

**Abteilung Sport- und Bewegungsmedizin
Fachbereich Bewegungswissenschaft in der
Fakultät für Erziehungswissenschaft, Psychologie und Bewegungswissenschaft
Universität Hamburg
Leiter: Prof. Dr. med. K.-M. Braumann**

**Trainingsempfehlungen aus Herzfrequenzverläufen bei
Belastung auf unterschiedlichen Ergometertypen**

Dissertation

**zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg vorgelegt von**

Mathias Alexander Brahm

aus Hamburg

Hamburg 2007

Angenommen von der Medizinischen Fakultät

der Universität Hamburg am: 22.11.2007

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen

Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Prof. Dr. K.-M. Braumann

Prüfungsausschuss: 2. Gutachter: Prof. Dr. K. Püschel

Prüfungsausschuss: 3. Gutachter: Prof. Dr. M. Amling

Diese Dissertation ist meiner Familie gewidmet.

WIDMUNG	II
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	X
1. ARBEITSHYPOTHESE UND FRAGESTELLUNG	1
2. EINLEITUNG	2
3. MATERIAL UND METHODEN	7
3.1. PROBANDEN.....	7
3.1.1. <i>Trainingsanamnese</i>	10
3.1.2. <i>Anthropometrische Daten</i>	12
3.2. GERÄTE UND METHODEN.....	15
3.2.1. <i>Fahrradergometer</i>	15
3.2.2. <i>Ruderergometer</i>	16
3.2.3. <i>Laufband</i>	17
3.2.4. <i>Blutlaktatanalyse</i>	18
3.2.5. <i>Herzfrequenzerfassung</i>	19
3.2.6. <i>Spirometer</i>	19
3.2.7. <i>Gewicht- und Körperfettbestimmung</i>	20
3.3. VERSUCHSABLAUF	21
3.3.1. <i>Ort der Untersuchungen</i>	21
3.3.2. <i>Vor der ersten Untersuchung</i>	21
3.3.3. <i>Versuchsdurchführung</i>	23
3.3.4. <i>Fahrradergometrie</i>	24
3.3.5. <i>Ruderergometrie</i>	25
3.3.6. <i>Laufbandergometrie</i>	26
3.3.7. <i>Procedere an jedem Untersuchungstag</i>	28
3.3.8. <i>Procedere vor jeder Untersuchung</i>	29
3.3.9. <i>Procedere nach jedem Untersuchungstag</i>	29
3.3.10. <i>Procedere nach jeder Untersuchungswoche</i>	30
3.4. BESTIMMUNG DER INDIVIDUELLEN ANAEROBEN SCHWELLE.....	32
3.5. AUSWERTUNG UND STATISTIK	32
3.6. KRITIK AN DER METHODE.....	33
4. ERGEBNISSE	35
4.1. HERZFREQUENZ AN DER INDIVIDUELLEN ANAEROBEN SCHWELLE.....	35
4.1.1. <i>Herzfrequenz an der IAS Radsportler intraindividuell</i>	35
4.1.2. <i>Herzfrequenz an der IAS : Rudersportler intraindividuell</i>	37

4.2.	HERZFREQUENZ UND BLUTLAKTATKONZENTRATION IM VERLAUF: FAHRRADERGOMETER RADSPORTLER.....	39
4.2.1.	<i>Herzfrequenz Verlauf Fahrradergometer Radsportler.....</i>	40
4.2.2.	<i>Laktat Verlauf Radsportler Fahrradergometer.....</i>	41
4.3.	HERZFREQUENZ UND BLUTLAKTATKONZENTRATION IM VERLAUF: LAUFBAND RADSPORTLER ...	42
4.3.1.	<i>Herzfrequenz Verlauf Laufband Radsportler.....</i>	43
4.3.2.	<i>Laktat Verlauf Laufband Radsportler.....</i>	44
4.4.	HERZFREQUENZ UND BLUTLAKTATKONZENTRATION IM VERLAUF: RUDERERGOMETER RADSPORTLER.....	45
4.4.1.	<i>Herzfrequenz Verlauf Radsportler Ruderergometer.....</i>	46
4.4.2.	<i>Laktat Verlauf Ruderergometer Radsportler.....</i>	47
4.5.	LEISTUNGSPHYSIOLOGISCHE PARAMETER BEI MAXIMALBELASTUNG: RADSPORTLER.....	48
4.5.1.	<i>Herzfrequenz bei Maximalbelastung: Radsportler.....</i>	48
4.5.2.	<i>Laktat bei Maximalbelastung: Radsportler.....</i>	50
4.5.3.	<i>Sauerstoffaufnahme bei Maximalbelastung: Radsportler.....</i>	52
4.6.	HERZFREQUENZ UND BLUTLAKTATKONZENTRATION IM VERLAUF: RUDERERGOMETER RUDERSPORTLER.....	54
4.6.1.	<i>Herzfrequenz Verlauf Ruderergometer Rudersportler.....</i>	55
4.6.2.	<i>Laktat Verlauf Ruderergometer Rudersportler.....</i>	56
4.7.	HERZFREQUENZ UND BLUTLAKTATKONZENTRATION IM VERLAUF: LAUFBAND RUDERSPORTLER	57
4.7.1.	<i>Herzfrequenz Laufband Rudersportler.....</i>	58
4.7.2.	<i>Laktat Verlauf Laufband Rudersportler.....</i>	59
4.8.	HERZFREQUENZ UND BLUTLAKTATKONZENTRATION IM VERLAUF: FAHRRADERGOMETER RUDERSPORTLER.....	60
4.8.1.	<i>Herzfrequenz Verlauf Fahrradergometer Rudersportler.....</i>	61
4.8.2.	<i>Laktat Verlauf Fahrradergometer Rudersportler.....</i>	62
4.9.	LEISTUNGSPHYSIOLOGISCHE PARAMETER BEI MAXIMALBELASTUNG: RUDERSPORTLER	63
4.9.1.	<i>Herzfrequenz bei Maximalbelastung: Rudersportler.....</i>	63
4.9.2.	<i>Laktat bei Maximalbelastung: Rudersportler.....</i>	65
4.9.3.	<i>Sauerstoffaufnahme bei Maximalbelastung: Rudersportler.....</i>	67
5.	DISKUSSION.....	69
5.1.	HERZFREQUENZ AN DER INDIVIDUELLEN ANAEROBEN SCHWELLE.....	69
5.1.1.	<i>Herzfrequenz an der IAS: Radsportler intraindividuell.....</i>	69
5.1.2.	<i>Herzfrequenz an der IAS: Rudersportler intraindividuell.....</i>	72
5.2.	TRAININGSBEDINGTE METABOLISCHE UND KARDIOPULMONALE ADAPTATIONEN DER RADSPORTLER.....	74
5.2.1.	<i>Herzfrequenz der Radsportler.....</i>	74

5.2.1.1.	<i>Herzfrequenz der Radsportler bei Maximalbelastung interindividuell</i>	75
5.2.1.2.	<i>Herzfrequenz der Radsportler bei Maximalbelastung intraindividuell</i>	76
5.2.2.	<i>Blutlaktatkonzentration der Radsportler</i>	78
5.2.2.1.	<i>Blutlaktatkonzentration der Radsportler bei Maximalbelastung intraindividuell</i>	79
5.2.3.	<i>Sauerstoffaufnahme der Radsportler</i>	80
5.2.3.1.	<i>Sauerstoffaufnahme der Radsportler bei Maximalbelastung interindividuell</i>	80
5.2.3.2.	<i>Sauerstoffaufnahme der Radsportler bei Maximalbelastung intraindividuell</i>	82
5.3.	TRAININGSBEDINGTE METABOLISCHE UND KARDIOPULMONALE ADAPTATIONEN DER RUDERSPORTLER.....	84
5.3.1.	<i>Herzfrequenz der Rudersportler</i>	84
5.3.1.1.	<i>Herzfrequenz der Rudersportler bei Maximalbelastung interindividuell</i>	84
5.3.1.2.	<i>Herzfrequenz der Rudersportler bei Maximalbelastung intraindividuell</i>	84
5.3.2.	<i>Blutlaktatkonzentration der Rudersportler</i>	86
5.3.2.1.	<i>Blutlaktatkonzentration der Rudersportler bei Maximalbelastung intraindividuell</i>	86
5.3.3.	<i>Sauerstoffaufnahme der Rudersportler</i>	87
5.3.3.1.	<i>Sauerstoffaufnahme der Rudersportler bei Maximalbelastung interindividuell</i>	87
5.3.3.2.	<i>Sauerstoffaufnahme der Rudersportler bei Maximalbelastung intraindividuell</i>	87
6.	ZUSAMMENFASSUNG	90
7.	LITERATURVERZEICHNIS	91
8.	DANKSAGUNG	101
9.	LEBENS LAUF	102
10.	ERKLÄRUNG	103
11.	ANHANG	104
11.1.	MESSPUNKTE FÜR DIE CALIPERMETRIE.....	104
11.2.	NORMOGRAMM FÜR DIE CALIPERMETRIE (MÄNNER).....	105
11.3.	ANAMNESEBOGEN.....	106
11.4.	UNTERSUCHUNGSBOGEN	108

Abb.	Abbildung
BMI	Body Mass Index
bpm	Beats per minute
bzw.	beziehungsweise
CE	cycle ergometer (Fahrradergometer)
CLT	cyclists less trained (Radsportler wenig trainiert)
CO ₂	Kohlendioxid
CON	Control (Kontrollgruppe)
CWT	cyclists well trained (Radsportler gut trainiert)
gem.	gemäß
h	Stunde
HF	Herzfrequenz
HF _{IAS}	HF an der individuell anaeroben Schwelle
HF _{peak}	maximale Herzfrequenz
HMV	Herzminutenvolumen
IAS	individuell anaerobe Schwelle
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
km	Kilometer
l	Liter
LA	Lebensalter
Lac	Blutlaktatkonzentration
Lac _{peak}	maximale Blutlaktatkonzentration
LD	Leistungsdiagnostik
min	Minute
ml	Milliliter
mmol	Millimol
MW	Mittelwert
n	Anzahl
n.s.	nicht signifikant (P -Wert > 0,05)
O ₂	Sauerstoff
p	p-Wert (Signifikanzniveau)
P	Leistung
P _{peak}	maximale Leistung
RE	rowing ergometer (Ruderergometer)
RLT	rowers less trained (Rudersportler wenig trainiert)
rpm	rounds per minute

RWT	rowers well trained (Rudersportler gut trainiert)
s	Sekunde
s.o.	siehe oben
SD	Standardabweichung
SEM	Standardfehler des Mittelwertes
Std.	Stunden
TM	treadmill (Laufband)
VO _{2peak}	maximale Sauerstoffaufnahme
VO _{2rel}	relative Sauerstoffaufnahme
z.B.	zum Beispiel
µl	Mikroliter
%	Prozent
*	signifikant: p -Wert < 0,05
**	sehr signifikant: p -Wert < 0,01
***	hochsignifikant: p -Wert < 0,001
<	kleiner als
>	größer als

ABBILDUNG 1: PROBANDENKOLLEKTIV MIT ABKÜRZUNG	7
ABBILDUNG 2: EINSCHLUSSKRITERIEN DER PROBANDEN.....	8
ABBILDUNG 3: FAHRRADERGOMETER MODEL LODE EXCALIBUR SPORT	15
ABBILDUNG 4: RUDERERGOMETER MODELL CONCEPT II	16
ABBILDUNG 5: LAUFBAND MODELL VENUS	17
ABBILDUNG 6 LAKTATANALYSEGERÄT EBIO PLUS 6668 V1.61	18
ABBILDUNG 7: BESTIMMUNG DER HAUTFALTENDICKE NACH PARIZKOVA.	20
ABBILDUNG 8: MÖGLICHE TESTKOMBINATIONEN	22
ABBILDUNG 9: ABKÜRZUNG DER ERGOMETERTYPEN	22
ABBILDUNG 10: KAPILLARBLUTENTNAHME AUS DEM HYPERÄMISIERTEN OHRLÄPPCHEN.....	23
ABBILDUNG 11: FAHRRADSPIROERGOMETRIE.....	24
ABBILDUNG 12: RUDERSPIROERGOMETRIE	25
ABBILDUNG 13: LAUFBANDSPIROERGOMETRIE.....	26
ABBILDUNG 14: SCHEMA ZUM ABLAUF DER DREI SPIROERGOMETERTESTS	27
ABBILDUNG 15: SCHEMA ZUR TESTVOR- UND TESTNACHBEREITUNG.....	31
ABBILDUNG 16: HERZFREQUENZ AN DER IAS (MW / SEM) RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE – ALLE TESTS INTRAINDIVIDUELL	36
ABBILDUNG 17: HERZFREQUENZ AN DER IAS (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE – ALLE TESTS INTRAINDIVIDUELL.....	38
ABBILDUNG 18: VERLAUF DER HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER FAHRRADERGOMETRIE.....	40
ABBILDUNG 19: VERLAUF DES LAKTATS (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER FAHRRADERGOMETRIE.....	41
ABBILDUNG 20: VERLAUF DER HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DES LAUFBANDTESTS.....	43
ABBILDUNG 21: VERLAUF DES LAKTATS (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DES LAUFBANDTESTS.....	44
ABBILDUNG 22: VERLAUF DER HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER RUDERERGOMETRIE.....	46
ABBILDUNG 23: VERLAUF DES LAKTATS (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER RUDERERGOMETRIE.....	47
ABBILDUNG 24: MAXIMALE HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON): ALLE TESTS	49
ABBILDUNG 25: MAXIMALES LAKTAT (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON): ALLE TESTS	51
ABBILDUNG 26: MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNAHME (MW / SEM) DER RADSPORTLER (CWT / CLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON): ALLE TESTS	53

ABBILDUNG 27: VERLAUF DER HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER RUDERERGOMETRIE	55
ABBILDUNG 28: VERLAUF DES LAKTATS (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER RUDERERGOMETRIE	56
ABBILDUNG 29: VERLAUF DER HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DES LAUFBANDTESTS	58
ABBILDUNG 30: VERLAUF DES LAKTATS (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DES LAUFBANDTESTS	59
ABBILDUNG 31: VERLAUF DER HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER FAHRRADERGOMETRIE	61
ABBILDUNG 32: VERLAUF DES LAKTATS (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON) WÄHREND DER FAHRRADERGOMETRIE	62
ABBILDUNG 33: MAXIMALE HERZFREQUENZ (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON): ALLE TESTS	64
ABBILDUNG 34: MAXIMALES LAKTAT (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON): ALLE TESTS	66
ABBILDUNG 35: MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNAHME (MW / SEM) DER RUDERSPORTLER (RWT / RLT) UND DER KONTROLLGRUPPE (CON): ALLE TESTS	68

TABELLE 1: DESKRIPTIVE STATISTIK TRAININGSANAMNESE DER RAD- UND RUDERSPORTLER.....	11
TABELLE 2: DESKRIPTIVE STATISTIK ANTHROPOMETRISCHE DATEN.....	14
TABELLE 3: DELTA DER HF (BPM) BEIM TRANSFER DER HF _{IAS} ZWISCHEN ZWEI ERGOMETRIEN - RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE.....	35
TABELLE 4: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ AN DER IAS / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / ALLE TESTS INTRAININDIVIDUELL.....	36
TABELLE 5: DELTA DER HF (BPM) BEIM TRANSFER DER HF _{IAS} ZWISCHEN ZWEI ERGOMETRIEN – RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE.....	37
TABELLE 6: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ AN DER IAS / RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / ALLE TESTS INTRAININDIVIDUELL.....	38
TABELLE 7: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ (BPM) / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / FAHRRADERGOMETER	40
TABELLE 8: DESKRIPTIVE STATISTIK LAKTAT (MMOL/L) / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / FAHRRADERGOMETER	41
TABELLE 9: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ (BPM) / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE/ LAUFBAND	43
TABELLE 10: DESKRIPTIVE STATISTIK LAKTAT (MMOL/L) / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE/ LAUFBAND	44
TABELLE 11: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ (BPM) / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / RUDERERGOMETER.....	46
TABELLE 12: DESKRIPTIVE STATISTIK LAKTAT (MMOL/L) / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / RUDERERGOMETER.....	47
TABELLE 13: : DESKRIPTIVE STATISTIK MAXIMALE HERZFREQUENZ (BPM) / RADSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE/ ALLE TEST	49
TABELLE 14: DESKRIPTIVE STATISTIK MAXIMALES LAKTAT (MMOL/L) / RADSPORTLER / ALLE TEST	51
TABELLE 15: DESKRIPTIVE STATISTIK MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNABME (ML/MIN/KG) / RADSPORTLER / ALLE TEST	53
TABELLE 16: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ (BPM) / RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / RUDERERGOMETER.....	55
TABELLE 17: DESKRIPTIVE STATISTIK LAKTAT (MMOL/L) / RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / RUDERERGOMETER.....	56
TABELLE 18: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ (BPM) / RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / LAUFBAND	58
TABELLE 19: DESKRIPTIVE STATISTIK LAKTAT (MMOL/L) / RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / LAUFBAND	59
TABELLE 20: DESKRIPTIVE STATISTIK HERZFREQUENZ (BPM) / RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE / FAHRRADERGOMETER	61

TABELLE 21: DESKRIPTIVE STATISTIK LAKTAT (MMOL/L) / RUDERSPORTLER UND KONTROLLGRUPPE /
 FAHRRADERGOMETER 62

TABELLE 22: DESKRIPTIVE STATISTIK MAXIMALE HERZFREQUENZ (BPM) / RUDERSPORTLER UND
 KONTROLLGRUPPE / ALLE TEST 64

TABELLE 23: DESKRIPTIVE STATISTIK MAXIMALES LAKTAT (MMOL/L) / RUDERSPORTLER UND
 KONTROLLGRUPPE / ALLE TEST 66

TABELLE 24: DESKRIPTIVE STATISTIK MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNAHME (ML/MIN/KG) / RUDERSPORTLER
 UND KONTROLLGRUPPE – ALLE TESTS 68

1. Arbeitshypothese und Fragestellung

Bei der Vorgabe von individuell optimalen Trainingsherzfrequenzen aus ergometrischen Untersuchungen, auf verschiedenen Ergometern, ergibt sich in der Einsetzung, vor allem in der Fitnessszene, immer wieder die Frage der Übertragbarkeit der, auf verschiedenen Ergometern ermittelten, Herzfrequenzen. Entscheidend hierfür ist der Trainingsstatus und die damit verbundenen metabolischen und kardiopulmonale Adaptationen.

Zur Beantwortung dieser Frage wurden neben Fitnesssportlern (Kontrollgruppe) auch Breiten- und Leistungssportler (Rad- und Rudersport) im Rahmen einer Spiroergometrie auf verschiedenen Ergometern (Fahrrad-, Ruderergometer und Laufband) untersucht.

2. Einleitung

Zur Durchführung eines möglichst effizienten Trainings mit einem optimalen Trainingseffekt, ist es unabdingbar, je nach individueller Zielsetzung, in entsprechenden Intensitätsbereichen zu trainieren [67, 121]. Dies gilt für den Leistungssportler, der die bestmögliche Leistung erreichen will, genauso wie für den Breiten- und Fitnesssportler, dem es um die Erhaltung der Gesundheit und / oder die Gewichtsreduktion geht.

Als hilfreichen und leicht anwendbaren Parameter für die Trainingssteuerung hat sich die Herzfrequenz (HF) erwiesen, die jederzeit mittels tragbarer Herzfrequenzmesser bestimmt werden kann. Unter aeroben Bedingungen steigt die HF proportional zur Leistung. Diese Beziehung ist intraindividuell valide [8]. Es gibt verschiedene Modelle zur Berechnung der Intensitätsbereiche in Abhängigkeit der individuellen maximalen Herzfrequenz (HF_{max}). Beispielsweise empfiehlt das American College of Sports Medicine (ACSM) Intensitätsbereiche prozentual von der HF_{max} ($\%HF_{max}$) – z.B. moderates Ausdauertraining bei 60 - 90 % der HF_{max} , wobei 90 % das obere aerobe Limit darstellen [101]. Dies setzt die Kenntnis der individuellen HF_{max} des Athleten voraus, wobei diese z.B. bei herzkranken Sportlern (koronare Herzkrankheit) nicht erhoben werden kann, oder aber man benutzt die altersabhängige HF_{max} gemäß der Gleichung: $HF_{max} = 220 - \text{Lebensalter}$ [2, 113]. Letzteres ist aufgrund der Tatsache, dass die HF_{max} interindividuell verschieden [101, 141, 142] und daher nicht valide ist, zur Bestimmung der Intensitätsbereiche nicht zu empfehlen. Interindividuell unterscheidet sich die HF bei gleichen Belastungsintensitäten, bedingt durch eine unterschiedliche metabolische Belastung und einem unterschiedlichen Trainingsstatus. Daher hat sich die Bestimmung der jeweiligen Herzfrequenzbereiche anhand der anaeroben Schwelle (AS) empfohlen. Die AS ist definitionsgemäß die Intensität, bei der sich ein maximales Laktat Steady State (= Gleichgewicht) einstellt und die man bis zu einer Stunde halten kann [21, 140]. Diese Tatsache macht die AS zu einem bedeutenden Beziehungspunkt zur Bestimmung der Trainingsintensitäten. Es liegen

verschiedene Konzepte zur Ermittlung der AS vor, die auf der Nutzung der Atemgase (Respiratorische Schwelle) [41, 139] oder aber der Blutlaktatkonzentration (Laktat Schwelle) [18, 28, 56, 65, 67, 76, 115, 121, 147] beruhen.

Das 1964 von Wassermann entwickelte Konzept der respiratorischen Schwelle wird heute vor allem in den angelsächsischen Ländern zur Leistungsdiagnostik eingesetzt. Grundlage hierfür ist die Tatsache, dass sich unter aeroben Bedingungen das Verhältnis von O₂ zu CO₂ expiratorisch proportional verhält. Mit steigender Intensität und pH-Wert Abfall wird das anfallende H⁺ im Blut abgepuffert (Bicarbonatpuffer). Hierbei entsteht zusätzliches, nicht aus dem aeroben Stoffwechsel stammendes CO₂ (excess CO₂) und hat einen überproportionalen CO₂ Anstieg zur Folge [85]. Dieser Punkt markiert den Wechsel des aeroben zum anaeroben Stoffwechsel und wird respiratorische Schwelle genannt [139].

Für die in Deutschland üblicherweise genutzte Laktat-Schwelle werden im Rahmen einer sportartspezifischen Leistungsdiagnostik (LD) Laktatproben der Athleten gewonnen und ausgewertet. Zur Energiebereitstellung werden auf zellulärer Ebene neben Fetten (Lipolyse) vor allem bei höheren Intensitäten Glukose aus der Muskulatur und Glykogen aus der Leber im Rahmen der Glykolyse verstoffwechselt. Für das hierbei gebildete Pyruvat stehen zwei Stoffwechselwege zur Verfügung. Zum einen kann es unter ausreichender Sauerstoffversorgung in den Mitochondrien zu Acetyl-CoA metabolisiert und in den Zitatzyklus eingeschleust werden, oder aber temporär zu Laktat umgewandelt werden, wenn die aeroben Kapazitäten erschöpfen [104]. Das gebildete Laktat diffundiert in den Blutkreislauf und kann peripher leicht gemessen werden. Ein Tropfen kapillarisierten Blutes aus Ohrläppchen oder Fingerbeere genügt, um die Laktatkonzentration mittels einfacher enzymatischer Testverfahren zu bestimmen [88]. Während der Belastung findet neben der Laktatproduktion gleichzeitig die Laktatelimination/ -utilisation in der nicht aktiv eingesetzten Skelettmuskulatur und dem Herzmuskel statt (Gluconeogenese). Die Summe der sich gegensinnig und gleichzeitig ablaufenden Prozesse der Laktatproduktion bzw. -elimination stellt die jeweilige aktuelle Blutlaktatkonzentration dar. Sind Laktatproduktion bzw. -elimination gleich groß, so ist das Verhältnis ausgeglichen und es besteht ein so genannter „steady state“. Kommt es

jedoch zu einer Intensitätssteigerung, mit steigender Laktatkonzentration, so dekompensiert das System rasch und es kommt zum exponentiellen Anstieg der Laktatkurve mit finalem Belastungsabbruch. Ursächlich hierfür ist zum einen die vasokonstriktorsiche Wirkung der Katecholamine (Adrenalin / Noradrenalin) an den an der Laktatelimination beteiligten Muskelgruppen, zum anderen der niedrige pH Wert, der die Schlüsselenzyme der Glykolyse (vor allem Phosphofruktokinase) konsekutiv hemmt und damit die Energiebereitstellung [104]. Dieser Umkehrpunkt wird als anaerobe Schwelle (AS) bezeichnet und kann anhand der Laktatleistungskurve bestimmt werden. Die Möglichkeiten der Terminierung der Schwelle sind vielfältig und teilen sich in so genannte starre Schwellenkonzepte, z.B. 4 mmol/l Schwelle [76] und in jene, die die individuelle anaerobe Schwelle (IAS) [18, 28, 65, 115, 121] bestimmen [145].

Die zur Bestimmung der IAS essentiellen leistungsphysiologischen Parameter (Blutlaktatkonzentration und Herzfrequenz) werden im Rahmen einer sportartspezifischen Leistungsdiagnostik (LD) auf dem Laufband, Rad- oder Ruderergometer ermittelt. Anhand der HF an der IAS lassen sich die jeweiligen Trainingsintensitäten prozentual bestimmen. Mit diesen Trainingsempfehlungen haben die Athleten die Möglichkeit, ihr Training mittels Herzfrequenzuhren entsprechend dem Trainingsplan zu dosieren und zu kontrollieren. Vor allem in Ausdauersportarten ist dies wichtig, um z.B. bei Trainingseinheiten mit großen Umfängen auf Dauer nicht zu intensiv zu trainieren, oder aber im Breiten- und Fitnesssport, in dem es darum geht, einen möglichst hohen Anteil der β -Oxidation zu gewährleisten bzw. die kardiovaskuläre Leistungsfähigkeit zu verbessern. Bedingt durch Ausdauertraining kommt es zu strukturellen (z.B. Skelettmuskulatur, Herz) [6, 50-52, 60, 62, 103, 106, 126, 133, 137, 143], und metabolischen (Energiebereitstellung) [7, 10, 12, 29, 42, 44, 45, 50, 53, 55, 59, 63, 66, 74, 75, 84, 90, 95-97, 105, 119, 120, 131, 136, 148] Adaptationen der Athleten. Aufgrund der Adaptation des Herzkreislaufsystems, kommt es zu einer Absenkung der Herzfrequenz (HF) [19, 20, 26, 64, 72, 73, 128, 136]. Ursächlich hierfür ist das vermehrte Plasmavolumen [60, 62, 106, 137] mit konsekutiver Erhöhung des Schlagvolumens [125, 128] und die verminderte sympathoadrenerge Stimulation [60, 144] infolge eines erhöhten Parasympathikotonus. Darüber hinaus kann sich eine physiologische Myokardhypertrophie, als später Adaptationsprozess von

jahrelangem intensiven Ausdauertraining [6, 133, 143], mit einer weiteren Zunahme des Schlagvolumens [35, 48, 128] entwickeln. Aufgrund einer höheren Mitochondriendichte bzw. -volumen und Kapillarisation der Muskulatur [50-52, 103] und der damit verbundenen gesteigerten aeroben Kapazität (höhere aerobe Enzymausstattung [29, 44, 53, 97, 105, 120, 131], erhöhte Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) [29, 44, 53, 90, 97, 105, 120, 131, 136]), verläuft die Laktatleistungskurve (Lac) charakteristischerweise flacher [7, 10, 12, 45, 50, 55, 63, 70, 74, 148] (Abb. 22). In der Summe führen die genannten Adaptationen mit einer verbesserten Leistungsfähigkeit zu einer Rechtsverschiebung der Laktatleistungskurve und IAS [45, 55, 57, 63, 74].

Die Trainingsempfehlungen, anhand der ermittelten IAS, gelten in erster Linie für die Sportart, die während der LD durchgeführt wurde, so dass der Transfer der Trainingsempfehlungen einer LD auf andere Sportarten im Allgemeinen nicht zu empfehlen ist [102]. Es geschieht dennoch häufig, da eine weitere spezifische Leistungsdiagnostik für eine andere Sportart zu aufwendig bzw. zu kostspielig ist. Gerade im Fitness- und Breitensport kann man nicht erwarten, dass dieser Aufwand betrieben wird, denn in diesem Bereich sind eingehende Leistungsdiagnostiken für individuelle Trainingsempfehlungen generell selten. Daher werden in der Praxis, z.B. beim Transfer der HF Bereiche, die auf einer Fahrradergometrie erhoben wurden und auf das Laufen übertragen werden sollen (und vice versa), grobe Schätzungen angewandt. Hierbei wird angenommen, dass die HF an der IAS (HF_{IAS}) beim Laufen um bis zu 20 bpm höher liegt als beim Radfahren.

Diese groben Regeln sind jedoch wenig in der Literatur diskutiert [102]. Es konnten bei einem großen Kollektiv von verschiedenen Sportlern (Läufer, Radfahrer, Triathleten und Freizeitsportler) mittleren Leistungsniveaus (IAS Fahrradergometer: $196,2 \pm 47,1$ Watt; IAS Laufband: $12,9 \pm 1,9$ km/h) signifikante Unterschiede gezeigt werden, die die üblich gebrauchten o.g. Schätzungen in der Tendenz bestätigen [102]. Aufgrund der Tatsache, dass das Leistungsniveau in der zitierten Studie innerhalb einer Probandengruppe einheitlich war, stellte sich die Frage, inwieweit sich ggf. das Delta der HF_{IAS} , erhoben auf verschiedenen Ergometern, mit Sportlern unterschiedlichen Leistungsniveaus und

Trainingspezifität, verändert. Daher wurden im Rahmen dieser Studie neben Freizeitsportlern (Kontrollgruppe) Leistungs- und Breitensportler aus dem Rad- und Rudersport rekrutiert. Darüber hinaus wurde der Vergleich nicht nur zwischen zwei sondern drei Sportarten durchgeführt (Radfahren, Rudern, Laufen). Aus diesen Ausführungen ergibt sich folgende Fragestellung:

Sind Herzfrequenzempfehlungen, die auf einer spezifischen Leistungsdiagnostik basieren, in Abhängigkeit der Trainingspezifität, auf andere Belastungsformen übertragbar?

3. Material und Methoden

3.1. Probanden

Es wurden insgesamt 60 männliche Probanden im Alter zwischen 18-33 Jahren untersucht. Das Probandenkollektiv setzte sich aus 24 Radsportlern, 25 Rudersportlern und aus 11 Probanden, die keinen Ausdauersport betreiben (Kontrollgruppe), zusammen; die Gruppe der Rad- und Rudersportler unterteilte sich weiter in gut und wenig trainierte Sportler (Abb. 1).

Die Probanden wurden aus den örtlichen Hamburger Rad- und Rudervereinen bzw. per Aushang an der Universität rekrutiert (Letzteres gilt für die Kontrollgruppe).

Probandenkollektiv mit Abkürzungen:		
13 x Radsportler gut trainiert	➔	CWT (Cyclists <u>W</u> ell <u>T</u> rained)
11 x Radsportler wenig trainiert	➔	CLT (Cyclists <u>L</u> ess <u>T</u> rained)
14 x Rudersportler gut trainiert	➔	RWT (Rowers <u>W</u> ell <u>T</u> rained)
11 x Rudersportler wenig trainiert	➔	RLT (Rowers <u>L</u> ess <u>T</u> rained)
11 x Kontrollgruppe	➔	CON (<u>C</u> ontrol)

Abbildung 1: Probandenkollektiv mit Abkürzung

Die Einteilung der Probandengruppen erfolgte gemäß den vorher festgelegten Einschlusskriterien (Abb. 2). Für die Rad- bzw. Rudersportler galten die spezifischen

Einschlusskriterien: die Anzahl der Trainingsjahre, der Trainingsaufwand pro Woche in Stunden bzw. Anzahl der Einheiten pro Woche und ob Wettkampferfahrungen vorhanden waren. Die Gruppe der gut trainierten Sportler setzte sich in erster Linie aus Leistungssportlern zusammen, die zum Teil der nationalen und internationalen Spitze angehörten. Die wenig trainierten Athleten waren Breitensportler, die kein zielgerichtetes Training absolvierten. Für die Kontrollgruppe galt, dass kein regelmäßiges Ausdauertraining in Form von Lauf-, Rad- oder Rudertraining ausgeübt werden durfte (Abb. 2).

Einschlusskriterien allgemein:

- Geschlecht: männlich
- Alter: mind. 18 bis höchstens 33 Jahren
- Sportgesund – keine pathologischen Befunde in der orientierenden sportmedizinischen Eingangsuntersuchung

Einschlusskriterien gut trainierte Athleten:

- > 7 Trainingsjahre
- ≥ 5 Trainingseinheiten pro Woche
- > 10 Std. Training pro Woche in der Hauptsportart
- Wettkampferfahrungen (national und/oder international) in der Hauptsportart

Einschlusskriterien wenig trainierte Athleten:

- < 7 Trainingsjahre
- < 5 Trainingseinheiten pro Woche
- < 10 Std. Training pro Woche in der Hauptsportart
- Keine Wettkampferfahrungen in der Hauptsportart

Einschlusskriterien Kontrollgruppe:

- Kein regelmäßiges Ausdauertraining im Laufen, Radfahren und Rudern

Abbildung 2: Einschlusskriterien der Probanden

Teilnahmevoraussetzung war, dass die Probanden sportgesund waren und keine gesundheitlichen Beschwerden hatten, die zu Leistungseinschränkungen hätten führen können. Dies wurde eingangs durch eine orientierende sportmedizinische Untersuchung (incl. Ruhe EKG, Lungenfunktionstest) sichergestellt. Jeder Proband wurde ferner zu Beginn nach einem umfangreichen standardisierten Anamnesebogen befragt (Kap. 11.3.).

