33:754-761, 2001.
219. Wilmore JH. Body composition in sport and exercise: directions for future research. *Med Sci Sports Exerc.* 15:21-31, 1983.
220. Wilmore JH und Costill DL. Cardiovascular and respiratory adaptations to training. In: *Physiology of sport and exercise.* Wilmore JH und Costill DL (Hrsg.). 3. Auflage. Champaign: Human Kinetics, 2004, S. 271-304.
221. Wilmore JH und Costill DL. Cardiovascular disease and physical activity. In: *Physiology of sport and exercise.* Wilmore JH und Costill DL (Hrsg.). 3. Auflage. Champaign: Human Kinetics, 2004, S. 634-663.
222. Wilmore JH, Stanforth PR, Gagnon J, Leon AS, Rao DC, Skinner JS und Bouchard C. Endurance exercise training has a minimal effect on resting heart rate: the HERITAGE Family Study. *Med Sci Sports Exerc.* 28:829-835, 1996.
223. Wilmore JH, Stanforth PR, Gagnon J, Rice T, Mandel S, Leon AS, Rao DC, Skinner JS und Bouchard C. Heart rate and blood pressure changes with endurance training: the HERITAGE Family Study. *Med Sci Sports Exerc.* 33:107-116, 2001.
224. Wilmore JH, Stanforth PR, Hudspeth LA, Gagnon J, Daw EW, Leon AS, Rao DC, Skinner JS und Bouchard C. Alterations in resting metabolic rate as a consequence of 20 wk of endurance training: the HERITAGE Family Study. *Am J Clin Nutr.* 68:66-71, 1998.
225. Wilund KR. Is the anti-inflammatory effect of regular exercise responsible for reduced cardiovascular disease? *Clin Sci (Lond).* 112:543-555, 2007.
226. Wood PD, Terry RB und Haskell WL. Metabolism of substrates: diet, lipoprotein metabolism, and exercise. *Fed Proc.* 44:358-363, 1985.
227. Young AJ, Sawka MN, Levine L, Burgoon PW, Latzka WA, Gonzalez RR und Pandolf KB. Metabolic and thermal adaptations from endurance training in hot or cold water. *J Appl Physiol.* 78:793-801, 1995.
228. Zimmet PZ, Collins VR, Dowse GK, Alberti KG, Tuomilehto J, Gareeboo H und Chitson P. The relation of physical activity to cardiovascular disease risk factors in Mauritians. Mauritius Noncommunicable Disease Study Group. *Am J Epidemiol.* 134:862-875, 1991.

## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die Arbeit

**Ausmaß, Variabilität und Zeitverlauf von Anpassungserscheinungen an  
ein 50-wöchiges gesundheitssportliches Ausdauertraining**

von mir selbst ohne unerlaubte Hilfe angefertigt wurde und dass sie noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegen hat. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken nach Sinn oder Wortlaut entnommen sind, habe ich kenntlich gemacht und deren Herkunft nachgewiesen.

Friederike Scharhag-Rosenberger

## Dank

Mein erster und wichtigster Dank gilt Prof. Dr. med. Tim Meyer, der mir das Thema meiner Promotion anvertraute. Er stand mir mit konstruktiver Kritik und spannenden Anregungen zur Seite – eine Betreuung, die aus meiner Sicht nicht voranbringender hätte sein können. Besonderer Dank gebührt auch Prof. Dr. med. Wilfried Kindermann, an dessen Institut ich die Studie durchführen durfte. Sein Vertrauen und seine Ratschläge haben mir sehr geholfen. Prof. Dr. phil. Eike Emrich bin ich ebenfalls zu großem Dank verpflichtet. Ohne zu zögern übernahm er meine Betreuung von sportwissenschaftlicher Seite.

Den Mitarbeitern des Instituts für Sport- und Präventivmedizin der Universität des Saarlandes, insbesondere den Ärzten, den Mitarbeiterinnen im Sekretariat und dem Personal im Labor, danke ich für ihre Hilfe und Unterstützung. Dr. med. Frank Krämer danke ich für die orthopädische Betreuung der Probanden in seiner Praxis. Susanne Walitzek, die im Rahmen der Studie Daten für ihre Diplomarbeit erhob, gilt mein Dank für ihre Hilfe bei den Tests und der Trainingsbetreuung. Besonders danke ich auch den Studienteilnehmern, die hervorragend mitgearbeitet haben.

Ganz herzlicher Dank gilt meinem Mann Dr. med. Jürgen Scharhag. Obwohl das Promotionsvorhaben in den letzten Jahren einen beträchtlichen Teil meiner Zeit in Anspruch nahm, bestärkte er mich darin immer vorbehaltlos. Auch meinen Eltern Dr. Ing. Eckart und Christiane Rosenberger danke sehr ich für ihre liebevolle Unterstützung und ihr Vertrauen.