Die Probanden wurden vor Beginn der Studie über den Ablauf, die Risiken und die Ziele der Untersuchungen informiert. Es wurde ihnen erläutert, dass sie zu jeder Zeit die jeweilige Untersuchung abbrechen könnten. Sie sollten zu der jeweiligen Spiroergometrie in einem erholten Zustand kommen, d.h. nach einem Ruhetag oder nach Kompensationstraining. Ferner sollten sie ausreichend Flüssigkeit und Kohlenhydrate zu sich genommen haben, um das Risiko einer eventuellen Glykogenverarmung zu minimieren [57, 146], was die Validität der Messwerte eingeschränkt hätte. Dies wurde mittels der Bestimmung des Ruhelaktatwertes und der Trainingsanamnese der letzten Trainingstage belegt.

Mit einer schriftlichen Einverständniserklärung (Kap. 11.3.) bestätigten die Teilnehmer ihre freiwillige Teilnahme an den Untersuchungen und dass sie über die Nutzung der erhobenen Daten aufgeklärt wurden.

3.1.1. Trainingsanamnese

Die Radsportler (CWT vs. CLT) unterschieden sich gemäß ihrem unterschiedlichem Leistungsniveau signifikant in: Trainingsjahren ($10,8 \pm 6,7$ vs. $6,1 \pm 4,1$ Jahre) ($p < 0,05$), Trainingseinheiten pro Woche ($4,9 \pm 0,6$ vs. $3,0 \pm 0,9$ n) ($p < 0,001$), Zeit pro Trainingseinheit ($3,0 \pm 0,5$ vs. $2,1 \pm 0,7$ Std.) ($p < 0,01$) und Trainingszeit pro Woche ($14,9 \pm 3,8$ vs. $6,6 \pm 3,7$ Std.) ($p < 0,001$) (Tab. 1). Die Durchführung von Ausgleichstraining in Form von Lauftraining wurde verneint.

Mit Ausnahme der Trainingszeit pro Einheit, die $1,9 \pm 0,2$ vs. $1,7 \pm 0,3$ Std. betrug ($p > 0,05$), unterschied sich die RWT von der RLT-Gruppe signifikant ($p < 0,01$) in den anderen Parametern der Trainingsanamnese (Trainingsjahre: $8,0 \pm 4,1$ vs. $3,2 \pm 3,1$; Trainingseinheiten pro Woche: $7,6 \pm 2,8$ vs. $4,1 \pm 1,8$ n und Trainingszeit pro Woche: $14,3 \pm 6,1$ vs. $7,3 \pm 4,1$ Std.) entsprechend ihres besseren Leistungsniveaus (Tab. 1). Es ist zu erwähnen, dass die RWT-Gruppe sporadisch ungezieltes Lauftraining absolvierte.

Vergleicht man die gut trainierten Athleten interindividuell (CWT vs. RWT) bezüglich ihrer Trainingsanamnese, so trainierte die RWT-Gruppe signifikant ($p < 0,05$) häufiger pro Woche ($7,6 \pm 2,8$ vs. $4,9 \pm 0,6$ n) ($p < 0,05$), jedoch in signifikant kürzeren Trainingseinheiten ($1,9 \pm 0,2$ vs. $3,0 \pm 0,5$ Std.) ($p < 0,001$). In Trainingsjahren bzw. Trainingszeit pro Woche weisen die beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede auf ($p > 0,05$) (Tab. 1).

Interindividuell verglichen, unterscheiden sich die wenig trainierten Sportler (CLT vs. RLT) signifikant in den Trainingsjahren ($p < 0,05$): Die CLT-Gruppe trainierte fast doppelt so lange wie die RLT-Gruppe ($6,1 \pm 4,1$ vs. $3,2 \pm 3,1$ Jahre). In den anderen Parametern der Trainingsanamnese gibt es keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) (Tab. 1).

Die Probanden der Kontrollgruppe haben kein regelmäßiges und leistungsorientiertes Ausdauertraining in Form von Lauf-, Rad- und Rudertraining absolviert. Ein Proband hat regelmäßig gefochten, ein weiterer hat von Zeit zu Zeit Fußball gespielt. Die übrigen

haben keinen regelmäßigen Sport ausgeübt, ihre sportliche Aktivität bestand zum Teil in der Nutzung des Fahrrades im Alltag oder aber im gelegentlichen Joggen.

Tabelle 1: deskriptive Statistik Trainingsanamnese der Rad- und Rudersportler

	Training [Jahre]	Trainingseinheiten [x/Woche]	Zeit/Einheit [Std]	Zeit/Woche [Std]	Wettkampferfahrungen	
Mittelwert [MW]						
CWT	10,8	4,9	3,0	14,9	Ja	
CLT	6,1	3,0	2,1	6,6	Nein	
RWT	8,0	7,6	1,9	14,3	Ja	
RLT	3,2	4,1	1,7	7,3	Nein	
Standardabweichung [SD]						
CWT	6,7	0,6	0,5	3,8	Ja	
CLT	4,1	0,9	0,7	3,7	Nein	
RWT	4,1	2,8	0,2	6,1	Ja	
RLT	3,1	1,8	0,3	4,1	Nein	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]						
CWT	1,9	0,2	0,1	1,0	Ja	
CLT	1,2	0,3	0,2	1,1	Nein	
RWT	1,1	0,8	0,1	1,7	Ja	
RLT	0,9	0,5	0,1	1,2	Nein	
Anzahl [n]						
CWT	13	13	13	13	Ja	
CLT	11	11	11	11	Nein	
RWT	14	14	14	14	Ja	
RLT	11	11	11	11	Nein	
p-Wert [grau unterlegt, falls $p < 0,05$]						
global	Kruskal-Wallis-Test	0,001	0,000	0,000	0,000	-
CWT / CLT	Mann-Whitney-U-Test	0,033	0,000	0,003	0,000	-
RWT / RLT	Mann-Whitney-U-Test	0,003	0,005	0,057	0,008	-
CWT / RWT	Mann-Whitney-U-Test	0,222	0,011	0,000	0,825	-
CWT / RLT	Mann-Whitney-U-Test	0,001	0,018	0,000	0,001	-
CLT / RWT	Mann-Whitney-U-Test	0,178	0,000	0,501	0,001	-
CLT / RLT	Mann-Whitney-U-Test	0,042	0,139	0,177	0,366	-

3.1.2. Anthropometrische Daten

Die Radsportler (CWT vs. CLT) waren in Bezug auf Alter, Größe, Gewicht und BMI gleich ($p > 0,05$). Entsprechend ihres unterschiedlichen Leistungsniveaus unterschieden sie sich signifikant in ihrem prozentualen Körperfettanteil ($9,5 \pm 1,3$ vs. $14,2 \pm 3,8$ %) ($p < 0,001$) und der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2peak}) (CE: $68,0 \pm 6,0$ vs. $56,4 \pm 6,4$ ml/min/kg ($p < 0,001$); RE: $59,5 \pm 4,8$ vs. $51,1 \pm 6,5$ ml/min/kg ($p < 0,01$); TM: $63,5 \pm 4,6$ vs. $55,1 \pm 5,6$ ml/min/kg ($p < 0,01$)) auf allen Ergometertypen (Tab. 2).

In ähnlicher Weise wie bei den Radsportlern stellten sich die anthropometrischen Daten der Rudersportler (RWT vs. RLT) dar: keine Signifikanz ($p > 0,05$) in Alter, Größe, Gewicht und BMI, jedoch in Abhängigkeit des unterschiedlichen Trainingsstatus gab es signifikante Unterschiede im prozentualen Körperfettanteil ($10,2 \pm 2,3$ vs. $14,0 \pm 5,1$ %) ($p < 0,01$) und der VO_{2peak} (RE: $68,1 \pm 7,2$ vs. $59,6 \pm 8,0$ ml/min/kg ($p < 0,05$); CE: $64,5 \pm 7,2$ vs. $56,5 \pm 9,5$ ml/min/kg ($p < 0,05$)). Eine Ausnahme stellte die VO_{2peak} auf dem TM dar, die bei der RWT und RLT-Gruppe ähnlich hoch lag ($p > 0,05$) (Tab. 2).

Interindividuell verglichen, ist die RWT-Gruppe signifikant größer als die CWT ($184,4 \pm 4,5$ vs. $179,8 \pm 5,2$ cm) ($p < 0,05$) und weist entsprechend ihrer Trainingspezifität eine signifikant höhere VO_{2peak} auf dem RE auf ($68,1 \pm 7,2$ vs. $59,5 \pm 4,8$ ml/min/kg) ($p < 0,01$). Auch beim Vergleich der wenig trainierten Athleten, also der RLT mit der CLT-Gruppe, ist neben dem signifikant jüngerem Alter ($22,7 \pm 4,2$ vs. $27,1 \pm 3,1$ Jahre) ($p < 0,05$), die signifikant höhere VO_{2peak} der RLT-Gruppe auf dem RE hervorzuheben ($59,6 \pm 8,0$ vs. $51,1 \pm 6,5$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) (Tab. 2).

Zwischen der Kontrollgruppe und den anderen Gruppen (CWT, RWT, CLT, RLT) gab es in Alter, Größe, Gewicht und BMI keinen signifikanten Unterschied ($p > 0,05$). Eine Ausnahme stellt die CLT-Gruppe dar, die sich im Alter signifikant von der CON-Gruppe unterschied ($27,1 \pm 3,1$ vs. $23,6 \pm 2,8$ Jahre) ($p < 0,05$). In Bezug auf den prozentualen Körperfettanteil gab es signifikante Unterschiede im Vergleich zu den gut trainierten Athleten (CON: $16,4 \pm 5,5$ vs. CWT: $9,6 \pm 1,3$ ($p < 0,001$) bzw. RWT: $10,2 \pm 2,3$ % ($p <$

0,01)). Signifikante Unterschiede in der VO_{2peak} gab es, verglichen mit den gut trainierten Athleten, auf allen Ergometertypen (*CON CE*: $47,6 \pm 6,4$ vs. *CWT*: $68,0 \pm 6,0$ bzw. *RWT*: $64,5 \pm 7,7$ ml/min/kg ($p < 0,001$); *CON RE*: $47,0 \pm 6,5$ vs. *CWT*: $59,5 \pm 4,8$ bzw. *RWT*: $68,1 \pm 7,2$ ml/min/kg ($p < 0,001$); *CON TM*: $53,8 \pm 7,3$ vs. *CWT*: $63,5 \pm 4,6$ ($p < 0,01$) bzw. *RWT*: $67,7 \pm 6,9$ ml/min/kg ($p < 0,001$)) (Tab. 2). Von der CLT-Gruppe unterschied sich die Kontrollgruppe signifikant in ihrer VO_{2peak} auf dem CE und RE (*CE*: $47,6 \pm 6,4$ vs. $56,4 \pm 6,4$ ml/min/kg ($p < 0,01$); *RE*: $47,0 \pm 6,5$ vs. $51,1 \pm 6,5$ ml/min/kg ($p < 0,05$)), wohingegen sie sich von der RLT-Gruppe signifikant auf dem RE bzw. TM unterschied (*RE*: $47,0 \pm 6,5$ vs. $59,6 \pm 8,0$ ml/min/kg; *TM*: $53,8 \pm 7,3$ vs. $61,5 \pm 8,4$ ml/min/kg ($p < 0,05$)) (Tab. 2).

Tabelle 2: deskriptive Statistik anthropometrische Daten

	Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m ²]	Körperfett [%]	VO _{2peak} [ml/min/kg] Radergometer	VO _{2peak} [ml/min/kg] Ruderergometer	VO _{2peak} [ml/min/kg] Laufband	
Mittelwert [MW]									
CWT	25,8	179,8	73,1	22,6	9,6	68,0	59,5	63,5	
CLT	27,1	180,2	76,8	23,6	14,2	56,4	51,1	55,1	
RWT	21,4	184,4	74,3	21,8	10,2	64,5	68,1	67,7	
RLT	22,7	179,6	74,4	23,0	14,0	56,5	59,6	61,5	
NOS	23,6	182,3	76,2	22,9	16,4	47,6	47,0	53,8	
Standardabweichung [SD]									
CWT	5,1	5,2	7,8	1,9	1,3	6,0	4,8	4,6	
CLT	3,1	6,3	8,2	1,8	3,8	6,4	6,5	5,6	
RWT	3,4	4,5	6,7	1,7	2,3	7,2	7,2	6,9	
RLT	4,2	6,3	8,6	1,8	5,1	9,5	8,0	8,4	
NOS	2,8	4,8	7,5	1,9	5,5	6,4	6,5	7,3	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]									
CWT	1,4	1,4	2,2	0,5	0,4	1,7	1,3	1,3	
CLT	0,9	1,9	2,5	0,5	1,1	1,9	2,0	1,7	
RWT	0,9	1,2	1,8	0,4	0,6	1,9	1,9	1,9	
RLT	1,3	1,9	2,6	0,5	1,5	2,9	2,4	2,5	
NOS	0,8	1,5	2,3	0,6	1,6	1,9	2,0	2,2	
Anzahl [n]									
CWT	13	13	13	13	13	13	13	13	
CLT	11	11	11	11	11	11	11	11	
RWT	14	14	14	14	14	14	14	14	
RLT	11	11	11	11	11	11	11	11	
NOS	11	11	11	11	11	11	11	11	
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]									
global	Kruskal-Wallis-Test	0,004	0,050	0,851	0,145	0,000	0,000	0,000	0,000
CWT vs. CLT	Mann-Whitney-U Test	0,126	0,521	0,458	0,381	0,000	0,000	0,002	0,001
RWT vs. RLT	Mann-Whitney-U Test	0,270	0,088	0,794	0,198	0,004	0,019	0,015	0,056
CWT vs. RWT	Mann-Whitney-U Test	0,190	0,032	0,626	0,437	0,307	0,181	0,003	0,138
CWT vs. RLT	Mann-Whitney-U Test	0,137	0,468	0,749	0,417	0,014	0,004	0,954	0,450
CLT vs. RWT	Mann-Whitney-U Test	0,001	0,032	0,563	0,011	0,002	0,01	0,000	0,000
CLT vs. RLT	Mann-Whitney-U Test	0,017	0,574	0,531	0,577	0,922	0,869	0,015	0,087
NOS vs. CWT	Mann-Whitney-U Test	0,214	0,252	0,332	0,656	0,000	0,000	0,000	0,002
NOS vs. RWT	Mann-Whitney-U Test	0,084	0,261	0,511	0,374	0,001	0,000	0,000	0,000
NOS vs. CLT	Mann-Whitney-U Test	0,013	0,392	0,851	0,137	0,280	0,002	0,027	0,449
NOS vs. RLT	Mann-Whitney-U Test	0,554	0,281	0,602	0,919	0,296	0,060	0,001	0,038

3.2. Geräte und Methoden

3.2.1. Fahrradergometer

Die Fahrradergometrien wurden auf dem drehzahlunabhängigen Wirbelstrom gebremsten Fahrradergometermodell LODE Excalibur Sport (Lode B.V. Groningen, Niederlande) durchgeführt (Abb. 3). Bei diesem Modell ließ sich individuell die Sitzhöhe, Sattelposition, Lenkerhöhe und die Vorbaulänge einstellen. Es bestand die Möglichkeit, die Haken-Riemen-Pedale gegenüber anderen Pedalsystemen auszutauschen. Das Ergometer ließ sich frei in Bezug auf die Stufenlänge bzw. Steigerung des Widerstandes programmieren. Auf dem Display der Steuerungseinheit (hier nicht im Bild) ließen sich die aktuellen Testparameter (Zeit gesamt, Zeit Stufe, Cadence und Leistung) des Tests verfolgen.



Abbildung 3: Fahrradergometer Model LODE Excalibur Sport

3.2.2. Ruderergometer

Die Ruderergometrien wurden auf dem über Luftwiderstand gebremsten Ruderergometermodell Concept II (Concept, Vermont, USA) durchgeführt (Abb. 4). Individuelle Einstellmöglichkeiten bestanden in der Länge der Stembretter, an denen die Füße mittels eines Nylonriemens fixiert wurden. Die Länge der genutzten Strecke des Rollsitzes auf der Monoschiene ergab sich aus der jeweiligen Beinlänge, genauso wie sich der Zugwinkel und die Zugstrecke an dem Griff aus der Oberkörper- bzw. Armhaltung ergab. Zur Begrenzung der angesaugten Luftmenge ließ sich die Stellung der Blätter des Windrades einstellen. Auf dem Display der Bedieneinheit waren die aktuellen Testdaten (Zeit gesamt, Zeit Stufe bzw. Pause, Schlagzahl, Leistung) ablesbar.



Abbildung 4: Ruderergometer Modell Concept II

3.2.3. Laufband

Die Laufbandergometrien wurden auf dem Laufband VENUS (H-P-COSMOS Sportgeräte GmbH, Nussdorf, Deutschland) durchgeführt (Abb. 5). Das Ergometer ließ sich in Bezug auf Geschwindigkeit, Neigung, Stufen- und Pausendauer frei programmieren. Änderungen der Geschwindigkeit kündigten sich dem Probanden und dem Untersucher mit drei aufeinander folgenden akustischen Signalen an. Die Lauffläche betrug 200 x 75 cm. Aus Sicherheitsgründen befand sich hinter dem Gerät eine weiche Notfallmatte. Ferner gab es einen großen Notstoppschalter und eine sog. Rehaschiene zum Abstützen, im Falle einer vollkommenen Erschöpfung. Neben der Gesamttestzeit konnte die Zeit der jeweiligen Stufe bzw. Pause, die Geschwindigkeit und die Steigung auf dem Display der Steuerungseinheit abgelesen werden.



Abbildung 5: Laufband Modell VENUS

3.2.4. Blutlaktatanalyse

Aus dem hyperämisierten und desinfiziertem (CutaseptF, Bode Chemie, Hamburg, Deutschland) Ohrläppchen, das mit einer Blutlanzette (Solofix, B.Braun Petzold GmbH; Melsungen; Deutschland) angeritzt wurde, erfolgte unter zu Hilfenahme eines 20 μ l End-zu-End-Kapillarröhrchens (Eppendorf-Netheler-Hinz-GmbH; Hamburg; Deutschland) die Entnahme von 20 μ l Kapillarblut. Die entnommene Probe wurde in einem Probengefäß mit 1000 μ l Systemlösung eingeschlossen und geschüttelt (EBIO/ESAT Probegefäße; Eppendorf-Netheler-Hinz-GmbH; Hamburg; Deutschland). Der Laktatgehalt der Proben wurde unverzüglich nach dem Test mit dem Analysegerät: EBIO plus 6668 V1.61 (Eppendorf-Netheler-Hinz-GmbH; Hamburg; Deutschland) enzymatisch-amperometrische bestimmt (Abb. 6). Während der Entnahme wurden Einmalhandschuhe (Vasco puderfrei, B.Braun Petzold GmbH, Melsungen; Deutschland) vom Untersucher getragen.



Abbildung 6 Laktatanalysegerät EBIO plus 6668 V1.61

3.2.5. Herzfrequenz Erfassung

Zur kontinuierlichen Erfassung der Herzfrequenz wurde die Herzfrequenzuhr Accurex Plus™ der Firma Polar Electro Oy (Kempele, Finnland) verwendet. Gemessen wurde über einen Sender (Brustgurt) und einem Empfänger (Armbanduhr). Die Uhr mittelte alle 5 Sekunden die Herzfrequenzwerte der letzten 5 Sekunden und zeichnete diese Werte auf. Die gespeicherten Daten wurden unter Zuhilfenahme des Polar Interface Plus™ (Polar Electro Oy; Kempele, Finnland) mit dem PC eingelesen und ausgewertet.

3.2.6. Spirometer

Die spirometrischen Daten wurden mit dem stationären ErgoSpirometrie System METAMAX (MetaMax Ergometriesystem, Version 3.21; Cortex Biophysik GmbH; Borsdorf/Leipzig; Deutschland) kontinuierlich aufgezeichnet. Das System, das im Mischkammerverfahren die spirometrischen Parameter aufzeichnet, mittelt diese in einem Intervall von 10 s. Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit dem Programm MetaMax Analyse (Version 3.31; Cortex Biophysik GmbH; Borsdorf/Leipzig; Deutschland). Die Probanden trugen, um die Atemgase bündeln zu können, während der Spirometrie eine Gesichtsmaske (8940 Series, Hans Rudolph Inc, Kansas City, USA), die Nase und Mund abdeckte und über ein Netz (Hans Rudolph Inc, Kansas City, USA), das über den Hinterkopf gelegt wurde, positioniert und gespannt werden konnte. Die gebündelten Atemgase wurden über die an die Maske angeschlossene Turbine (Gasausgang incl. Absaugstrecke + Volumensensor) analysiert.

3.2.7. Gewicht- und Körperfettbestimmung

Das Gewicht der Probanden (nur mit Sporthose bekleidet) wurde mit einer mechanischen Waage, Messgenauigkeit 100 g, Maximalbelastung 150 kg (Seca, Vogel & Halke GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland) ermittelt.

Der prozentuale Körperfettanteil in Bezug auf das Körpergewicht der Teilnehmer wurde mittels Calipermetrie gemäß der 10-Punkt Hautfaltenmethode nach Parzikova [91, 92] ermittelt. Hierbei wurde mit Hilfe einer Fettzange (= Caliper) (Baty International, West Sussex, Großbritannien) an zehn definierten Körperstellen die Hautfaltendicke in Millimetern ermittelt (Abb. 7 / Kap. 11.1.). Anhand der Summe der Falten wurde in einem geschlechtsspezifischen Normogramm (Kap. 11.2.) der prozentuale Körperfettanteil abgelesen.



Abbildung 7: Bestimmung der Hautfaltendicke mittels Caliper gemäß der 10-Punkt Hautfaltenmethode nach Parzikova - hier beispielhaft an der Axilla.

3.3. Versuchsablauf

3.3.1. Ort der Untersuchungen

Ort der Versuchsdurchführung war der Forschungsbereich für Sport- und Bewegungsmedizin, Fachbereich Bewegungswissenschaft, Universität Hamburg, Mollerstraße 10, 20148 Hamburg, Deutschland.

Die Studie erstreckte sich über den Zeitraum vom 20-01-03 bis 31-12-03. Die Daten wurden in der Trainingsaufbauphase (Januar - April) und nach der Saison von (Oktober – Dezember) erhoben. Jeder Proband musste in einem Zeitraum von maximal 21 Tagen alle drei Untersuchungen durchlaufen haben, um eventuelle trainingsbedingte Leistungsverbesserungen durch das Training in der Zwischenzeit ausschließen zu können. Auch wurde versucht, die Tests zur gleichen Tageszeit durchzuführen, um Auswirkungen des zirkadianen Rhythmus ausschließen zu können.

3.3.2. Vor der ersten Untersuchung

Zu Beginn der Studie wurde jeder Proband ausführlich über den Ablauf der jeweiligen Spiroergometertests, die Funktionsweise der verschiedenen Ergometertypen und die geplanten Blutentnahmen informiert. Anschließend wurde jeder Proband anhand eines standardisierten Fragebogens anamnestiziert (Kap. 11.3.) und gebeten, die Einverständniserklärung nach der Klärung noch offener Fragen zu unterschreiben. Im Folgenden wurden die Probanden orientierend sportmedizinisch untersucht. Hierzu zählte neben der Auskultation des Herzens auch das Ableiten eines Ruhe-EKGs und die Messung des Blutdruckes im Liegen und Sitzen nach der Riva-Rocci Methode. Zur pulmonologischen Abklärung gehörte die Auskultation und Perkussion der Lungen und die

Durchführung eines Lungenfunktionstests mit dem Handspirometer 2120 (Vitalograph GmbH Jacobsenweg 12, 22525 Hamburg, Deutschland), um eine eventuelle obstruktive Ventilationsstörungen der Probanden ausschließen zu können. Neben dem Körperfettanteil, der nach der Methode von Parizkova erhoben wurde (Abb. 7) [91, 92], wurden die Probanden auf einer mechanischen Waage (Seca, Vogel & Halke GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland) gewogen und dann vermessen (Kap. 3.2.7.).

Die Reihenfolge der zu absolvierenden Tests auf dem Laufband, Rad- und Ruderergometer wurde zu Beginn randomisiert. Durch die Randomisierung waren mit den drei Testsituationen Fahrrad-, Ruderergometer und Laufband sechs verschiedene Testkombinationen möglich (Abb. 8).

Testkombination	Testsituation I	Testsituation II	Testsituation III
1	CE	RE	TM
2	CE	TM	RE
3	RE	CE	TM
4	RE	TM	CE
5	TM	CE	RE
6	TM	RE	CE

Abbildung 8: mögliche Testkombinationen

Abkürzung der Ergometertypen:		
• Fahrradergometer	CE	(<u>C</u> ycle- <u>E</u> rgometer)
• Ruderergometer	RE	(<u>R</u> owing- <u>E</u> rgometer)
• Laufband	TM	(<u>T</u> read <u>M</u> ill)

Abbildung 9: Abkürzung der Ergometertypen

3.3.3. Versuchsdurchführung

Jeder Proband absolvierte jeweils einen Stufentest auf dem Fahrrad- und Ruderergometer und auf dem Laufband (Kap. 3.3.4., 3.3.5., 3.3.6. / Abb. 14). Eine kurze Trainingsanamnese (Kap. 11.11.) wurde vor jedem Test erneut erhoben, um zusammen mit der Ruhelaktatprobe eine ausreichende Erholung zu belegen. Der jeweilige Testablauf wurde jedem Probanden vor Beginn ausführlich erklärt. Alle Tests wurden mit der Ausbelastung des Probanden beendet. Die Herzfrequenz und die spirometrischen Daten wurden kontinuierlich während der ganzen Tests und der Nachbelastungsphase aufgezeichnet. Das Kapillarblut wurde am Ende einer jeden Stufe aus dem hyperämisierten Ohrläppchen gewonnen, um die Blutlaktatkonzentration zu bestimmen (Abb. 10).



Abbildung 10: Kapillarblutentnahme aus dem hyperämisierten Ohrläppchen – hier beispielhaft während einer Fahrradspiroergometrie

3.3.4. Fahrradergometrie

Der Test begann mit einem initialen Widerstand von 50 Watt für 3 Minuten. Danach erhöhte sich der Widerstand pro Minute stufenförmig um 16,6 Watt bis zur subjektiven Ausbelastung, was im Mittel eine Steigerung um 50 Watt / 3 min bedeutet [102], entsprechend den in üblicher Weise genutzten Protokolls des Bundesausschusses für Leistungssport (BAL). Die Blutentnahme erfolgte am Ende jeder dritten Minute. Die spirometrischen Daten sowie die Herzfrequenz wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Die Lenker- und Sattelleinstellung erfolgte individuell, wobei die CWT-Gruppe sowohl ihre gewohnte Sitzposition von ihrem Rennrad übernahm als auch ihre Pedalsysteme, wohingegen alle übrigen Probanden mit den von dem Hersteller gelieferten Pedalen mit Haken und Riemen fuhren (Abb. 11).



Abbildung 11: Fahrradspiroergometrie – Beistelltisch mit den Materialien zur Kapillarblutgewinnung und der Steuerungseinheit (hier nicht im Bild)

3.3.5. Ruderergometrie

Das Testprofil auf dem Ruderergometer wurde in Anlehnung an das des Fahrradergometertests erstellt [17]. Der Widerstand der ersten Stufe lag bei 50 Watt und wurde alle 3 Minuten um 50 Watt gesteigert. Zwischen den Stufen erfolgte eine Pause von 30 s, um Kapillarblut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen zu gewinnen. Die Aufzeichnung der spirometrischen Daten und der Herzfrequenz erfolgte kontinuierlich. Die Stembretter wurden individuell entsprechend der Schuhgröße in der Länge eingestellt, um die Füße optimal über den Fußriemen fixieren zu können. Für alle Probanden wurde die Luftklappe auf Stufe 7 eingestellt (Abb. 12).



Abbildung 12: Ruderspiroergometrie - Spirometerschläuche sind an einer von der Decke hängenden Schlaufe vor dem Probanden befestigt, um den Bewegungsablauf des Probanden nicht zu stören

3.3.6. Laufbandergometrie

Der Lauftest begann mit einer 5 minütigen Eingehphase (5 km/h bei 2 % Steigung) zur Habitualisierung und zum Aufwärmen. Der eigentliche Stufentest begann mit einer Geschwindigkeit von 8 km/h bei einer Steigung von 2 % [102]. Die Stufendauer betrug 3 Minuten und die Geschwindigkeit erhöhte sich von Stufe zu Stufe um jeweils 2 km/h. Zwischen den 3 minütigen Stufen wurde das Laufband für 30 Sekunden gestoppt, um das Kapillarblut zur Bestimmung des Blutlaktats entnehmen zu können. Eine Ausnahme stellte hierbei die Entnahme zwischen der 5 km/h Habitualisierungsphase und der ersten Teststufe (8 km/h) dar, denn hier steigerte sich die Geschwindigkeit ohne Pause, so dass die Entnahme während des Gehens innerhalb der letzten Minute bei 5 km/h erfolgte. Auch bei diesem Testprofil erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung der spirometrischen Daten und der Herzfrequenz (Abb. 13).



Abbildung 13: Laufbandspiroergometrie - Spirometerschläuche sind an einer von der Decke hängende Schlaufe vor dem Probanden befestigt, um den Bewegungsablauf des Probanden nicht zu stören – Spirometer steht rechts – Untersucher verfolgt Spirometrie am PC

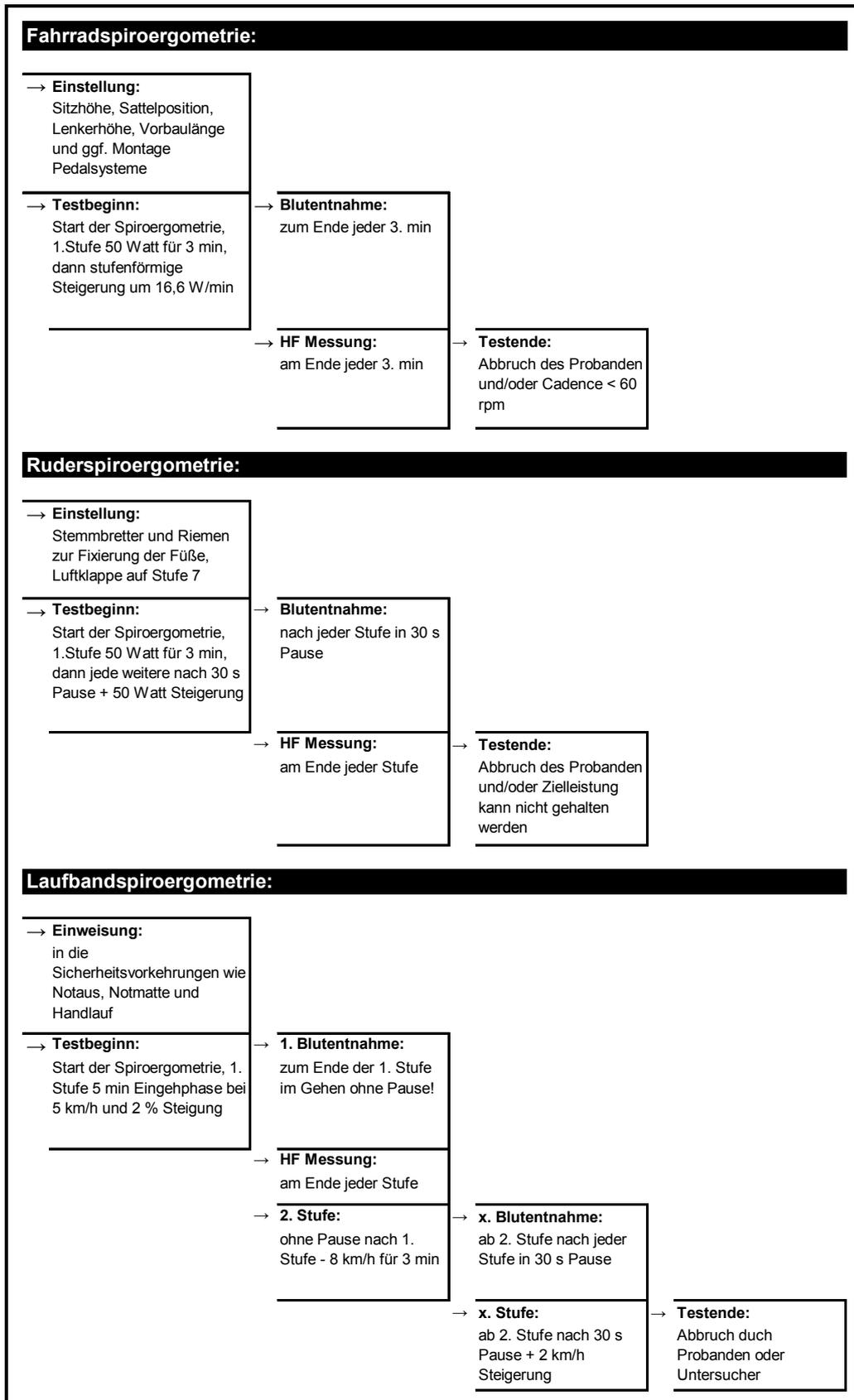


Abbildung 14: Schema zum Ablauf der drei Spiroergometertests

3.3.7. Procedere an jedem Untersuchungstag

An jedem Untersuchungstag wurde das Spirometer mindestens 30 min vor der Kalibration eingeschaltet, um die notwendige Betriebstemperatur des Gerätes zu gewährleisten. Es wurde sowohl der Volumensensor als auch der Gassensor kalibriert. Die Volumenkalibration wurde wie folgt durchgeführt: Das Sensorkabel wurde an das Spirometer angeschlossen und der am Gasausgang verschlossene Volumensensor dicht mit dem Ausgang der Eichpumpe (3 Liter Volumen / Hub) verbunden. Nach dem Start des Kalibriervorgangs über die Software wurden sechs gleichmäßige Pumpenhübe durchgeführt (Abb. 15).

Zur Kalibration des Gassensors wurde eine Zweipunktkalibration mit zwei verschiedenen Gasgemischen durchgeführt, um sowohl eine Verstärkungs- als auch eine Offset-Abweichung der Sensoren zuverlässig bestimmen zu können. Es wurde zum einen mit der Umgebungsluft und zum anderen mit einem Gasgemisch am anderen Ende des physiologischen Messbereichs, 6 % CO, 12 % O₂, 82 % N (Messer Griesheim GmbH, Sondergaswerk, Krefeld, Deutschland) kalibriert. Für die Kalibration der Umgebungsluft musste darauf geachtet werden, dass keine Atemgase der Probanden oder des Untersuchers angesaugt werden konnten. Für die Kalibration mit dem Referenzgas wurde die Ansaugstrecke des Spirometers direkt mit dem Gerät verbunden und der permanente Gasdurchfluss mittels eines Reduzierventils an der Gasflasche limitiert (ca. 1 Bar). Nach Beendigung der beiden Messungen wurden automatisch die Korrekturwerte für das System errechnet. Zur Bestimmung des Blutlaktats wurde das Analysegerät eingeschaltet und kontrolliert, ob genügend Glukose-Laktat Systemflüssigkeit dem Gerät zur Verfügung stand. Ferner wurde überprüft, ob die Spirometermasken, Maskenbefestigungsnetze und Brustgurte gereinigt zur Verfügung standen (Abb. 15).

3.3.8. Procedere vor jeder Untersuchung

Vor jeder Untersuchung wurden die notwendigen Arbeitsmittel (Tupfer, Lanzetten, Kapillaren, Einmalhandschuhe, Desinfektionsspray und Probenzylinder) in ausreichender Menge bereitgestellt, um die Untersuchung störungsfrei ablaufen zu lassen. Danach wurde dem Probanden der Sender (Brustgurt) zur telemetrischen Übertragung der Herzfrequenz angefeuchtet mittig unterhalb des M. pectoralis umgelegt und der störungsfreie Empfang der übermittelten Daten kontrolliert. Auch das Anlegen der Gesichtsmaske des Spirometers über Nase und Mund wurde vor jedem Test auf richtigen Sitz mittels Spannen des Spannetzes über den Hinterkopf kontrolliert. Hierbei hechelten die Probanden, bei mit der flachen Hand verschlossenem Maskenausgang, leicht in die Maske, um eventuelle, durch ungenauen Sitz entweichende Luft zu bemerken und um gegebenenfalls die Maske besser zu positionieren. Während des Anpassens von Brustgurt und Spirometermaske wurde eine kurze Trainingsanamnese durchgeführt und dokumentiert und der Testablauf des jeweils zu absolvierenden Tests erläutert. Schließlich wurde der Ruhepuls im Sitzen protokolliert und Kapillarblut zur Bestimmung des Ruheblutlaktatwertes aus dem hyperämisierten Ohrläppchen gewonnen. Bei den Tests auf dem Fahrrad- bzw. Ruderergometer wurde auf eine individuelle Anpassung des Ergometers geachtet (Abb.15).

3.3.9. Procedere nach jedem Untersuchungstag

Nach der jeweils letzten Untersuchung am Tag wurden die Untersuchungsmaterialien (Masken, Maskenbefestigungsnetze und Brustgurte) in einer warmen Seifenlösung gereinigt (Abb. 15).

3.3.10. Procedere nach jeder Untersuchungswoche

Am Ende jeder Untersuchungswoche wurden Reinigungs-, Desinfektions- und Wartungsarbeiten erledigt. In erster Linie wurden die Ergometer und das Spirometer gereinigt. Darüber hinaus wurden die Masken, die Maskenbefestigungsnetze, der Volumensensor (Turbine) und die Gurte der Herzfrequenzmessersender desinfiziert (S&M Labor flüssig, Schülke&Mayr GmbH, Norderstedt, Deutschland). Bei dem Volumensensor war darauf zu achten, dass er nur vorsichtig in der Desinfektionslösung geschwenkt wurde, um eine mechanische Schädigung zu verhindern. Abschließend wurde die Turbine mit destilliertem Wasser abgespült und luftgetrocknet. Während der Reinigung bzw. Desinfektion wurde sorgfältig auf eventuelle Beschädigungen aller Untersuchungsmaterialien geachtet (Abb. 15).

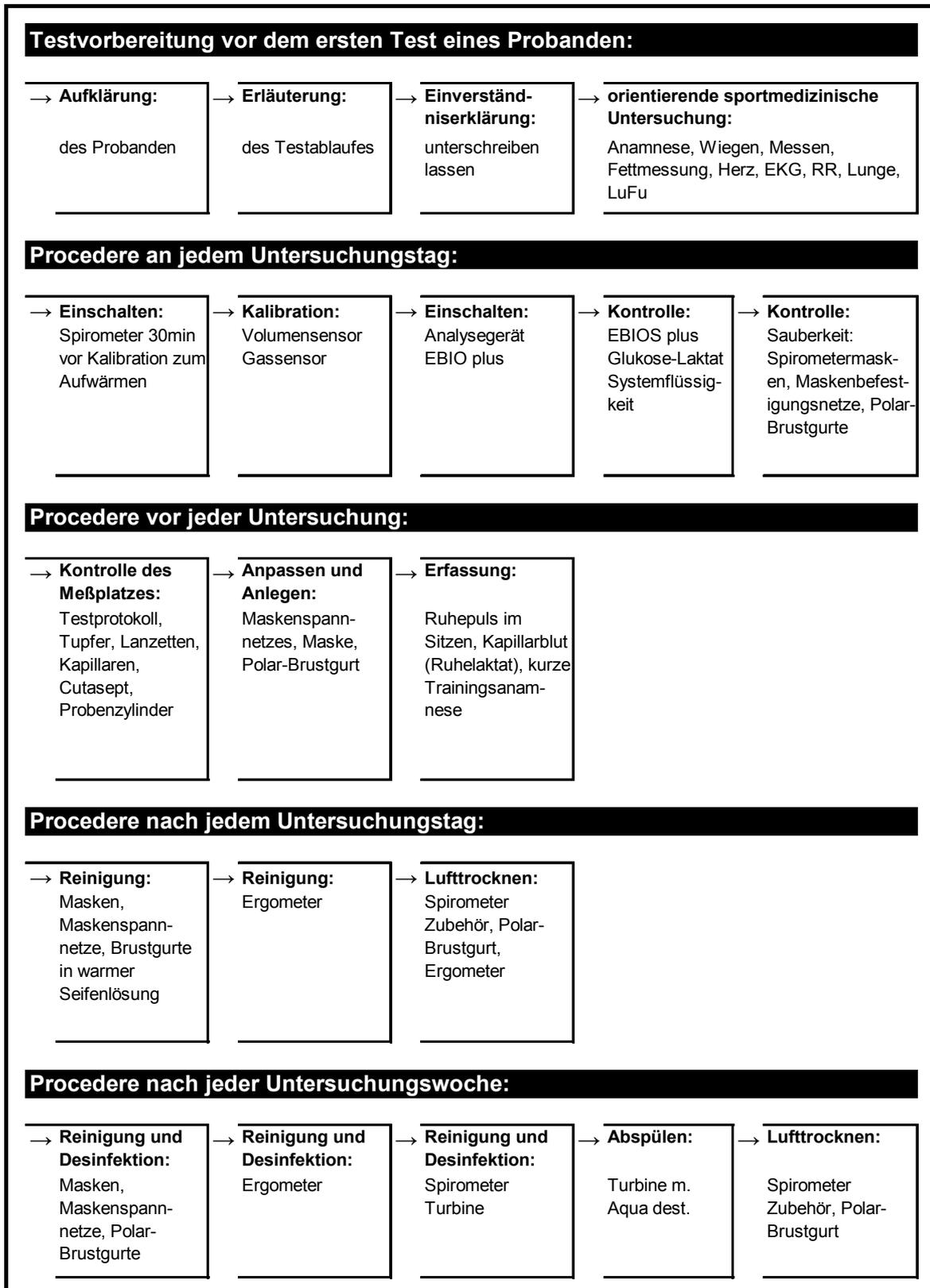


Abbildung 15: Schema zur Testvor- und Testnachbereitung

3.4. Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle

Mittels Expertenrating, basierend auf dem Punkt der größten Steigungsänderung der Laktatleistungskurve, wurde bei jedem Probanden individuell auf jedem Ergometertyp die individuelle anaerobe Schwelle (IAS) bestimmt [38].

3.5. Auswertung und Statistik

Zur grafischen Aufbereitung der Daten diente das Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL von Microsoft (EXCEL XP, Microsoft, Redmond, USA) und für die statistische Auswertung das Programm SPSS (SPSS 11.5.2, SPSS Inc., Chicago, USA).

Zum simultanen Vergleich von drei Gruppen bezüglich eines metrischen Merkmals wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) mit einem nichtparametrischen Test, dem Kruskal-Wallis Test, durchgeführt, und wenn dieser Globaltest zu einem p-Wert unter 0,05 führte, wurde post hoc der Mann-Whitney-U Test zum Vergleich je zweier Gruppen benutzt.

Den Friedman Test (ANOVA) zog man zum simultanen Vergleich eines metrischen Merkmals von allen drei Ergometrien einer Probandengruppe heran. Lag der p-Wert dieses nichtparametrischen Globaltest unter 0,05, wurde post hoc der Wilcoxon Test für abhängige Stichproben benutzt.

Unterschiede zwischen den Gruppen, die zu einem p-Wert $< 0,05$ führten, wurden als signifikant (*) angesehen, $< 0,01$ als sehr signifikant (**) und $< 0,001$ als hochsignifikant (***).

3.6. Kritik an der Methode

Die Einteilung der Probanden in die entsprechenden Gruppen (gut trainiert / wenig trainiert) erfolgte aufgrund der genauen individuellen Trainingsanamnese, doch sind diese Angaben zu den Trainingsjahren, dem Trainingsumfang und den ausgeübten Nebensportarten stets subjektiv und schwer zu kontrollieren.

Es war angestrebt, die Athleten innerhalb eines Zeitraumes von 21 Tagen zu untersuchen (1x Test / Woche), um einen eventuellen Leistungszuwachs durch das in der Zwischenzeit erfolgte Training ausschließen zu können. Leider ließ es sich nicht immer exakt einhalten, da zum einen auf den jeweiligen Trainingsplan der Sportler Rücksicht genommen werden musste und diese gut erholt zum Test erscheinen sollten, zum anderen verlängerten auch Krankheit bzw. Verletzungen und sonstige Verpflichtungen (Schule und Studium) seitens der Sportler die angestrebten Testintervalle von 21 Tagen.

Die Tests sollten mit der Ausbelastung des Einzelnen beendet werden, was in erster Linie vom subjektiven Empfinden (Toleranz gegenüber der Spirometernmaske), der Motivation (Leistungsbereitschaft) und der jeweiligen Tagesform stark abhängig war. Jedoch ließ sich das Kriterium der Ausbelastung gut anhand der gewonnenen Herzfrequenz objektivieren. So ist grob davon auszugehen, dass der Athlet ausbelastet ist, wenn sein Puls beim Laufen bei $220 \text{ bpm} - \text{Lebensalter (LA)}$, beim Fahrradfahren bei $200 \text{ bpm} - \text{LA}$ und beim Rudern bei $210 \text{ bpm} - \text{LA}$ liegt. Vor allem bei der Kontrollgruppe und den Gruppen der wenig trainierten Athleten war dies wichtig, da davon ausgegangen werden musste, dass sie ihr Leistungspotential aufgrund mangelnder Erfahrung nicht immer einzuschätzen wussten.

Mittels der bei steigenden Belastungsintensitäten stetig steigenden Laktatkurve und einem hohen maximalen Blutlaktatwert ließ sich auch sicherstellen, dass die Probanden mit gefüllten Glykogenspeichern, also nicht glykogenverarmt, untersucht wurden. Die ausreichende Erholung vor dem Test ließ sich neben einem entsprechenden niedrigen Ruhelaktatwert ($\leq 1,5 \text{ mmol/l}$) auch mit einer präzisen Trainingsanamnese der letzten Tage belegen. Beides war unumgänglich, um eine Vergleichbarkeit der gewonnenen Parameter

zu gewährleisten. Auf diesem Wege war es immer möglich, eine ausreichende Erholung der Probanden vor den Tests zu belegen und ggf. die Probanden zu einem späteren Zeitpunkt wieder einzubestellen, wenn entweder der Ruhelaktatwert zu hoch lag ($\geq 1,5$ mmol/l) oder der Sportler kaum Laktat aufgrund einer Glykogenverarmung infolge einer zu intensiven Vorbelastung während der Untersuchung aufbauen konnte. Präziser wäre es jedoch gewesen, wenn man bei jedem Athleten vor dem jeweiligen Test eine Ruhespirometrie durchgeführt hätte, um anhand des respiratorischen Quotienten unter Ruhebedingungen Rückschlüsse auf das genutzte Energiesubstrat machen und dadurch letztlich den Regenerationsstatus exakt bestimmen zu können.

Um ein möglichst gleiches Leistungsniveau der Athleten anzustreben, wurden im Sommer keine Untersuchungen durchgeführt. Somit wurde die jeweilige Saison und das damit verbundene bessere Leistungsniveau ausgeschlossen. Dies betraf in erster Linie die Gruppe der Leistungssportler. Da jedoch nicht alle Athleten weder die gleiche Saisonplanung, noch die gleichen Saisonhöhepunkte hatten, muss davon ausgegangen werden, dass das Leistungsniveau interindividuell nicht einheitlich gestaltet war.

Die Tatsache, dass während der Sommermonate keine Untersuchungen stattfanden, hatte auch den Vorteil, dass die äußeren Untersuchungsbedingungen in Bezug auf die Raumtemperatur während des Untersuchungszeitraumes (Frühjahr / Herbst) annähernd gleich blieben, da der Untersuchungsraum nicht klimatisiert war. Dennoch konnten keine exakt gleichen Temperaturbedingungen gewährleistet werden (17 - 22°C).

4. Ergebnisse

4.1. Herzfrequenz an der individuellen anaeroben Schwelle

4.1.1. Herzfrequenz an der IAS Radsportler intraindividuell

Die Herzfrequenz an der individuell anaeroben Schwelle (HF_{IAS}) war bei beiden Gruppen auf dem Laufband (= treadmill (TM)) am höchsten. TM verglichen mit dem Ruderergometer (RE) (Mittelwert \pm Standardabweichung): CWT $> 10\%$ ($171,2 \pm 7,1$ vs. $155,8 \pm 10,8$ bpm ($p < 0,01$) (Abb. 16)), CLT $> 8\%$ ($178,2 \pm 9,8$ vs. $164,8 \pm 8,2$ bpm ($p < 0,01$) (Abb. 17)). Auf dem Fahrradergometer (CE) erreichte die CWT-Gruppe die gleiche HF_{IAS} wie auf dem TM ($p > 0,05$) (Abb. 16). Die HF der CLT-Gruppe lag auf dem CE ($166,4 \pm 5,6$ bpm) (Abb. 17) um 7% unter der erreichten HF_{IAS} auf dem TM ($178,2 \pm 9,8$ bpm) ($p < 0,05$). Mit Ausnahme der CLT-Gruppe ($p > 0,05$) lag die HF_{IAS} der CWT-Gruppe auf dem RE am niedrigsten ($p < 0,01$) (Abb. 16).

Tabelle 3: Delta der HF (bpm) beim Transfer der HF_{IAS} zwischen zwei Ergometrien - Radsportler und Kontrollgruppe

	CWT	CLT	CON
CE → TM	0	+12	+13
CE → RE	-13	0	-6
TM → RE	-15	-13	-19

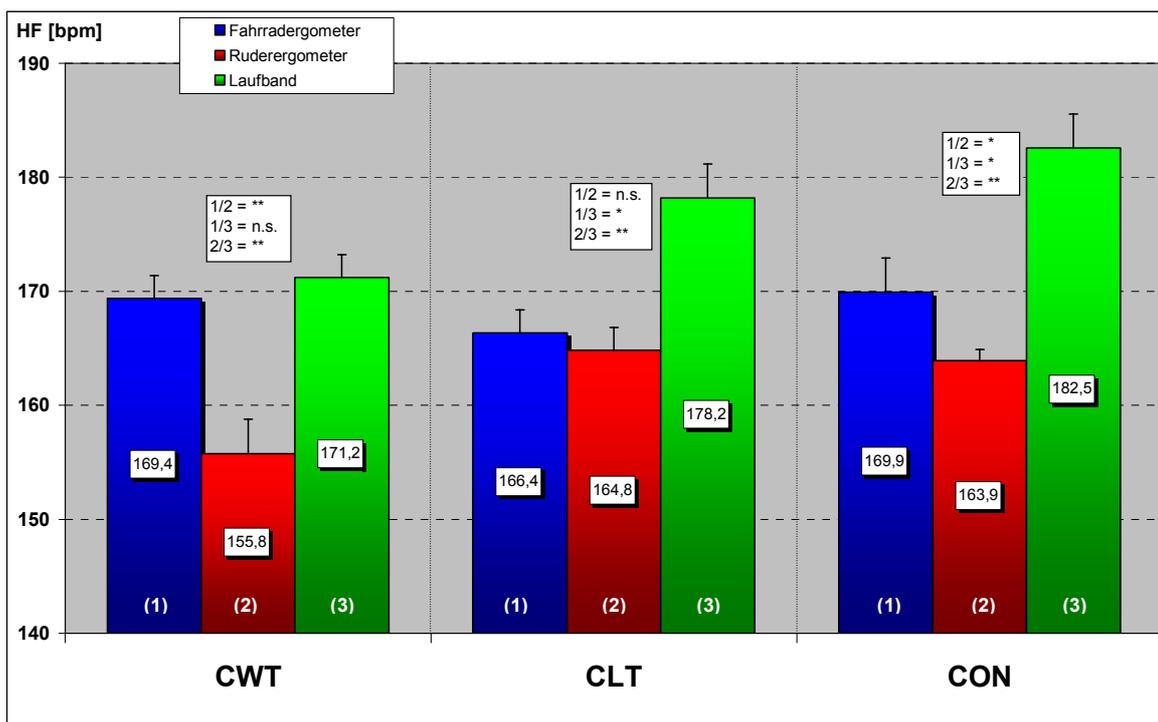


Abbildung 16: Herzfrequenz an der IAS (MW / SEM) Radsportler und Kontrollgruppe – alle Tests intraindividuell

Tabelle 4: deskriptive Statistik Herzfrequenz an der IAS / Radsportler und Kontrollgruppe / alle Tests intraindividuell

		CWT	CLT	CON
Mittelwert [MW]				
CE		169,4	166,4	169,9
RE		155,8	164,8	163,9
TM		171,2	178,2	182,5
Standardabweichung [SD]				
CE		7,1	5,6	7,8
RE		10,8	8,2	7,3
TM		7,1	9,8	11,4
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
CE		2,0	1,7	2,4
RE		3,0	2,5	2,2
TM		2,0	3,0	3,4
Anzahl [n]				
CE		13	11	11
RE		13	11	11
TM		13	11	11
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]				
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,000	0,003	0,001
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,003	0,593	0,014
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,344	0,013	0,013
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,002	0,003	0,003

4.1.2. Herzfrequenz an der IAS : Rudersportler intraindividuell

An der IAS auf dem TM war die HF der RWT und CON-Gruppe signifikant am höchsten – RWT: 7 % > CE ($182,1 \pm 9,6$ vs. $170,4 \pm 11,5$ bpm) ($p < 0,01$) / 3 % > RE ($182,1 \pm 9,6$ vs. $177,4 \pm 4,6$ bpm) ($p < 0,05$) (Abb. 19); CON: 7 % > CE ($182,5 \pm 11,4$ vs. $169,9 \pm 7,8$ bpm) ($p < 0,05$) / 12 % > RE ($182,5 \pm 11,4$ vs. $163,9 \pm 7,3$ bpm) ($p < 0,01$) (Abb. 21). Betrachtet man die HF_{IAS} der RLT-Gruppe auf dem TM, so lag diese um 5 % signifikant höher als auf dem CE ($174,6 \pm 8,1$ vs. $164,7 \pm 10,5$ bpm) ($p < 0,01$) und unterschied sich nicht von der HF_{IAS} auf dem RE ($p > 0,05$) (Abb. 17). Bezogen auf das CE lag die HF_{IAS} auf dem RE bei der RWT als auch RLT-Gruppe um 4 % höher ($177,4 \pm 4,6$ vs. $170,4 \pm 11,5$ bzw. $171,5 \pm 9,9$ vs. $164,7 \pm 10,5$ bpm) (Abb. 117).

Tabelle 5: Delta der HF (bpm) beim Transfer der HF_{IAS} zwischen zwei Ergometrien – Rudersportler und Kontrollgruppe

	RWT	RLT	CON
RE → TM	+5	0	+19
RE → CE	-7	0	+6
TM → CE	-12	-10	-13

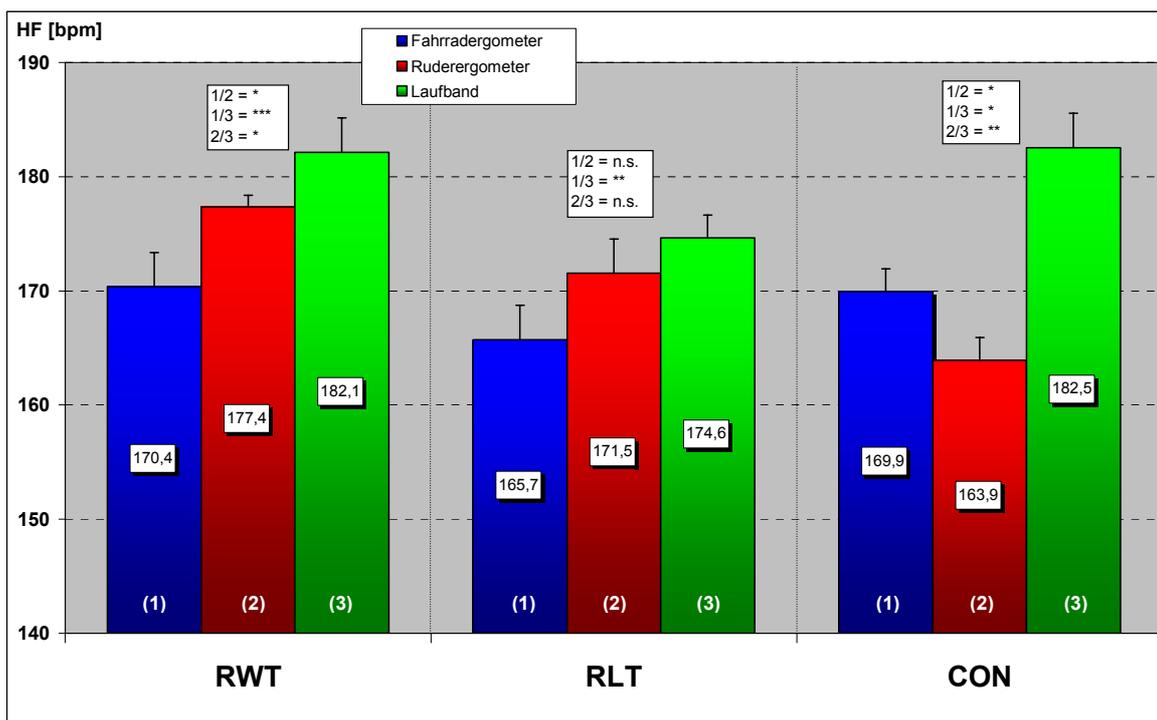


Abbildung 17: Herzfrequenz an der IAS (MW / SEM) der Rudersportler und Kontrollgruppe – alle Tests intraindividuell

Tabelle 6: deskriptive Statistik Herzfrequenz an der IAS / Rudersportler und Kontrollgruppe / alle Tests intraindividuell

		RWT	RLT	CON
Mittelwert [MW]				
CE		170,4	164,7	169,9
RE		177,4	171,5	163,9
TM		182,1	174,6	182,5
Standardabweichung [SD]				
CE		11,5	10,5	7,8
RE		4,6	9,9	7,3
TM		9,6	8,1	11,4
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
CE		3,1	3,2	2,4
RE		1,2	3,0	2,2
TM		2,6	2,4	3,4
Anzahl [n]				
CE		14	11	11
RE		14	11	11
TM		14	11	11
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]				
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,000	0,007	0,001
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,025	0,057	0,014
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,001	0,004	0,013
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,048	0,138	0,003

4.2. Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration im Verlauf: Fahrradergometer Radsportler

In der CWT-Gruppe fanden sich auf dem CE bei den leistungsphysiologischen Parametern Herzfrequenz (HF), Blutlaktatkonzentration (Lac) auf sämtlichen Belastungsstufen signifikant niedrigere ($p < 0,05$) Werte als in der CLT- und CON-Gruppe. Signifikante ($p < 0,05$). Einen Unterschied zwischen der CLT- und CON-Gruppe gab es in der HF (ab 100 Watt) ($p < 0,05$). Die Laktatleistungskurve (Lac) verlief gleich ($p > 0,05$) (Abb. 18, 19).

4.2.1. Herzfrequenz Verlauf Fahrradergometer Radsportler

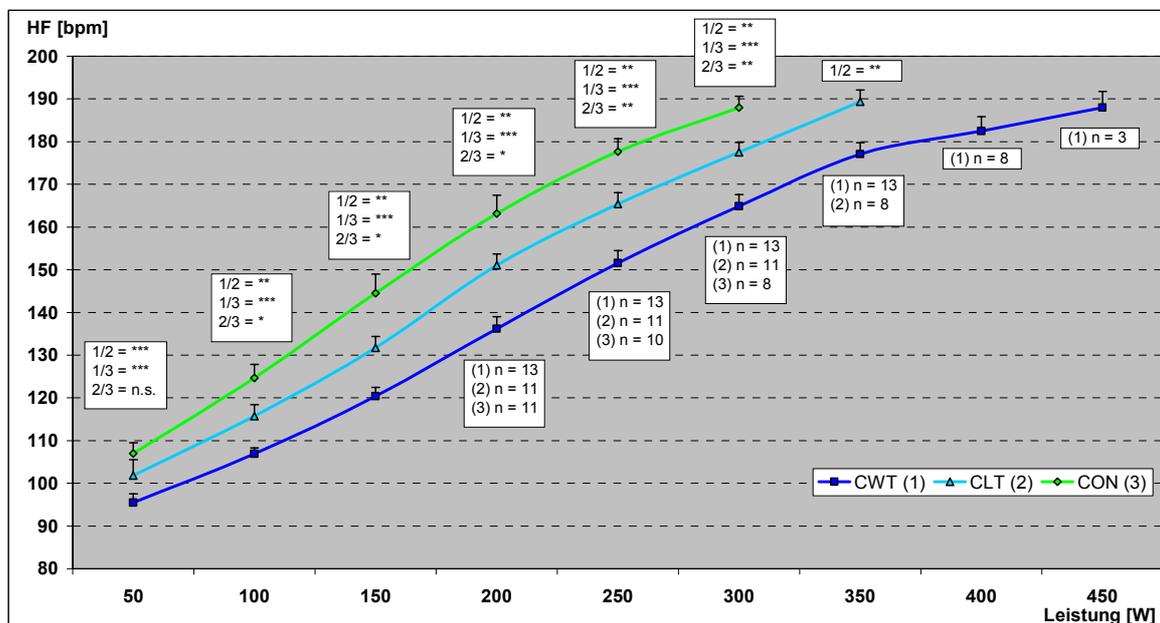


Abbildung 18: Verlauf der Herzfrequenz (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Fahrradergometrie

Tabelle 7: deskriptive Statistik Herzfrequenz (bpm) / Radsportler und Kontrollgruppe / Fahrradergometer

	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt	350 Watt	400 Watt	450 Watt
Mittelwert [MW]									
■ CWT	95,5	106,9	120,4	136,2	151,5	164,8	177,1	182,5	188,0
▲ CLT	101,8	115,7	131,7	151,0	165,4	177,5	189,4	-	-
◆ CON	107,0	124,6	144,5	163,2	177,7	188,0	-	-	-
Standardabweichung [SD]									
■ CWT	7,4	4,8	7,5	10,4	10,5	10,0	9,6	9,4	6,6
▲ CLT	12,2	8,9	8,8	9,0	8,8	7,8	7,6	-	-
◆ CON	8,2	10,7	14,7	14,2	9,3	7,4	-	-	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]									
■ CWT	2,0	1,3	2,1	2,9	2,9	2,8	2,7	3,3	3,8
▲ CLT	3,7	2,7	2,6	2,7	2,7	2,4	2,7	-	-
◆ CON	2,5	3,2	4,4	4,3	3,0	2,6	-	-	-
Anzahl [n]									
■ CWT	13	13	13	13	13	13	13	8	3
▲ CLT	11	11	11	11	11	11	8	-	-
◆ CON	11	11	11	11	10	8	-	-	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]									
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,001	0,006	0,004	0,002	0,004	0,006	0,005	-	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,608	0,047	0,016	0,023	0,008	0,009	-	-	-

4.2.2. Laktat Verlauf Radsportler Fahrradergometer

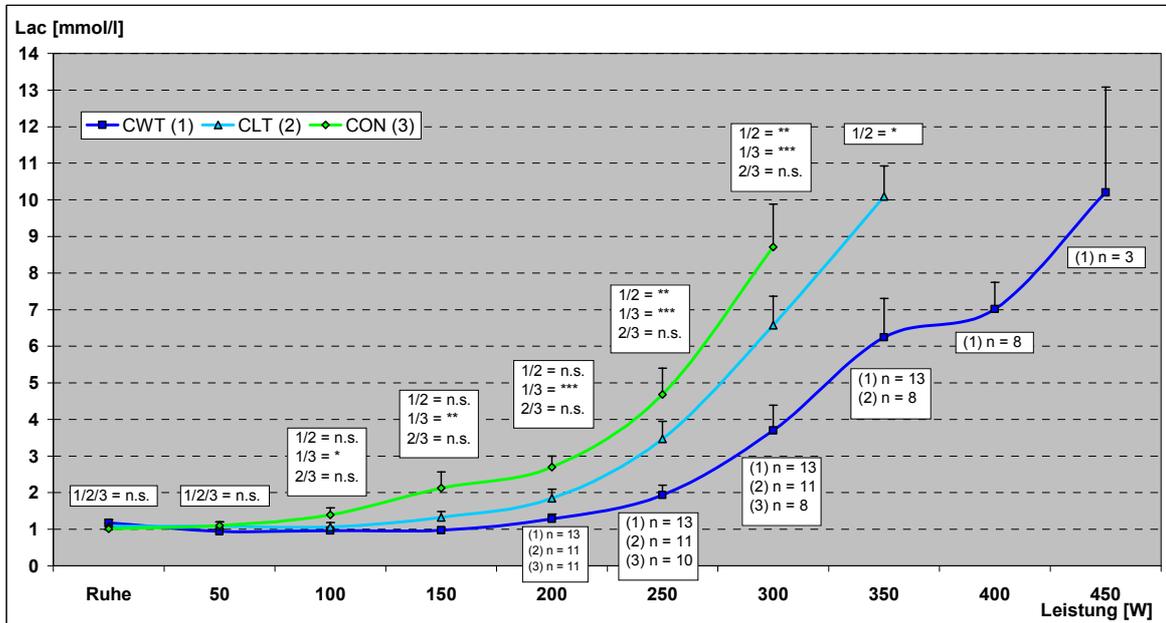


Abbildung 19: Verlauf des Laktats (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Fahrradergometrie

Tabelle 8: deskriptive Statistik Laktat (mmol/l) / Radsportler und Kontrollgruppe / Fahrradergometer

	Ruhe	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt	350 Watt	400 Watt	450 Watt
Mittelwert [MW]										
■ CWT	1,2	0,9	1,0	1,0	1,3	1,9	3,7	6,2	7,0	10,2
▲ CLT	1,1	1,1	1,1	1,3	1,8	3,5	6,6	10,1	-	-
◆ CON	1,0	1,1	1,4	2,1	2,7	4,7	8,7	-	-	-
Standardabweichung [SD]										
■ CWT	0,3	0,3	0,2	0,2	0,5	1,0	2,5	3,8	2,1	5,0
▲ CLT	0,3	0,4	0,4	0,5	0,8	1,6	2,6	2,4	-	-
◆ CON	0,2	0,3	0,6	1,4	1,0	2,3	3,3	-	-	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]										
■ CWT	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	1,1	0,7	2,9
▲ CLT	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,5	0,8	0,8	-	-
◆ CON	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	0,7	1,2	-	-	-
Anzahl [n]										
■ CWT	13	13	13	13	13	13	13	13	8	3
▲ CLT	11	11	11	11	11	11	11	8	-	-
◆ CON	11	11	11	11	11	10	8	-	-	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]										
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,323	0,226	0,137	0,007	0,001	0,001	0,002	-	-	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,580	0,370	0,770	0,186	0,082	0,009	0,009	0,025	-	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,209	0,068	0,033	0,010	0,000	0,000	0,001	-	-	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,597	0,593	0,249	0,133	0,076	0,132	0,129	-	-	-

4.3. Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration im Verlauf: Laufband Radsportler

In der CWT-Gruppe fanden sich auf dem TM bei den leistungsphysiologischen Parametern HF und Lac auf sämtlichen Belastungsstufen signifikant niedrigere Werte als in der CLT und CON-Gruppe ($p < 0,05$) (Abb. 20, 21). Die CLT-Gruppe unterschied sich in der HF mit signifikant niedrigeren Werten von der CON-Gruppe ($p < 0,05$) (Abb. 20) bei gleicher Lac ($p > 0,05$) (Abb. 21).

4.3.1. Herzfrequenz Verlauf Laufband Radsportler

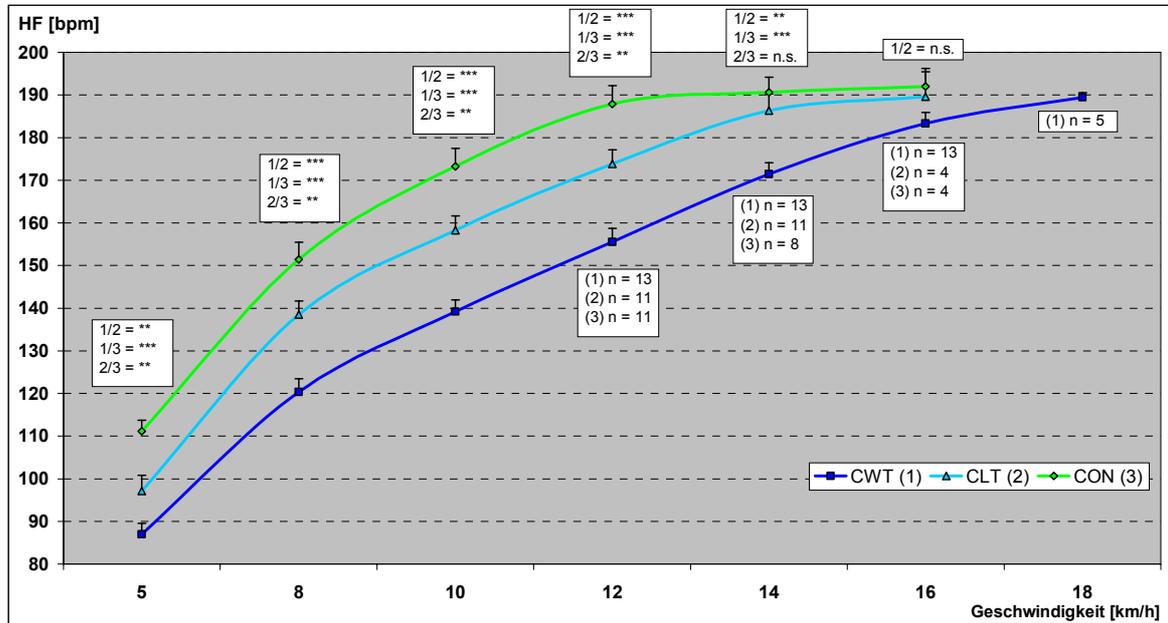


Abbildung 20: Verlauf der Herzfrequenz (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON) während des Laufbandtests

Tabelle 9: deskriptive Statistik Herzfrequenz (bpm) / Radsportler und Kontrollgruppe/ Laufband

	5 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h
Mittelwert [MW]							
■ CWT	87,0	120,4	139,2	155,5	171,5	183,3	189,4
▲ CLT	97,1	138,5	158,3	173,8	186,4	189,6	-
◆ CON	111,2	151,4	173,3	187,9	190,6	192,0	-
Standardabweichung [SD]							
■ CWT	9,2	11,0	9,9	11,3	9,7	9,2	2,6
▲ CLT	12,4	10,7	11,2	10,9	13,0	13,0	-
◆ CON	8,5	13,6	14,0	14,1	9,9	8,5	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]							
■ CWT	2,5	3,1	2,7	3,1	2,7	2,5	1,2
▲ CLT	3,7	3,2	3,4	3,3	3,9	5,8	-
◆ CON	2,6	4,1	4,2	4,3	3,5	4,2	-
Anzahl [n]							
■ CWT	13	13	13	13	13	13	5
▲ CLT	11	11	11	11	11	4	-
◆ CON	11	11	11	11	8	4	-
p-Wert [grau unterlegt, falls $p < 0,05$]							
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,213	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,026	0,001	0,000	0,001	0,005	-	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	-	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,016	0,019	0,016	0,013	0,600	-	-

4.3.2. Laktat Verlauf Laufband Radsportler

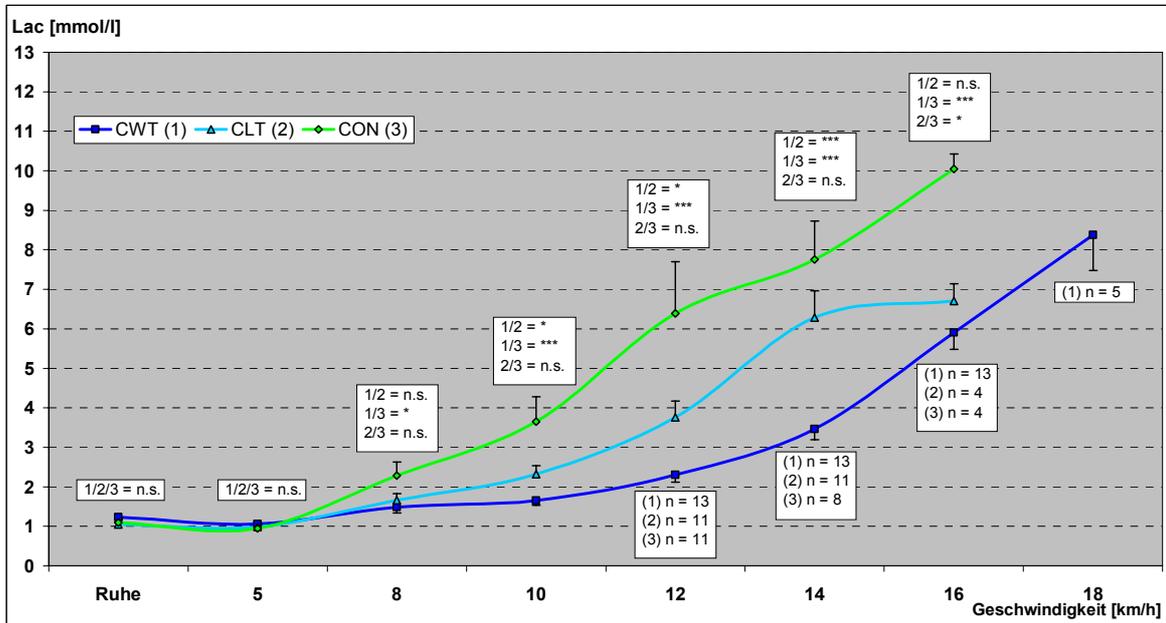


Abbildung 21: Verlauf des Laktats (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON) während des Laufbandtests

Tabelle 10: deskriptive Statistik Laktat (mmol/l) / Radsportler und Kontrollgruppe/ Laufband

	Ruhe	5 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h
Mittelwert [MW]								
■ CWT	1,2	1,1	1,5	1,7	2,3	3,5	5,9	8,4
▲ CLT	1,0	1,0	1,7	2,3	3,8	6,3	6,7	-
◆ CON	1,1	0,9	2,3	3,6	6,4	7,8	10,1	-
Standardabweichung [SD]								
■ CWT	0,4	0,4	0,5	0,4	0,7	1,0	1,5	2,0
▲ CLT	0,4	0,4	0,6	0,7	1,3	2,3	0,9	-
◆ CON	0,3	0,3	1,1	2,1	4,3	2,8	0,8	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]								
■ CWT	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,9
▲ CLT	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,7	0,4	-
◆ CON	0,1	0,1	0,3	0,6	1,3	1,0	0,4	-
Anzahl [n]								
■ CWT	13	13	13	13	13	13	13	5
▲ CLT	11	11	11	11	11	11	4	-
◆ CON	11	11	11	11	11	8	4	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]								
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,564	0,823	0,116	0,002	0,000	0,000	0,007	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,269	0,661	0,415	0,026	0,005	0,001	0,246	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,683	0,540	0,039	0,000	0,000	0,000	0,001	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,597	0,974	0,236	0,133	0,133	0,272	0,029	-

4.4. Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration im Verlauf: Ruderergometer Radsportler

In der CWT-Gruppe fanden sich auf dem RE bei den leistungsphysiologischen Parametern HF und Lac auf sämtlichen Belastungsstufen signifikant niedrigere ($p < 0,05$) Werte als in der CLT und CON-Gruppe. Die CLT und CON-Gruppe unterschied sich zum Teil in Lac (ab 150 Watt) und waren in Bezug auf HF gleich ($p > 0,05$) (Abb. 22, 23).

4.4.1. Herzfrequenz Verlauf Radsportler Ruderergometer

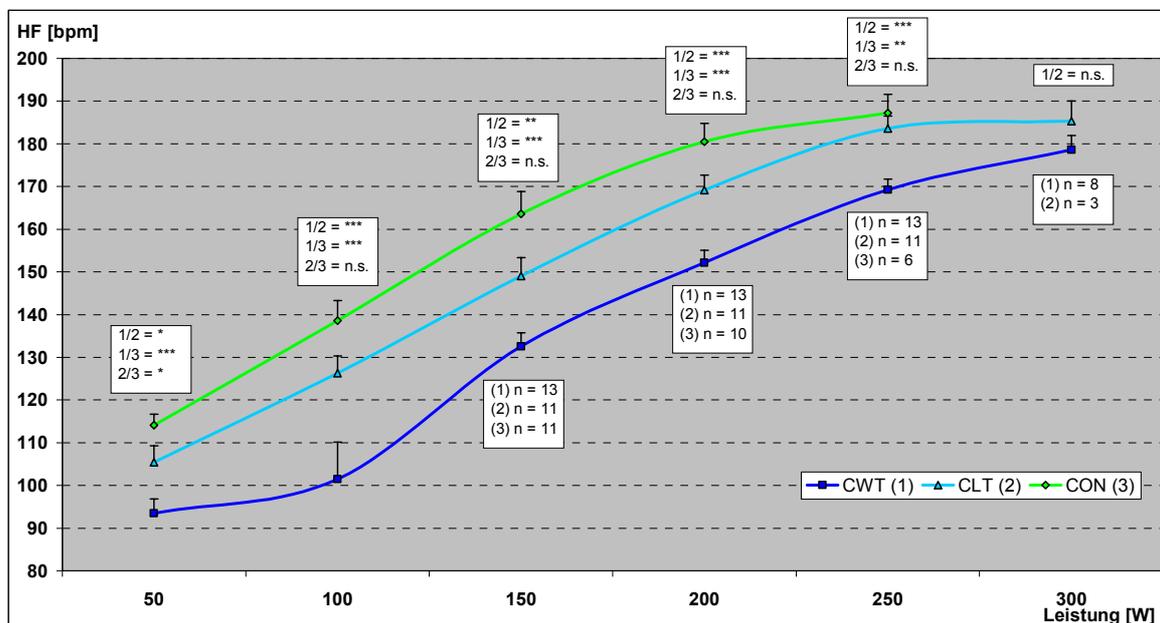


Abbildung 22: Verlauf der Herzfrequenz (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Ruderergometrie

Tabelle 11: deskriptive Statistik Herzfrequenz (bpm) / Radsportler und Kontrollgruppe / Ruderergometer

	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt
Mittelwert [MW]						
■ CWT	93,5	101,4	132,5	152,2	169,2	178,6
▲ CLT	105,5	126,3	149,1	169,2	183,6	185,3
◆ CON	114,1	138,5	163,5	180,5	187,2	
Standardabweichung [SD]						
■ CWT	12,1	31,4	11,6	10,6	9,1	9,3
▲ CLT	12,8	13,4	14,2	11,5	9,5	8,1
◆ CON	8,5	15,8	17,4	13,5	10,8	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]						
■ CWT	3,3	8,7	3,2	2,9	2,5	3,3
▲ CLT	3,9	4,0	4,3	3,5	2,9	4,7
◆ CON	2,6	4,8	5,3	4,3	4,4	
Anzahl [n]						
■ CWT	13	13	13	13	13	8
▲ CLT	11	11	11	11	11	3
◆ CON	11	11	11	10	6	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]						
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,022	0,001	0,003	0,001	0,001	0,583
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,047	0,056	0,065	0,061	0,404	-

4.4.2. Laktat Verlauf Ruderergometer Radsportler

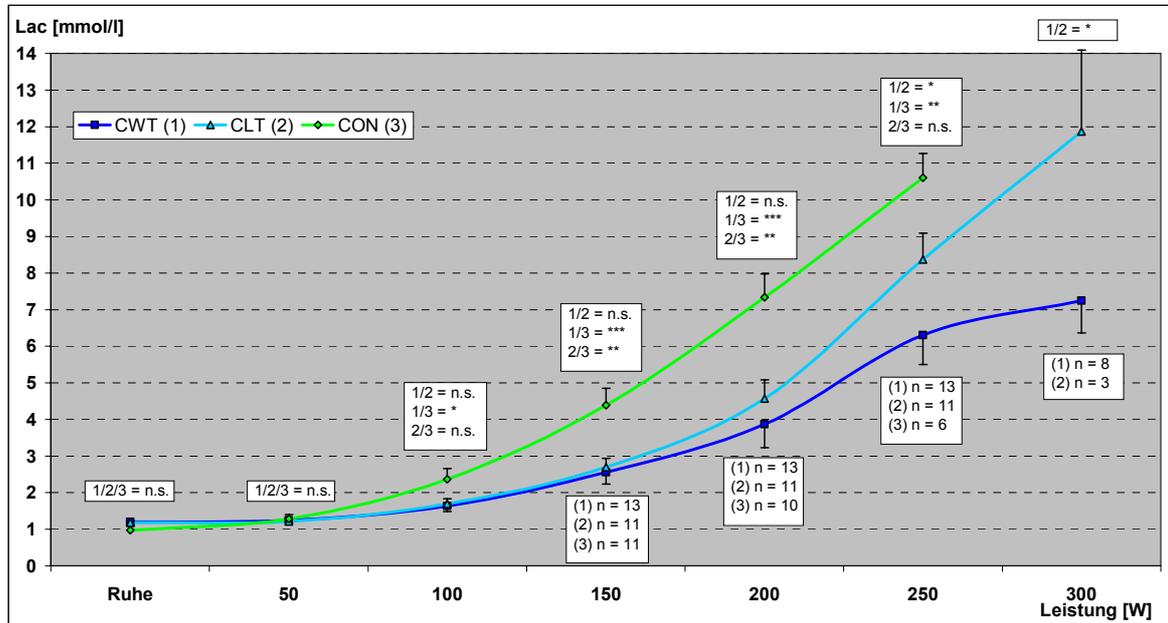


Abbildung 23: Verlauf des Laktats (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Ruderergometrie

Tabelle 12: deskriptive Statistik Laktat (mmol/l) / Radsportler und Kontrollgruppe / Ruderergometer

	Ruhe	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt
Mittelwert [MW]							
■ CWT	1,2	1,2	1,6	2,6	3,9	6,3	7,3
▲ CLT	1,2	1,2	1,7	2,7	4,6	8,4	11,9
◆ CON	1,0	1,3	2,4	4,4	7,3	10,6	-
Standardabweichung [SD]							
■ CWT	0,3	0,3	0,5	1,2	2,3	2,9	2,5
▲ CLT	0,2	0,3	0,5	0,8	1,7	2,4	3,9
◆ CON	0,4	0,4	1,0	1,5	2,0	1,6	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]							
■ CWT	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,8	0,9
▲ CLT	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,7	2,2
◆ CON	0,1	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	-
Anzahl [n]							
■ CWT	13	13	13	13	13	13	8
▲ CLT	11	11	11	11	11	11	3
◆ CON	11	11	11	11	10	6	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]							
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,120	0,988	0,041	0,002	0,001	0,009	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,930	1,000	0,424	0,392	0,093	0,047	0,048
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,081	0,837	0,022	0,001	0,000	0,007	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,068	0,790	0,056	0,002	0,005	0,062	-

4.5. Leistungsphysiologische Parameter bei Maximalbelastung: Radsportler

4.5.1. Herzfrequenz bei Maximalbelastung: Radsportler

Die Herzfrequenz der Gruppen bei Maximalbelastung (HF_{peak}) unterschied sich auf dem jeweiligen Ergometer nicht signifikant voneinander ($p > 0,05$). Eine Ausnahme stellte die HF_{peak} auf dem RE bzw. TM dar: hier lag die HF_{peak} der CWT-Gruppe signifikant unter der der Kontrollgruppe (RE: CWT < 6 %: $179,1 \pm 7,9$ vs. $189,3 \pm 5,4$ bpm bzw. TM: CWT < 8 %: $186,1 \pm 9,5$ vs. $199,6 \pm 8,3$ bpm) ($p < 0,01$) (Abb. 24).

Die CWT-Gruppe erreichte ihre höchste Herzfrequenz bei Maximalbelastung (HF_{peak}) auf dem CE bzw. TM ($p > 0,05$) - (CE 4 % > RE ($187,8 \pm 8,4$ vs. $179,1 \pm 7,9$ bpm) ($p < 0,01$); TM 4 % > RE ($186,1 \pm 9,5$ vs. $179,1 \pm 7,9$ bpm) ($p < 0,01$) (Abb. 24)). Die CLT-Gruppe erreichte ihre HF_{peak} auf dem TM (TM 2 % > CE ($192,5 \pm 7,4$ vs. $191,1 \pm 6,1$ bpm) ($p < 0,01$); TM 4 % > RE ($192,5 \pm 7,4$ vs. $185,5 \pm 9,1$ bpm) ($p < 0,01$) (Abb. 52)). Auch die HF_{peak} der CON-Gruppe lag auf dem TM am höchsten (TM 3 % > CE ($199,6 \pm 8,3$ vs. $192,9 \pm 6,1$ bpm) ($p < 0,01$); TM 5 % > RE ($199,6 \pm 8,3$ vs. $189,3 \pm 5,4$ bpm) ($p < 0,01$)). Die niedrigste HF_{peak} erreichen alle drei Gruppen auf dem RE ($p < 0,05$) (Abb. 24).

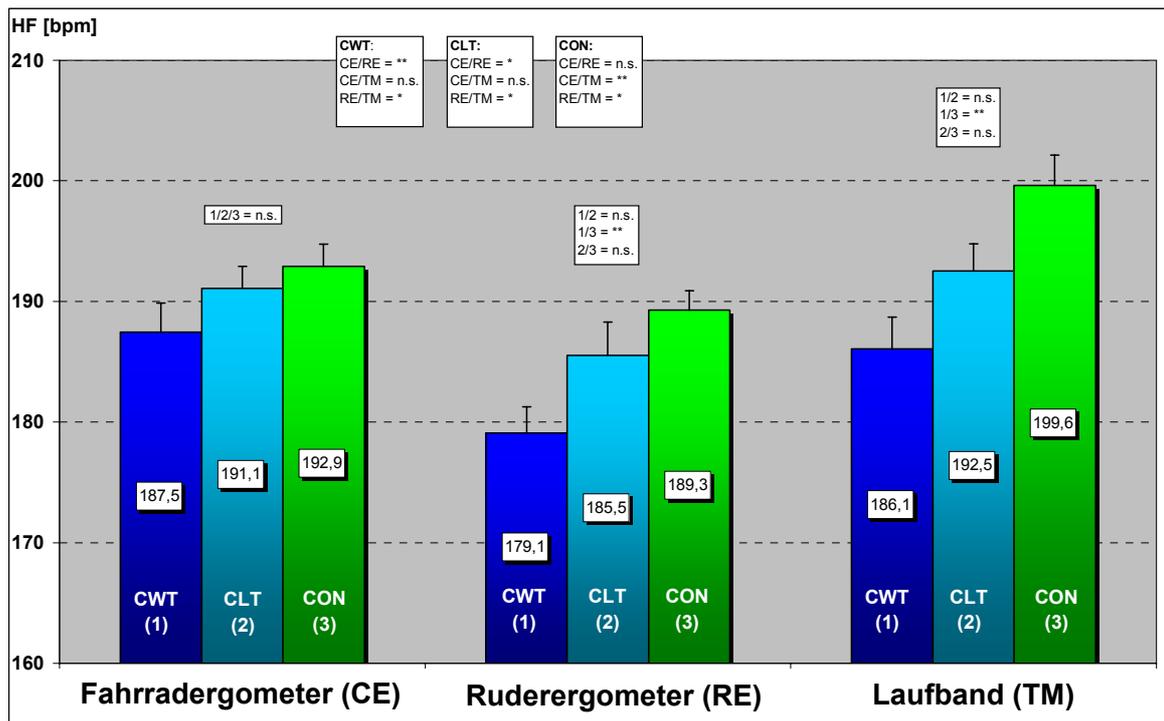


Abbildung 24: maximale Herzfrequenz (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON): alle Tests

Tabelle 13: : deskriptive Statistik maximale Herzfrequenz (bpm) / Radsportler und Kontrollgruppe/ alle Test

	Fahradergometer	Ruderergometer	Laufband	
Mittelwert [MW]				
CWT	187,5	179,1	186,1	
CLT	189,0	183,0	192,5	
CON	192,9	189,3	199,6	
Standardabweichung [SD]				
CWT	8,6	7,9	9,5	
CLT	7,9	7,0	7,4	
CON	6,1	5,4	8,3	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
CWT	2,4	2,2	2,6	
CLT	2,4	2,1	2,2	
CON	1,8	1,6	2,5	
Anzahl [n]				
CWT	13	13	13	
CLT	11	11	11	
CON	11	11	11	
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]				
CWT/CLT/CON	Kruskal-Wallis-Test	0,123	0,018	0,006
CWT/CLT	Mann-Whitney-U-Test	0,907	0,087	0,131
CWT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,052	0,006	0,003
CLT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,114	0,293	0,052
		CWT	CLT	CON
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,004	0,001	0,000
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,005	0,036	0,005
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,401	0,009	0,023
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,006	0,005	0,003

4.5.2. Laktat bei Maximalbelastung: Radsportler

Die Blutlaktatkonzentration bei Maximalbelastung (Lac_{peak}) unterschied sich auf dem jeweiligen Ergometer nicht signifikant voneinander ($p > 0,05$). Eine Ausnahme stellte die Lac_{peak} der Kontrollgruppe (CON) auf dem TM dar: hier lag die Lac_{peak} signifikant mit 39 % über der CLT-Gruppe ($10,7 \pm 2,7$ vs. $7,7 \pm 1,4$ mmol/l) ($p < 0,01$) und um 55 % über der CWT-Gruppe ($10,7 \pm 2,7$ vs. $6,9 \pm 2,1$ mmol/l) ($p < 0,01$) (Abb. 25).

Auf dem CE erreichte die CWT-Gruppe die höchste Blutlaktatkonzentration bei Maximalbelastung (Lac_{peak}) (CE 62 % > TM ($11,2 \pm 3,3$ vs. $6,9 \pm 2,1$ mmol/l) ($p < 0,01$); CE 39 % > RE ($11,2 \pm 3,3$ vs. $8,1 \pm 2,3$) ($p < 0,01$) (Abb. 25)). Die Lac_{peak} der CLT-Gruppe verhielt sich auf dem CE ähnlich (CE 48 % > TM ($11,4 \pm 2,2$ vs. $7,7 \pm 1,4$ mmol/l) ($p < 0,01$) (Abb. 25)), doch unterschied sie sich nicht signifikant von der Lac_{peak} auf dem RE ($p > 0,05$). Die CWT als auch CLT-Gruppe bildete auf dem TM die niedrigste Lac_{peak} , wobei jedoch keine signifikanten Unterschiede beider Gruppen auf dem RE bestanden ($p > 0,05$). Die Lac_{peak} der Kontrollgruppe (CON) war auf allen Ergometertypen gleich ($p > 0,05$) (Abb. 25).

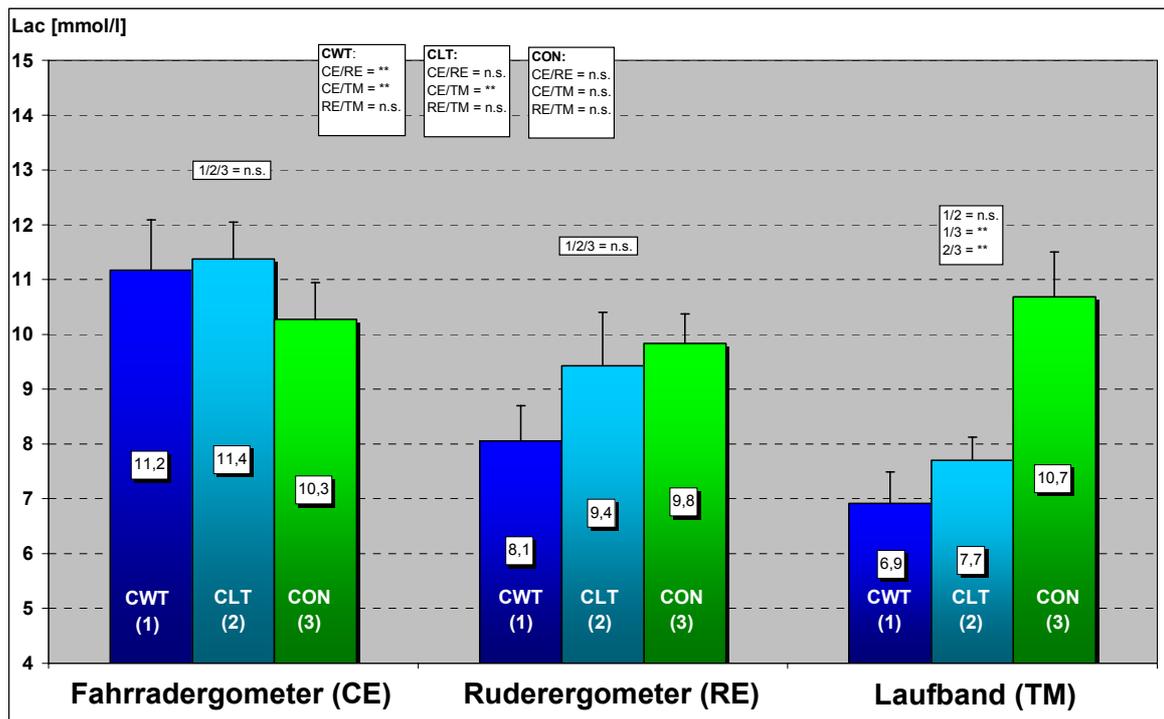


Abbildung 25: maxiales Laktat (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON): alle Tests

Tabelle 14: deskriptive Statistik maxiales Laktat (mmol/l) / Radsportler / alle Test

	Fahradergometer	Ruderergometer	Laufband	
Mittelwert [MW]				
CWT	11,2	8,1	6,9	
CLT	11,4	9,4	7,7	
CON	10,3	9,8	10,7	
Standardabweichung [SD]				
CWT	3,3	2,3	2,1	
CLT	2,2	3,2	1,4	
CON	2,2	1,8	2,7	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
CWT	0,9	0,6	0,6	
CLT	0,7	1,0	0,4	
CON	0,7	0,5	0,8	
Anzahl [n]				
CWT	13	13	13	
CLT	11	11	11	
CON	11	11	11	
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]				
CWT/CLT/CON	Kruskal-Wallis-Test	0,875	0,244	0,002
CWT/CLT	Mann-Whitney-U-Test	0,794	0,224	0,234
CWT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,543	0,111	0,001
CLT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,921	0,818	0,005
		CWT	CLT	CON
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,000	0,009	0,441
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,003	0,274	0,197
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,001	0,003	1,000
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,059	0,100	0,374

4.5.3. Sauerstoffaufnahme bei Maximalbelastung: Radsportler

Die relative Sauerstoffaufnahme bei Maximalbelastung (VO_{2peak}) unterschied sich auf dem jeweiligen Ergometer signifikant in der Reihenfolge CWT > CLT > CON voneinander (Fahrradergometer: VO_{2peak} - CWT lag um 21 % über der CLT-Gruppe ($68,0 \pm 6,0$ vs. $56,4 \pm 6,4$ ml/min/kg) ($p < 0,001$) und um 42 % über CON-Gruppe ($68,0 \pm 6,0$ vs. $47,6 \pm 6,4$ ml/min/kg) ($p < 0,001$); VO_{2peak} - CLT lag um 17 % über CON-Gruppe ($56,4 \pm 6,4$ vs. $47,6 \pm 6,4$ ml/min/kg) ($p < 0,01$) (Abb. 26) - Ruderergometer: VO_{2peak} - CWT lag um 18 % über CLT-Gruppe ($59,5 \pm 4,8$ vs. $51,1 \pm 6,5$ ml/min/kg) ($p < 0,01$) und 28 % über CON-Gruppe ($59,5 \pm 4,8$ vs. $47,0 \pm 6,5$ ml/min/kg) ($p < 0,001$); VO_{2peak} - CLT lag um 9 % über CON-Gruppe ($51,1 \pm 6,5$ vs. $47,0 \pm 6,5$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) (Abb. 54) - Laufband: VO_{2peak} - CWT lag um 16 % über der CLT-Gruppe ($63,5 \pm 4,6$ vs. $55,1 \pm 5,6$ ml/min/kg) ($p < 0,01$) und um 19 % über CON-Gruppe ($63,5 \pm 4,6$ vs. $53,8 \pm 7,3$ ml/min/kg) ($p < 0,01$) (Abb. 26)). Eine Ausnahme stellt hier die VO_{2peak} CLT-Gruppe dar, die sich auf dem TM nicht signifikant von der CON-Gruppe unterschied ($p > 0,05$).

Die CWT- als auch CLT-Gruppe erreichte die höchste relative Sauerstoffaufnahme bei Maximalbelastung (VO_{2peak}) auf dem CE bzw. TM ($p > 0,05$) und die niedrigste auf dem RE (CWT: CE 13 % > RE ($68,0 \pm 6,0$ vs. $59,5 \pm 4,8$ ml/min/kg) ($p < 0,01$) (Abb. 26), CLT: CE 9 % > RE ($56,4 \pm 6,4$ vs. $51,1 \pm 6,1$ ml/min/kg) ($p < 0,01$) (Abb. 26)). Die höchste VO_{2peak} erreichte die Kontrollgruppe (CON) auf dem TM (TM 15 % > RE ($54,7 \pm 7,3$ vs. $47,0 \pm 5,6$ ml/min/kg) ($p < 0,01$), TM 13 % > CE ($54,7 \pm 7,3$ vs. $47,7 \pm 2,2$ ml/min/kg) ($p < 0,01$)) – die Werte auf dem CE bzw. RE waren gleich ($p > 0,05$) (Abb. 26).

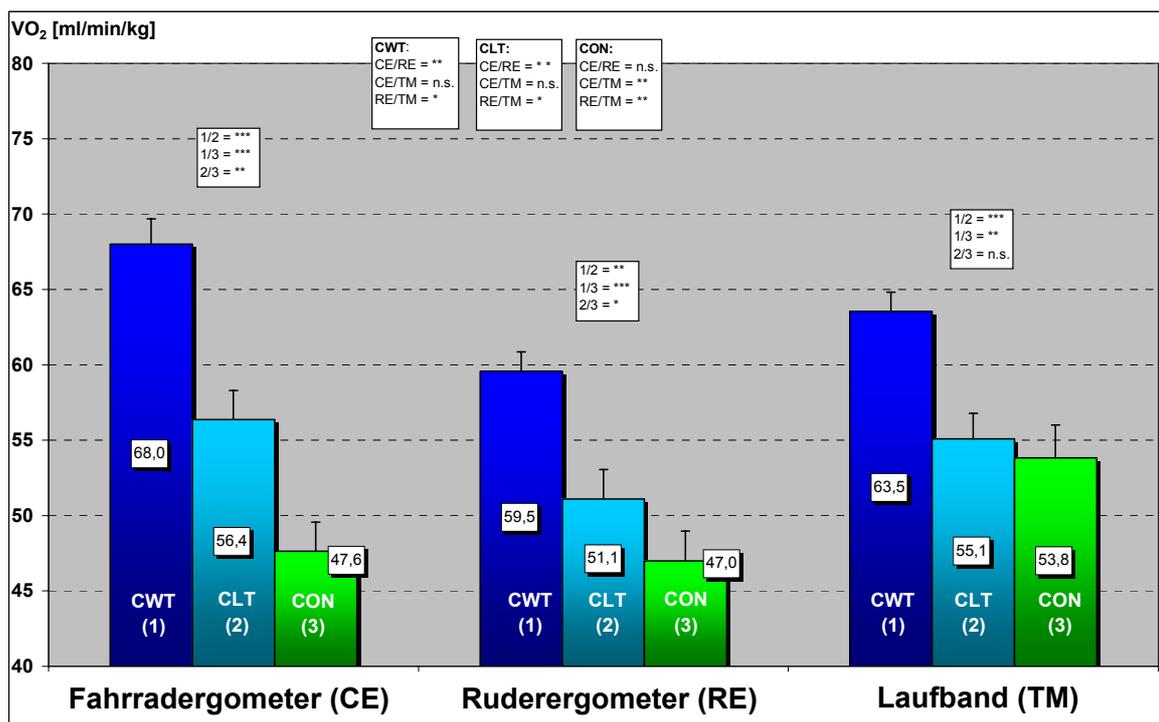


Abbildung 26: maximale Sauerstoffaufnahme (MW / SEM) der Radsportler (CWT / CLT) und der Kontrollgruppe (CON): alle Tests

Tabelle 15: deskriptive Statistik maximale Sauerstoffaufnahme (ml/min/kg) / Radsportler / alle Test

	Fahrradergometer	Ruderergometer	Laufband	
Mittelwert [MW]				
CWT	68,0	59,5	63,5	
CLT	56,4	51,1	55,1	
CON	47,6	47,0	53,8	
Standardabweichung [SD]				
CWT	6,0	4,8	4,6	
CLT	6,4	6,5	5,6	
CON	6,4	6,5	7,3	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
CWT	1,7	1,3	1,3	
CLT	1,9	2,0	1,7	
CON	1,9	2,0	2,2	
Anzahl [n]				
CWT	13	13	13	
CLT	11	11	11	
CON	11	11	11	
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]				
CWT/CLT/CON	Kruskal-Wallis-Test	0,000	0,000	0,001
CWT/CLT	Mann-Whitney-U-Test	0,000	0,002	0,001
CWT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,000	0,000	0,002
CLT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,002	0,027	0,449
		CWT	CLT	CON
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,001	0,022	0,001
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,001	0,009	0,414
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,054	0,442	0,004
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,041	0,042	0,003

4.6. Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration im Verlauf: Ruderergometer Rudersportler

In der RWT-Gruppe fanden sich auf dem RE bei den leistungsphysiologischen Parametern HF und Lac auf sämtlichen Belastungsstufen signifikant niedrigere Werte als in der RLT bzw. CON-Gruppe ($p < 0,05$). Die RLT-Gruppe wies lediglich in Lac signifikant niedrigere Werte als die CON-Gruppe auf ($p < 0,05$) bei gleicher HF ($p > 0,05$) (Abb. 27, 28).

4.6.1. Herzfrequenz Verlauf Ruderergometer Rudersportler

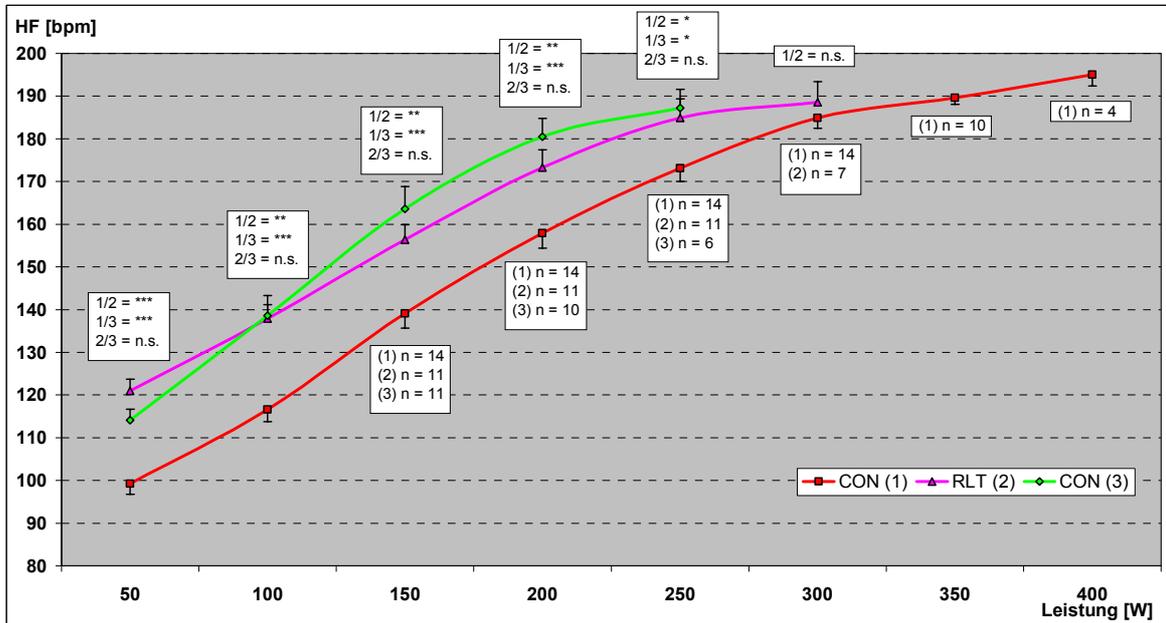


Abbildung 27: Verlauf der Herzfrequenz (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Ruderergometrie

Tabelle 16: deskriptive Statistik Herzfrequenz (bpm) / Rudersportler und Kontrollgruppe / Ruderergometer

	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt	350 Watt	400 Watt
Mittelwert [MW]								
■ RWT	99,2	116,6	139,1	157,9	173,1	184,9	189,6	195,0
▲ RLT	121,0	137,9	156,4	173,3	184,9	188,6	-	-
◆ CON	114,1	138,5	163,5	180,5	187,2	-	-	-
Standardabweichung [SD]								
■ RWT	9,2	10,7	12,8	13,4	11,6	9,0	4,9	5,4
▲ RLT	9,1	10,9	11,7	13,8	14,8	12,7	-	-
◆ CON	8,5	15,8	17,4	13,5	10,8	-	-	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]								
■ RWT	2,5	2,8	3,4	3,6	3,1	2,4	1,6	2,7
▲ RLT	2,7	3,3	3,5	4,2	4,5	4,8	-	-
◆ CON	2,6	4,8	5,3	4,3	4,4	-	-	-
Anzahl [n]								
■ RWT	14	14	14	14	14	14	10	4
▲ RLT	11	11	11	11	11	7	-	-
◆ CON	11	11	11	10	6	-	-	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]								
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,000	0,001	0,002	0,003	0,038	-	-	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,000	0,002	0,011	0,023	0,037	0,636	-	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,001	0,000	0,001	0,001	0,033	-	-	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,169	0,608	0,169	0,123	0,960	-	-	-

4.6.2. Laktat Verlauf Ruderergometer Rudersportler

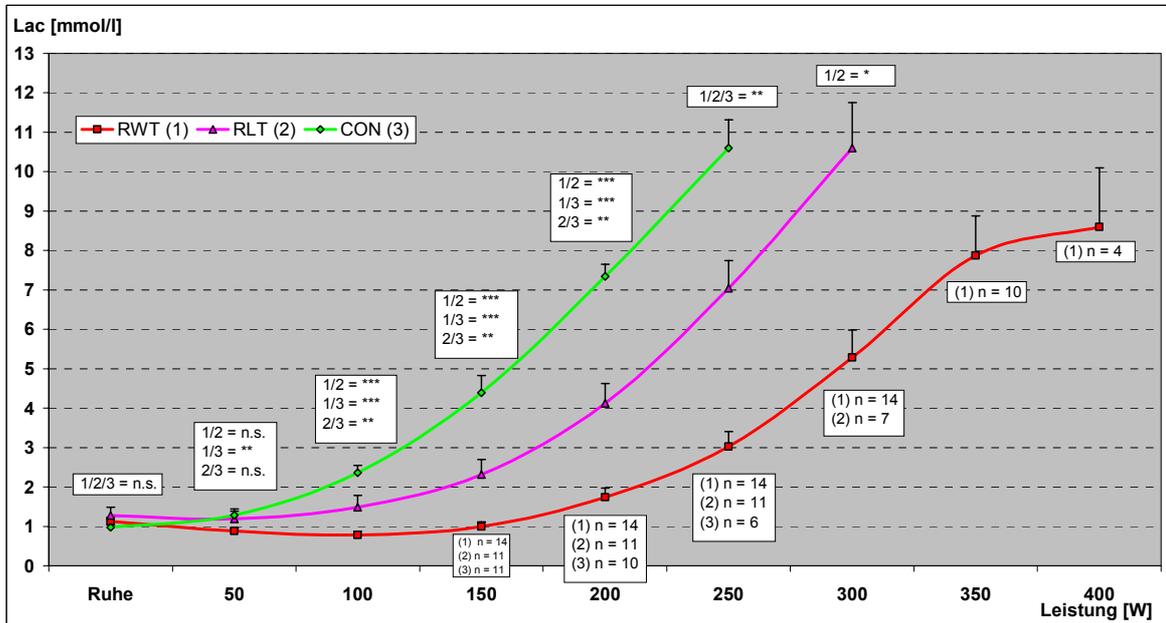


Abbildung 28: Verlauf des Laktats (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Ruderergometrie

Tabelle 17: deskriptive Statistik Laktat (mmol/l) / Rudersportler und Kontrollgruppe / Ruderergometer

	Ruhe	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt	350 Watt	400 Watt
Mittelwert [MW]									
■ RWT	1,1	0,9	0,8	1,0	1,7	3,0	5,3	7,9	8,6
▲ RLT	1,3	1,2	1,5	2,3	4,1	7,0	10,6	-	-
◆ CON	1,0	1,3	2,4	4,4	7,3	10,6	-	-	-
Standardabweichung [SD]									
■ RWT	0,3	0,3	0,3	0,4	0,9	1,8	2,8	3,6	2,9
▲ RLT	0,4	0,4	0,5	0,7	1,7	2,6	2,2	-	-
◆ CON	0,4	0,4	1,0	1,5	2,0	1,6	-	-	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]									
■ RWT	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,7	1,1	1,4
▲ RLT	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,8	0,8	-	-
◆ CON	0,1	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	-	-	-
Anzahl [n]									
■ RWT	14	14	14	14	14	14	14	10	4
▲ RLT	11	11	11	11	11	11	7	-	-
◆ CON	11	11	11	11	10	6	-	-	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]									
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,293	0,022	0,000	0,000	0,000	0,001	-	-	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,458	0,053	0,001	0,000	0,001	0,003	0,013	-	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,225	0,006	0,000	0,000	0,000	0,002	-	-	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,106	0,740	0,009	0,003	0,009	0,009	-	-	-

4.7. Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration im Verlauf: Laufband Rudersportler

In der RWT-Gruppe fanden sich auf dem TM bei den leistungsphysiologischen Parametern HF und Lac auf sämtlichen Belastungsstufen signifikant niedrigere Werte als in der CON-Gruppe ($p < 0,05$) (Abb. 29, 30). Die RWT-Gruppe wies lediglich in der HF und in der Lac auf sämtlichen Belastungsstufen signifikant niedrigere Werte auf als die RLT-Gruppe ($p < 0,05$). Einen Unterschied zwischen der CLT und CON-Gruppe gab es nicht ($p > 0,05$) (Abb. 29, 30).

4.7.1. Herzfrequenz Laufband Rudersportler

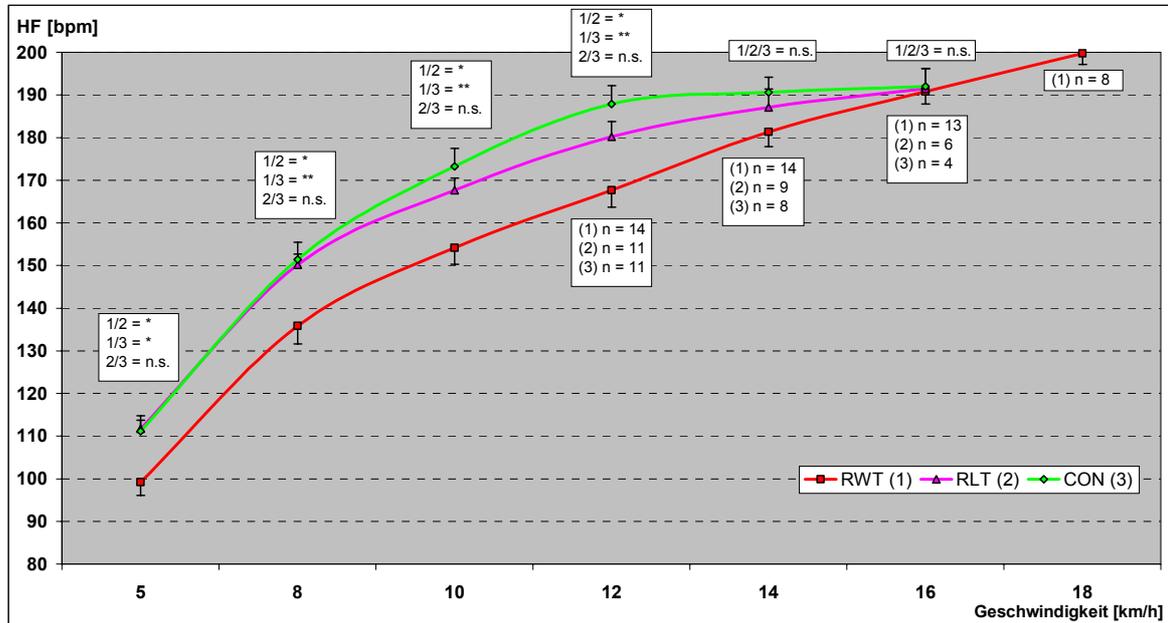


Abbildung 29: Verlauf der Herzfrequenz (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON) während des Laufbandtests

Tabelle 18: deskriptive Statistik Herzfrequenz (bpm) / Rudersportler und Kontrollgruppe / Laufband

	5 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h
Mittelwert [MW]							
■ RWT	99,1	135,8	154,1	167,6	181,4	190,8	199,8
▲ RLT	111,7	150,2	167,6	180,2	187,1	191,5	-
◆ CON	111,2	151,4	173,3	187,9	190,6	192,0	-
Standardabweichung [SD]							
■ RWT	11,5	15,7	14,4	14,6	13,0	10,3	7,2
▲ RLT	10,1	8,3	9,4	11,8	12,8	11,3	-
◆ CON	8,5	13,6	14,0	14,1	9,9	8,5	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]							
■ RWT	3,1	4,2	3,9	3,9	3,5	2,9	2,5
▲ RLT	3,1	2,5	2,8	3,6	4,3	4,6	-
◆ CON	2,6	4,1	4,2	4,3	3,5	4,2	-
Anzahl [n]							
■ RWT	14	14	14	14	14	13	8
▲ RLT	11	11	11	11	9	6	-
◆ CON	11	11	11	11	8	4	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]							
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,024	0,014	0,006	0,007	0,298	0,971	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,031	0,023	0,017	0,040	0,230	0,826	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,011	0,006	0,004	0,004	0,141	0,820	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,880	0,880	0,307	0,212	0,595	0,831	-

4.7.2. Laktat Verlauf Laufband Rudersportler

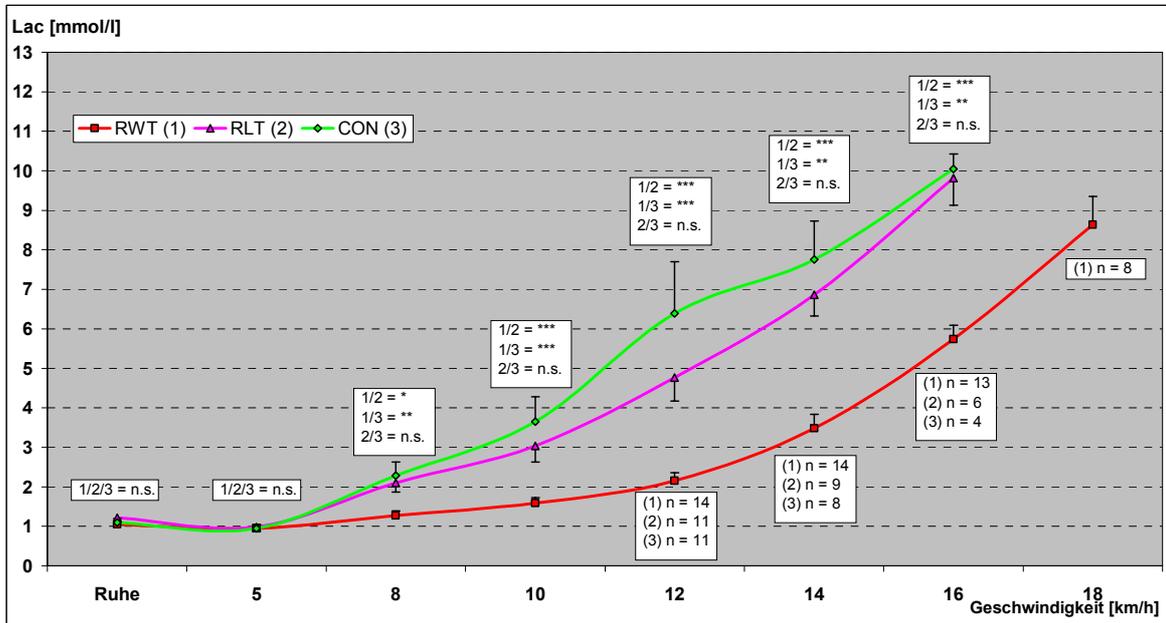


Abbildung 30: Verlauf des Laktats (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON) während des Laufbandtests

Tabelle 19: deskriptive Statistik Laktat (mmol/l) / Rudersportler und Kontrollgruppe / Laufband

	Ruhe	5 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h
Mittelwert [MW]								
■ RWT	1,1	1,0	1,3	1,6	2,2	3,5	5,7	8,6
▲ RLT	1,2	1,0	2,1	3,0	4,8	6,9	9,8	-
◆ CON	1,1	0,9	2,3	3,6	6,4	7,8	10,1	-
Standardabweichung [SD]								
■ RWT	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	1,3	1,3	2,0
▲ RLT	0,5	0,4	0,8	1,4	2,0	1,6	1,7	-
◆ CON	0,3	0,3	1,1	2,1	4,3	2,8	0,8	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]								
■ RWT	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4	0,7
▲ RLT	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,5	0,7	-
◆ CON	0,1	0,1	0,3	0,6	1,3	1,0	0,4	-
Anzahl [n]								
■ RWT	14	14	14	14	14	14	13	8
▲ RLT	11	11	11	11	11	9	6	-
◆ CON	11	11	11	11	11	8	4	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]								
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,556	0,930	0,005	0,001	0,000	0,002	0,004	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,320	0,782	0,013	0,001	0,000	0,000	0,000	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,543	0,741	0,002	0,000	0,000	0,013	0,003	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,742	0,895	0,609	0,379	0,487	0,965	0,527	-

4.8. Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration im Verlauf: Fahrradergometer Rudersportler

In der RWT-Gruppe fanden sich auf dem CE bei den leistungsphysiologischen Parametern HF und Lac auf sämtlichen Belastungsstufen signifikant niedrigere ($p < 0,05$) Werte als in der RLT und CON-Gruppe, wohingegen sich keine signifikanten Unterschiede in oben genannten Parametern zwischen RLT und CON-Gruppe zeigten ($p > 0,05$) (Abb. 31, 32) gab.

4.8.1. Herzfrequenz Verlauf Fahrradergometer Rudersportler

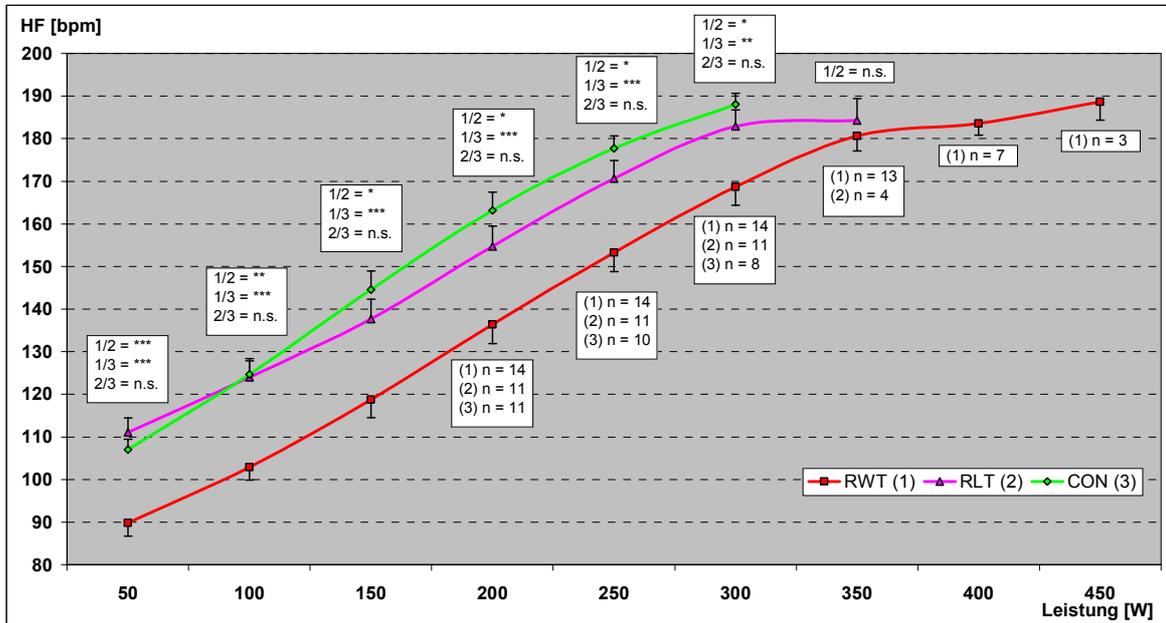


Abbildung 31: Verlauf der Herzfrequenz (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Fahrradergometrie

Tabelle 20: deskriptive Statistik Herzfrequenz (bpm) / Rudersportler und Kontrollgruppe / Fahrradergometer

	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt	350 Watt	400 Watt	450 Watt
Mittelwert [MW]									
■ RWT	89,8	102,9	118,7	136,4	153,3	168,6	180,6	183,6	188,7
▲ RLT	111,1	124,0	137,6	154,7	170,6	182,9	184,3	-	-
◆ CON	107,0	124,6	144,5	163,2	177,7	188,0	-	-	-
Standardabweichung [SD]									
■ RWT	11,5	11,0	15,6	16,7	16,8	16,0	12,6	7,3	7,6
▲ RLT	11,0	14,5	15,4	15,8	14,0	12,8	10,3	-	-
◆ CON	8,2	10,7	14,7	14,2	9,3	7,4	-	-	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]									
■ RWT	3,1	2,9	4,2	4,5	4,5	4,3	3,5	2,8	4,4
▲ RLT	3,3	4,4	4,7	4,8	4,2	3,9	5,2	-	-
◆ CON	2,5	3,2	4,4	4,3	3,0	2,6	-	-	-
Anzahl [n]									
■ RWT	14	14	14	14	14	14	13	7	3
▲ RLT	11	11	11	11	11	11	4	-	-
◆ CON	11	11	11	11	10	8	-	-	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]									
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,001	0,000	0,002	0,003	0,003	0,008	-	-	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,001	0,003	0,020	0,031	0,036	0,025	0,932	-	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	-	-	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,608	0,566	0,211	0,190	0,140	0,395	-	-	-

4.8.2. Laktat Verlauf Fahrradergometer Rudersportler

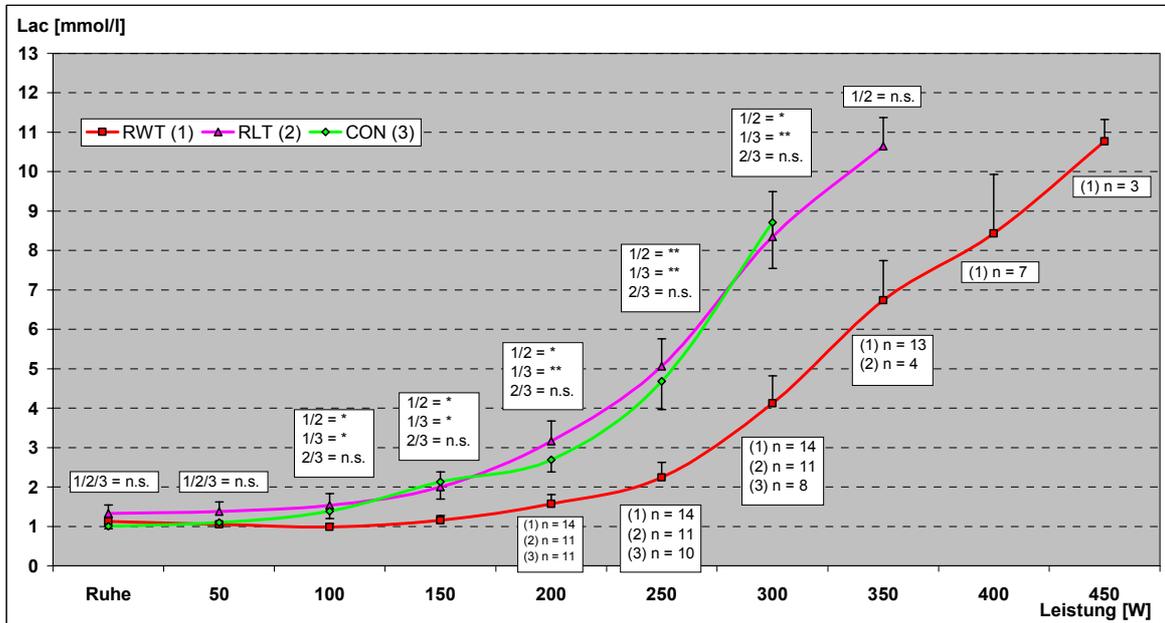


Abbildung 32: Verlauf des Laktats (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON) während der Fahrradergometrie

Tabelle 21: deskriptive Statistik Laktat (mmol/l) / Rudersportler und Kontrollgruppe / Fahrradergometer

	Ruhe	50 Watt	100 Watt	150 Watt	200 Watt	250 Watt	300 Watt	350 Watt	400 Watt	450 Watt
Mittelwert [MW]										
■ RWT	1,1	1,1	1,0	1,2	1,6	2,2	4,1	6,7	8,4	10,8
▲ RLT	1,3	1,4	1,5	2,0	3,2	5,1	8,3	10,7	-	-
◆ CON	1,0	1,1	1,4	2,1	2,7	4,7	8,7	-	-	-
Standardabweichung [SD]										
■ RWT	0,4	0,3	0,3	0,4	0,9	1,4	2,6	3,6	4,0	1,0
▲ RLT	0,7	0,8	1,0	1,3	1,7	2,3	3,8	1,4	-	-
◆ CON	0,2	0,3	0,6	1,4	1,0	2,3	3,3	-	-	-
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]										
■ RWT	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,5	0,6
▲ RLT	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,2	0,7	-	-
◆ CON	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	0,7	1,2	-	-	-
Anzahl [n]										
■ RWT	14	14	14	14	14	14	14	13	7	3
▲ RLT	11	11	11	11	11	11	11	4	-	-
◆ CON	11	11	11	11	11	10	8	-	-	-
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]										
■ ▲ ◆ Kruskal-Wallis-Test	0,864	0,716	0,077	0,033	0,008	0,004	0,008	-	-	-
■ ▲ Mann-Whitney-U-Test	0,544	0,295	0,042	0,023	0,011	0,005	0,023	0,079	-	-
■ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,544	0,760	0,039	0,029	0,005	0,002	0,003	-	-	-
▲ ◆ Mann-Whitney-U-Test	0,509	0,269	1,000	0,786	0,786	0,974	0,571	-	-	-

4.9. Leistungsphysiologische Parameter bei Maximalbelastung: Rudersportler

4.9.1. Herzfrequenz bei Maximalbelastung: Rudersportler

Die Herzfrequenz der Gruppen bei Maximalbelastung (HF_{peak}) unterschied sich auf dem jeweiligen Ergometer nicht signifikant voneinander ($p > 0,05$), mit Ausnahme der RWT-Gruppe, die auf dem RE eine 2 % höhere HF_{peak} aufweist als die CON-Gruppe ($193,1 \pm 4,8$ vs. $189,3 \pm 5,4$ bpm) ($p < 0,05$) (Abb. 33).

Die Herzfrequenz bei Maximalbelastung (HF_{peak}) der RWT und der RLT-Gruppe war auf allen Ergometertypen gleich ($p > 0,05$) (Abb. 33). Eine Ausnahme stellte die RWT-Gruppe dar, die auf dem TM eine signifikant höhere HF_{peak} aufwies als auf dem CE (TM 3% > CE ($196,6 \pm 10,4$ vs. $192,4 \pm 6,2$ bpm) ($p < 0,05$) (Abb. 33). Die Kontrollgruppe (CON) erreichte ihre höchste HF_{peak} auf dem TM (TM 4 % > CE ($199,6 \pm 8,3$ vs. $192,9 \pm 6,1$ bpm) ($p < 0,05$); TM 6 % > RE ($199,6 \pm 8,3$ vs. $189,3 \pm 5,4$ bpm) ($p < 0,01$)), und auf dem RE die signifikant niedrigste HF_{peak} (TM 6 % > RE ($199,6 \pm 8,3$ vs. $189,3 \pm 5,4$ bpm) ($p < 0,01$); CE 2 % > RE ($192,9 \pm 6,1$ vs. $189,3 \pm 5,4$ bpm) ($p < 0,01$) (Abb. 33).

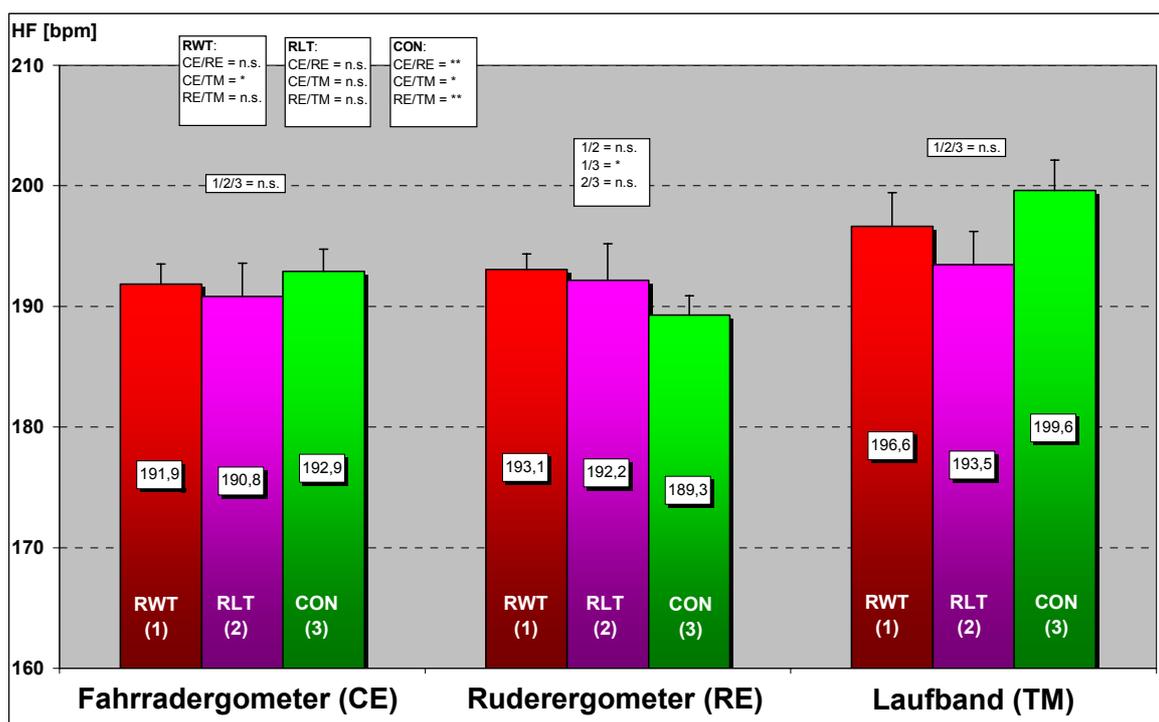


Abbildung 33: maximale Herzfrequenz (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON): alle Tests

Tabelle 22: deskriptive Statistik maximale Herzfrequenz (bpm) / Rudersportler und Kontrollgruppe / alle Test

	Fahrradergometer	Ruderergometer	Laufband	
Mittelwert [MW]				
RWT	191,9	193,1	196,6	
RLT	190,8	192,2	193,5	
CON	192,9	189,3	199,6	
Standardabweichung [SD]				
RWT	6,2	4,8	10,4	
RLT	9,2	9,9	9,2	
CON	6,1	5,4	8,3	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
RWT	1,7	1,3	2,8	
RLT	2,8	3,0	2,8	
CON	1,8	1,6	2,5	
Anzahl [n]				
RWT	14	14	14	
RLT	11	11	11	
CON	11	11	11	
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]				
RWT/RLT/CON	Kruskal-Wallis-Test	0,740	0,151	0,428
RWT/RLT	Mann-Whitney-U-Test	1,000	0,978	0,529
RWT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,442	0,034	0,681
RLT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,576	0,250	0,138
		RWT	RLT	CON
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,027	0,257	0,000
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,181	0,687	0,005
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,028	0,090	0,023
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,140	0,539	0,003

4.9.2. Laktat bei Maximalbelastung: Rudersportler

Die Blutlaktatkonzentration bei Maximalbelastung (Lac_{peak}) unterschied sich auf dem jeweiligen Ergometer nicht signifikant voneinander ($p > 0,05$). Eine Ausnahme stellt die Lac_{peak} der Kontrollgruppe (CON) auf dem TM dar, die mit 41 % signifikant über der RWT-Gruppe lag ($10,7 \pm 2,7$ vs. $7,6 \pm 2,1$ mmol/l) ($p < 0,01$) (Abb. 34).

Auf dem CE erreichte die RWT-Gruppe die höchste Blutlaktatkonzentration bei Maximalbelastung (Lac_{peak}) (CE 50 % > TM ($11,4 \pm 3,2$ vs. $7,6 \pm 2,1$ mmol/l) ($p < 0,01$); CE 27 % > RE ($11,4 \pm 3,2$ vs. $9,0 \pm 2,7$ mmol/l) ($p < 0,01$) (Abb. 34). Auch die RLT-Gruppe erreichte ihre höchste Lac_{peak} auf dem CE (CE 35 % > TM ($12,0 \pm 3,5$ vs. $8,9 \pm 2,0$ mmol/l) ($p < 0,05$)), doch unterschied sie sich nicht von der Lac_{peak} auf dem RE ($p > 0,05$) (Abb. 34). Die RWT als auch RLT-Gruppe wies auf dem TM die niedrigste Lac_{peak} auf, wobei jedoch keine signifikanten Unterschiede zur Lac_{peak} auf dem RE bestanden ($p > 0,05$). Die Kontrollgruppe (CON) bildete auf allen Ergometertypen die gleiche Lac_{peak} ($p > 0,05$) (Abb. 34).

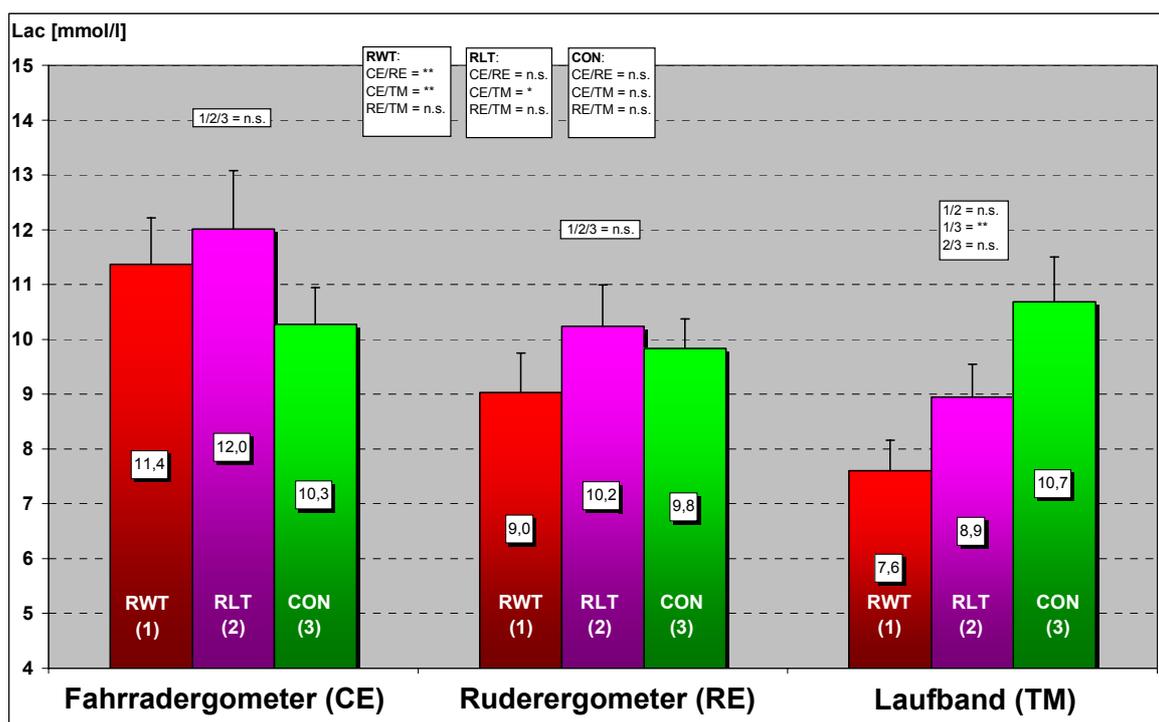


Abbildung 34: maximales Laktat (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON): alle Tests

Tabelle 23: deskriptive Statistik maximales Laktat (mmol/l) / Rudersportler und Kontrollgruppe / alle Test

	Fahrradergometer	Ruderergometer	Laufband	
Mittelwert [MW]				
RWT	11,4	9,0	7,6	
RLT	12,0	10,2	8,9	
CON	10,3	9,8	10,7	
Standardabweichung [SD]				
RWT	3,2	2,7	2,1	
RLT	3,5	2,5	2,0	
CON	2,2	1,8	2,7	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
RWT	0,8	0,7	0,6	
RLT	1,1	0,8	0,6	
CON	0,7	0,5	0,8	
Anzahl [n]				
RWT	14	14	14	
RLT	11	11	11	
CON	11	11	11	
p-Wert [grau unterlegt, falls $p < 0,05$]				
RWT/RLT/CON	Kruskal-Wallis-Test	0,670	0,343	0,017
RWT/RLT	Mann-Whitney-U-Test	0,702	0,189	0,119
RWT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,584	0,362	0,007
RLT/NOSCON	Mann-Whitney-U-Test	0,375	0,450	0,131
		RWT	RLT	CON
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,003	0,048	0,441
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,009	0,182	0,197
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,008	0,041	1,000
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,133	0,109	0,374

4.9.3. Sauerstoffaufnahme bei Maximalbelastung: Rudersportler

Die relative Sauerstoffaufnahme der Gruppen bei Maximalbelastung (VO_{2peak}) unterschied sich auf dem jeweiligen Ergometer signifikant in der Reihenfolge $RWT > RLT > CON$ voneinander (Fahrradergometer: VO_{2peak} - RWT lag um 12 % über der RLT-Gruppe ($64,0 \pm 6,3$ vs. $56,5 \pm 9,5$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) und um 33 % über der CON-Gruppe ($64,0 \pm 6,3$ vs. $47,6 \pm 6,4$ ml/min/kg) ($p < 0,001$); VO_{2peak} - RLT lag um 19 % über der CON-Gruppe ($56,5 \pm 9,5$ vs. $47,6 \pm 6,4$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) (Abb. 35) - Ruderergometer: VO_{2peak} - RWT lag um 13 % über der RLT-Gruppe ($68,1 \pm 7,2$ vs. $59,6 \pm 8,0$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) und 45 % über CON-Gruppe ($68,1 \pm 7,2$ vs. $47,0 \pm 6,5$ ml/min/kg) ($p < 0,001$); VO_{2peak} - RLT lag um 28 % über der CON-Gruppe ($59,6 \pm 8,0$ vs. $47,0 \pm 6,5$ ml/min/kg) ($p < 0,01$) (Abb. 35) - Laufband: VO_{2peak} - CWT lag um 11 % über der RLT-Gruppe ($67,7 \pm 6,9$ vs. $61,5 \pm 8,4$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) und um 26 % über der CON-Gruppe ($67,7 \pm 6,9$ vs. $53,8 \pm 7,3$ ml/min/kg) ($p < 0,001$); VO_{2peak} - RLT lag um 13 % über der CON-Gruppe ($61,5 \pm 8,4$ vs. $53,8 \pm 7,3$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) (Abb. 35)).

Auf dem RE und TM erreichte die RWT-Gruppe die gleiche relative Sauerstoffaufnahme bei Maximalbelastung (VO_{2peak}) ($p < 0,05$), wohingegen sie auf dem CE signifikant niedriger lag (RE und TM 6 % > CE ($68,1 \pm 7,2$ bzw. $67,7 \pm 6,9$ vs. $64,5 \pm 6,3$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) (Abb. 35). Die RLT-Gruppe erreichte ihre höchste VO_{2peak} auf dem TM (TM 7% > CE ($60,6 \pm 8,4$ vs. $57,5 \pm 9,5$ ml/min/kg) ($p < 0,05$) (Abb. 58)). Die VO_{2peak} der Kontrollgruppe (CON) lag auch auf dem TM signifikant ($p > 0,05$) am höchsten (TM 15 % > RE ($54,7 \pm 7,3$ vs. $47,0 \pm 6,5$ ml/min/kg) ($p < 0,01$); TM 13 % > CE ($54,7 \pm 7,3$ vs. $47,7 \pm 6,4$ ml/min/kg) ($p < 0,01$)) – die erreichten Werte auf dem CE bzw. RE unterscheiden sich nicht ($p < 0,05$) (Abb. 35).

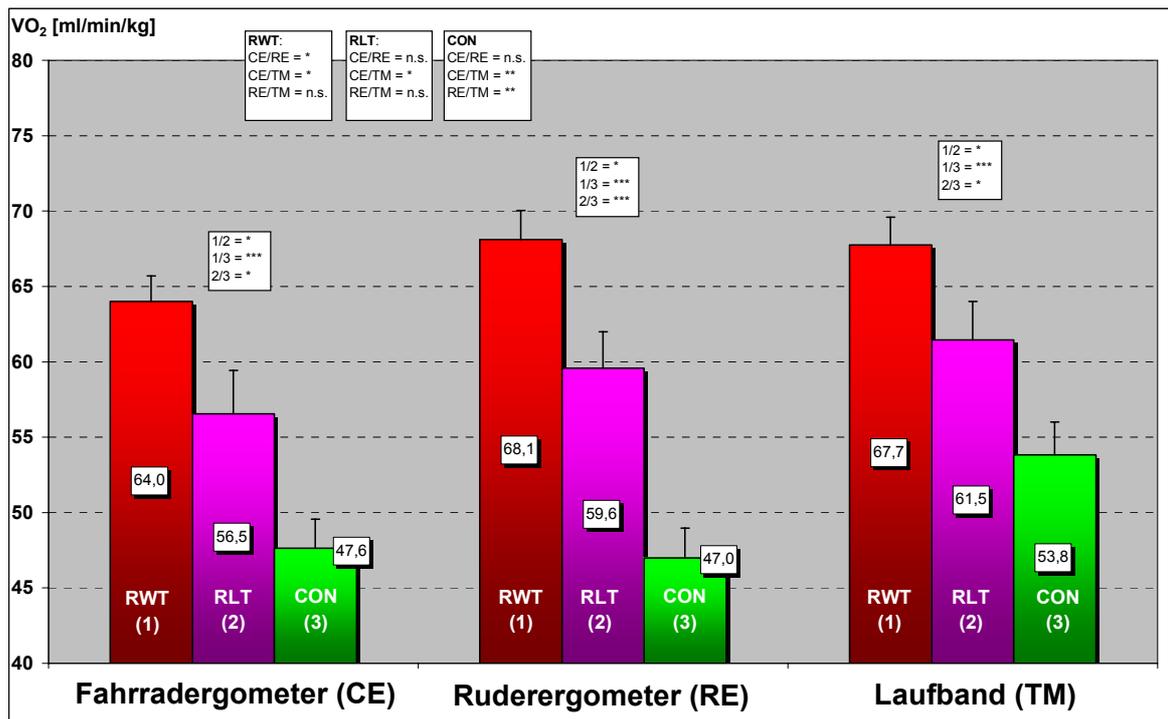


Abbildung 35: maximale Sauerstoffaufnahme (MW / SEM) der Rudersportler (RWT / RLT) und der Kontrollgruppe (CON): alle Tests

Tabelle 24: deskriptive Statistik maximale Sauerstoffaufnahme (ml/min/kg) / Rudersportler und Kontrollgruppe – alle Tests

	Fahrradergometer	Ruderergometer	Laufband	
Mittelwert [MW]				
RWT	64,0	68,1	67,7	
RLT	56,5	59,6	61,5	
CON	47,6	47,0	53,8	
Standardabweichung [SD]				
RWT	6,3	7,2	6,9	
RLT	9,5	8,0	8,4	
CON	6,4	6,5	7,3	
Standardfehler des Mittelwertes [SEM]				
RWT	1,7	1,9	1,9	
RLT	2,9	2,4	2,5	
CON	1,9	2,0	2,2	
Anzahl [n]				
RWT	14	14	14	
RLT	11	11	11	
CON	11	11	11	
p-Wert [grau unterlegt, falls p < 0,05]				
RWT/RLT/CON	Kruskal-Wallis-Test	0,000	0,000	0,001
RWT/RLT	Mann-Whitney-U-Test	0,035	0,013	0,029
RWT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,000	0,000	0,000
RLT/CON	Mann-Whitney-U-Test	0,016	0,001	0,038
		RWT	RLT	CON
CE/RE/TM	Friedman-Test	0,015	0,060	0,001
CE/RE	Wilcoxon-Test	0,021	1,000	0,414
CE/TM	Wilcoxon-Test	0,043	0,036	0,004
RE/TM	Wilcoxon-Test	0,814	0,230	0,003

5. Diskussion

5.1. Herzfrequenz an der individuellen anaeroben Schwelle

5.1.1. Herzfrequenz an der IAS: Radsportler intraindividuell

Leistungs- und Breitensportler im Radsport kommen immer wieder in Trainingsphasen, in denen sie neben ihrer Hauptsportart gerade im Winter andere Sportarten zum Ausgleich ausüben, um eine gewisse Abwechslung bei Erhaltung der Kondition zu erfahren. Aber auch Breiten- und Fitnessportler, die mehrere Sportarten nebeneinander ausüben, da sie je nach Jahreszeit und äußeren Bedingungen im Winter laufen gehen und im Sommer das Fahrrad bevorzugen. In beiden Fällen tritt die Frage auf, inwieweit man Trainingsempfehlungen in Form von Herzfrequenzbereichen, die anhand der individuell anaeroben Schwelle (IAS) bestimmt wurden, von einer Sportart auf die andere übertragen kann. Die oft angewandte grobe Schätzung, bei der man beim Laufen um bis zu 20 bpm auf die Radtrainingsempfehlungen addiert, ist ungenau und nicht auf jeden Athleten zutreffend [102]. Im Rahmen dieser Studie wurde bei jedem Probanden und auf jedem Ergometertypen anhand des Punktes der größten Steigungsänderung der Laktatleistungskurve die individuell anaerobe Schwelle (IAS) bestimmt und damit die Herzfrequenz an diesem Punkt (HF_{IAS}), was einen intraindividuellen Vergleich zwischen den Ergometertypen möglich machte.

Betrachtet man die Radsportler (CWT / CLT) und die Kontrollgruppe (CON) (Kap. 4.1.1.), so erkennt man, dass die o.g. Schätzung bezogen auf das Fahrradergometer (CE) bzw. dem

Laufband (TM) tendenziell bei der Gruppe der CLT bzw. CON zutrifft. Die HF_{IAS} der weniger bzw. nicht spezifisch trainierten Gruppe (CLT / CON) lag auf dem TM um 12 bpm (CLT) bzw. um 13 bpm (CON) über der HF_{IAS} auf dem CE. Dies würde man so auch bei nicht spezifisch Trainierten erwarten, denn beim Laufen wird absolut mehr Muskulatur eingesetzt, die entscheidend für die Laktatelimination ist [12, 75, 95, 96, 149] und somit die Laktatleistungskurve später ansteigen lässt. Beim Radfahren hingegen kommt es zur frühen peripheren Ermüdung, da die kleinere absolut eingesetzte Muskelmasse stärker azidotisch wird [9]. Radfahren führt im Gegensatz zum Laufen zu einer konzentrischen Muskelbelastung und somit stärkeren Muskelspannung [13, 25]. Dadurch bedingt kommt es zur vermehrten Rekrutierung von Typ II Muskelfasern [24], die konsekutiv zu einer stärkeren Kohlenhydratutilisation mit einer höheren Laktatproduktion führt [68]. Somit steigt ihre Laktatkurve beim Radfahren im Vergleich zum Laufen früher steiler an. Die Tatsache, dass die CLT-Gruppe eine ähnliche Differenz der HF_{IAS} zwischen TM und CE aufwies wie die CON-Gruppe bedeutet, dass ihr Radtraining nicht ausreicht, um ihre IAS auf dem CE nach rechts zu verschieben. Letzteres war jedoch der CWT-Gruppe aufgrund ihrer Trainingsspezifität und den damit verbundenen metabolischen als auch kardiopulmonalen Adaptationen möglich, so dass ihre HF_{IAS} auf dem CE letztlich der auf dem TM entsprach. Somit ist festzuhalten, dass bei spezifisch gut trainierten Radsportlern, also hochtrainierten Athleten, die Trainingsempfehlung in Form von Herzfrequenzbereichen relativ zur HF_{IAS} von dem CE auf das TM oder umgekehrt übernommen werden kann. Bei wenig trainierten Radsportlern liegt die HF_{IAS} auf dem CE um 13 bpm unter der auf dem TM (Tab. 3).

Diese Daten entsprechen zum Teil den Ergebnissen der Literatur [102]. Roecker et al. berichtet auf dem TM bei Freizeitsportlern bzw. nicht spezifisch trainierten Sportlern von einer bis zu 22,4 bpm höher liegenden HF_{IAS} als auf dem CE und bei spezifisch trainierten Radsportlern von einer bis zu 13,7 bpm höheren. Damit entsprechen die zitierten Ergebnisse in der Tendenz den Ergebnissen der vorliegenden Studie (Delta HF_{IAS} CON 12,6 bpm / CLT 11,8 bpm), auch wenn es sich im Falle der CON-Gruppe um 40 % geringeres Delta handelte. Aufgrund der Tatsache, dass in beiden Studien die Wahl der Ergometertypen und der Testprofile identisch war, verwundert die große Abweichung

bezüglich der CON-Gruppe. Bei genauerer Betrachtung der ausgewählten Probanden fällt einem auf, dass die Freizeitsportler der zitierten Studie um 49 % weniger Leistung (P) an der IAS erbracht haben als die Kontrollgruppe dieser Arbeit (P_{IAS} : $150,3 \pm 54,1$ vs. $224,5 \pm 39,3$ W). Allerdings war die Laufgeschwindigkeit (V) an der IAS in beiden Gruppen annähernd gleich (V_{IAS} : $11,0 \pm 2,4$ vs. $11,5 \pm 1,8$ km/h). Das größere Delta ist folglich durch die schlechtere Fahrradergometerleistung erklärbar. Die IAS der Radsportler der zitierten Studie lag auf dem CE bei $222,0 \pm 47,1$ W und auf dem TM bei $12,3 \pm 1,5$ km/h und entsprach somit den Werten an der IAS der CLT-Gruppe auf beiden Ergometern dieser Studie (P_{IAS} : $247,9 \pm 41,6$ W bzw. V_{IAS} : $9,5 \pm 1,9$ km/h). Eine Übereinstimmung des HF_{IAS} Deltas ist daher plausibel.

Will man die Trainingsintensitäten, die auf dem CE bzw. TM erhoben wurden, auf das RE übertragen, so muss man in beiden Fällen die Herzfrequenzempfehlungen niedriger setzen. In welcher Höhe ist von dem jeweiligen Trainingsstatus und der Belastungsform abhängig (Tab. 3). Ursächlich hierfür sind die mangelnde Trainingsspezifität, aufgrund dessen die Muskulatur (Arme und Rumpf) nicht entsprechend ausgebildet ist [29, 44, 50-53, 61, 97, 103, 105, 120, 131] und die mangelnde Bewegungsökonomie. Beides führt zu einer früher und steiler ansteigenden Laktatleistungskurve [7, 10, 12, 45, 55, 63, 74, 148] und damit zum früheren Erreichen der IAS [109]. Darüber hinaus hat die sitzende Körperhaltung bzw. die bessere Muskelpumpe beim Rudern zur Folge, dass die maximal erreichte HF niedriger lag als beim Radfahren oder Laufen (Kap. 5.3.2.) [114, 134, 138, 150], so dass daraus konsequent, so ist zu postulieren, eine niedrigere HF_{IAS} beim Rudern resultieren könnte. Eine quantitative Diskussion der Ergebnisse auf dem RE kann gemäß der derzeitigen wissenschaftlichen Datenlage mangels Publikationen nicht erfolgen.

5.1.2. Herzfrequenz an der IAS: Rudersportler intraindividuell

Entsprechend ihrer Trainingspezifität und den damit verbundenen Adaptationen (metabolisch und kardiovaskulär – siehe Kapitel 5.3.) lag die HF_{IAS} der Rudersportler auf dem RE absolut höher als die der Radsportler und der Kontrollgruppe, als nicht ruderspezifisch trainierte Athleten.

Vergleicht man die HF_{IAS} der Rudersportler zwischen RE und TM, so lag sie auf dem TM zwar höher als auf dem RE (Abb. 17), doch war die Differenz geringer als bei den Radsportlern, denn aufgrund ihrer Trainingsadaptationen ist ihre IAS auf dem RE nach rechts verschoben. Dennoch scheint es paradox, dass die Rudersportler beim Rudern eine niedrigere HF_{IAS} als auf dem TM aufweisen, denn auf dem RE wird absolut mehr Muskelmasse eingesetzt [110, 111, 150], die zu einer größeren Laktatelimination [12, 75, 95, 96, 149] führen müsste und konsekutiv zu einer niedrigeren HF bei gleicher Intensität (IAS). So ist davon auszugehen, dass der intermittierenden Bewegungsablauf beim Rudern mit längeren Kontraktionsphasen (0,8 s) [118] als beim Laufen, ähnlich wie beim Radfahren, zu einer größeren Nutzung von Typ II Muskelfasern [25] und dadurch zu einer höheren Laktatproduktion führt [68]. Die Tatsache, dass das Delta der HF_{IAS} der RLT-Gruppe zwischen TM und RE keine Signifikanz aufweist, ist dennoch widersprüchlich und kann mit den verschiedenen erhobenen Parametern (Lac_{peak} (Abb. 32) und VO_{2peak} (Abb. 33)) nicht schlüssig geklärt werden. Letztlich hätte man dieses Ergebnis bei der RWT-Gruppe erwartet, also wie bei der CWT-Gruppe, da sie die größere Trainingspezifität aufwies. Auf dem TM lag die HF_{IAS} der Kontrollgruppe (CON) um 19 bpm über der auf dem RE, aufgrund der fehlenden Trainingspezifität der beim Rudern eingesetzten Muskulatur, die letztlich zu einer frühen Laktatazidose und zum Abbruch führte (Kap. 4.6.2.). Die HF_{IAS} auf dem CE lag erwartungsgemäß bei der RWT-Gruppe unterhalb der erreichten auf dem RE, da sie in diesem Fall früher auf dem CE peripher ermüdete infolge der fehlenden Trainingspezifität die sie auf dem RE aufweisen kann (HF_{IAS} RWT-Gruppe CE: 4 bpm < RE). In Bezug auf die RLT-Gruppe, ist in diesem Zusammenhang tendenziell auch die Trainingspezifität auf dem RE zu erkennen, was durch den p-Wert von 0,057

deutlich wird. Doch reicht ihr Training noch nicht aus, um eine signifikant höhere HF_{IAS} auf dem RE zu erreichen.

Will man die HF_{IAS} , die auf dem TM bei Rudersportlern ermittelt wurde, auf das CE übertragen, so liegt sie bei wenig trainierten Rudersportlern um 9,9 bpm bzw. bei gut trainierten Rudersportlern um 11,7 bpm niedriger. In Ermangelung von analogen Studien zu dem Vergleich der HF_{IAS} auf verschiedenen Ergometertypen bei Rudersportlern ist eine quantitative Diskussion schwer zu führen. Dennoch ist gemäß der Arbeit von Roecker et. al [102] auf dem TM eine höhere HF_{IAS} als auf dem CE, bei trainierten Athleten (nicht radspezifisch!), zu erwarten gewesen. Die Tatsache, dass mit spezifischem Training (ausgenommen Lauftraining) das Delta der HF_{IAS} zwischen spezifischem Ergometer und TM kleiner wird, wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen, entspricht der Literatur [102]. Die CON-Gruppe wies ein Delta (TM vs. RE) von 18,6 bpm auf, wohingegen es bei der RWT-Gruppe mit 4,7 bpm deutlich geringer war. Dies entspricht den Ergebnissen von Roecker et. al, der bei Radsportlern, also spezifisch Trainierten, ein deutlich niedrigeres Delta der HF_{IAS} zwischen TM vs. CE (13,7 bpm) zeigen konnte als bei der Kontrollgruppe (22,4 bpm).

5.2. Trainingsbedingte metabolische und kardiopulmonale Adaptationen der Radsportler

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt werden konnte, kommt es mit einer höheren Trainingspezifität zu einer Rechtsverschiebung der IAS. Ursächlich hierfür sind sowohl metabolische als auch kardiopulmonale Adaptationen, die im Folgenden erläutert werden. Die quantitative Diskussion der jeweiligen trainingsbedingten Adaptationen erfolgt, bei fehlenden Verlaufsdaten in der Literatur, anhand der Werte bei Maximalbelastung.

5.2.1. Herzfrequenz der Radsportler

Mit verbessertem Trainingszustand kommt es zu Veränderungen der Herzfrequenz, die bei den Radsportlern auf dem Fahrradergometer (CE) deutlich zu erkennen sind. Auf gleichen Belastungsstufen kommt es zu einer Absenkung der Herzfrequenz (HF) (Abb. 20) [19, 20, 26, 64, 72, 73, 128, 136] aufgrund der Adaptation des Herzkreislaufsystems. Ursächlich hierfür ist das vermehrte Plasmavolumen [60, 62, 106, 137] mit konsekutiver Erhöhung des Schlagvolumens [125, 128] und verminderter sympathoadrenerger Stimulation [60, 144] infolge eines erhöhten Parasympathikotonus (CWT- und CLT-Gruppe). Darüber hinaus ist anzunehmen, dass sich als weitere trainingsbedingte Adaptation bei der CWT-Gruppe eine physiologische Myokardhypertrophie als später Adaptationsprozess von jahrelangem intensiven Ausdauertraining (Tab. 1: 18 Trainingsstunden/Woche und 11 Jahre Training) [6, 133, 143], mit der Folge einer weiteren Zunahme des Schlagvolumens, entwickelt hat [35, 48, 128]. Die genannten Adaptationen der Radsportler zeigten sich auch bei den Belastungsformen Rudern (RE) und Laufband (TM).

Eine Ausnahme stellt der Verlauf der HF der CLT-Gruppe auf dem RE dar, da sie bei dieser Belastungsform die gleiche HF wie die CON-Gruppe aufwies. Erwartungsgemäß

hätte die HF der CLT-Gruppe niedriger liegen müssen, wie der Verlauf auf dem CE bzw. TM vermuten lässt (Abb. 18, 20). Entsprechend dieser Verläufe müssen Unterschiede in der kardialen Adaptation der CLT-Gruppe in Form von Plasmavolumendilution [60, 62, 106, 137], Frank-Starling Mechanismus und verminderter sympathoadrenerge Stimulation [60, 144] vorhanden sein, die jedoch auf dem RE nicht deutlich werden. Es wäre zu postulieren, dass ein unökonomischerer Bewegungsablauf zu einer höheren HF führte und somit der „kardiovaskulären Vorteil“ der CLT-Gruppe gegenüber der CON-Gruppe aufgehoben hat.

5.2.1.1. Herzfrequenz der Radsportler bei Maximalbelastung interindividuell

Die maximal erreichte Herzfrequenz (HF_{peak}) der Radsportler und Kontrollgruppe war auf den verschiedenen Ergometern interindividuell gleich (Abb. 24). Eine Ausnahme stellt die HF_{peak} der CWT-Gruppe dar, die auf dem RE und TM eine signifikant niedrigere HF_{peak} erreichte als die CON-Gruppe. Es ist daher anzunehmen, dass die CWT-Gruppe zum einen auf dem RE nicht voll kardiovaskulär ausbelastet war, dies würde durch die signifikant niedrigste intraindividuelle VO_{2peak} gestützt werden (Abb. 26) und zum anderen, dass durch die Lage im Raum und der damit verbesserten Muskelpumpe [114, 134, 138, 150] die Vorlast erhöht und konsekutiv die HF_{peak} niedriger war [114, 134, 138, 150] (intraindividuell betrachtet war die HF_{peak} der CWT-Gruppe auf dem RE am niedrigsten – Abb. 24). Auf dem TM hingegen belastete sich die CWT-Gruppe kardiovaskulär voll aus (intraindividuelle HF_{peak} : CE = TM) und lag mit ihrer HF_{peak} dennoch unter der CON-Gruppe. Obwohl die größere Muskelmasse der CWT-Gruppe (Kap. 3.1.2.) eine höhere HF_{peak} als die CON-Gruppe zur Folge hätte haben müssen [9, 150], sind es die kardialen Adaptationsprozesse durch den höheren Trainingsstatus (Kap. 5.2.1.), die, so ist zu postulieren, zu einer ökonomisierten HF auch bei Maximalbelastung führten.

5.2.1.2. Herzfrequenz der Radsportler bei Maximalbelastung intraindividuell

Intraindividuell betrachtet ist die Reihenfolge der HF_{peak} bei den gut trainierten Radsportlern (CWT) folgendermaßen: sowohl auf dem Fahrradergometer (CE), als auch auf dem Laufband (TM) erreichten sie die gleiche [22] und auf dem RE die signifikant niedrigste HF_{peak} (Abb. 24). Gemäß ihrer Trainingsspezifität setzte die CWT-Gruppe auf dem CE ihre spezifisch trainierte Beinmuskulatur ein, die sie maximal belasten konnte. Auf dem TM hingegen wurde einerseits absolut mehr Muskulatur (Oberkörper / Rumpf) eingesetzt [9, 49, 69, 83], was eine höhere HF_{peak} bedingen würde [9, 150], da sie jedoch andererseits weniger spezifisch trainiert war und daher früher ermüdete, war die HF_{peak} auf dem TM und CE gleich. Basset et. al [5] hat in diesem Zusammenhang bei gut trainierten Radsportlern eine um 2 % signifikant höhere HF_{peak} auf dem TM belegen können und begründet es mit der größeren eingesetzten Muskelmasse. Auf dem Ruderergometer (RE) führten die weniger trainierten oberen Extremitäten durch die lokale Laktatazidose zu einem verfrühten Abbruch der Belastung [27, 32, 112] und damit zu der niedrigsten HF_{peak} , bei fehlender kardiovaskulärer Ausbelastung (Kap. 5.2.1.1.). Es konnten in der Literatur keine Daten bezüglich Radsportler auf dem Ruderergometer gefunden werden, so dass eine quantitative Diskussion an dieser Stelle nicht möglich ist.

Die CLT-Gruppe erreichte auf dem CE als auch RE eine signifikant niedrigere HF_{peak} im Vergleich zu der auf dem TM ($TM 2 \% > CE (192,5 \pm 7,4 \text{ vs. } 191,1 \pm 6,1 \text{ bpm}); TM 4 \% > RE (192,5 \pm 7,4 \text{ vs. } 185,5 \pm 9,1 \text{ bpm})$) (Abb. 24). Es ist anzunehmen, dass es auch hier aufgrund der lokalen Laktatazidose, die durch eine weniger gut ausdauertrainierte Arm-, Oberkörper- und Beinmuskulatur bedingt war [27, 32, 47, 108, 112], die Belastung beendet wurde, obwohl das kardiovaskuläre System noch nicht vollkommen ausbelastet war [48, 49, 79] (Abb. 26). Die Tatsache, dass die HF_{peak} auf dem RE niedriger lag als auf dem CE, kann mit der erhöhten Vorlast (s.o.) und der darüber hinaus weniger ausdauertrainierten ruderspezifischen Muskulatur im Vergleich zur Beinmuskulatur auf dem CE erklärt werden. Auf dem TM war es ihnen möglich, aufgrund des größeren Muskeleinsatzes im Vergleich zum CE [9, 49, 69, 83] sich kardiovaskulär voll auszubelasten und somit die höchste HF_{peak} zu erreichen. Dieser Zusammenhang wird in der Literatur kontrovers

diskutiert. Einerseits lässt sich eine Arbeit zitieren, die bei wenig trainierten Radsportlern ähnliche signifikante Ergebnisse ($HF_{peak} TM 5 \% > CE$ [100]), aber andererseits auch eine Arbeit, die keine Unterschiede belegt [102]. Roecker et al. [102] hat keinen signifikanten Unterschied in seinem Vergleich der HF_{peak} bei wenig trainierten Radsportlern finden können, was mit den spezifischen Adaptationen durch das Radtraining erklärt wird. Es ist ggf. eine mangelnde Ausbelastung der Probanden auf dem TM zu postulieren, da zum einen die Testprotokolle auf dem TM als auch CE identisch mit denen der vorliegenden Studie waren, und zum anderen das Leistungsniveau des Probandenkollektivs dem dieser Arbeit ähnelte ($P_{IAS} Roecker: 222,0 \pm 47,1$ vs. $247,9 \pm 41,6$ W).

Die HF_{peak} der CON-Gruppe (Abb. 24) stellte sich in der gleichen Reihenfolge wie die der CLT-Gruppe auf den verschiedenen Ergometertypen dar. Auf dem TM erreichte sie die höchste HF_{peak} gefolgt von CE und RE [22, 49, 80, 82, 86, 102, 150, 151]. Dies wird durch frühere Arbeiten bestätigt: die HF_{peak} auf dem TM liegt zwischen 2 - 7 bpm über der erreichten auf dem CE [22, 49, 80, 82, 86, 102] bzw. um bis zu 4 bpm über der auf dem RE [150, 151]. Es wird in der Literatur in erster Linie die lokale Ermüdung der Oberschenkelmuskulatur für die niedrigere HF_{peak} auf dem CE herangezogen, die einen Abbruch zur Folge hat, obgleich das kardiovaskuläre System noch nicht vollkommen ausbelastet ist [82, 86, 102]. Darüber hinaus wird aber auch die größere eingesetzte Muskelmasse beim Laufen [49] für die letztlich höhere HF_{peak} auf dem TM, bedingt durch gleichgewichtshaltende und gewichtstragende Faktoren, ursächlich gemacht [102]. Es gibt darüber hinaus auch Quellen in der Literatur zu nicht spezifisch Trainierten, die belegen, dass die HF_{peak} auf CE und TM gleich ist [36, 48, 90]. Pannier et. al führt eine gewisse Habitualisierung an das Radfahren durch die alltägliche Nutzung, die zur Folge hat, dass eine höhere Ausbelastung möglich sei [90]. In weiteren Studien wird das kleinere Schlagvolumen beim Fahrradfahren für die hohe und letztlich gleiche HF_{peak} wie auf dem TM bei Untrainierten verantwortlich gemacht [36, 48]. Durch die längere Kontraktionsphase beim Radfahren, im Gegensatz zum dynamischeren Laufen, ist der venöse Rückfluss und konsekutiv die Ventrikelfüllung erniedrigt, was zu einer höheren Herzfrequenz führen könnte [36]. Die genannten Ergebnisse entsprechen nicht denen der vorliegenden Studie und können ggf. letztlich mit der unterschiedlichen Auswahl und

Anzahl der Probanden und den verschiedenen Testprofilen (Steigung und Stufenlänge) erklärt werden. Da es sich in der Studie von Pannier et. al [90] bei genauerer Betrachtung nicht um Untrainierte im engeren Sinne handelte, sondern um „Sportstudenten“ bzw. „gut trainierte Labormitarbeiter“, die eine VO_{2peak} von $52,9 \pm 1,78$ ml/min/kg auf dem CE aufweisen und somit eher der CLT-Gruppe der vorliegenden Arbeit ähneln, ist ein direkter Vergleich mit der CON-Gruppe nicht möglich. Darüber hinaus war das genutzte Testprotokoll auf dem TM ein anderes als in der vorliegenden Arbeit. Es handelt sich dabei um einen Test mit gleich bleibender Geschwindigkeit (10 km/h) aber sich stetig ändernder Neigung. Letzteres gilt auch für die Arbeit von Faulkner et. al [36], so dass die Daten nicht gleich erhoben wurden und Ursache der unterschiedlichen Ergebnisse sein könnte.

5.2.2. Blutlaktatkonzentration der Radsportler

Mit einer höheren Leistungsfähigkeit kommt es zu einer Zunahme der Mitochondriendichte bzw. -volumen, Kapillarisation der Muskulatur [50-52, 103] und damit verbunden zu einer gesteigerten aeroben Kapazität (höhere Enzymausstattung) [29, 44, 53, 97, 105, 120, 131]. Es werden mehr aerobe Energiebereitstellungsmechanismen aktiviert, weniger Laktat gebildet [45, 50] und die Laktatelimination der Muskulatur verbessert [12, 42, 75, 84, 95, 96, 119]. Konsekutiv verläuft die Laktatleistungskurve (Lac) typischerweise flacher [7, 10, 12, 45, 50, 55, 63, 70, 74, 148] und ist nach rechts verschoben [45, 55, 57, 63, 74], wie an dem Verlauf der Laktatleistungskurve auf dem Fahrradergometer zu erkennen ist (Abb. 19).

Beim Rudern auf dem Ruderergometer (RE), also einer Sportart, bei der neben der Beinmuskulatur zusätzlich die Arme und der Rumpf eingesetzt werden [27, 32, 47, 108], war die Rechtsverschiebung erwartungsgemäß weniger ausgebildet und trat, relativ betrachtet, erst auf höheren Belastungsstufen auf. Die CWT als auch CLT-Gruppe schien in ihrer Arm- und Rumpfmuskulatur ähnlich entwickelt zu sein [111], denn die Laktatkurve beider Gruppen verlief zuerst gleich, bevor sie auf den hohen Stufen (ab 250 Watt) auseinander lief. Erst ab diesem Punkt, so ist zu vermuten, konnte die spezifisch

trainierte Beinmuskulatur der CWT-Gruppe vorteilhaft eingesetzt werden. Der Einsatz weniger gut ausdauertrainierter Muskulatur, d.h. Rekrutierung von FT-Fasern (fast twitch) ,wird durch den früheren und steileren Anstieg der Laktatkurve aller Gruppen deutlich [29, 44, 50-53, 97, 103, 105, 120, 131] (Abb. 23).

Beim Laufen, eine Sportart, bei der neben dem Oberkörper und Rumpf vor allem die unteren Extremitäten vortriebswirksam eingesetzt wird [49, 69, 83], verliefen die Laktatleistungskurven mit höherer Leistungsfähigkeit flacher und stiegen weniger steil an, als Hinweis des Einsatzes der trainierten Beinmuskulatur (Abb. 21).

5.2.2.1. Blutlaktatkonzentration der Radsportler bei Maximalbelastung intraindividuell

Die Tatsache, dass auf dem CE intraindividuell betrachtet das höchste Lac_{peak} erreicht wurde [68] (Abb. 25), liegt an der lokal stark beanspruchten geringen Muskulatur, die verglichen mit exzentrischen Bewegungen (z.B. Laufen) eine höhere Muskelspannung entwickelt, wodurch mehr Typ II Muskelfasern rekrutiert werden [24], die konsekutiv zu einer erhöhten Kohlenhydratutilisation mit einer stärkeren Laktatproduktion führt [68]. Kommt mehr Muskulatur zum Einsatz, kann mehr Laktat eliminiert werden und die Lac_{peak} ist geringer [12, 75, 95, 96, 149], siehe CWT und CLT-Gruppe im intraindividuellen Vergleich auf dem RE als auch TM (Abb. 25).

In der vorliegenden Studie produzierte die CWT-Gruppe auf dem CE 62 % und die CLT-Gruppe 48 % mehr Laktat als auf dem TM. Diese Ergebnisse entsprechen tendenziell denen von Caputo et. al [22], der auf dem CE bei Radsportamateuren eine 31 % höhere Lac_{peak} als auf dem TM, sowie denen von Knechtle et. al, die auf dem CE bei Triathleten, Radsportlern und Läufern eine 20 % höhere Lac_{peak} messen konnte [68]. Schließlich wird das vorliegende Ergebnis auch durch die Arbeit von Verstappen et. al [135] unterstrichen, jedoch kann eine quantitative Diskussion in Ermangelung absoluter Werte der zitierten Studie an dieser Stelle nicht erfolgen.

Die CON-Gruppe hingegen scheint auf allen Ergometertypen metabolisch voll ausgelastet und in ihrer Laktatelimination eingeschränkt gewesen zu sein [12, 42, 75, 84, 95, 96, 119], denn ihre intraindividuelle Lac_{peak} war auf den verschiedenen Ergometertypen gleich (Abb. 25), obwohl unterschiedlich viel Muskulatur zum Einsatz kommt. Die vorliegenden Ergebnisse entsprechen denen der Literatur bei Untrainierten [22]. Caputo et. al konnte bei Untrainierten sowohl auf dem TM als auch auf dem CE die gleiche Lac_{peak} durch mangelnde Ausdauerkapazität feststellen.

5.2.3. Sauerstoffaufnahme der Radsportler

Die maximale Sauerstoffaufnahme gilt als Bruttokriterium der aeroben Kapazität [4, 54, 78, 89, 117, 130, 141] und stellt somit zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit ein wesentliches Kriterium dar. Es ist seit langem bekannt, dass der Trainingstatus die VO_{2max} beeinflusst [14, 55, 63]. Unter Ausdauertraining erhöht sich die Enzymausstattung der Muskulatur mit Enzymen des aeroben Stoffwechsels (Succinat Dehydrogenase, Laktat Dehydrogenase) [29, 44, 53, 97, 105, 120, 131], die letztlich für eine höhere Sauerstoffaufnahme mit entscheidend ist. Darüber hinaus ist die VO_{2max} von der absolut eingesetzten Muskelmasse [3, 11, 33, 77, 99, 108, 111, 124, 130] und damit von der Sportart abhängig [1, 5, 11, 15, 43, 80, 123]. Ausdauertrainierte Athleten erreichen ihre VO_{2max} darüber hinaus in ihrer spezifischen Sportart [46, 77, 81, 87, 90, 93, 124] aufgrund spezifischer Trainingsadaptationen (s.o.). Es ist daher präziser, von der maximal erreichten Sauerstoffaufnahme (VO_{2peak}) zu sprechen, zumal die wahre maximale Sauerstoffaufnahme ggf. erst bei Ausschaltung der autonomen Reserve erreicht werden kann.

5.2.3.1. Sauerstoffaufnahme der Radsportler bei Maximalbelastung interindividuell

Die maximal erreichte relative Saustoffaufnahme (VO_{2peak}) der Radsportler unterscheidet sich auf dem Fahrradergometer in der Reihenfolge CWT > CLT > CON ($68,0 \pm 6,0 > 56,4 \pm 6,4 > 47,6 \pm 6,4 \text{ ml/min/kg}$) (Abb. 26) und entspricht in der Tendenz den Werten der

Literatur (CWT: $69,6 \pm 1,6$ vs. CLT: $58,8 \pm 2,8$ ml/min/kg [71]) bzw. CWT: $67,6 \pm 7,6$ vs. CON: $36,4 \pm 6,0$ ml/min/kg [22]). Entscheidend hierfür ist die Trainingspezifität [22, 81, 90], der damit verbundene bessere aerobe Metabolismus der trainierten Muskulatur [29, 44, 53, 90, 97, 105, 120, 131, 136] und die größere eingesetzte Muskelmasse (Tab. 2) [3, 11, 33, 34, 77, 80, 99, 108, 111, 123, 124, 130].

Die CWT-Gruppe zeigte auch auf dem RE und TM gegenüber den anderen Gruppen eine signifikant höhere VO_{2peak} (Ruderergometer: VO_{2peak} - CWT liegt um 18 % über CLT und um 28 % über CON-Gruppe; Laufband: VO_{2peak} - CWT liegt um 16 % über der CLT und um 19 % über CON-Gruppe). Das Ergebnis belegt den Transfer der Trainingsadaptationen (kardiorespiratorisches System und Metabolismus) auf andere Sportarten und steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Caputo et al. [22]. In dieser genannten Arbeit konnte beim Vergleich der VO_{2peak} von Radsportlern und Untrainierten auf dem TM ein interindividueller Unterschied von 28 % gezeigt werden[22].

Betrachtet man allerdings die VO_{2peak} der CLT und CON-Gruppe auf dem TM, ist festzustellen, dass die VO_{2peak} beider Gruppen gleich war ($p > 0,05$) – und somit ihre maximal erreichte VO_{2peak} im Rahmen dieser Studie (Abb. 26). Aufgrund des Trainings der CLT-Gruppe (Kap. 3.1.1.) wäre auf dem TM auch ein signifikanter Unterschied in der VO_{2peak} zu erwarten gewesen. Ursächlich hätte eine höhere Muskelmasse, bedingt durch das Training der CLT-Gruppe sein können, doch da sich beide Gruppen weder in Bezug auf ihr Körpergewicht, ihrem prozentualen Körperfettanteil noch ihrer Größe signifikant unterschieden (Tab. 2), kann von einer gleich großen absoluten Muskelmasse ausgegangen werden. Daher ist festzustellen, dass das Training der CLT-Gruppe zwar zu einem spezifischen Trainingsvorteil auf dem CE bezogen auf die VO_{2peak} gegenüber der CON-Gruppe führte (VO_{2peak} - CLT liegt um 17 % über CON-Gruppe), jedoch nicht auf dem TM. Die Tatsache der gleichen VO_{2peak} beider Gruppen wurde erst auf dem TM deutlich, da hier einerseits absolut mehr Muskulatur eingesetzt wurde als auf dem CE [9, 49, 69, 83] und andererseits die Trainingspezifität fehlt.

5.2.3.2. Sauerstoffaufnahme der Radsportler bei Maximalbelastung intraindividuell

Die erreichte VO_{2peak} der Radsportler (CWT / CLT) unterschied sich intraindividuell auf dem CE und TM nicht signifikant voneinander ($VO_{2peak} - CWT$: CE $68,0 \pm 6,0$ bzw. TM $63,5 \pm 6,4$ ml/min/kg; $VO_{2peak} - CLT$: CE $56,4 \pm 6,4$ bzw. TM $55,1 \pm 6,5$ ml/min/kg) (Abb. 26), was die Ergebnisse von Hagberg et. al mit gut trainierten Radsportlern (TM $62,9 \pm 1,7$ vs. CE $65,0 \pm 3,4$) [46] und Pechar et. al bei wenig trainierten Radsportlern (TM: $56,3 \pm 6,6$ vs. CE $51,4 \pm 5,6$) [93] bestätigt. Tendenziell kann man in Bezug auf die CWT-Gruppe bei einem p-Wert von 0,054 festhalten, dass die intraindividuell höchste VO_{2peak} auf dem sportartspezifischen Ergometer (CE) erreicht wurde. Viele Studien belegen, dass hoch ausdauertrainierte Athleten ihre maximale VO_{2peak} erreichen, wenn die Ergometrie ihrer spezifischen Sportart entspricht [22, 46, 81, 90, 93, 124, 136]. Trainierte Radsportler erreichen auf dem CE eine um bis zu 13 % höhere VO_{2peak} als auf dem TM [22, 100, 124]. Es ist davon auszugehen, dass die Radsportler in der vorliegenden Studie hochtrainiert waren, vergleicht man ihre VO_{2peak} (68 ml/min/kg) mit den Werten der Literatur (63 - 73 ml/min/kg) [22, 30, 31, 74, 100, 116]. Damit lässt sich die erreichte VO_{2peak} der Radsportler in dieser Studie auf dem CE mit ihrer Trainingsspezifität [22, 46, 124] und auf dem TM mit einer eventuellen Habitualisierung, auch wenn gemäß Trainingsanamnese kein spezifisches Lauftraining absolviert wurde, und dem vor allem größeren Muskeleinsatz erklären [49, 69, 83]. Auf dem RE, auf dem zwar einerseits absolut die meiste Muskulatur zum Einsatz kommt [34, 111, 122, 150], führte andererseits, so ist zu vermuten, die lokale Ermüdung (Laktatazidose) der Oberkörpermuskulatur zu einem frühen Abbruch, obwohl keine kardiopulmonale Ausbelastung vorlag und somit die VO_{2peak} der Radsportler auf dem RE signifikant am niedrigsten war (Abb. 26). Diese Vermutung könnte durch die intraindividuell signifikant am niedrigsten liegende HF_{peak} auf dem RE gestützt werden ($p < 0,01$) (Abb. 24).

Untrainierte Probanden (Kontrollgruppe) weisen ihre höchste VO_{2peak} beim Laufen auf, wie es auch frühere Arbeiten zeigen [3, 5, 22, 25, 36, 43, 48, 49, 69, 79, 80, 82, 86, 90, 107, 118, 135]. Auf dem TM ist die VO_{2peak} bei Untrainierten zwischen 6 - 19 % höher als auf dem CE [3, 22, 25, 36, 43, 48, 49, 80, 82, 86]. Dies belegen auch die erhobenen Daten

dieser Studie: TM VO_{2peak} 15 % > CE und 16 % > RE (Abb. 52). Die CON-Gruppe erreichte auf dem Laufband, einer Sportart mit viel Muskulatureinsatz und bei der durch Alltag, Schule etc. eine gewisse Habitualisierung vorhanden ist, signifikant die höchsten VO_{2peak} Werte, da sie sich hier voll kardiopulmonal als auch muskulär ausbelasten konnte. Im Gegensatz dazu waren sie auf den anderen Ergometertypen (CE / RE) aufgrund von mangelnder spezifischer Muskulatur (CE: Beine; RE: Arme / Beine / Rumpf) und damit verbundener lokaler Ermüdung nicht in der Lage, eine ähnlich hohe VO_{2peak} zu erreichen [3, 5, 22, 25, 36, 43, 48, 49, 69, 79, 80, 82, 86, 90, 107, 118, 135]. Es gibt jedoch auch Literatur, die belegt, dass nicht spezifisch trainierte Probanden auf dem TM die gleiche VO_{2peak} erreichen wie auf dem CE, was mit einer gewissen Gewöhnung der Probanden an das Radfahren im Alltag begründet wird, aufgrund dessen sie sich stärker ausbelasten können [90]. Ferner gibt es Studien, die belegen, dass Untrainierte auf dem CE höhere Werte erreichen als auf dem RE, da durch die fehlende Trainingspezifität bzw. Adaptationen der Muskulatur die ruderspezifischen Muskeln früher ermüden [16, 118], was den Werten der vorliegenden Studie widerspricht, denn hier ist die VO_{2peak} der CON-Gruppe auf dem RE und CE gleich ($p > 0,05$). Die Tatsache, dass die Probanden der zitierten Studie bei genauerer Betrachtung VO_{2peak} Werte von 51,4 bzw. 57,5 ml/min/kg aufweisen, belegt, dass nicht von Untrainierten gesprochen werden kann und somit die Ergebnisse nicht mit denen der vorliegenden Studie vergleichbar sind. Yoshiga et. al [150] hat darüber hinaus bei 55 Untrainierten (healthy men) eine um 3 % höhere VO_{2peak} auf dem RE im Vergleich zu dem TM gefunden, was mit der größeren vortriebswirksam eingesetzten Muskelmasse begründet wird. Auch dieses Ergebnis deckt sich nicht mit dem der vorliegenden Studie. Die fehlende Übereinstimmung des Ergebnisses könnte mit dem unterschiedlichen Studiendesign erklärt werden. Das RE Testprotokoll der zitierten Studie startete im Gegensatz zu dieser Studie bei 150 Watt vs. 50 Watt und wurde alle 2 min um 50 Watt gesteigert vs. 3 min, so dass dieses Protokoll deutlich kürzer war und somit früher hohe ausbelastende Intensitätsstufen erreicht wurden, bevor es, so ist zu postulieren, zur leistungslimitierenden früheren lokalen Ermüdung kam.

5.3. Trainingsbedingte metabolische und kardiopulmonale Adaptationen der Rudersportler

5.3.1. Herzfrequenz der Rudersportler

Als Folge der in Kap. 5.2.1. ausführlich dargestellten kardialen Adaptationsprozesse, wies die RWT-Gruppe auf dem RE die signifikant niedrigste HF auf [19, 20, 26, 64, 72, 73, 128, 136] (Abb. 27, 29, 31). Das Training der RLT-Gruppe reichte jedoch nicht aus, um kardiale Adaptationen auszulösen, da sich ihre HF nicht von der Kontrollgruppe unterschied (RLT = CON).

5.3.1.1. Herzfrequenz der Rudersportler bei Maximalbelastung interindividuell

Die maximal erreichte Herzfrequenz (HF_{peak}) der Rudersportler war auf den verschiedenen Ergometern interindividuell verglichen gleich (Abb. 33). Eine Ausnahme stellte hier die HF_{peak} der CON-Gruppe dar, die auf dem RE eine signifikant niedrigere HF_{peak} , als die RWT-Gruppe aufwies. Es ist anzunehmen, dass die CON-Gruppe, bedingt durch die lokale Azidose der Arm- und Rumpfmuskulatur, sich nicht vollkommen auf dem RE kardiovaskulär ausbelasten konnte, was durch den intraindividuellen Vergleich der HF der CON-Gruppe belegt werden konnte, wie später erläutert wird (Abb. 33).

5.3.1.2. Herzfrequenz der Rudersportler bei Maximalbelastung intraindividuell

Betrachtet man die HF_{peak} im intraindividuellen Vergleich (Abb. 33), so erreichten die gut trainierten Rudersportler (RWT-Gruppe) auf dem Fahrradergometer (CE) signifikant niedrigere Werte als auf dem Laufband (TM), was in der Literatur den Ergebnissen mit nicht radspezifisch trainierten Sportlern entspricht [79, 86, 90] und mit der lokalen

muskulären Ermüdung, die vor der kardiovaskulären Ausbelastung einsetzt, erklärt wird [79, 86, 90]. Die HF_{peak} auf dem TM ist auch im Vergleich zu der auf dem RE höher, was auf das Rudern bezogen mit der horizontalen Lage und der damit verbesserten Muskelpumpe zu erklären sein könnte [150], die eine niedrigere HF_{peak} auch bei maximaler Ausbelastung zur Folge hat [138, 150]. Aktive Muskelmasse stellt eine Pumpe dar, die das zentrale Blutvolumen ansteigen lässt und damit den venösen Rückfluss zum rechten Vorhof erleichtert [33, 114, 132, 134]. In der aufgerichteten Körperhaltung (z.B. Laufen) folgt das Blut der Gravitation in die tieferen Körperabschnitte, wodurch das sympathische Nervensystem aktiviert wird und konsekutiv Blutdruck, Gefäßwiderstand und Herzfrequenz ansteigen [94, 127]. Während bei sitzender Beinarbeit (z.B. Rudern) das zentrale Blutvolumen zum einen aufgrund der Muskelpumpe und zum anderen aufgrund der verminderten Aktivierung des Sympathikus steigt [98]. Durch den erhöhten venösen Rückfluss wird der rechte Ventrikel verstärkt gedehnt was, bedingt durch den Frank-Starling Mechanismus, ein höheres enddiastolisches Volumen (EDV) und Schlagvolumen (SV) zur Folge hat [98, 129, 138] und die HF sinken lässt. Darüber hinaus erhöht das vergrößerte zentrale Blutvolumen den zentral venösen Druck (ZVD) und die Dehnung der Gefäße, wodurch es zur Stimulation der kardiopulmonalen Barorezeptoren kommt, die eine HF Verminderung und eine periphere Vasodilatation zur Folge hat [39, 98].

Die HF_{peak} der RLT-Gruppe war auf allen Ergometertypen gleich, was man nicht erwarten würde, denn gerade auf dem TM hätte man die signifikant höchste HF, wie bei allen anderen Probandengruppen, erwartet. Beim Laufen, als dynamische Sportart, wird viel Muskulatur eingesetzt [9, 49, 69, 83], die zur maximalen kardiopulmonalen Ausbelastung führt. Man könnte vermuten, dass sich die RLT-Gruppe nicht vollkommen auf dem TM ausbelastet habe. Eine niedrige $VO_{2\text{peak}}$ auf dem TM würde diese Vermutung stützen. Betrachtet man die intraindividuelle erreichte $VO_{2\text{peak}}$ der RLT-Gruppe (Abb. 35), so ist festzustellen, dass auf dem TM die höchste erreicht wurde und folglich eine intraindividuelle Ausbelastung vorlag. Der kausale Zusammenhang für die intraindividuell gleiche HF_{peak} kann anhand der vorliegenden Daten nicht erbracht werden.

Die CON-Gruppe erreichte, wie schon in Kap. 5.2.1. ausführlich beschrieben, ihre HF_{peak} in Abhängigkeit von Ergometertyp, Muskeleinsatz und lokaler Ermüdung in der Reihenfolge: $TM > CE > RE$.

5.3.2. Blutlaktatkonzentration der Rudersportler

Bedingt durch Ausdauertraining (RWT-Gruppe), verlief die Laktatleistungskurve auf dem RE flacher und war nach rechts verschoben (Kap. 5.2.2.) [7, 10, 12, 45, 50, 55, 57, 63, 70, 74, 148]. Diese Tatsache ist auch bei der Gruppe der wenig trainierten Rudersportler (RLT-Gruppe) deutlich zu erkennen (Abb. 28).

Betrachtet man die Laktatleistungskurve auf dem CE und TM, fällt auf, dass sich die der RLT-Gruppe nicht von der CON-Gruppe unterschied. Man könnte postulieren, dass eine ähnliche aerobe Kapazität der Beinmuskulatur auf dem CE bzw. TM dazu führte, denn auf dem Ruderergometer (zusätzlicher Arm- und Rumpfmuskulatureinsatz) wiesen die beiden Gruppen signifikante Unterschiede auf.

5.3.2.1. Blutlaktatkonzentration der Rudersportler bei Maximalbelastung intraindividuell

Intraindividuell erreichte die RWT-Gruppe auf dem RE und TM eine niedrigere Lac_{peak} als auf dem CE (Abb. 34), was zum einen an der spezifisch trainierten Muskulatur auf dem RE [55, 74, 95] und zum anderen allgemein an der höheren Laktatelimination, aufgrund eines größeren Muskeleinsatzes, liegen könnte [12, 75, 95, 96, 149]. Eine ähnliche Reihenfolge ergibt sich auch für die RLT-Gruppe, jedoch mit dem Unterschied, dass auf dem CE und RE die Lac_{peak} gleich war. Man muss vermuten, dass ihre Trainingspezifität nicht groß genug war, um auf dem RE niedrigere Lac_{peak} zu erreichen. Die Kontrollgruppe scheint, wie in Kapitel 5.2.2.1. ausgeführt, in ihrer Laktatelimination eingeschränkt gewesen zu sein, da sie, unabhängig von der zum Einsatz kommenden Muskelmasse, auf allen Ergometertypen die gleiche Lac_{peak} aufweist.

5.3.3. Sauerstoffaufnahme der Rudersportler

Wie schon in Kap. 5.2.3. dargestellt, kommt es mit einem höheren Trainingsstatus zu einer konsekutiven Erhöhung der VO_{2peak} .

5.3.3.1. Sauerstoffaufnahme der Rudersportler bei Maximalbelastung interindividuell

Die maximal erreichte relative Sauerstoffaufnahme (VO_{2peak}) der Rudersportler unterschied sich interindividuell auf dem Ruderergometer, aufgrund einer besseren aeroben Kapazität [29, 44, 53, 90, 97, 105, 120, 131, 136] der spezifisch trainierten Muskulatur [22, 81, 90] und der größeren eingesetzten Muskelmasse [3, 11, 33, 34, 77, 80, 99, 108, 111, 123, 124, 130] wie man es erwarten würde, in der Reihenfolge: RWT > RLT > CON ($68,1 \pm 7,2 > 59,6 \pm 8,0 > 47,0 \pm 6,5 \text{ ml/min/kg}$) (Abb. 58). Das Delta zwischen der RWT und CON-Gruppe beträgt 45 % und liegt damit fast doppelt so hoch, wie das von Bouckaert et. al mit 25 % ermittelte [16], was jedoch mit dem unterschiedlichen Leistungsniveau der Probanden erklärt werden könnte (VO_{2peak} CWT-Gruppe vs. Bouckaert et. al: $68,1$ vs. $64,3 \text{ ml/min/kg}$ bzw. VO_{2peak} CON-Gruppe: VO_{2peak} : $47,0$ vs. $51,4 \text{ ml/min/kg}$). Die gleiche Reihenfolge der VO_{2peak} zeigte sich auch auf den anderen beiden Ergometern, was bedeutet, dass sich alle Gruppen tatsächlich in ihrer kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit voneinander unterschieden. Aufgrund der fehlenden Trainingsspezifität, ist das Delta zwischen RWT und CON-Gruppe auf dem CE geringer, doch mit 33 % weist es auf den guten Trainingszustand der RWT-Gruppe hin. Die geringere Differenz (13 %) bei diesem Vergleich der Studie von Bouckaert et. al [16] ist, wie schon weiter oben beschrieben, mit der unterschiedlichen Auswahl der Probanden zu erklären.

5.3.3.2. Sauerstoffaufnahme der Rudersportler bei Maximalbelastung intraindividuell

Intraindividuell erreichten die Rudersportler unabhängig von ihrem Trainingszustand (RWT / RLT) auf dem RE und TM die gleiche VO_{2peak} (Abb. 35) [23, 112, 118], was

verwundert, denn gerade bei den hochtrainierten Rudersportlern würde man, aufgrund der Trainingsspezifität, die höchste VO_{2peak} auf dem RE erwarten, wie auch die Literatur beschreibt ($VO_{2peak} RE 5 \% > TM$) [124]. Die Tatsache, dass die VO_{2peak} der Rudersportler der vorliegenden Studie (68 ml/min/kg) den Werten der Literatur (64 - 70 ml/min/kg) [17, 23, 122] entsprach und somit die Probanden hochtrainiert waren, kann demnach nicht die abweichenden Ergebnisse erklären. Vielmehr scheint die VO_{2peak} auf dem RE, durch die intermittierende [32, 109, 122] und längere muskuläre Aktivierung als auf dem TM bzw. CE vermindert. Die Kontraktionsphase beim Rudern ist mit 0,8 s [118] deutlich länger als beim Laufen bzw. Radfahren (0,2 - 0,3 s) [37], wodurch die Perfusion der Muskulatur stärker reduziert [40] und somit der aerobe Stoffwechsel bzw. die Sauerstoffaufnahme eingeschränkt ist. Darüber hinaus ist zu postulieren, dass eine gewisse Habitualisierung der Rudersportler an das Laufen durch Ausgleichstraining erfolgte (Kap. 3.1.1.), wodurch eine höhere Ausbelastung auf dem TM möglich gewesen sein könnte.

Auf dem CE erreichte die RWT-Gruppe signifikant die niedrigste VO_{2peak} , aufgrund des Einsatzes einer kleineren Muskelmasse als beim Laufen [9, 49, 69, 83] bzw. Rudern [110, 111, 150] und der geringeren Trainingsspezifität. Die Literatur belegt, dass hochtrainierte Rudersportler auf dem RE die gleiche VO_{2peak} wie auf dem CE erreichen [118]. Bei einer ähnlichen VO_{2peak} der Rudersportler beider Arbeiten auf dem RE (VO_{2peak} : 68 vs. 66 ml/min/kg), könnte das abweichende Ergebnis mit dem unterschiedlichen Studiendesign erklärt werden. Das CE Testprotokoll war in der zitierten Studie deutlich kürzer. Im Gegensatz zu der vorliegenden Studie (50W), startete es bei 140-175 Watt und beinhaltete größere Delta der Belastungsstufen (pro Minute 30 Watt Steigerung vs. 16,6 Watt). So ist zu postulieren, dass durch das kürzere Testprotokoll bedingt, eine kardiopulmonale Ausbelastung möglich war, bevor es zur lokalen Ermüdung der nicht spezifisch trainierten Beinmuskulatur kam, die, in der vorliegenden Arbeit, das Erreichen gleich hoher VO_{2peak} Werte wie auf dem RE verhinderte.

Die Trainingsspezifität der RLT-Gruppe war zu gering, als dass sie es auf dem RE schaffte, eine signifikant höhere VO_{2peak} zu erreichen als auf dem CE. Betrachtet man die CON-Gruppe, die auf dem RE bzw. CE die gleiche VO_{2peak} und die RWT-Gruppe, die eine

signifikant höhere VO_{2peak} auf dem RE, als auf dem CE erreichte, so hätte man die Werte der RLT-Gruppe dazwischen liegend erwartet. Die einzige Studie mit Rudersportlern auf einem ähnlichen Leistungsniveau, das dem der RLT-Gruppe dieser Studie entspricht, kann diese Vermutung nicht stützen [118]. Die Ergebnisse der zitierten Studie zeigen auf dem CE höhere VO_{2peak} Werte als auf dem RE ($VO_{2peak} CE 3 \% > RE$). Ursächlich hierfür sei die längere Muskelkontraktionszeit mit Limitierung des aeroben Stoffwechsels wie bereits oben ausgeführt wurde.

6. Zusammenfassung

Der Transfer von Herzfrequenzempfehlungen anhand, der HF_{IAS} zwischen verschiedenen Ergometrien wie dem Fahrrad- und Ruderergometer und dem Laufband, ist von der Trainingsspezifität bzw. dem Trainingsniveau abhängig. Generell lässt sich festhalten, dass die höchsten HF_{IAS} Werte auf dem TM erreicht werden. Darüber hinaus werden auf dem spezifischen Ergometer höhere Werte, als auf einem ungewohnten (nicht TM) erreicht. Je höher die Trainingsspezifität ist, desto kleiner wird das Delta der HF_{IAS} zwischen spezifischem Ergometer und TM. Eine Ausnahme scheint hier die CWT-Gruppe zu spielen, die auf dem CE die gleiche HF_{IAS} erreichte wie auf dem TM. Aus dem Gesagten ergibt sich, dass sportartspezifische Ergometrien für Leistungssportler essentiell für verlässliche Trainingsempfehlungen sind. Aufgrund der Tatsache, dass bei Freizeitsportlern (Fitnessszene) eine andere Zielsetzung im Vordergrund steht, könnte man, wenn Daten einer Ergometrie vorliegen sollten, die Herzfrequenzempfehlungen wie folgt übertragen: Fahrradergometer --> Laufband: +13 bpm; Laufband --> Ruderergometer: -19 bpm; Fahrradergometer --> Ruderergometer: -6 bpm.

Ausdauertraining führt zu metabolischen und kardiopulmonalen Adaptationen, die am ausgeprägtesten im Rahmen einer Spiroergometrie, die der Hauptsportart entspricht, erfasst werden können. Vor allem bei mäßig spezifisch trainierten Athleten, werden die spezifischen Veränderungen ansonsten durch einen anderen Muskeleinsatz bzw. andere Bewegungsabläufe maskiert. Sollte kein spezifisches Ergometer zur Verfügung stehen, stellt das Laufband eine universelle Testform dar, vor allem zur Ermittlung der absoluten kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit.

7. Literaturverzeichnis

1. Astrand I, Astrand PO, Hallback I, Kilbom A (1973) Reduction in maximal oxygen uptake with age. *J Appl Physiol* 35:649-654
2. Astrand PO, Ryhming I (1954) A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *J Appl Physiol* 7 (2):218-21
3. Astrand PO, Saltin B (1961) Maximal oxygen uptake and heard rate in various types of muscular activity. *J Appl Physiol* 16 (6):977-981
4. Astrand PO, Saltin B (1961) Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. *J Sports Med Phys Fitness* 16 (6):971-976
5. Basset FA, Boulay MR (2000) Specificity of treadmill and cycle ergometer tests in triathletes, runners and cyclists. *Eur J Appl Physiol* 81 (3):214-21
6. Baumgartl P (1990) Treadmill ergometry and heart-volumes in elite biathletes: a longitudinal study. *Int J Sports Med* 11 (3):223-7
7. Beneke R, Hutler M, Leithauser RM (2000) Maximal lactate-steady-state independent of performance. *Med Sci Sports Exerc* 32 (6):1135-9
8. Beneke R, Meyer K (1997) Walking performance and economy in chronic heart failure patients pre and post exercise training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 75 (3):246-51
9. Beneke R, von Duvillard SP (1996) Determination of maximal lactate steady state response in selectes sports events. *Med Sci Sports Exerc* 28:241-246
10. Bentley DJ, McNaughton LR, Batterham AM (2001) Prolonged stage duration during incremental cycle exercise: effects on the lactate threshold and onset of blood lactate accumulation. *Eur J Appl Physiol* 85 (3-4):351-7
11. Bergh U, Kanstrup IL, Ekblom B (1976) Maximal oxygen uptake during exercise with various combinations of arm and leg work. *J Appl Physiol* 41 (2):191-6
12. Bergman BC, Wolfel EE, Butterfield GE, Lopaschuk GD, Casazza GA, Horning MA, Brooks GA (1999) Active muscle and whole body lactate kinetics after endurance training in men. *J Appl Physiol* 87 (5):1684-96
13. Bijker KE, De-Groot G, Hollander AP (2001) Delta efficiencies of running and cycling. *Med Sci Sports Exerc* 33 (9):1546-51
14. Blomqvist CG, Saltin B (1983) Cardiovascular adaptations to physical training. *Annu Rev Physiol* 45:169-189

15. Bouchard C, Godbout P, Mondor JC, Leblanc C (1979) Specificity of maximal aerobic power. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 40 (2):85-93
16. Bouckaert J, Pannier JL, Vrijens J (1983) Cardiorespiratory response to bicycle and rowing ergometer exercise in oarsmen. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 51 (1):51-9
17. Bourdin M, Messonnier L, Hager JP, Lacour JR (2004) Peak power output predicts rowing ergometer performance in elite male rowers. *Int J Sports Med* 25 (5):368-73
18. Braumann KM, Tegtbur U, Busse MW, Maasen N (1991) Die "Laktatsenke" - Eine Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze. *Dtsch Z Sportmed* 42 (6)
19. Brooke JD, Hamley EJ (1972) The heart-rate-physical work curve analysis for the prediction of exhausting work ability. *Med Sci Sports* 4 (1):23-6
20. Brooke JD, Hamley EJ, Thomason H (1969) Normal and strain heart rate responses to work load increasing continuously and by steps. *J Physiol* 201 (1):33P-34P
21. Brooks GA (1985) Anaerobic threshold: review of the concept and directions for further research. *Med Sci Sports Exerc* 17:22-34
22. Caputo F, Denadai BS (2004) Effects of aerobic endurance training status and specificity on oxygen uptake kinetics during maximal exercise. *Eur J Appl Physiol* 93 (1-2):87-95
23. Carey P, Stensland M, Hartley LH (1974) Comparison of oxygen uptake during maximal work on the treadmill and the rowing ergometer. *Med Sci Sports* 6:101-103
24. Carter H, Jones AM, Barstow TJ, Burnley M, Williams C, Doust JH (2000) Effect of endurance training on oxygen uptake kinetics during treadmill running. *J Appl Physiol* 89 (5):1744-52
25. Carter H, Jones AM, Barstow TJ, Burnley M, Williams CA, Doust JH (2000) Oxygen uptake kinetics in treadmill running and cycle ergometry: a comparison. *J Appl Physiol* 89 (3):899-907
26. Chase RB (1968) The predictability of heart rate in sequential work. *Am Ind Hyg Assoc J* 29 (5):490-4
27. Clifford PS, Hanel B, Secher NH (1994) Arterial blood pressure response to rowing. *Med Sci Sports* 26:715-719
28. Coen B, Schwarz L, Urhausen A, Kindermann W (1991) Control of training in middle- and long-distance running by means of the individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 12 (6):519-24
29. Costill DL, Daniels J, Evans W, Fink W, Krahenbuhl G, Saltin B (1976) Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J Appl Physiol* 40 (2):149-54
30. Coyle EF, Coggan AR, Hopper MK, Walters TJ (1988) Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J Appl Physiol* 64 (6):2622-30

31. Coyle EF, Feltner ME, Kautz SA, Hamilton MT, Montain SJ, Baylor AM, Abraham LD, Petrek GW (1991) Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 23 (1):93-107
32. Cunningham DA, Goode PB, Critz JB (1975) Cardiorespiratory response to exercise on a rowing and bicycle ergometer. *Med Sci Sports* 7:37-43
33. Davies CT, Sargeant AJ (1974) Indirect determination of maximal aerobic power output during work with one or two limbs. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 32 (3):207-15
34. Di-Prampo PE, Cortili G, Celentano F, Cerretelli P (1971) Physiological aspects of rowing. *J Appl Physiol* 31 (6):853-7
35. Ekblom B, Hermansen L (1968) Cardiac output in athletes. *J Appl Physiol* 25 (5):619-625
36. Faulkner JA, Roberts DE, Elk RL, Conway J (1971) Cardiovascular responses to submaximum and maximum effort cycling and running. *J Appl Physiol* 30 (4):457-61
37. Folkow B, Gaskell P, Waaler BA (1970) Blood flow through limb muscles during heavy rhythmic exercise. *Acta Physiol Scand* 80 (1):61-72
38. Forsyth JJ, Reilly T (2004) Circadian rhythms in blood lactate concentration during incremental ergometer rowing. *Eur J Appl Physiol* 92 (1-2):69-74
39. Gabrielsen A, Johansen LB, Norsk P (1993) Central cardiovascular pressures during graded water immersion in humans. *J Appl Physiol* 75 (2):581-5
40. Gaffney FA, Sjogaard G, Saltin B (1990) Cardiovascular and metabolic responses to static contraction in man. *Acta Physiol Scand* 138 (3):249-58
41. Gilman MB, Wells CL (1993) The use of heart rates to monitor exercise intensity in relation to metabolic variables. *Int J Sports Med* 14:339-344
42. Gladden LB (2000) Muscle as a consumer of lactate. *Med Sci Sports Exerc* 32 (4):764-71
43. Glassford RG, Baycroft GH, Sedgwick AW, Macnab RB (1965) Comparison of maximal oxygen uptake values determined by predicted and actual methods. *J Appl Physiol* 20 (3):509-13
44. Gollnick PD, Armstrong RB, Saubert CWt, Piehl K, Saltin B (1972) Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *J Appl Physiol* 33 (3):312-9
45. Green HJ, Jones S, Ball-Burnett ME, Smith D, Livesey J, Farrance BW (1991) Early muscular and metabolic adaptations to prolonged exercise training in humans. *J Appl Physiol* 70 (5):2032-8
46. Hagberg JM, Giese MD, Schneider RB (1978) Comparison of the three procedures for measuring VO₂max in competitive cyclists. *Eur J Appl Physiol* 39:47-52
47. Hagerman FC (1984) Applied physiology of rowing. *Sports Med* 1 (4):303-26

48. Hermansen L, Ekblom B, Saltin B (1970) Cardiac output during submaximal and maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 29 (1):82-6
49. Hermansen L, Saltin B (1969) Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 26 (1):31-7
50. Holloszy JO, Coyle EF (1984) Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J Appl Physiol* 56 (4):831-8
51. Hoppeler H, Howald H, Conley K, Lindstedt SL, Claassen H, Vock P, Weibel ER (1985) Endurance training in humans: aerobic capacity and structure of skeletal muscle. *J Appl Physiol* 59 (2):320-7
52. Hoppeler H, Luthi P, Claassen H, Weibel ER, Howald H (1973) The ultrastructure of the normal human skeletal muscle. A morphometric analysis on untrained men, women and well-trained orienteers. *Pflugers Arch* 344 (3):217-32
53. Howald H (1982) Training-induced morphological and functional changes in skeletal muscle. *Int J Sports Med* 3 (1):1-12
54. Howley ET, Bassett DR, Jr., Welch HG (1995) Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27 (9):1292-301
55. Hurley BF, Hagberg JM, Allen WK, Seals DR, Young JC, Cuddihee RW, Holloszy JO (1984) Effect of training on blood lactate levels during submaximal exercise. *J Appl Physiol* 56 (5):1260-4
56. Ivy JL, Withers RT, Van-Handel PJ, Elger DH, Costill DL (1980) Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J Appl Physiol* 48 (3):523-7
57. Ivy JLC, D. L.; Van-Handel, P. J.; Essig D.A.; Lower R.W. (1981) Alteration in the lactate threshold with changes in the substrate availability. *Int J Sports Med* 2:139-142
58. Jansson E, Kaijser L (1987) Substrate utilization and enzymes in skeletal muscle of extremely endurance-trained men. *J Appl Physiol* 62:999-1005
59. Jeukendrup AE, Saris WH, Wagenmakers AJ (1998) Fat metabolism during exercise: a review. Part I: fatty acid mobilization and muscle metabolism. *Int J Sports Med* 19 (4):231-44
60. Jost J, Weiss M, Weicker H (1990) Sympathoadrenergic regulation and the adrenoceptor system. *J Appl Physiol* 68 (3):897-904
61. Kang J, Robertson RJ, Goss FL, Dasilva SG, Suminski RR, Utter AC, Zoeller RF, Metz KF (1997) Metabolic efficiency during arm and leg exercise at the same relative intensities. *Med Sci Sports Exerc* 29 (3):377-82
62. Kargotich S, Goodman C, Keast D, Morton AR (1998) The influence of exercise-induced plasma volume changes on the interpretation of biochemical parameters used for monitoring exercise, training and sport. *Sports Med* 26 (2):101-17
63. Karlsson J, Nordesjo LO, Jorfeldt L, Saltin B (1972) Muscle lactate, ATP, and CP levels during exercise after physical training in man. *J Appl Physiol* 33 (2):199-203

64. Karvonen J, Vuorimaa T (1988) Heart rate and exercise intensity during sports activities. Practical application. *Sports Med* 5 (5):303-11
65. Keul J, Simon G, Berg A (1979) Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. *Dtsch Z Sportmed* 30:212-218
66. Kiens B (1997) Effect of endurance training on fatty acid metabolism: local adaptations. *Med Sci Sports Exerc* 29 (5):640-5
67. Kindermann W, Simon G, Keul J (1979) The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 42 (1):25-34
68. Knechtle B, Muller G, Willmann F, Kotteck K, Eser P, Knecht H (2004) Fat oxidation in men and women endurance athletes in running and cycling. *Int J Sports Med* 25 (1):38-44
69. Kohrt WM, Morgan DW, Bates B, Skinner JS (1987) Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. *Med Sci Sports Exerc* 19 (1):51-5
70. Kuipers H, Verstappen FT, Keizer HA, Geurten P, van-Kranenburg G (1985) Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates. *Int J Sports Med* 6 (4):197-201
71. Lopategui E, Perez HR, Smith TK, Otto RM (1986) The anaerobic threshold of elite and novice cyclists. *J Sports Med Phys Fitness* 26 (2):123-7
72. Lopez R, Ebel H (1974) Endurance performance as a function of prior-exercise heart rate. *J Sports Med* 2 (5):291-4
73. Lucia A, Hoyos J, Perez M, Chicharro JL (2000) Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 32 (10):1777-82
74. Lucia A, Pardo J, Durantez A, Hoyos J, Chicharro JL (1998) Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med* 19 (5):342-8
75. MacRae HS, Dennis SC, Bosch AN, Noakes TD (1992) Effects of training on lactate production and removal during progressive exercise in humans. *J Appl Physiol* 72 (5):1649-56
76. Mader A, Liesen H, Heck H (1976) Zur Beurteilung der Ausdauerfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin* 27:80-88;109-112
77. Magel JR, Foglia GF, McArdle WD, Gutin B, Pechar GS, Katch FI (1975) Specificity of swim training on maximum oxygen uptake. *J Appl Physiol* 38 (1):151-5
78. Marsh AP, Martin PE (1993) The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Med Sci Sports Exerc* 25 (11):1269-74

79. Martinez ML, Ibanez-Santos J, Grijalba A, Santesteban MD, Gorostiaga EM (1993) Physiological comparison of roller skating, treadmill running and ergometer cycling. *Int J Sports Med* 14 (2):72-7
80. Matsui H, Kitamura K, Miyamura M (1978) Oxygen uptake and blood flow of the lower limb in maximal treadmill and bicycle exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 40 (1):57-62
81. McConnel TR (1988) Practical consideration in testing of VO₂max in runners. *Sports Med* 5:57-68
82. McKay GA, Banister EW (1976) A comparison of maximum oxygen uptake determination by bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds. *Eur J Appl Physiol* 35:191-200
83. Medelli J, Maingourd Y, Bouferrache B, Bach V, Freville M, Libert JP (1993) Maximal oxygen uptake and aerobic-anaerobic transition on treadmill and bicycle in triathletes. *Jpn J Physiol* 43 (3):347-60
84. Messonnier L, Freund H, Bourdin M, Belli A, Lacour JR (1997) Lactate exchange and removal abilities in rowing performance. *Med Sci Sports Exerc* 29 (3):396-401
85. Meyer T (2003) Der Respiratorische Quotient (RQ). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 54 (1):29-30
86. Miyamura M, Honda Y (1972) Oxygen intake and cardiac output during maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 32 (2):185-8
87. Moreira-da-Costa M, Russo AK, Picarro IC, Silva AC, Leite-de-Barros-Neto T, Tarasantchi J, Barbosa AS (1984) Maximal oxygen uptake during exercise using trained or untrained muscles. *Braz J Med Biol Res* 17 (2):197-202
88. Olbrecht J, Madsen O, Mader A, Liesen H, Hollmann W (1985) Relationship between swimming velocity and lactic concentration during continuous and intermittent training exercises. *Int J Sports Med* 6 (2):74-7
89. O'Toole ML, Douglas PS (1995) Applied physiology of triathlon. *Sports Med* 19:251-267
90. Pannier JL, Vrijens J, Van-Cauter C (1980) Cardiorespiratory response to treadmill and bicycle exercise in runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 43 (3):243-51
91. Parizkova J, Buzkova P (1971) Relationship between skinfold thickness measured by Harpenden caliper and densitometric analysis of total body fat in men. *Hum Biol* 43 (1):16-21
92. Parizkova J, Roth Z (1972) The assessment of depot fat in children from skinfold thickness measurements by Holtain (Tanner-Whitehouse) caliper. *Hum Biol* 44 (4):613-20
93. Pechar GS, McArdle WD, Katch FI, Magel JR, DeLuca J (1974) Specificity of cardiorespiratory adaptation to bicycle and treadmill training. *J Appl Physiol* 36 (6):753-6

94. Pedersen M, Madsen P, Klokke M, Olesen HL, Secher NH (1995) Sympathetic influence on cardiovascular responses to sustained head-up tilt in humans. *Acta Physiol Scand* 155 (4):435-44
95. Phillips S, Green H, Tarnopolsky M, Grant S (1995) Increased clearance of lactate after short-term training in men. *J Appl Physiol* 79:1862-1869
96. Poortmans JR, Delescaille-Vanden Bossche J, Leclercq R (1978) Lactate uptake by inactive forearm during progressive leg exercise. *J Appl Physiol* 45:835-839
97. Prince FP, Hikida RS, Hagerman FC (1976) Human muscle fiber types in power lifters, distance runners and untrained subjects. *Pflugers Arch* 363 (1):19-26
98. Ray CA, Rea RF, Clary MP, Mark AL (1993) Muscle sympathetic nerve responses to dynamic one-legged exercise: effect of body posture. *Am J Physiol* 264 (1 Pt 2):H1-7
99. Reybrouck T, Heigenhauser GF, Faulkner JA (1975) Limitations to maximum oxygen uptake in arms, leg, and combined arm-leg ergometry. *J Appl Physiol* 38 (5):774-9
100. Ricci J, Leger LA (1983) VO₂max of cyclists from treadmill, bicycle ergometer and velodrome tests. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 50 (2):283-9
101. Roecker K, Niess AM, Horstmann T, Striegel H, Mayer F, Dickhuth HH (2002) Heart rate prescriptions from performance and anthropometrical characteristics. *Med Sci Sports Exerc* 34 (5):881-7
102. Roecker K, Striegel H, Dickhuth HH (2003) Heart-rate recommendations: transfer between running and cycling exercise? *Int J Sports Med* 24 (3):173-8
103. Rosler K, Hoppeler H, Conley KE, Claassen H, Gehr P, Howald H (1985) Transfer effects in endurance exercise. Adaptations in trained and untrained muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 54 (4):355-62
104. Rost R (2002) *Lehrbuch der Sportmedizin*. Deutscher Ärzte-Verlag:26-41
105. Saltin B, Nazar K, Costill DL, Stein E, Jansson E, Essén B, Gollnick PD (1976) The nature of training response; Peripheral and central adaptations in one-legged exercise. *Acta Physiol Scand* 96:189-305
106. Schmidt W, Maassen N, Trost F, Boning D (1988) Training induced effects on blood volume, erythrocyte turnover and haemoglobin oxygen binding properties. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 57 (4):490-8
107. Schneider DA, Lacroix KA, Atkinson GR, Troped PJ, Pollack J (1990) Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake during cycling and running in triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 22 (2):257-64
108. Secher NH (1983) The physiology of rowing. *J Sports Sci* 1:23-53
109. Secher NH (1993) Physiological and biomechanical aspects of rowing. Implications for training. *Sports Med* 15 (1):24-42

110. Secher NH, Clausen JP, Klausen K, Noer I, Trap-Jensen J (1977) Central and regional circulatory effects of adding arm exercise to leg exercise. *Acta Physiol Scand* 100:288-297
111. Secher NH, Ruberg-Larsen N, Binkhorst RA, Bonde-Petersen F (1974) Maximal oxygen uptake during arm cranking and combined arm plus leg exercise. *J Appl Physiol* 36 (5):515-8
112. Secher NH, Vaage O, Jensen K, Jackson RC (1983) Maximal aerobic power in oarsmen. *Eur J Appl Physiol* 51:155-162
113. Sheffield LT, Holt JH, Reeves TJ (1965) Exercise graded by heard rate in electrocardiographic testing for angina pectoris. *Circulation* 32:622-629
114. Sheriff DD, Rowell LB, Scher AM (1993) Is rapid rise in vascular conductance at onset of dynamic exercise due to muscle pump? *Am J Physiol* 265 (4 Pt 2):H1227-34
115. Simon G, Berg A, Dickhuth HH (1981) Bestimmung der anaeroben Schwelle in Abhängigkeit vom Alter und von der Leistungsfähigkeit. *Dtsch Z Sportmed* 32:7-14
116. Simon J, Young JL, Blood DK, Segal KR, Case RB, Gutin B (1986) Plasma lactate and ventilation thresholds in trained and untrained cyclists. *J Appl Physiol* 60 (3):777-81
117. Sleivert GG, Rowlands DS (1996) Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Med* 22:8-18
118. Smith TB, Hopkins WG, Taylor NA (1994) Respiratory responses of elite oarsmen, former oarsmen, and highly trained non-rowers during rowing, cycling and running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69 (1):44-9
119. Spengler CM, Roos M, Laube SM, Boutellier U (1999) Decreased exercise blood lactate concentrations after respiratory endurance training in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 79 (4):299-305
120. Staron RS, Hikida RS, Hagerman FC, Dudley GA, Murray TF (1984) Human skeletal muscle fiber type adaptability to various workloads. *J Histochem Cytochem* 32 (2):146-52
121. Stegmann H, Kindermann W, Schnabel A (1981) Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 2 (3):160-5
122. Steinacker JM (1993) Physiological aspects of training in rowing. *Int J Sports Med* 14 (1):S3-10
123. Stenberg J, Astrand PO, Ekblom B, Royce J, Saltin B (1967) Hemodynamic response to work with different muscle groups, sitting and supine. *J Appl Physiol* 22 (1):61-70
124. Stromme SB, Ingjer F, Meen HD (1977) Assessment of maximal aerobic power in specifically trained athletes. *J Appl Physiol* 42 (6):833-7

125. Sundstedt M, Hedberg P, Jonason T, Ringqvist I, Brodin LA, Henriksen E (2004) Left ventricular volumes during exercise in endurance athletes assessed by contrast echocardiography. *Acta Physiol Scand* 182 (1):45-51
126. Tanaka H, Bassett DR, Jr., Swensen TC, Sampedro RM (1993) Aerobic and anaerobic power characteristics of competitive cyclists in the United States Cycling Federation. *Int J Sports Med* 14 (6):334-8
127. Tanaka H, Davy KP, Seals DR (1999) Cardiopulmonary baroreflex inhibition of sympathetic nerve activity is preserved with age in healthy humans. *J Physiol* 515 (Pt 1):249-54
128. Tanaka K, Yoshimura T, Sumida S, Mitsuzono R, Tanaka S, Konishi Y, Watanabe H, Yamada T, Maeda K (1986) Transient responses in cardiac function below, at, and above anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 55 (4):356-61
129. Tate CA, Hyek MF, Taffet GE (1994) Mechanisms for the responses of cardiac muscle to physical activity in old age. *Med Sci Sports Exerc* 26 (5):561-7
130. Taylor HL, Buskirk ER, Henschel A (1955) Maximal oxygen intake as an objective measure of cardiorespiratory performance. *Journal of applied physiology* 8:73-80
131. Thorstensson A, Hultén B, von Döhlen W, Karlsson J (1976) Effect of strength training on enzyme activities and fibre characteristics in human skeletal muscle. *Acta Physiol Scand* 96:392-398
132. Toner MM, Sawka MN, Levine L, Pandolf KB (1983) Cardiorespiratory responses to exercise distributed between the upper and lower body. *J Appl Physiol* 54 (5):1403-7
133. Urhausen A, Kindermann W (1999) Sports-specific adaptations and differentiation of the athlete's heart. *Sports Med* 28 (4):237-44
134. van-Lieshout JJ, Pott F, Madsen PL, van-Goudoever J, Secher NH (2001) Muscle tensing during standing: effects on cerebral tissue oxygenation and cerebral artery blood velocity. *Stroke* 32 (7):1546-51
135. Verstappen FT, Huppertz RM, Snoeckx LH (1982) Effect of training specificity on maximal treadmill and bicycle ergometer exercise. *Int J Sports Med* 3 (1):43-6
136. Vrijens J, Hoeckstra P, Bouckaert J, Van Uytvanck P (1975) Effect of training on maximal working capacity and haemodynamic response during arm and leg-exercise in a group of paddlers. *Eur J Appl Physiol* 34 (113-119)
137. Warburton DE, Glendhill N, Quinney HA (2000) Blood volume, aerobic power and endurance performance: potential ergogenic effect of volume loading. *Clin J of Sport Med* 10:59-66
138. Warburton DE, Haykowsky MJ, Quinney HA, Blackmore D, Teo KK, Humen DP (2002) Myocardial response to incremental exercise in endurance-trained athletes: influence of heart rate, contractility and the Frank-Starling effect. *Exp Physiol* 87 (5):613-22

139. Wasserman K, McIlroy MB (1964) Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am J Cardiol* 14:844-852
140. Wasserman K, Whipp BJ, Koysl N, Beaver WL (1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35:236-243
141. Weltman A, Snead D, Seip R, Schurrer R, Weltman J, Rutt R, Rogol A (1990) Percentages of maximal heart rate, heart rate reserve and VO₂max for determining endurance training intensity in male runners. *Int J Sports Med* 11 (3):218-22
142. Whaley MH, Kaminsky LA, Dwyer GB, Getchell LH, Norton JA (1992) Predictors of over- and underachievement of age-predicted maximal heart rate. *Med Sci Sports Exerc* 24 (10):1173-9
143. Whyte GP, George K, Nevill A, Shave R, Sharma S, McKenna WJ (2004) Left ventricular morphology and function in female athletes: a meta-analysis. *Int J Sports Med* 25 (5):380-3
144. Winder WW, Hagberg JM, Hickson RC, Ehsani AA, McLane JA (1978) Time course of sympathoadrenal adaptation to endurance exercise training in man. *J Appl Physiol* 45 (3):370-4
145. Wrage A (2005) Überprüfung verschiedener Laktatschwellenkonzepte zur Bestimmung der Dauerleistungsgrenze unter Mitberücksichtigung der respiratorischen anaeroben Schwelle. Diplomarbeit, Universität Hamburg:10-16
146. Yoshida T (1984) Effect of dietary modifications on lactate threshold and onset of blood accumulation during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol* 53:200-205
147. Yoshida T, Chida M, Ichioka M, Suda Y (1987) Blood lactate parameters related to aerobic capacity and endurance performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56 (1):7-11
148. Yoshida T, Suda Y, Takeuchi N (1982) Endurance training regimen based upon arterial blood lactate: effects on anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 49 (2):223-30
149. Yoshida T, Takeuchi N, Suda Y (1982) Arterial versus venous blood lactate increase in the forearm during incremental bicycle exercise. *Eur J Appl Physiol* 50:87-93
150. Yoshiga CC, Higuchi M (2002) Heart rate is lower during ergometer rowing than during treadmill running. *Eur J Appl Physiol* 87 (2):97-100
151. Yoshiga CC, Higuchi M, Oka J (2003) Lower heart rate response to ergometry rowing than to treadmill running in older men. *Clin Physiol Funct Imaging* 23 (1):58-61

8. Danksagung

Ich möchte mich ausdrücklich für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung bei der Erstellung der Promotion bei Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann, Prof Dr. med. Rüdiger Reer und Dr. med. Marc Ziegler bedanken. Ohne ihre Erfahrungen und Hilfe wäre die Arbeit an der Promotion sicherlich nicht so zügig und konsequent vorangegangen.

Ferner möchte ich mich bei Marlena Grudniak für die technische Assistenz im Labor (Abteilung für Sport- und Bewegungsmedizin), bei Herrn Dr. Bubenheim und Herrn Supplieth für die Hilfe bei der statistischen Auswertung (Institut für Medizinische Biometrie und Epidemiologie; Universitäts Krankenhaus Hamburg-Eppendorf) und bei Regina Kruse (Sekretariat; Abteilung für Sport- und Bewegungsmedizin) für die logistische Unterstützung bedanken.

Abschließend gilt mein außerordentlicher Dank meinen Eltern, die mir bei Fragen immer beratend zur Seite standen und mit ihren Erfahrungen zu einem guten Gelingen der Promotion beitragen konnten.

9. Lebenslauf

Zur Person

Name	Mathias Alexander Brahm
Geburtsort	Hamburg
Geburtsdatum	03.05.1975
Familienstand	ledig

Ausbildung

1996 – 1998	Ausbildung, Groß- und Außenhandel STEVENS Vertriebs GmbH, Hamburg
1994 – 1996	Zivildienst (Ersatzdienst) Altenpflegeheim Haus Alstertal, Hamburg
1985 - 1994	Gymnasium Heidberg, Hamburg
1982 - 1985	Grundschule Neubergerweg, Hamburg

Universitäre Ausbildung

1998 – 2005	Universität Hamburg
2005	Drittes Staatsexamen
2003	Zweites Staatsexamen
2001	Erstes Staatsexamen
2000	Physikum

Famulaturen

Sep 2003	Institut für Sportmedizin – Universität Hamburg Sportmedizin / Allgemeinmedizin
Sep - Okt 2002	Kanti-Children Hospital, Kathmandu, Nepal Innere Medizin, Radiologie
Mrz 2002	Marienkrankenhaus Hamburg Unfallchirurgie
Sep 2001	Institut für Sportmedizin – Universität Hamburg Sportmedizin / Allgemeinmedizin
Feb 2001	ENDO Klinik Hamburg Orthopädie/ Chirurgie

Zusatzqualifikationen

WS 2002/2003	operatives Praktikum Unfallchirurgie Universitäts Krankenhaus Hamburg-Eppendorf Prof. Windolf / Dr. Sommerfeld
WS 2003/2004	Sonographiepraktikum Unfallchirurgie Universitäts Krankenhaus Hamburg-Eppendorf Prof Dr. Meenen
2002- 2004	Studentische Nachtwachen, Intensiv – Station ELIM Krankenhaus, Hamburg
1999 – 2000	Studentische Nachtwachen Universitäts Krankenhaus Hamburg-Eppendorf

Wissenschaft

2003-2004	Promotionsstudien, Titel: Trainingsempfehlungen aus Herzfrequenzverläufen bei Belastung auf unterschiedlichen Ergometertypen, Abteilung für Sport- und Bewegungsmedizin, Universität Hamburg
seit 2006	wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsprojekt „Entwicklung und klinischer Einsatz von minimal- invasiven Implantationstechniken in der Hüftendoprothetik, Universitätsklinikum Schleswig- Holstein Campus Lübeck

Facharztausbildung

seit Jan 2006	Assistenzarzt der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie am Unfallkrankenhaus Hamburg Boberg mit Einsatz am Universitätsklinikum Schleswig- Holstein Campus Lübeck
---------------	---

10. Erklärung

Hiermit versichere ich ausdrücklich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

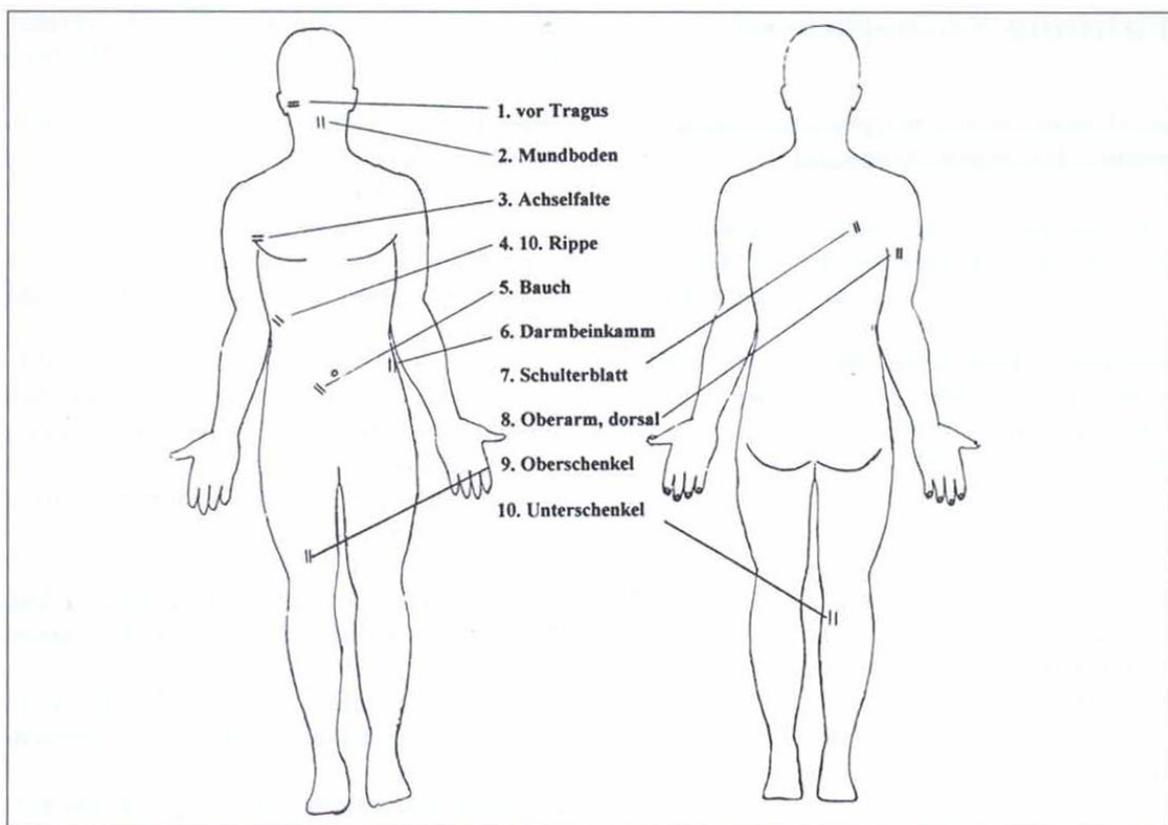
Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Mathias Alexander Brahm

Hamburg, den 30. Mai 2007

11. Anhang

11.1. Messpunkte für die Calipermetrie



11.2. Normogramm für die Calipermetrie (Männer)

Hautfaldendicke 10 Messpunkte [mm]	Körperdepotfett [% der Körpermasse]
30	1,5
31	1,9
32	2,3
33	2,7
34	3,1
35	3,5
36	3,8
37	4,1
38	4,5
39	4,8
40	5,1
41	5,4
42	5,7
43	6
44	6,3
45	6,6
46	6,9
47	7,1
48	7,4
49	7,7
50	8,1
51	8,2
52	8,4
53	8,7
54	8,9
55	9,1
56	9,4
57	9,5
58	9,8
59	10
60	10,2
61	10,4
62	10,6
63	10,8
64	11
65	11,2
66	11,4
67	11,6
68	11,8
69	12
70	12,2
71	12,3
72	12,5
73	12,7
74	12,9
75	13

Hautfaldendicke 10 Messpunkte [mm]	Körperdepotfett [% der Körpermasse]
76	13,2
77	13,3
78	13,5
79	13,7
80	13,8
81	14
82	14,2
83	14,3
84	14,5
85	14,6
86	14,8
87	14,9
88	15
89	15,2
90	15,3
91	15,5
92	15,6
93	15,7
94	15,9
95	16
96	16,1
97	16,3
98	16,4
99	16,5
100	16,7
101	16,8
102	16,9
103	17
104	17,1
105	17,3
106	17,4
107	17,5
108	17,6
109	17,7
110	17,9
111	18
112	18,1
113	18,2
114	18,3
115	18,4
116	18,5
117	18,6
118	18,7
119	18,8
120	18,9
121	19

Hautfaldendicke 10 Messpunkte [mm]	Körperdepotfett [% der Körpermasse]
122	19,1
123	19,2
124	19,4
125	19,5
126	19,6
127	19,7
128	19,8
129	19,9
130	20
131	20,1
132	20,1
133	20,2
134	20,4
135	20,4
136	20,5
137	20,6
138	20,7
139	20,8
140	20,9
141	21
142	21,1
143	21,2
144	21,3
145	21,3
146	21,4
147	21,5
148	21,6
149	21,7
150	21,8
151	21,8
152	21,9
153	22
154	22,1
155	22,2
160	22,6
165	23
170	23,3
175	23,7
180	24,1
185	24,4
190	24,7
195	25,1
200	25,4
205	25,7
210	26
215	26,3

11.3. Anamnesebogen

Studie: METABOLISMUS vs. ÖKONOMIE	[Mathias Brahm]
--	------------------------

Anamnese

Name :

Vorname :

Geb.-Dat. :

Adresse :

Wird von Untersucher ausgefüllt!

Größe (cm) :
Gewicht (ganze Kg) :
Körperfett (Summe d. Hautfalten / %) :
BMI :

Training:

Hauptsportart?.....

Hauptdisziplin?.....

Seit wann wird d. Hauptsportart ausgeübt (Jahre) ?.....

Trainingsaufkommen pro Woche (Std.)?.....

Trainingsaufkommen pro Woche (Einheiten) ?.....

Nebensportart(en)?.....

Trainingsaufkommen pro Woche (Std.)?.....

Trainingsaufkommen pro Woche (Einheiten) ?.....

Letzte Trainingseinheit (wann & was & wie viel?).....

Wurde schon mal eine Leistungsdiagnostik durchgeführt (wann&wo) ?.....

.....

Krankenanamnese:

Bestehen zur Zeit aktuelle Beschwerden, wenn ja welche, seit wann und bisherige Therapie?

.....

.....

.....

Besteht irgendeine Grunderkrankung / chronische Erkrankung, wenn ja, welche, seit wann und Therapie?

.....
.....
.....

Bestanden frühere Erkrankungen, Verletzungen, Knochenbrüche, Unfälle, Operationen, Krankenhausaufenthalte? Wenn ja, wann und Grund.....

.....
.....
.....
.....

Wurde in dem vergangenen Jahr eine eingehende ärztliche Untersuchung (EKG etc.) durchgeführt? Wenn ja, wann und mit welchem Ergebnis?

.....
.....
.....

Sind Sie sportgesund und es besteht kein erhöhtes Risiko einen Leistungstest durchzuführen?
Wenn ja liegt ein Attest des Hausarztes vor?

Ich bin über den Ablauf der Tests informiert worden und bestätige hiermit, dass alle Angaben wahrheitsgemäß und vollständig beantwortet wurden.

Ich erteile mein Einverständnis zur Durchführung von Spiroergometrien im Rahmen der o.g. Studie.

Außerdem erlaube ich ausdrücklich, dass die Universität Hamburg, Fachbereich Sportwissenschaft, Institut für Sport- und Bewegungsmedizin alle von mir erhobenen Daten unter Beachtung des persönlichen Datenschutzes zu wissenschaftlichen Zwecken speichern, auswerten und veröffentlichen darf.

Unterschrift

Ort/Datum

11.4. Untersuchungsbogen

Studie: METABOLISMUS vs. ÖKONOMIE

[Mathias Brahm]

Name :	Geb.-Dat. :	Größe [cm] :	Test:	Rad	Laufen	Datum:
Vorname :	Alter :	Gewicht[kg] :		Rudern	Maske	

Belastungsprotokoll:

	RR [mm Hg]	HF [Schl./min]	Lac.[mmol/l]
Liegen	/		
Sitzen	/		
Start	/		
50W / 5km/h	/		
100W / 8km/h	/		
150W / 10km/h	/		
200W / 12km/h	/		
250W / 14km/h	/		
300W / 16km/h	/		
350W / 18km/h	/		
400W / 20km/h	/		
450W / 22km/h	/		
500W / 24km/h	/		
550W / 26km/h	/		
Abbruchgrund	all. Ersch.: musk. Ermüd.: Atemnot: Schwindel: Sonstiges:		

Leistungsparameter:

Leistung [max.] :	Watt
Leistung [rel.] :	Watt/kg
VO ₂ [max.] :	ml/min
VO ₂ [rel.] :	ml/min/kg

Lungenfunktion:

Vitalkap. (VK)	l
Sollwert (VK)	%
1 sec. Kap.	l
Tiffenautest	%

Körperfett:

Summe d. Hautfalten	mm
Körperfett	%
BMI	kg/m ²

Erholungsprotokoll:

	RR [mm Hg]	HF [Schl./min]	Lac.[mmol/l]
1.min	/		
2.min	/		
3.min	/		
4.min	/		
5.min	/		

Trainingsanamnese: