

Diplomarbeit

**Vergleich unterschiedlicher ergometrischer
Belastungsformen
bei Patienten mit chronischer Herzinsuffizienz**

eingereicht von

Stefan Petritsch

Geb.Dat.: 28.11.1985

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der gesamten Heilkunde
(Dr. med. univ.)**

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Univ. Klinik. F. Innere Medizin, Abteilung für Kardiologie

sowie in der

SKA-RZ der PVA St. Radegund

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dr. Friedrich M. Fruhwald

Prim. Doz. Mag. DDr. Manfred Wonisch

Graz, April 2012

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich zunächst bei meinen Eltern bedanken! Sie haben mir mein Studium ermöglicht und standen mir in jeder Phase meines Lebens zur Seite. Danke!

Ein Dankeschön möchte ich auch meinen beiden Betreuern aussprechen, Herrn Univ-Prof. Dr. Friedrich M. Fruhwald und Herrn Mag. DDr. Manfred Wonisch, die mir diese Diplomarbeit ermöglicht haben.

Besonderer Dank gebührt auch Frau Dr. Ursula Eherer für ihre fachliche Unterstützung und Frau Angela Meister für die kompetente Hilfe bei der Durchführung der Ergometrien.

Zusammenfassung

Hintergrund: Die kardiopulmonale Leistungsdiagnostik ist die elementare Untersuchung zur Feststellung der körperlichen Leistungsfähigkeit bei Gesunden und zur Beurteilung von kardiopulmonalen Einschränkungen bei Patienten. Daraus abgeleitete Trainingsempfehlungen stellen die Basis für Primär- und Sekundärprävention von Herz-Kreislauf-Erkrankungen dar. Diese Studie vergleicht die Ergebnisse unterschiedlicher ergometrischer Belastungsformen. Unterschiede, Zusammenhänge und etwaige Auswirkungen auf Trainingsempfehlungen sollen im Rahmen der Arbeit besprochen werden.

Methoden: Zehn Patienten mit Herzinsuffizienz absolvierten Leistungsuntersuchungen am Fahrrad (FR), an der Armkurbel (AK) und am Laufband (LB) bis zur Ausbelastung. Dabei wurden bei stufenweise ansteigender Belastung, Herzfrequenz (HF), Sauerstoffaufnahme (VO_2) und Laktatkonzentrationen bestimmt.

Ergebnisse: Die 10 männlichen Patienten (medianes Alter: 46,5 Jahre, min Alter: 36 Jahre, max. Alter 77 Jahre) konnten alle geforderten Untersuchungen absolvieren. Die maximale Leistung betrug am FR $156,5 \pm 40$ Watt, an der AK $82,9 \pm 25$ Watt und am LB $203,2 \pm 57$ Watt. Die VO_2max (ml/kg/min) war zwischen AK ($18,2 \pm 6$) und FR ($22,4 \pm 5$) bzw. LB ($27,6 \pm 6$) und zwischen FR und LB signifikant ($p < 0,001$) unterschiedlich. Hinsichtlich maximaler HF (bpm) gab es signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen AK (133 ± 26) und FR (144 ± 20) bzw. LB (144 ± 20). Bezüglich des maximalen Laktats gab es keine signifikanten Unterschiede.

Am Laktat Turn Point 2 (LTP2) fand sich bezüglich HF (bpm) und VO_2 (ml/kg/min) signifikante Unterschiede zwischen allen drei Verfahren: AK (HF: 108 ± 17 ; VO_2 : $9,9 \pm 2$), FR (HF: 116 ± 16 ; VO_2 : $12,4 \pm 2$), LB (HF: 128 ± 17 ; VO_2 : $15,4 \pm 3$). Zwischen FR und AK konnte, bezüglich der HFmax ($r=0,94$; $p < 0,001$) und der HF am LTP2 ($r=0,83$; $p < 0,05$) ein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden.

Zusammenfassung: Ausgehend vom FR konnten bezüglich der HFmax und der HF am LTP2 Voraussagen für die HF an der AK getroffen werden. Dadurch können HF Vorgaben für das Training an der AK aufgrund der HF am FR gegeben werden. Es konnte gezeigt werden, dass gleichwertige Belastungen an der AK zu einer größeren metabolischen Beanspruchung führen, als Belastungen am FR und am LB.

Abstract

Background: Cardio pulmonary exercise testing is the preferred method for the measurement of physical performance in healthy people, as well as for the description of the cardiopulmonary deficits in patients. Derived training recommendations are the basis for primary and secondary prevention of cardiovascular diseases. This study compares results of different methods of exercise testing, regarding differences, correlations and their impact on training recommendations.

Methods: Ten patients with chronic heart failure underwent an incremental cycle (BC), arm crank (AC) and treadmill (TM) exercise test until exhaustion. During the test with stepwise increase of workload, heart rate (HR), oxygen uptake (VO_2) and blood lactate concentration were measured.

Results: All ten male patients (median age: 46,5 years, min. age: 36 years, max. age 77 years) were able to complete the required exercise tests. The maximum power output was $156,5 \pm 40$ Watt on the BC, $82,9 \pm 25$ Watt on the AC and $203,2 \pm 57$ Watt on the TM. VO_2 max was significantly different ($p < 0,001$) from AC ($18,2 \pm 6$) to BC ($22,4 \pm 5$) and TM ($27,6 \pm 6$), as well as from BC to TM. Maximum heart rate was significantly different ($p < 0,05$) between AC (133 ± 26) and BC (144 ± 20) respectively TM (144 ± 20). No significant differences were found concerning maximum blood lactate concentrations. At the second lactate turn point (LTP2) significant differences concerning heart rate (bpm) and oxygen uptake (ml/kg/min) were found between all three exercise tests: AC (HR: 108 ± 17 ; VO_2 : $9,9 \pm 2$), BC (HR: 116 ± 16 ; VO_2 : $12,4 \pm 2$), TM (HR: 128 ± 17 ; VO_2 : $15,4 \pm 3$). Furthermore, significant correlations were found between BC and AC with regard to maximum heart rate ($r=0,94$; $p < 0,001$) and heart rate at LTP2 ($r=0,83$; $p < 0,05$).

Conclusion: Due to statistical results, maximum heart rate and LTP2 heart rate on the AC could be derived from the HR on the BC. As a result, HR training recommendations can be given for the AC, based on HR determined on the BC. It was found out that equal work load on the AC, leads to higher intrinsic physical strain than on BC and TM.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	ii
Zusammenfassung	iii
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Glossar und Abkürzungen	vii
Abbildungsverzeichnis	ix
1. Einleitung:	1
1.1. Formen der Leistungsdiagnostik:	1
1.1.1 Die Sportmedizinische Leistungsdiagnostik:	2
1.1.2 Der Mehrstufentest:	2
1.1.3 Die Laktatbestimmung:	4
1.1.4 Spiroergometrie – Atemgasanalyse:	4
1.2 Physiologische Grundlagen der Leistungsdiagnostik:	5
1.2.1 Metabolische Grundlagen – Energiebereitstellung:	5
1.2.2 Die Energieflussrate – Energiedepots:	7
1.2.3 Das Herz-Kreislauf System:	10
1.2.3.1 Belastungs-Herzfrequenz:	10
1.2.3.2 Belastungs-EKG:	11
1.2.3.3 Belastungs-Blutdruck:	12
1.2.4 Spiroergometrie: Grundlagen und Parameter	13
1.2.4.1 Die Maximale Sauerstoffaufnahme – VO_2max	13
1.2.4.2 Die Ventilation (V_E) - Atemminutenvolumen (AMV)	14
1.2.4.3 Die Kohlendioxidabgabe – VCO_2	15
1.2.4.4 Der Respiratorische Quotient (RQ)	15
1.2.4.5 Der Sauerstoffpuls (VO_2/HF)	16
1.2.5 V_T und RCP – Die ventilatorischen Schwellen	16
1.3 Besonderheiten in der Belastungsuntersuchung bei chronischer Herzinsuffizienz ..	18
1.4 Ziel der Studie	19
2 Methoden, Material, Probanden	20
2.1 Probanden	20
2.2 Der Ablauf der Studie - Spiroergometrie	20
2.2.1 Abbruchkriterien und Überwachung der Untersuchung	22
2.2.2 Fahrradergometrie	22

2.2.3	Armkurbelergometrie	23
2.2.4	Laufbandergometrie	23
2.3	Statistik.....	23
3	Ergebnisse:	25
3.1	Patientenkollektiv – Anthropometrie.....	25
3.2	Parameter im Vergleich: Ruhe, Schwellenbelastung, Maximalbelastung	25
3.2.1	Ruhewerte:.....	26
3.2.2	Aerobe Schwelle	26
3.2.3	Anaerobe Schwelle.....	27
3.2.4	Maximale Belastung	28
3.3	Schwellenkonzepte im Vergleich	29
3.4	Verlauf der unterschiedlichen Parameter unter Belastung	30
3.4.1	Herzfrequenz.....	30
3.4.2	Leistung.....	33
3.4.2.1	Leistung an der aeroben Schwelle (AS) - LTP1	34
3.4.2.2	Leistung an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2.....	35
3.4.2.3	Leistung Maximal.....	37
3.4.3	Laktatkonzentration	38
3.4.4	Ventilation	40
3.4.5	Sauerstoffaufnahme - VO_2	41
4	Diskussion	43
4.1	Die Beschreibung der Schwellen	43
4.2	Herzfrequenz	43
4.3	Leistung.....	47
4.3.1	Mechanische Leistung - P_{mech} im Vergleich	48
4.3.2	Äußere Belastung und Innere Beanspruchung – P_{mech} und P_{met} im Vergleich	50
4.4	VO_2 und VO_{2max}	52
4.5	Laktat und Laktat Turn Points	55
4.6	Schlussfolgerungen und Kritik.....	56
	Literaturverzeichnis	58

Glossar und Abkürzungen

AC	Arm crank
AMV	Atemminutenvolumen
AF	Atemfrequenz
AK	Armkurbel
ANS	anaerobe Schwelle
AS	aerobe Schwelle
ATP	Adenosinriphosphat
AT	Anaerobic Threshold
BC	Bicycle Test
BMI	Body-Mass-Index
cm	Zentimeter
COPD	Chronic Obstructive Pulmonary Disease
CO ₂	Kohlendioxid
EDV	Enddiastolisches Volumen
ESV	Endsystolisches Volumen
EKG	Elektrokardiographie
EQO ₂	Atemäquivalent für Sauerstoff
EQCO ₂	Atemäquivalent für Kohlendioxid
FADH ₂	Flavin-Adenin-Dinukleotid
FIO ₂	inspiratorische Sauerstoffkonzentration
FEO ₂	expiratorische Sauerstoffkonzentration
FR	Fahrrad
HMV	Herzminutenvolumen
HF	Herzfrequenz
HI	Herzinsuffizienz
HRTTP	Heart Rate Turn Point
HTX	Herztransplantation
H ₂ O	Wasser
kcal	Kilokalorien
kg	Kilogramm
KP	Kreatinphosphat
LB	Laufband
LTP1,2	Laktat Turn Point 1,2
LVEF	Left Ventricular Ejection Fraction
MET	metabolisches Äquivalent
MLSS	Major Lactate Stady State

NADH/H ⁺	Nikotinsäure-Adenin-Dinukleotid
NYHA	New York Heart Association
O ₂	Sauerstoff
P _{max}	maximale Leistung
P _{mech}	mechanische Leistung
P _{met}	metabolische Leistung
RCP	Respiratory Compensation Point
RQ	Respiratorischer Quotient
SKA-RZ	Sonderkrankenanstalt – Rehabilitationszentrum
SV	Schlagvolumen
TM	Treadmill
VAT	Ventilatory Aerobic Threshold
V _E	Ventilation
VO ₂	Sauerstoffaufnahme
VCO ₂	Kohlendioxidabgabe
VO ₂ max	maximale Sauerstoffaufnahme
V _T	Tidalvolumen
VT1,2	Ventilatory Threshold 1,2
W	Watt
%P _{max}	Prozent der maximalen Leistung
%HF _{max}	Prozent der maximalen Herzfrequenz
%VO ₂ max	Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Laktat-Verlauf bei ansteigender Belastung (schematische Darstellung).	9
Abbildung 2: Bestimmung von VT und RCP.....	17
Abbildung 3: Verlauf der Herzfrequenz im Verhältnis zur relativen Leistung (%Pmax).....	30
Abbildung 4: Korrelationsuntersuchungen der HF(bpm) bei FR(Fahrrad)/AK(Armkurbel), sowie FR/LB(Laufband) an der aeroben Schwelle (AS)	31
Abbildung 5: Korrelationsuntersuchungen der HF(bpm) bei FR(Fahrrad)/AK(Armkurbel), sowie FR/LB(Laufband) an der anaeroben Schwelle (ANS).....	32
Abbildung 6: Korrelationsuntersuchungen der HF (bpm) bei FR(Fahrrad)/AK(Armkurbel), sowie FR/LB(Laufband) bei maximaler Belastung (Max). (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$).....	32
Abbildung 7: Darstellung der erzielten Leistungen P _{mech} und P _{met} (Watt) an der aeroben Schwelle (AS) - LTP1.....	34
Abbildung 8: Darstellung der relativen Leistung %P _{mech} und %P _{met} an der aeroben Schwelle (AS) - LTP1.....	34
Abbildung 9: Darstellung der erzielten Leistungen P _{mech} und P _{met} (Watt) an der anaeroben Schwelle (ANS) – LTP2	35
Abbildung 10: Darstellung der erzielten Leistungen %P _{mech} und %P _{met} an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2	35
Abbildung 11: Korrelationsanalyse der erbrachten Leistungen (P _{mech}) in Watt an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2	36
Abbildung 12: Korrelationsanalysen der metabolisch erbrachten Leistung (P _{met}) in Watt an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2.....	36
Abbildung 13: Darstellung der erzielten maximalen Leistungen P _{mech} und P _{met} (Watt)	37
Abbildung 14: Korrelationsanalyse der maximalen P _{mech} (Watt) zwischen FR/AK und FR/LB	37
Abbildung 15: Korrelationsanalyse der maximalen P _{met} (Watt) zwischen FR/AK und FR/LB	38
Abbildung 16: Verlauf der Laktatkonzentrationen (mmol/l) in Bezug zu %P _{max}	39
Abbildung 17: Verlauf der Laktatkonzentrationen (mmol/l) in Bezug zu %HF _{max}	39
Abbildung 18: Verlauf der Ventilation (l/min) in Bezug zu %P _{max}	40
Abbildung 19: Verlauf der Sauerstoffaufnahme in ml/min/kg in Bezug zu %P _{max}	41
Abbildung 20: Korrelationsanalysen der VO ₂ max.....	42
Abbildung 21: Vergleich der mechanischen Leistung (P _{mech}) in Watt und der metabolisch erbrachten Leistung (P _{met}) in Watt.....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kardiorespiratorische Klassifizierung der Fitness anhand der maximalen Sauerstoffaufnahme ($VO_2\text{max}$)	14
Tabelle 2: Klassifikation der Herzinsuffizienz nach Weber	18
Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter in Ruhe	26
Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am LTP1	26
Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am VT1	27
Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am LTP2	27
Tabelle 7: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am RCP	28
Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter unter maximaler Belastung.....	28
Tabelle 9: Mittelwerte und Standardabweichungen der Herzfrequenz (bpm) im Vergleich an submaximalen Messpunkten.....	29
Tabelle 10: Mittelwerte und Standardabweichungen der Herzfrequenz (bpm) an den Messpunkten	31
Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichungen des Laktats an den Messpunkten ...	38
Tabelle 12: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ventilation an den Messpunkten	40
Tabelle 13: Mittelwerte und Standardabweichungen der Sauerstoffaufnahme in ml/min/kg an den Messpunkten.....	41

1. Einleitung:

1.1. Formen der Leistungsdiagnostik:

In der Sportmedizin kennt man unterschiedliche Formen der Leistungsuntersuchung. Man unterscheidet in erster Linie zwischen sportmotorischen Tests, biomechanischen Leistungsuntersuchungen, sportmedizinischer Leistungsdiagnostik, psychologischer Leistungsdiagnostik und Wettkampfbeobachtungen.¹ Ziel ist es, jeweils durch genaue Beobachtung und Bewertung der Ergebnisse Leistungsreserven festzustellen und durch gezieltes Training Verbesserungen in den entsprechenden Bereichen zu bewirken. Wie bei allen wissenschaftlichen Tests müssen auch hier die Prinzipien der Validität, der Reliabilität und der Objektivität gegeben sein.¹

Desweiteren kann zwischen sportartspezifischen Untersuchungen, die häufig als sogenannte Feldtests durchgeführt werden, und Labortests unterschieden werden. Feldtests haben den Vorteil, dass sie in der spezifischen Sportart des Probanden durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass der Proband die Bewegungsabläufe der Sportart beherrscht, die Leistungsfähigkeit in der jeweiligen Sportart außerhalb von Wettkämpfen bestimmt werden kann und dadurch Rückschlüsse auf ein spezifisches Verbesserungspotential gezogen werden können. Der Nachteil ist, dass aufgrund von äußeren Bedingungen die oben genannten Testprinzipien nicht immer erfüllt werden können, und so eine exakte Vergleichbarkeit zwischen mehreren Untersuchungen nur schwer möglich ist.² Dieser Nachteil kann als der große Vorteil von Laboruntersuchungen angesehen werden. Sie finden unter standardisierten Bedingungen statt und können unabhängig von äußerer Beeinflussung nach gleichem Belastungsschema wiederholt durchgeführt werden. Sie sind sportartunabhängig und erfordern meist keine große Bewegungsschulung des Probanden, da es sich im Allgemeinen um Bewegungen des Alltags, wie Gehen/Laufen oder Radfahren handelt. Sie dienen in erster Linie zur wiederholten Kontrolle der Leistungsfähigkeit, sind aber zusätzlich von großer Bedeutung hinsichtlich der Beurteilung des Gesundheitszustandes des Probanden. Eine Tatsache, die vor allem im Jugendalter nicht zu unterschätzen ist. Im Zuge von Labortests können verschiedene Zusatzuntersuchungen wie EKG, Spirometrie,

Laktatmessung und Blutdruckmessung durchgeführt werden, die bei Feldtests nur mit großem Aufwand, beziehungsweise gar nicht durchgeführt werden können.²

1.1.1 Die Sportmedizinische Leistungsdiagnostik:

Die sportmedizinische Leistungsdiagnostik stellt sowohl im klinischen Alltag als auch im Bereich der Sportmedizin eine Basisuntersuchung dar. Im klinischen Alltag können damit kardiopulmonale Einschränkungen bei Patienten festgestellt und beurteilt werden, andererseits dient die metabolische Leistungsdiagnostik der objektiven Feststellung der Ausdauerfähigkeit von Sportlern.³

Die wichtigste Untersuchung hierfür ist die Ergometrie. Die Basisuntersuchungen der Ergometrie umfassen die Beurteilung von Leistung, Herzfrequenz und Blutdruck. Um möglichst genaue Aussagen über den Leistungszustand des Patienten/Probanden treffen zu können, wird die Untersuchung häufig zusätzlich durch eine Atemgasanalyse und/oder die Blutlaktatbestimmung erweitert. Letztere gilt als *„goldener Standard der Leistungsdiagnostik im Ausdauersport“*.³ Je nach Fragestellung lassen sich aus den Ergebnissen der Leistungsuntersuchung therapeutische Konsequenzen hinsichtlich einer erkannten pathologischen Einschränkung oder aber Empfehlungen zur Trainingssteuerung ableiten. Die Indikationen der Leistungsdiagnostik sind vielfältig. Sie umfassen Feststellungen von Verlaufsbeurteilungen bei chronischen Erkrankungen wie Herzinsuffizienz oder COPD genauso, wie Trainingsempfehlungen für Rehabilitationspatienten, oder eben Leistungsbestimmungen bei Sportlern.³

Für die Leistungsdiagnostik gilt grundsätzlich: *„Ziel ist jeweils eine objektive Differenzierung der kardiopulmonalen und metabolisch-muskulären Leistungsfähigkeit.“*³

1.1.2 Der Mehrstufentest:

Beim Mehrstufentest durchläuft der Proband einen Test mit konstant stufenweise ansteigender Belastung. Das bedeutet, dass sowohl die Dauer der einzelnen Belastungsstufen als auch das Belastungsinkrement, also der Anstieg der Belastung zwischen den einzelnen Stufen, konstant ist. Abhängig von der Fragestellung der Untersuchung werden verschiedene Protokolle verwendet.

Dabei ist zunächst wichtig, zwischen „steady state“- und „non steady state“-Protokollen zu unterscheiden.⁴

„Steady state“ bezieht sich in diesem Fall auf die Grundlagen der Laktatkinetik, welche besagen, dass sich ein Gleichgewichtszustand (steady state) des Laktats erst nach 2-6 Minuten einstellt. Nur bei dieser Form des Protokolls können absolute Laktatwerte bei submaximaler Belastung beurteilt werden.⁴ Der Unterschied liegt also in der Dauer der Belastungsstufen, die zwischen 1 und ca. 10 min liegen können. Je länger die Stufendauer, desto eher stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein und desto genauere Aussagen lassen sich bezüglich der inneren Beanspruchung bei einer bestimmten Belastung treffen. Ist die Fragestellung, Vorgaben für Trainingsintensitäten zu geben, wird bei Leistungssportlern eine Stufendauer von 5-10 Minuten empfohlen.^{4,5}

Ist die Fragestellung jedoch die subjektive Ausbelastung des Probanden und somit die Feststellung der maximalen Leistungsfähigkeit, werden „non steady state“ Protokolle verwendet. Hierbei wird empfohlen, der Leistungsfähigkeit des Patienten angepasste Belastungsprotokolle zu verwenden, die eine Ausbelastung in 8 -12 Minuten gewährleisten.^{6,7} Die Stufendauer sollte 1-3 min betragen und die Belastungsinkremente sollten sich an der erwarteten Maximalleistung orientieren, etwa 10% der maximalen Leistung.⁶ Um jedoch möglichst genaue Aussagen bezüglich der Energiebereitstellung treffen zu können, werden in der Literatur von Pokan et al. 12-16 Belastungsstufen empfohlen, bis hin zu Rampenprotokollen.⁴ Es werden allerdings auch 4-6 Stufen als ausreichend angegeben. Der Test sollte in keinem Fall länger als 17 Minuten dauern.⁷

Dieses Verfahren ist bei allen Formen der Ergometrie anwendbar. Als Standardergometer wird im deutschsprachigen Raum das Fahrradergometer betrachtet, vor allem aufgrund der im Verhältnis zum Laufband leichteren Messung von EKG, Blutdruck, Atemgasen und der Möglichkeit der Laktatbestimmung ohne Unterbrechung.⁸ In den USA wird das Laufband aufgrund der besseren Bewegungsausführung der Probanden dem Fahrrad vorgezogen. Spezielle Ergometer sind zum Beispiel das Armkurbelergometer, Ruderergometer oder Schirollerergometer. Die Entscheidung für ein Ergometer sollte individuell,

hinsichtlich Bewegungserfahrung und eventueller körperlichen Einschränkungen, sowie sportartspezifisch getroffen werden. Vor allem beim Vergleich von Absolutwerten zwischen einzelnen Ergometrieformen ist ein differenziertes Herangehen notwendig.⁸

1.1.3 Die Laktatbestimmung:

Bei der Bestimmung von Laktat wird Blut, typischerweise aus dem Ohrläppchen oder der Fingerbeere, gewonnen und danach die Konzentration gemessen. Es kann sowohl arterielles, venöses oder kapilläres Blut verwendet werden. Die absolut gemessenen Werte, „*abhängig von der Art der Probe und dem Ort der Probenentnahme*“⁹, sind aber unterschiedlich hoch. Jedoch verhalten sich die Laktatkonzentrationen bei steigender Belastung, relativ gesehen, auf gleiche Weise, wodurch eine Beurteilung des Konzentrationsverlaufs exakt möglich ist.^{9,10} Die Methoden der Bestimmung sind vielfältig: photometrisch, elektrochemisch und enzymatisch sind die gängigsten Methoden. Die Genauigkeit hängt vor allem von der Technik und Geschicklichkeit bei der Probenentnahme, der Aufbewahrung, beziehungsweise gegebenenfalls der Konservierung der Probe, sowie der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit ab.¹¹

1.1.4 Spiroergometrie – Atemgasanalyse:

Die Spiroergometrie ist eine Spezialform der Ergometrie, bei welcher im Rahmen eines Mehrstufentests (siehe 1.1.2.) kontinuierlich das Atemminutenvolumen, die Sauerstofffraktion und die Kohlendioxidfraktion der ausgeatmeten Luft mittels Atemmaske gemessen werden. Mithilfe der Herzfrequenz können so diverse Parameter berechnet werden, die zusätzliche Informationen zum Verhalten der unterschiedlichen Organsysteme und ihrem Zusammenwirken unter Belastung ermöglichen. Die Parameter werden bei jedem Atemzug anhand der sogenannten Breath-by-breath-Analyse gemessen, und unverzüglich berechnet.⁸

1.2 Physiologische Grundlagen der Leistungsdiagnostik:

1.2.1 Metabolische Grundlagen – Energiebereitstellung:

Im Mittelpunkt des menschlichen Energiestoffwechsels steht das Adenosintriphosphat (ATP). Durch Hydrolyse von ATP werden Phosphat-Gruppen auf ein Substrat übertragen, wobei Energie freigesetzt wird. In Muskelzellen führt diese Reaktion zu einer Kontraktion.¹² Weitere Moleküle, welche Phosphatgruppen zur Energiegewinnung abgeben sind Phosphoenolpyruvat, 1,3-Bisphosphoglycerat, Acetyl-CoA, und Kreatinphosphat (KP). Wobei vor allem das Kreatinphosphat für die Muskelkontraktion von Bedeutung ist, da es, so wie ATP, in geringen Mengen in Muskelzellen gespeichert ist.¹³ Der Abbau aller drei Hauptnährstoffgruppen, Kohlenhydrate, Lipide, und Aminosäuren, führt zur Bildung von ATP. Zwischenprodukt dieser Abbauvorgänge ist Acetyl-CoA.¹²

Die β -Oxidation stellt den Abbauweg der Fette dar. Dabei wird in den Mitochondrien Acetyl-CoA gebildet und unter aeroben Bedingungen daraus ATP gewonnen. Dieser Vorgang findet vor allem bei langdauernden Belastungen, ab etwa 2 Stunden mit niedriger Intensität, statt. Die Aminosäuren werden je nach Typ unterschiedlich abgebaut und können in Hungerperioden, durch den Abbau von Muskelprotein, als Energiereserve verwendet werden.¹² Dabei werden die verschiedenen Aminosäuren zur Aminosäure Alanin umgewandelt, in der Leber mit Hilfe der Alanin-Aminotransferase zu Pyruvat umgebaut und über die Glukoneogenese wieder zu Glukose aufgebaut. Diese kann dann im Rahmen der aeroben Glykolyse wieder zur Energiegewinnung herangezogen werden.¹⁴ *„Dieser Vorgang liefert zwar Energie, führt naturgemäß allerdings zu Eingriffen in die Funktion (z.B. Reduzierung kontraktile Eiweißstrukturen)“*¹² und Struktur.

Die Glykolyse, also der Abbau von Glukose, ist der wichtigste Stoffwechselvorgang zur Energiegewinnung. Diese kann, abhängig vom Energiebedarf und der notwendigen Geschwindigkeit der Energiebereitstellung, sowie dem Trainingszustand des Organismus, unterschiedlich ablaufen. Dabei wird zunächst Glukose im Zytosol zu Pyruvat abgebaut.¹³ Dieser Vorgang ist Sauerstoff unabhängig und findet in allen Zellen des Körpers statt. Erst über den weiteren Verlauf entscheidet die An- oder Abwesenheit von Sauerstoff. Ist die

Sauerstoffversorgung der Zelle ausreichend, wird Pyruvat in das Mitochondrium geschleust, und dort mit Hilfe der Pyruvatdehydrogenase zu Acetyl-CoA umgewandelt. Der weitere Abbau von Acetyl-CoA findet ausschließlich in den Mitochondrien im Rahmen des Citratzyklus (Krebszyklus) statt. Dabei wird Acetyl-CoA schrittweise zu CO_2 und H_2O umgewandelt und es entstehen die Reduktionsäquivalente NADH/ H^+ (Nikotinsäure-Adenin-Dinukleotid) und FADH₂ (Flavin-Adenin-Dinukleotid), sowie 2 ATP. In weiterer Folge wird durch den Abbau der Reduktionsäquivalente in der Atmungskette, mit Hilfe von Sauerstoff, ATP gebildet. Auf diese Weise werden pro Molekül Glucose insgesamt 32 ATP gebildet. Dieser Vorgang wird als aerobe Glykolyse bezeichnet.¹³

Da nicht alle Körperzellen über Mitochondrien verfügen, wie etwa die Erythrozyten, gibt es noch einen zweiten Weg der Energiegewinnung: Jenen ohne Sauerstoff, die sogenannte anaerobe Glykolyse. In Zellen mit Mitochondrien wird der anaerobe Stoffwechsel aktiviert, wenn die Intensität der Belastung sehr hoch ist und der aerobe Stoffwechsel nicht mehr genug Energie liefern kann oder wenn sehr schnell Energie bereitgestellt werden muss.¹⁵ Dabei entstehen im Zytosol der Zellen, durch den Abbau von Glucose zu Pyruvat, 2 ATP. Um die Glykolyse aufrecht erhalten zu können wird dabei Pyruvat durch das Enzym Laktat-Dehydrogenase zu Laktat, dem Salz der Milchsäure, umgebaut.¹⁶ Dieser Punkt stellt zwar den eigentlichen Endpunkt im Stoffwechselvorgang dar, jedoch ist *„Laktat kein Endprodukt sondern ein energiereiches Zwischenprodukt des Energiestoffwechsels.“*¹⁷ Die Zelle ist in der Lage, durch intrazelluläre Laktat-Shuttles und Shuttle Mechanismen zwischen Zellen, die Laktatkonzentration, durch Umwandlung von Laktat zurück zu Pyruvat, konstant zu halten.¹⁷ Das anfallende Pyruvat kann dann von der Zelle im aeroben Stoffwechsel wieder zur Energiegewinnung herangezogen werden. Erst wenn ein bestimmter Punkt überschritten wird, wird Laktat vermehrt an das Blut abgegeben.¹⁸ Das dabei angehäuften Laktat kann jedoch von Herzmuskel und Leber wieder „verstoffwechselt“ und erneut zur Energiegewinnung herangezogen werden. Dies passiert über den Cori-Zyklus in der Leber, beziehungsweise im Herzmuskel durch die dortige Laktat-Dehydrogenase 1. Da Laktat als Milchsäure ins Blut übertritt kann es jedoch bei hohen Konzentrationen zu Störungen der pH-Regulation und in weiterer Folge zu Laktatazidose kommen.¹⁶ Diese Laktatkonzentration kann im

Blut bestimmt werden und dient, in Zusammenschau mit der erbrachten Leistung, als Parameter der metabolischen Leistungsfähigkeit des Organismus.

Eine Besonderheit stellt der sogenannte anaerob alaktazide Energiestoffwechsel in Muskelzellen dar. Dabei wird in Muskelzellen eingelagertes ATP und KP zur Energiegewinnung herangezogen ohne dabei Laktat anzuhäufen. Je nach Trainingszustand und genetischen Voraussetzungen beträgt die maximale Einsatzdauer wenige Sekunden.¹⁵

Zusammenfassend kann man also sagen, dass sich der Organismus „*generell dreier Prozesse der Energiefreisetzung bedient: aerob, anaerob alaktazid, und anaerob laktazid.*“¹⁵ Je nach situativer Anforderung bedient sich der Körper unterschiedlicher Energiespeicher. Entscheidend dabei ist die energetische Flussrate, „*also die maximal mögliche Energiefreisetzung pro Zeiteinheit.*“¹² Zu beachten ist jedoch, dass alle Systeme gleichzeitig ablaufen und sich nur die prozentuelle Beteiligung an der Energiebereitstellung verschiebt.

1.2.2 Die Energieflussrate – Energiedepots:

Fette bilden das größte Energiereservoir im menschlichen Organismus, etwa 94500 kcal bei einem 70kg schweren Mann, mit 15% Fettanteil. Demgegenüber stehen etwa 1200-2000 kcal aus Kohlenhydraten in der Arbeitsmuskulatur und rund 200-450 kcal Kohlenhydrate in der Leber.¹² Fette können im Gegensatz zu Glykogen, der Speicherform von Glukose, nur langsam mobilisiert und oxidiert werden. Die Energieflussrate der Kohlenhydrate ist also höher als die Energieflussrate aus Fetten. Deshalb steigt mit steigender Intensität der Belastung auch der Anteil von Kohlenhydraten am Energiestoffwechsel, währenddessen der prozentuelle Anteil der Fette deutlich abnimmt. Der Körper bedient sich dann der aeroben Glykolyse.¹² Steigt die Belastungsintensität noch weiter an, bedient sich der Körper der anaeroben Glykolyse, „*da die anaerobe Glykolyse mehr Energie pro Zeiteinheit liefert als die Oxidation von Kohlenhydraten.*“¹² Dies hat allerdings den Nachteil, dass sich auch vermehrt Laktat im Blut anhäuft.

Die Energiebildungsrate beträgt für Fette etwa 0,4 mmol ATP pro min, für die aerobe Glykolyse 1,0 mmol ATP/min, die anaerobe Glykolyse 2,4 mmol ATP/min, und rund 4,4 mmol ATP/min für die im Muskel gespeicherten energiereichen

Phosphate ATP und KP.¹⁹ Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich eine Dreiphasigkeit der Energiebereitstellung:¹⁵

Phase 1 – AEROBE Phase

Phase 2 – AEROB/ANAEROBER Übergang

Phase 3 – ANAEROBE Phase

Der Organismus durchschreitet also bei ansteigender Belastung diese 3 Phasen. In welchem Stoffwechselbereich sich der Körper gerade befindet kann in der Sportmedizin durch die Bestimmung des Laktats aus dem Blut im Rahmen einer metabolischen Leistungsdiagnostik bestimmt werden. Dabei wird bei stufenweise ansteigender Belastung am Ende jeder Belastungsstufe Blut abgenommen und das Laktat daraus bestimmt. Anzustreben ist dabei das Erreichen der subjektiven Erschöpfung des Probanden unter maximaler Belastung. Ganz entscheidend ist hierbei die Wahl der richtigen Stufendauer und der Belastungsinckremente, abhängig von Fragestellung und Einschätzung des Probanden, durch den Untersucher (siehe 1.1.2.).⁶

Die in ein Diagramm eingetragenen Werte ergeben in Bezug auf Zeit und erbrachter Leistung die „sogenannte Laktat-Leistungs-Kurve“⁴. Vor allem die Übergänge zwischen den Phasen, die so bezeichneten „Schwellen“, sind für die Trainingssteuerung und die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Bedeutung. In der Wissenschaft haben sich unterschiedliche Schwellenmodelle entwickelt. Bis vor wenigen Jahren war es üblich, ein starres Schwellenmodell von fixen Schwellen bei 2 und 4mmol/L zu verwenden. Jedoch wird dieses Modell „den individuellen Regulationsverhältnissen nicht gerecht“.⁴ Aus diesem Grund werden heutzutage individuelle Schwellenkonzepte als Standard herangezogen.⁴

Der Übergang von einer rein aeroben Stoffwechsellage der Phase 1 in den aerob/anaeroben Übergangsbereich wird als aerobe Schwelle¹⁵ beziehungsweise synonym als Anaerobic Threshold²⁰ (AT) und First Lactate Turn Point²¹ (LTP1) bezeichnet. Diese Begriffe beschreiben immer dasselbe Phänomen, nämlich den erstmaligen messbaren Anstieg der Blutlaktatkonzentration über Ruhewerte bei

Belastung. Diese Schwelle stellt das Ende der aeroben Phase dar, in welcher das bei Belastung anfallende Laktat zur Gänze intramuskulär verstoffwechselt wird. Dies passiert bei Belastungen mit weniger als 45 % der maximalen Leistung. Steigt die Belastung weiter an, benötigt der Muskel Unterstützung des Gesamtorganismus, er gibt vermehrt Laktat in den Blutkreislauf ab.⁴

Im aerob/anaeroben Übergangsbereich steigt die Blutlaktatkonzentration bei weiterer Leistungssteigerung konstant an, jedoch ist der Gesamtorganismus noch in der Lage das anfallende Laktat zu verstoffwechseln. Der Körper befindet sich in einem „steady state“ Zustand, in welchem sich Laktatproduktion und Laktatclearance die Waage halten. Als „Maximales Laktat Steady State“ (MLSS) wird die höchste vom Probanden erbrachte Leistung bezeichnet, bei welcher sich dieser Gleichgewichtszustand noch einstellt.⁴ Dieser Punkt stellt den Übergang der Phase 2 in die anaerobe Phase dar, und wird als anaerobe Schwelle, Second Lactate Turn Point (LTP2), oder MLSS bezeichnet.^{4,3}

Die anaerobe Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass der Organismus nicht mehr in der Lage ist, das anfallende Laktat zur Gänze zu verstoffwechseln. Das bedeutet, die oxidative Kapazität des Organismus wird überschritten und es kommt zu einem exponentiellen Anstieg in der Laktat-Leistungs-Kurve.⁴ Gleichzeitig kommt es zu einem Abfall des pH-Wertes und im weiteren Verlauf zum konsekutiven Belastungsabbruch durch subjektive Erschöpfung. Je nach Trainingszustand beginnt diese Phase bei Belastungen im Bereich von etwa 75% der Maximalleistung.⁴

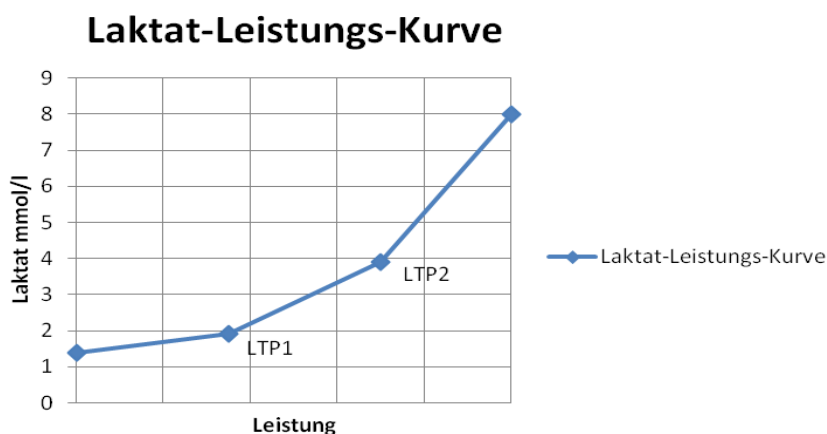


Abbildung 1: Laktat-Verlauf bei ansteigender Belastung (schematische Darstellung).

1.2.3 Das Herz-Kreislauf System:

Um den Energiestoffwechsel in der Muskulatur unter Belastung aufrechtzuerhalten benötigt es eine entsprechende Anpassung des kardiopulmonalen und kardiovaskulären Systems. Dementsprechend findet man auch typische Veränderungen des Herzens und des Gefäßsystems in Belastungssituationen. Ursache dafür ist eine physiologische Stressreaktion, die durch eine Sympathikusaktivierung mit konsekutiver Ausschüttung von Adrenalin und Noradrenalin hervorgerufen wird. Die Folge ist einerseits die Steigerung des Herzzeitvolumens (HMV), welches aus Herzfrequenz (HF) mal Schlagvolumen (SV) berechnet wird, und eine Blutumverteilung durch gezielte Eng- beziehungsweise Weitstellung von Gefäßen zu Gunsten der Arbeitsmuskulatur.²²

Das HMV wird bei untrainierten Probanden in erster Linie durch eine Steigerung der Herzfrequenz erhöht. Gleichzeitig wird in nicht beteiligten Organsystemen, wie den Verdauungsorganen, die Durchblutung durch Vasokonstriktion gedrosselt, während in der Arbeitsmuskulatur die Durchblutung mit Hilfe von lokalen Regulationsmechanismen durch Vasodilatation erhöht wird.²² Diese periphere Durchblutungssteigerung wird vor allem durch die Änderungen im zellulären Stoffwechsel verursacht. So führen ein Abfall des Sauerstoffpartialdrucks, ein Anstieg des Kohlendioxids, sowie die gesteigerte Produktion und Freisetzung von Laktat und Kalium und der damit verbundene Abfall des pH-Wertes zu einer Weitstellung der Gefäße.²² Durch diese Veränderungen in der Durchblutungssituation kommt es zu typischen Anpassungen des Blutdrucks und der Herzfrequenz.

1.2.3.1 Belastungs-Herzfrequenz:

Bei Betrachtung der Herzfrequenz unter Belastung findet man beim Gesunden einen s-förmigen Kurvenverlauf, mit in 85% der Fälle typischer Abflachung im submaximalen Bereich. Diesen Punkt findet man häufig im Übergang zwischen Phase 2 und 3 der Energiebereitstellung, also im Bereich der anaeroben Schwelle.²² Die beim Gesunden als Deflexionspunkt bezeichnete Abflachung kann nach Conconi auch zur nichtinvasiven Bestimmung der anaeroben Schwelle herangezogen werden.²³ Bei herzkranken Patienten mit eingeschränkter linksventrikulärer Funktion und Koronarer Herzkrankheit findet man im Gegensatz

dazu einen Aufwärtsknick, der durch einen verstärkten Anstieg der Herzfrequenz entsteht.²⁴ Weitere Studien fanden diese Veränderung aber auch bei 6% der gesunden Probanden.²¹ In beiden Fällen geht mit der Veränderung des Kurvenverlaufs auch eine Abnahme der myokardialen Funktion einher und somit eine Abnahme der linksventrikulären Ejektionsfraktion (LVEF).²² Der Anstieg der Herzfrequenz passiert in erster Linie durch eine Verkürzung der Diastolendauer. Folglich reduziert sich die Füllungszeit des Herzens. Dadurch ist eine weitere Zunahme des Herzzeitvolumens ab dem Erreichen einer individuell maximalen Herzfrequenz nicht mehr möglich.⁸ Die maximale Herzfrequenz nimmt mit zunehmendem Alter linear ab, jedoch unterliegt dies großen individuellen Schwankungen, wodurch eine einfache Berechnung nur einen Richtwert darstellen kann.

$$\text{HF} - \text{Max} = 220 - \text{Alter} (+/- 15\%)^6$$

Die Bestimmung des Herzfrequenzknickpunktes hat aufgrund der nicht-invasiven Berechenbarkeit stetig an Bedeutung gewonnen. Heutzutage werden bei einer Ergometrie mittels Computerauswertung an die Herzfrequenzkurve zwei Geraden angelegt und deren Schnittpunkt bestimmt, ausgehend einerseits von der Maximalen Herzfrequenz und andererseits im Bereich der aeroben Schwelle. Dieser Punkt wird als „*heart rate turn point (H RTP)*“²⁴ bezeichnet.²² Er kann als Ausgangspunkt für Trainingsempfehlungen herangezogen werden.²⁵

1.2.3.2 Belastungs-EKG:

Unter Belastung kommt es zu typischen physiologischen Veränderungen des EKG-Komplexes. Natürlich kann es aber auch zu pathologischen Normabweichungen kommen, welche häufig auf Perfusionsstörungen des Herzmuskels hinweisen.²²

In der Reihenfolge des EKG-Komplexes beginnend, gibt es typische Veränderungen der P-Wellen Amplitude. Unter Belastung werden Erhöhungen der Amplitude als physiologisch betrachtet, die Abnahme der Amplitude als wird dagegen als pathologisch angesehen. Eine R-Zacken Abnahme wird als physiologisch bezeichnet, während eine R-Erhöhung Hinweis für eine ischämische Reaktion sein kann. T-Wellen Veränderungen unter Belastung können unterschiedliche Ursachen haben. So kann das Aufrichten eines vor Belastung

negativen T's, in Zusammenschau mit entsprechender Symptomatik, als Ischämie-Hinweis gesehen werden. Bei ausdauertrainierten Sportlern kann dies jedoch als Zeichen einer linksventrikulären Hypertrophie im Rahmen eines Sportherzens gewertet werden. Abflachungen der T-Welle sind physiologisch.^{6,22}

Die größte Bedeutung in der Belastungs-EKG Diagnostik haben aber ST-Strecken Veränderungen. Der Bezugspunkt für die Interpretation ist der J-Punkt, an welchem der QRS-Komplex in die ST-Strecke übergeht. Man unterscheidet ST-Hebungen von ST-Senkungen, wobei letztere wiederum in ascendierende, horizontale und deszendierende Senkungen eingeteilt werden.⁶

ST-Strecken-Hebungen werden dann als pathologisch betrachtet, wenn die Hebung in drei aufeinanderfolgenden EKG-Komplexen auftritt, und jeweils am oder 60-80ms nach dem J-Punkt mehr als 0,1 mV beträgt. Dieses EKG Bild ist Hinweis für eine transmurale Ischämie und muss den sofortigen Belastungsabbruch nach sich ziehen.⁶

ST-Strecken-Senkungen müssen differenzierter betrachtet werden. So gelten ascendierende Senkungen bei raschem Verlauf grundsätzlich als nicht krankhaft, während belastungsabhängige horizontale und deszendierende ST-Strecken-Senkungen, von mehr als 0,1 mV und entsprechender Dauer von 60-80ms, als pathologisch angesehen werden. Sie weisen auf eine Koronarinsuffizienz hin und korrelieren im Ausprägungsgrad der EKG Veränderungen mit dem Ausprägungsgrad der Koronarveränderung.^{6,22}

1.2.3.3 Belastungs-Blutdruck:

Während einer kontinuierlich ansteigenden Belastung steigt auch der Blutdruck linear dazu an. Bei gesunden Probanden „*sollte der systolische Blutdruck um 5-10 mmHg pro MET (ca.20-30W) ansteigen*“.^{6,26} Als oberer Grenzwert wird in der Literatur unter maximaler Belastung ein systolischer Wert von 250 mmHg, beziehungsweise 140 mmHg über dem Ausgangswert angeführt.²⁶ Diese Werte sollten von untrainierten gesunden Probanden nicht überschritten werden. Bei ausdauertrainierten Sportlern können aber auch deutlich höhere Werte als physiologisch betrachtet werden. Da die Blutdruckmessung auf jeder

Belastungsstufe durchgeführt wird, kann man mit Hilfe einer Formel abschätzen ob die Blutdruckwerte für die jeweilige Belastung physiologisch sind, oder ob eine Belastungshypertonie vorliegt.^{6,27}

$$RR_{\text{sys}} = 120 + 0,4 \times (\text{Watt} + \text{Lebensalter in Jahren})^6$$

Belastungshypertonie ist eine Regulationsstörung unter Belastung und kann eine spätere arterielle Hypertonie ankündigen.²⁸

1.2.4 Spiroergometrie: Grundlagen und Parameter

1.2.4.1 Die Maximale Sauerstoffaufnahme – VO₂max

Die VO₂max beschreibt die maximale Sauerstoffaufnahme unter maximaler Belastung und gilt als der entscheidende Parameter der aeroben Leistungsfähigkeit. Sie gibt die Menge an Sauerstoff an, welche aus der eingeatmeten Luft pro Zeiteinheit extrahiert wird. Die Sauerstoffaufnahme VO₂ wird in l/min gemessen. Zur besseren Vergleichbarkeit wird sie jedoch meist in ml/min/kg Körpergewicht angegeben. Die VO₂max stellt den obersten Grenzwert der Leistungsfähigkeit des kardiopulmonalen Systems dar und ist ein Maß für die Sauerstoffaufnahme, den Sauerstofftransport und den Sauerstoffverbrauch des Organismus.²⁹ Dementsprechend vielfältig sind auch die Beeinflussungsmöglichkeiten. Berechnet wird die VO₂max mithilfe des Fick'schen Prinzips:

$$VO_{2\text{max}} = \text{HMV} \times a\text{-}v\text{-}DO_{2\text{max}},$$

wobei HMV das Herzzeitvolumen, und a-v-DO₂max die arterio-venöse Sauerstoffdifferenz beschreibt.²⁹

Die VO₂max wird im Rahmen einer Spiroergometrie mittels Atemmaske gemessen. Sie kann aber bei Ergometrien ohne Atemgasanalyse auch mithilfe der erbrachten Leistung und der Belastungsdauer berechnet werden. Diese Werte sollten jedoch aufgrund von Streuung, beeinflusst durch unterschiedliche Faktoren, nur als Annäherung angesehen werden.⁸ Ein Plateau- Phänomen, das bedeutet kein weiterer Anstieg der VO₂ trotz weiter steigender Belastung, wurde lange als der Punkt des Erreichens der VO₂max angesehen, wird heutzutage aber

kontrovers diskutiert.³⁰ Aus diesem Grund wird meist die sogenannte Peak-VO₂, der höchste erreichte VO₂ Wert, mit dem Begriff der VO₂max gleichgesetzt.⁸

Heutzutage werden immer häufiger METs (metabolische Einheiten) zur Angabe des Energieverbrauchs und der aeroben Leistungsfähigkeit verwendet. Das sogenannte metabolische Äquivalent (MET) beschreibt den basalen Sauerstoffverbrauch in Ruhe, bezogen auf das Körpergewicht: 1MET = 3,5ml O₂/min/kg.³¹

Die VO₂max ist ein objektiver Parameter zur Feststellung des Fitnesszustandes eines Probanden und gilt aus diesem Grund auch als guter Prädiktor für Prognosen hinsichtlich Mortalität und Überleben von Gesunden und Kranken. So gehen Werte unter 21 ml/min/kg VO₂max mit einer erhöhten Mortalität einher, während Werte einer VO₂max von >35ml/min/kg als Gesundheits protektiv angesehen werden.³² Erhöht sich die Leistungsfähigkeit um 1MET, reduziert sich damit die Mortalität um 8-18%, unabhängig von Gesundheitszustand, Alter oder Geschlecht der Probanden.³²

Frauen					
Alter	Sehr Schwach	Schwach	Durchschnitt	Gut	Hoch
30-39	<20	20-27	28-33	34-44	>45
40-49	<17	17-23	24-30	31-41	>42
50-59	<15	15-20	21-27	28-37	>38
60-69	<13	13-17	18-23	24-34	>35
Männer					
30-39	<23	23-30	31-38	39-48	>49
40-49	<20	20-26	27-35	36-44	>45
50-59	<28	18-24	25-33	34-42	>43
60-69	<16	16-22	23-30	31-40	>41

Tabelle 1: Kardiorespiratorische Klassifizierung der Fitness anhand der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max) in ml/min/kg³²

1.2.4.2 Die Ventilation (V_E) - Atemminutenvolumen (AMV)

Das Atemminutenvolumen berechnet sich aus der Atemfrequenz (AF) mal dem Atemzugvolumen (V_T = Tidalvolumen) und hat die Einheit l/min. Das AMV

berechnet jene Menge an Luft, die pro Zeiteinheit ein- beziehungsweise ausgeatmet wird und wird auch als Ventilation (V_E) bezeichnet. Unter Belastung kommt es bei gesunden Probanden zu einer Steigerung der Ventilation von Ruhewerten von ca. 6-8l/min, auf etwa 120l/min unter Maximalbelastung. Bei ausdauertrainierten Sportlern auf bis zu 200l/min.²⁹ Die Steigerung erfolgt bei niedrigen Belastungen in erster Linie durch Erhöhung des V_T . Unter submaximaler und maximaler Belastung kann eine weitere Steigerung der V_E nur durch eine Erhöhung der AF erreicht werden.²⁹

Die V_E hat große Bedeutung hinsichtlich der Sauerstoffaufnahme unter Belastung. Mit ihr und der Differenz aus inspiratorischer (FIO_2) und expiratorischer Sauerstoffkonzentration (FEO_2), kann man mit der Formel: $VO_2 \approx V_E \times (FIO_2 - FEO_2)$, die Sauerstoffaufnahme unter Belastung grob berechnen.⁸ Entscheidend für eine hohe körperliche Leistungsfähigkeit ist aber auch eine entsprechend gute Lungenperfusion. Bei Patienten mit chronischer Herzinsuffizienz und Lungenerkrankungen findet man typischerweise ein Missverhältnis zwischen Ventilation und Perfusion. Die V_E ist im Verhältnis zur Durchblutung übermäßig stark erhöht.⁸

1.2.4.3 Die Kohlendioxidabgabe – VCO_2

Dieser Parameter misst die Menge an CO_2 , die unter Belastung pro Zeiteinheit abgeatmet wird. CO_2 entsteht bei Belastung auf zwei Arten. Einerseits durch den oxidativen Metabolismus, andererseits nichtmetabolisch bei intensiven Belastungen durch die Pufferung von Laktat. Dabei kann es in Folge einer Reduktion des Bicarbonats (HCO_3) zu einem Anstieg des CO_2 im Blut kommen und somit zu einer metabolischen Azidose. Durch eine Steigerung der Ventilation wird das angehäuften CO_2 abgeatmet und die Azidose ausgeglichen. CO_2 ist der entscheidende Parameter für die Ventilation, was dazu führt, dass VCO_2 und Ventilation bei der Spiroergometrie einen annähernd gleichen Verlauf haben.^{8,29}

1.2.4.4 Der Respiratorische Quotient (RQ)

Der RQ berechnet sich aus dem Quotienten von VCO_2/VO_2 . Er kann unter steady state-Bedingungen zum Abschätzen des metabolischen Substrats der Energiegewinnung herangezogen werden.⁸ Bei reinem Kohlenhydratstoffwechsel beträgt der RQ 1, während er bei reinem Fettstoffwechsel 0,7 beträgt. Bei gemischter Ernährung beträgt er etwa 0,82-0,85. Bei Belastungen oberhalb eines

steady state Zustandes beträgt der RQ aufgrund der gesteigerten CO₂ Produktion >1.²⁹

1.2.4.5 Der Sauerstoffpuls (VO₂/HF)

Der Sauerstoffpuls beschreibt den Sauerstoffverbrauch pro Herzschlag und wird als spiroergometrisches Korrelat des Schlagvolumens bezeichnet.⁸ Berechnet wird er aus dem Quotienten von VO₂/HF, und wird in der Einheit ml angegeben. Als Normwerte werden 4-6ml in Ruhe, beziehungsweise 10-20ml bei maximaler Belastung angesehen.²⁹ Er dient zur Abschätzung der myokardialen Funktion unter Belastung und ist bei Patienten mit Herzinsuffizienz insgesamt reduziert. Zusätzlich kommt es zu einer frühzeitigen Plateaubildung auf niedrigen Intensitätsstufen. Jedoch können Medikamente die die HF herabsetzen, wie Beta-Blocker, zu erhöhten Absolutwerten führen.⁸

1.2.5 VT und RCP – Die ventilatorischen Schwellen

Die Phasen des Energiestoffwechsels sind die Grundlage sämtlicher Veränderungen des Organismus unter Belastung, und die Veränderungen im zellulären Metabolismus führen auch zu ganz bestimmten Veränderungen in der Ventilation.

Ventilatory threshold (VT):

Die ventilatorische Schwelle, auch als „ventilatory threshold“ (VT), beziehungsweise auch „anaerobic threshold“ (AT) und „ventilatory anaerobic threshold“ (VAT) bezeichnet, dient der Feststellung der aeroben Leistungsfähigkeit von Probanden bei Belastung.²⁹ Zur Feststellung der VT ist keine Ausbelastung notwendig, somit ist sie von willentlicher Beeinflussung relativ unbeeinflusst. Im Übergang der Phase 1 in die Phase 2 der Energiebereitstellung kommt es erstmals zu einem merklichen Anstieg der Laktatkonzentration im Blut. Um eine Azidose zu verhindern, müssen überschüssige H⁺ Ionen durch Bicarbonat gepuffert werden.²⁹ Dies führt zu einer Anhäufung von CO₂ im Blut, welches über eine Verstärkung der Ventilation abgeatmet wird. Dadurch kommt es auf der Ventilationskurve zu einem ersten nicht-linearen Anstieg.²⁹ Dieser Punkt wird als VT bezeichnet. Somit entspricht die VT auch in etwa dem LTP 1, dem erstmalig messbaren Anstieg der Blutlaktatkonzentration über Ruhewerte.³ Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung wäre die Darstellung jenes Punktes, an dem das

Atemäquivalent für Sauerstoff (V_E/V_{O_2}) merklich ansteigt, während das Atemäquivalent für Kohlendioxid (V_E/V_{CO_2}) weiterhin stabil bleibt.²⁹

RCP – Respiratory compensation point:

Findet im Rahmen einer Ergometrie eine weitere Belastungssteigerung statt, nimmt der Anteil des anaeroben Stoffwechsels immer mehr zu. Zunächst wird dieser Zustand noch einigermaßen konstant gehalten. Kommt es jedoch zu einer weiteren Steigerung der Belastung, wird die Energiebereitstellung vorwiegend anaerob betrieben und es kommt zur Ausbildung einer metabolischen Azidose. Die Kompensation erfolgt durch einen neuerlich überproportionalen Anstieg der Ventilation, welcher als erneuter Knick nach oben auf der V_E Kurve zu erkennen ist. Dieser Punkt wird als RCP bezeichnet.³ Der RCP, oder auch VT2, kann zusätzlich auch durch die Ermittlung des niedrigsten Wertes des Atemäquivalents für Kohlendioxid (V_E/V_{CO_2}) festgestellt werden.²⁹

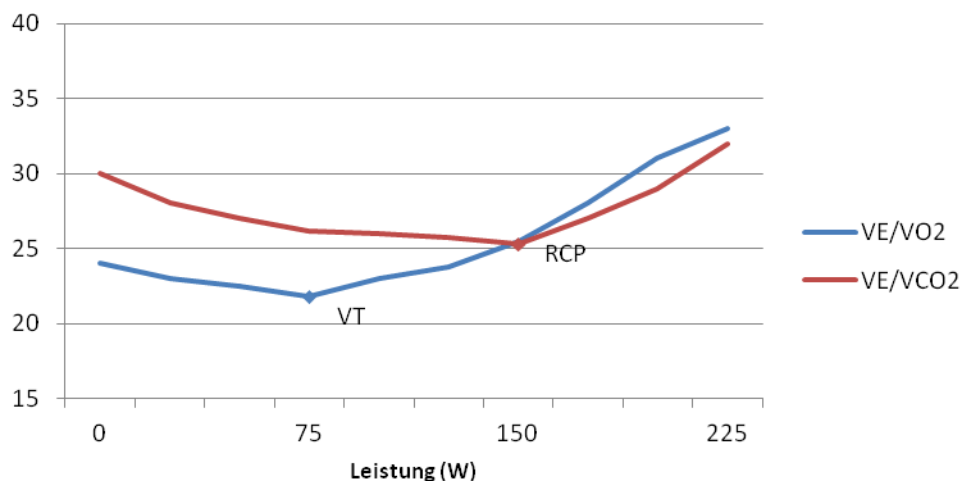


Abbildung 2: Bestimmung von VT und RCP, mittels Verlauf der Atemäquivalente für Sauerstoff (V_E/V_{O_2}) und Kohlendioxid (V_E/V_{CO_2}), (schematische Darstellung).⁸

1.3 Besonderheiten in der Belastungsuntersuchung bei chronischer Herzinsuffizienz

Unter dem Begriff der Herzinsuffizienz (HI) versteht man einen pathologischen Zustand bei dem es aufgrund von strukturellen oder funktionellen Störungen des Herzens zu einer verminderten Auswurfleistung kommt und dadurch zu einer ungenügenden Blut- und Sauerstoffversorgung von metabolischem Gewebe. Das klinische Syndrom setzt sich in erster Linie aus rascher Ermüdung, Schwäche, Luftnot und eventuellen Stauungszeichen zusammen.³³ Als Standardklassifikation für subjektives Empfinden dient die NYHA-Klassifikation.³³ Die Klassifizierung nach Weber et al. versucht den Schweregrad der HI aufgrund von spiroergometrisch erhobenen Parametern einzuteilen.³² Dabei spielen in erster Linie die $VO_2\text{max}$ und die V_E eine Rolle. Die $VO_2\text{max}$ ist bei Patienten mit HI deutlich eingeschränkt und dient als Prädiktor der Mortalität und ist Indikator für die Herztransplantation (HTX). Werte der $VO_2\text{max} < 10\text{ml/min/kg}$ gelten als Indikation für eine HTX. Werte von $<14\text{ml/min/kg}$ gehen mit einer erhöhten Mortalität einher. Aus diesem Grund gilt die Spiroergometrie bei HI als Routineuntersuchung.³²

Klasse	Schweregrad	$VO_2\text{max}$ (ml/min/kg)	VT (ml/min/kg)	CI (l/min/m ²)
A	Leicht bis keine	>20	>14	>8
B	Leicht bis moderat	16-20	11-14	6-8
C	Moderat bis schwer	10-16	8-11	4-6
D	Schwer	6-10	5-8	2-4
E	Sehr schwer	<6	<4	<2

Tabelle 2: Klassifikation der Herzinsuffizienz nach Weber, VT=Ventilatorische Schwelle, CI=Cardiac Index (HMV/Körperoberfläche m²)³²

1.4 Ziel der Studie

Im Rahmen der Untersuchung sollen verschiedene ergometrische Belastungsformen an einem bestimmten Kollektiv, nämlich an herzinsuffizienten Patienten, miteinander verglichen werden. Fahrradergometer, Armkurbelergometer und Laufbandergometer sollen hinsichtlich erreichter submaximaler und maximaler Kennwerte untersucht werden und etwaige dabei auftretende Korrelationen und Unterschiede beschrieben werden. Vor allem stellt sich dabei die Frage, ob man Rückschlüsse von einem Ergometer (z.B.: Fahrrad) auf ein anderes Ergometer (z.B.: Handkurbel) ziehen kann. Kann man aufgrund der erreichten Leistung an einem Ergometer auf die möglich erreichbare Leistung bei einer anderen Belastungsform schließen und ergeben sich dadurch Möglichkeiten zur Trainingsempfehlung auf anderen Ergometern? Vor allem letzteres spielt bei Patienten mit eingeschränkter ventrikulärer Funktion eine Rolle, da Laufbandbelastungen, auch bei niedrigen Intensitäten, eventuell zu beanspruchend sein können. In der Rehabilitation sind Trainingsempfehlungen oft schwer vorzugeben und mehrere Optionen in der Bewegungsform stellen sicher einen großen Vorteil dar.

2 Methoden, Material, Probanden

Das Studienprotokoll wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz genehmigt. Alle Patienten wurden über den Ablauf der Untersuchungen mündlich und schriftlich aufgeklärt und haben sich freiwillig zur Teilnahme an der Studie bereiterklärt. Die Untersuchungen wurden nach den Praxisleitlinien der österreichischen kardiologischen Gesellschaft durchgeführt.⁶

2.1 Probanden

Bei den Probanden handelte es sich um Patienten der SKA-RZ St. Radegund, welche sich dort im Rahmen eines Rehabilitationsaufenthaltes befanden. Die zehn Studienteilnehmer waren alle männlich und hatten ein medianes Alter von 46,5 Jahren (min.36; max.77). Die Patienten wurden während des Aufenthaltes angesprochen und gefragt, ob sie sich zur Studienteilnahme bereiterklären würden. Bei Interesse und Bereitschaft zur Teilnahme wurden die Patienten über die Studie sowie den Nutzen und etwaige Risiken der Untersuchungen aufgeklärt und mussten eine schriftliche Einverständniserklärung zur Teilnahme unterschreiben. Die Patienten wurden darüber aufgeklärt, dass die Teilnahme freiwillig ist und somit auch jederzeit ein Ausscheiden aus der Studie ohne Angabe von Gründen möglich ist. Vor der Aufnahme in die Studie wurde bei den Patienten eine Aufnahmeuntersuchung durchgeführt, um eventuelle Ausschlusskriterien festzustellen. Sie bestand aus Anamnese, körperlicher Untersuchung, Ruhe-RR, 12-Kanal-EKG, Echokardiographie und einem Standardlabor. Die linksventrikuläre Einschränkung war Haupteinschlusskriterium und wurde durch eine Echokardiographie bestimmt. Sie sollte zur Teilnahme an der Studie unter 45% liegen. Ausschlusskriterien waren Erkrankungen des Bewegungsapparates, welche eine Ausbelastung eingeschränkt hätten, sowie akute Erkrankungen und fieberhafte Infekte. Des Weiteren führte jeder Hinweis auf eine belastungsindizierte Ischämie, sowie chronische Lungenkrankheiten und Diabetes mellitus zum Ausschluss. Die Medikation wurde während der Dauer der Untersuchungen nicht verändert.

2.2 Der Ablauf der Studie - Spiroergometrie

Die Patienten erhielten genaue Richtlinien zum Verhalten an den Untersuchungstagen. Körperliches Training oder Anstrengungen sollten an diesen

Tagen vermieden werden. Des Weiteren wurden die Patienten gebeten, drei Stunden vor den Untersuchungen, auf Alkohol, Nikotin und Schokolade zu verzichten. Die Untersuchungen erfolgten an drei verschiedenen Tagen hintereinander, mit zumindest 24 Stunden Ruheintervallen. Es wurde jeweils eine Fahrradspiroergometrie, eine Armkurbelspiroergometrie und eine Laufbandspiroergometrie durchgeführt. Die Rahmenbedingungen und die Geräte dafür stellte die SKA-RZ St. Radegund zur Verfügung.

Die Untersuchungen folgten einem Schema: Vor Beginn jeder Untersuchung wurde ein Ohrläppchen mit Finalgonsalbe® hyperämisiert, um die darauffolgenden Blutabnahmen zur Laktatmessung zu erleichtern. Das Laktat wurde im Vorbelastungszustand bestimmt und in weiterer Folge unter Belastung minütlich, bis zur vierten Nachbelastungsminute gemessen. Zusätzlich wurde bei Ausbelastung ein maximales Laktat bestimmt.

Den Patienten wurden daraufhin der Untersuchungsablauf und das Belastungsprotokoll neuerlich erklärt und die Ergometer wurden den körperlichen Voraussetzungen (Größe) der Probanden angepasst. Des Weiteren wurde der Ruhe Blutdruck nach der Riva-Rocci Methode gemessen. Bei Art. Hypertonie >180/100 wurde keine Untersuchung durchgeführt.

Nach der Einstellung des Ergometers bekamen die Probanden noch eine Atemmaske angepasst, mit welcher die Atemgase während der Untersuchung kontinuierlich gemessen wurden. Es handelte sich dabei um eine sogenannte offene Spirometrie (Gerät: Via Sys Healthcare GmbH., Type SBx/CPX, Hoechberg, Deutschland), bei welcher Ventilation, Sauerstoffkonzentration und Kohlendioxidkonzentration in breath-to-breath Modus analysiert wurden und alle 15 sec vom Gerät gespeichert wurden. Das Gerät wurde vor jeder Untersuchung mit standardisierten Eichgasen kalibriert und die Maske wurde auf Dichtheit überprüft.

Die Belastung erfolgte nach dem vorher festgelegten Belastungsprotokoll bis zur subjektiven Erschöpfung beziehungsweise dem Auftreten von Abbruchkriterien.

2.2.1 Abbruchkriterien und Überwachung der Untersuchung

Während der gesamten Dauer der Untersuchung waren ein Arzt, sowie eine diplomierte medizinisch-technische Fachkraft anwesend, welche die Untersuchungen durchführten. Vor Beginn der Untersuchung und währenddessen wurde kontinuierlich ein 12-Kanal EKG aufgezeichnet und der Blutdruck kontrolliert. Die permanente Blutdruckmessung war aufgrund der Bewegungsform nur am Fahrrad möglich. Bei der Armkurbel- sowie der Laufbandergometrie wurde der arterielle Blutdruck in Ruhe und direkt nach Ausbelastung gemessen. Als Abbruchkriterien galten die Abbruchkriterien der österreichischen kardiologischen Gesellschaft von 2008⁶ und hier vor allem das Auftreten von pathologischen EKG Veränderungen, wie pathologische ST-Elevationen, anhaltende ventrikuläre Tachykardien, Auftreten von Angina Pectoris und andere Zeichen einer Ischämie, sowie zerebrale Symptome wie Schwindel oder Verwirrtheit und paradoxes Blutdruckverhalten, d.h. ein Abfall des systolischen Blutdrucks um mehr als 10mmHg unter den Ausgangswert bei ansteigender Belastung. Entsprechende Ausrüstung für den Notfall war zu jeder Zeit im Raum verfügbar.

Der Belastungsabbruch erfolgte bei objektiver Ausbelastung, wie z.B.: Erreichen der berechneten maximalen Herzfrequenz, eines Respiratorischen-Quotienten >1 , beziehungsweise bei subjektiver Erschöpfung der Probanden und dem Wunsch, die Ergometrie zu beenden. War die spirometrische Ausbelastung noch nicht gegeben, wurden die Patienten durch das Team motiviert, den Belastungsabbruch noch etwas länger hinauszuzögern. Dies geschah selbstverständlich nur dann, wenn keine anderen Abbruchgründe (siehe oben) vorlagen.

2.2.2 Fahrradergometrie

Als Fahrradergometer wurde ein elektrisch gebremster Ergometer verwendet (Gerät: Lode BV, Type 906900, Groningen, The Netherlands). Das Belastungsprotokoll wurde an den Patienten angepasst, jedoch wurde wenn möglich ein Standardprotokoll, 20 Watt Anfangsbelastung und jede Minute eine Steigerung um 12 Watt bis zur Ausbelastung eingehalten. Die Patienten saßen möglichst aufrecht am Ergometer und die Höhe der Sitzposition wurde so eingestellt, dass die Kniegelenke zum Zeitpunkt der größten Beinstreckung noch

leicht gebeugt waren (etwa 30°). Die Füße der Probanden wurden mit Klettverschluss am Pedal fixiert. Die Probanden wurden dazu angehalten, keine beengende Kleidung zu tragen und wenn möglich Sportschuhe.

2.2.3 Armkurbelergometrie

Die Armkurbelspiroergometrie wurde auf dem Gerät: Lode BV, Type 917900, Groningen, The Netherlands, durchgeführt. Auch hier wurde in 1-Minuten Abständen die Belastung gesteigert. Ausgangsbelastung war 20 Watt. Das Belastungssinkrement lag bei 5 bzw. 7 Watt. Die Patienten führten die Ergometrie in sitzender Position, mit beiden Füßen flach am Boden, durch. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Kurbel des Ergometers genau in der Körpermitte und auf derselben Höhe wie die beiden Schultergelenke positioniert wurde.

2.2.4 Laufbandergometrie

Die Untersuchungen wurden auf dem Laufbandergometer (Gerät: General Electrics, T2100, Waukesha, WI, USA) durchgeführt. Dabei blieb die Geschwindigkeit unverändert, jedoch wurde jede Minute die Steigung des Laufbandes erhöht. Abhängig von der erreichten maximalen Leistung am Fahrrad, wurde entweder ein Protokoll mit 5,5km/h Grundgeschwindigkeit und 1,5% Steigung/min (bei maximaler Leistung am Fahrrad <150Watt), oder ein Protokoll mit 5,5km/h Grundgeschwindigkeit und 2% Steigung/min verwendet (bei maximaler Leistung am Fahrrad >150 Watt). Zur Laktatbestimmung wurde die Belastung kurzzeitig pausiert und die Probanden stiegen dazu auf die seitlichen, rutschfesten Steigflächen und hielten sich an den seitlichen Stützvorrichtungen fest. Auch hier wurden bequeme Kleidung und Sportschuhe empfohlen.

2.3 Statistik

Die Ausarbeitung der Leistungsuntersuchungen erfolgte mit Hilfe des Programms proSport Database 1997-2008, proJEKT Mag. Schlemmer, Weiz, Österreich. Die Berechnung der Schwellen bzw. der Knickpunkte erfolgte mittels linearer Regressions-Knickpunkt-Analyse.

So konnten einerseits die Knickpunkte des Laktats (LTP1 und LTP2), sowie die ventilatorischen Schwellen (VT1, RCP/VT2) und der HRTP dargestellt werden. Für die Angabe der aeroben Schwelle wurden LTP1 und VT1 herangezogen, zur

Bestimmung der anaeroben Schwelle wurden LTP2, RCP und HRTP miteinander verglichen.

Die Berechnung der Leistung am Laufband in Watt (P_{mech}) erfolgte mit der Formel nach Schulz:

$$P \text{ (Watt)} = (1,065 + 0,0511 * n + 9,322 * 10^{-4} * n) * v * m/4.^{34}$$

Für die Berechnung der metabolisch erbrachten Leistung (P_{met}) wurde die Formel nach Wolf et al. herangezogen:

$$\text{Belastung (Watt)} = 0,28 \text{ (Mets-1)} * \text{Körpergewicht (kg)}.^{31}$$

Die Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen, sowie die Datenerfassung und Darstellung der Daten in Form von Tabellen und Diagrammen erfolgte im Programm MS EXCEL 2007® (Microsoft, Redmond, WA, USA). Die Korrelationsanalysen zur Darstellung von statistischen Zusammenhängen wurden mittels Pearson-Korrelation und linearer Regression ebenfalls im Programm MS EXCEL 2007® (Microsoft, Redmond, WA, USA) durchgeführt. Die Berechnung von statistischen Unterschieden zwischen den einzelnen Parametern erfolgte mittels T-Test für gepaarte Stichproben und homogene und heterogene Varianzen im Programm SPSS 19® (IBM, Armonk, NY, USA). Als globales Signifikanzniveau wurde $p < 0,05$ festgelegt. Zur möglichst genauen Darstellung der anthropometrischen Daten wurde der Median angegeben. Aufgrund der geringen Anzahl an Probanden und der Anzahl an Untersuchungen, möchte ich darauf hinweisen, dass die Ergebnisse explorativen Charakter haben und deshalb zwar als richtungsweisend, aber nicht endgültig und unkritisch zu betrachten sind.

3 Ergebnisse:

3.1 Patientenkollektiv – Anthropometrie

Das untersuchte Kollektiv bestand aus 10 männlichen Patienten, mit einem medianen Alter von 46,5 Jahren (min.Alter:36 Jahre, max. Alter: 77 Jahre). Die mediane Größe betrug 172,5 cm (min. Größe: 163 cm, max. Größe:189 cm) und das mediane Gewicht lag bei 84,5 kg (min. Körpergewicht: 49 kg, max. Körpergewicht: 110 kg). Der berechnete mediane BMI (Body-Mass-Index) betrug 28,14 kg/m² (min. BMI: 17,78 kg/m², max. BMI 34,72kg/m²), wobei ein Proband mit BMI 17,78 kg/m² untergewichtig war, die restlichen 9 Patienten lagen mit ihrem BMI im präadipösen und adipösen Bereich.

3.2 Parameter im Vergleich: Ruhe, Schwellenbelastung, Maximalbelastung

Die folgenden Tabellen (Tabelle 3-8) vergleichen die in den Belastungsuntersuchungen festgestellten Parameter im Ruhezustand, an der aeroben Schwelle (LTP1, VT1), an der anaeroben Schwelle (LTP2, RCP) und unter maximal Belastung. Dabei werden die unterschiedlichen Ergometrieformen, Laufband, Fahrrad und Armkurbel gegenübergestellt. Vergleiche der Leistung am Laufband, mit den bei den beiden anderen Verfahren gemessenen Leistungen, sind nur durch Schätzformeln möglich. In diesem Fall wird die Schätzformel für mechanisch erbrachte Leistung nach Schulz³⁴ (P_{mech}), und die Schätzformel nach Wolf et. al.³¹ für metabolisch erbrachte Leistung (P_{met}) angewendet.

Die Tabellen 3-8 stellen einen Überblick aller bestimmten Parameter dar. Da eine Besprechung aller Werte den Rahmen der Arbeit sprengen würde, werden ab Punkt 3.4 nur ausgewählte Parameter ausführlich besprochen.

%-Angaben beziehen sich immer auf den jeweilig erzielten Maximalwert des Parameters. Damit kann zum Beispiel beschrieben werden, wie viel Prozent der maximalen Herzfrequenz am jeweiligen Messpunkt erreicht wurden (%HF_{max}).

3.2.1 Ruhewerte:

Parameter	Fahrrad		Armkrurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
HF (bpm)	70,9*	12,06	64,2*	10,84	70,2	11,58
VO ₂ /kg (ml/min/kg)	4,36	1,08	4,54	1,18	4,68	0,99
V _E (l/min)	13,60	2,46	13	2,37	13,9	2,62
VO ₂ (ml/min)	363	74,43	378,2	72,8	390,9	84,86
VO ₂ /Hf (ml)	5,24	1,33	6,04	1,56	5,76	1,72
VCO ₂ (ml/min)	304	58,89	318,6	57,44	319,9	65,44
RQ	0,84	0,08	0,85	0,05	0,82	0,05
La (mmol/l)	1,42	0,38	1,39	0,23	1,34	0,28
METs	1,25	0,31	1,3	0,34	1,34	0,28

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter in Ruhe; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkrurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkrurbel-Laufband

3.2.2 Aerobe Schwelle

LTP1

Parameter	Fahrrad		Armkrurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
P _{mech} (Watt)	55,7*°	14,13	33,9*^	8,22	128,83°^	22,31
%P _{max} (%)	36,47°	8,27	43,08^	10,90	64,96°^	8,12
HF (bpm)	93,3°	11,94	92,2^	13,14	105,7°^	15,47
VO ₂ /kg (ml/min/kg)	11,11°	2,36	9,91^	2,28	18,59°^	3,72
VE (l/min)	27,73°	7,06	28,53^	5,07	41,47°^	5,19
VO ₂ (ml/min)	940,05°	228,27	827,8^	111,49	1547,17°^	227,81
VO ₂ /Hf (ml)	10,14°	2,32	9,15^	1,76	14,86°^	2,63
VCO ₂ (ml/min)	788,36°	228,07	775,02^	107,34	1246,62°^	170,89
RQ	0,82*	0,07	0,94*^	0,05	0,81^	0,07
La (mmol/l)	1,91*	0,31	2,41*	0,35	2,23	0,56
%HF _{max} (%)	65,28°	7,78	70,94	8,97	73,35°	4,54
%VO _{2max} (%)	50,76°	10,58	58,16^	14,92	68,12°^	5,97
METs	3,17°	0,67	2,83^	0,65	5,31°^	1,06
P _{met} (Watt)	51,19°	16,42	41,58^	8,94	99,67°^	15,72

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am LTP1; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkrurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkrurbel-Laufband

VT1

Parameter	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
P _{mech} (Watt)	59,9*°	15,01	32,6*^	11,81	126,65°^	26,86
%P _{max} (%)	38,89°	7,07	39,7^	7,55	63,84°^	10,95
HF (bpm)	94,4	16,37	88,8^	15,56	100,1^	12,28
VO ₂ /kg (ml/min/kg)	11,34*°	1,89	8,61*^	2,47	14,62°^	2,86
VE (l/min)	27,7°	5,83	24,4^	5,89	36,9°^	15,28
VO ₂ (ml/min)	957,4*°	189,09	711,8*^	142,91	1253,1°^	386,86
VO ₂ /Hf (ml)	10,58*°	2,51	8,14*^	1,77	12,54°^	3,75
VCO ₂ (ml/min)	787,7*	164,38	644,7*^	149,79	941,6^	281,43
RQ	0,82*°	0,05	0,9*^	0,07	0,76°^	0,05
La (mmol/l)	2,18	0,49	2,58	0,33	2,52	0,62
%HF _{max} (%)	65,84	10,03	67,59	6,05	69,64	3,89
%VO _{2max} (%)	51,42	5,54	49,1	9,18	54	9,7
METs	3,24*°	0,55	2,47*^	0,72	4,17°^	0,82
P _{met} (Watt)	52,63*°	12,77	33,32*^	10,64	76,12°^	27,76

Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am VT1; signifikanter Unterschied: p<0,05 *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

3.2.3 Anaerobe Schwelle

LTP2

Parameter	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
P _{mech} (Watt)	102,1*°	24,99	53,2*^	10,14	163,56°^	40,36
%P _{max} (%)	66,07°	9,62	67,18^	11,31	81,18°^	6,58
HF (bpm)	115,7*°	15,95	107,9*^	16,77	128,2°^	17,3
VO ₂ /kg (ml/min/kg)	16,85*°	3,2	12,63*^	2,93	23,3°^	4,2
VE (l/min)	43,94°	9,99	39,74^	6,82	64,23°^	10,78
VO ₂ (ml/min)	1428,28*°	327,06	1051,53*^	193,5	1951,46°^	359,8
VO ₂ /Hf (ml)	12,36*°	2,37	9,91*^	2,05	15,4°^	3,1
VCO ₂ (ml/min)	1410,93*°	345,01	1075,38*^	195,9	1913,78°^	301,98
RQ	0,99*	0,03	1,03*^	0,05	0,97^	0,08
La (mmol/l)	3,59°	0,44	3,79^	0,48	4,6°^	1,04
%HF _{max} (%)	80,75°	8,18	82,68^	8,96	89°^	4,01
%VO _{2max} (%)	76,35°	10,04	72,77^	11,82	85,38°^	5,72
METs	4,81*°	0,92	3,61*^	0,84	6,66°^	1,2
P _{met} (Watt)	90,27*°	23,75	60,16*^	13,99	132,25°^	25,66

Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am LTP2; signifikanter Unterschied: p<0,05 *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

RCP

Parameter	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
P _{mech} (Watt)	123*°	32,49	66,6*^	22,21	179,18°^	41,71
%P _{max} (%)	78,78°	4,74	79,75^	5,51	89,25°^	5,54
HF (bpm)	124,1°	18,59	114,9^	25,28	133,1°^	17,01
VO ₂ /kg (ml/min/kg)	18,44*°	3,82	14,33*^	5,28	24,81°^	5,36
VE (l/min)	51,9°	12,77	46,2^	12,01	71,2°^	14,35
VO ₂ (ml/min)	1550,6*°	329,3	1173,5*^	298,69	2070°^	398,13
VO ₂ /Hf (ml)	12,56*°	2,23	10,3*^	2,03	15,8°^	2,97
VCO ₂ (ml/min)	1607,5*°	387,7	1245,2*^	368,47	2072,6°^	389,63
RQ	1,03	0,04	1,05	0,07	1	0,06
La (mmol/l)	5,8	1,41	5,71	1,51	5,54	1,09
%HF _{max} (%)	86,11°	3,36	86,48^	5,92	92,44°^	3,27
%VO _{2max} (%)	82,63°	2,53	78,93^	7,62	90,35°^	4,77
METs	5,27*°	1,09	4,09*^	1,52	7,09°^	1,54
P _{met} (Watt)	100,09*°	23,48	69,99*^	24,01	141,77°^	29,41

Tabelle 7: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter am RCP; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

3.2.4 Maximale Belastung

Parameter	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
P _{mech} (Watt)	156,5*°	40,2	82,9*^	25,15	203,18°^	56,52
%P _{max} (%)	100	100	100	100,00	100	100
HF (bpm)	143,9*	19,43	132,6*^	26,38	144,3^	19,9
VO _{2max} (ml/min/kg)	22,35*°	4,72	18,15*^	6,33	27,56°^	6,25
VE (l/min)	73,64°	25,13	66^	18,92	90,4°^	20,19
VO ₂ (ml/min)	1882,2*°	416,71	1506,9*^	431,98	2284,3°^	465,08
VO ₂ /Hf (ml)	13,09*°	2,3	11,38*^	2,47	15,88°^	2,77
VCO ₂ (ml/min)	2152,4*°	493,51	1726,6*^	561,16	2496,5°^	563,48
RQ	1,16°	0,07	1,15	0,09	1,11°	0,07
La (mmol/l)	7,49	2,17	7,15	2,36	7,53	2,14
%HF _{max} (%)	100	100	100	100	100	100
%VO _{2max} (%)	100	100	100	100	100	100
METs	6,39*°	1,35	5,19*^	1,81	7,87°^	1,79
P _{met} (Watt)	126,48*°	30,68	96,4*^	33,32	160,12°^	35,19

Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter unter maximaler Belastung; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

3.3 Schwellenkonzepte im Vergleich

Wie in Punkt 1.2.2 beschrieben, gibt es für die Bestimmung der aeroben Schwelle (AS) und der anaeroben Schwelle (ANS) verschiedene Möglichkeiten. Aus diesem Grund wurden die ventilatorischen Schwellen (VT1, RCP/VT2) und die auf Laktatkonzentrationen basierenden Schwellen (LTP1, LTP2), sowie der HRTP hinsichtlich der bestimmten Herzfrequenz miteinander verglichen. Am LB gab es sowohl zwischen LTP1 und VT1, zwischen LTP2 und RCP, sowie RCP und HRTP einen signifikanten Unterschied.

Die geringere Differenz zwischen LTP2 und HRTP, in allen Verfahren, wurde als Hinweis für eine gute Beschreibung der ANS gewertet. Aus diesem Grund wurden die auf das Laktat bezogenen Schwellen (LTP1, LTP2) für die Angabe der AS und der ANS verwendet.

	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
LTP1	93,3	11,94	92,2	13,14	105,7*	15,47
VT1	94,4	16,37	88,8	15,56	100,1	12,28
LTP2	115,7	15,95	107,9	16,77	128,2°	17,3
RCP (VT2)	124,1	18,59	114,9	25,28	133,1°^	17,01
HRTP	116,80	19,93	108,3	17,84	129,1^	18,72

Tabelle 9: Mittelwerte und Standardabweichungen der Herzfrequenz (bpm) im Vergleich an submaximalen Messpunkten; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *LTP1-VT1, °LTP2-RCP, ^RCP-HRTP

3.4 Verlauf der unterschiedlichen Parameter unter Belastung

Im Folgenden werden ausgewählte leistungsdeterminierende Parameter differenziert dargestellt.

3.4.1 Herzfrequenz

Betrachtet man den Verlauf der Herzfrequenzkurven unter ansteigender Belastung (Abbildung 3), so kann man sehen, dass die Herzfrequenzkurve der Armkurbel an allen Messpunkten am niedrigsten ist. In LTP1 ist der Unterschied zum Fahrrad jedoch nicht signifikant. In Ruhe fand sich ein signifikanter Unterschied der HF zwischen der Armkurbel und den beiden anderen Verfahren, ebenso am LTP2 und bei Belastungsabbruch. Die Herzfrequenz am Fahrrad lag am LTP1 und LTP2 signifikant niedriger als am Laufband. In der letzten Phase der Belastung verliefen die Herzfrequenzkurven von FR und LB nahezu ident und es fand sich kein Unterschied der Herzfrequenz bei maximaler Belastung.

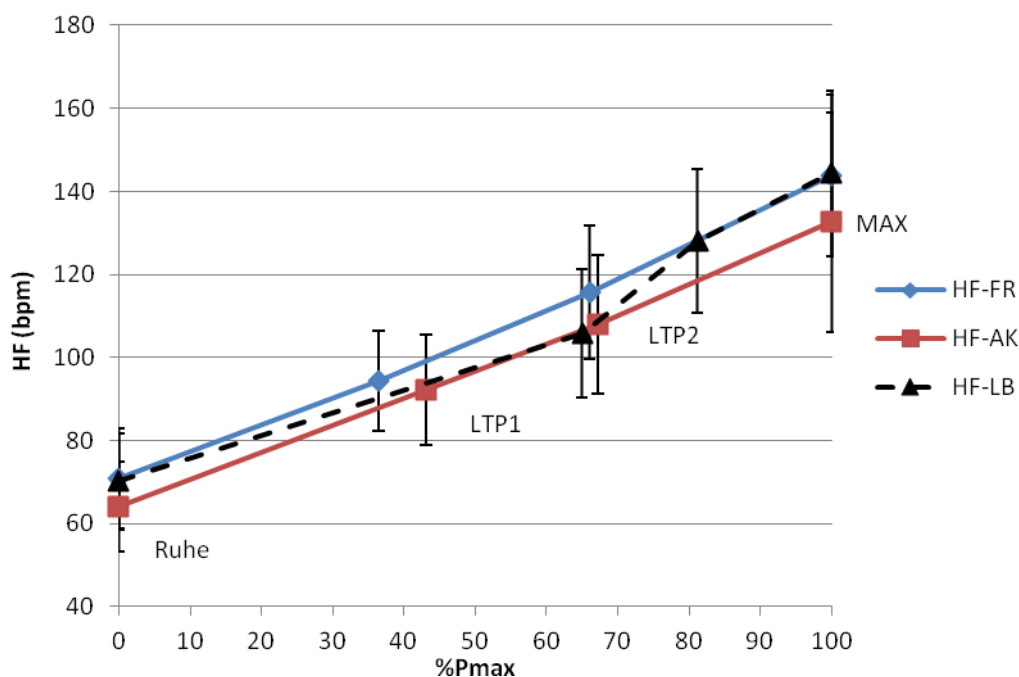


Abbildung 3: Verlauf der Herzfrequenz (HF) im Verhältnis zur relativen Leistung (%Pmax). Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen in Ruhe, am LTP1, LTP2 und bei maximaler Belastung.

	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
Ruhe	70,9*	12,06	64,2*^	10,84	70,2^	11,58
LTP1	93,3°	11,94	92,2^	13,14	105,7°^	15,47
LTP2	115,7*°	15,95	107,9*^	16,77	128,2°^	17,3
MAX	143,9*	19,43	132,6*^	26,38	144,3^	19,9

Tabelle 10: Mittelwerte und Standardabweichungen der Herzfrequenz (bpm) an den Messpunkten; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

Im Rahmen der Korrelationsanalysen fand sich an allen Messpunkten ein statistischer Zusammenhang zwischen der Herzfrequenz am Fahrrad und an der Armkurbel. Die Korrelationskoeffizienten betragen hierbei am LTP1 $r=0,92$, am LTP2 $r=0,83$ und bei maximaler Belastung $r=0,94$. Für den Vergleich von Fahrrad und Laufband ergab sich vor allem unter maximaler Belastung ein statistischer signifikanter Zusammenhang von $r=0,97$ (Abbildungen 4-6).

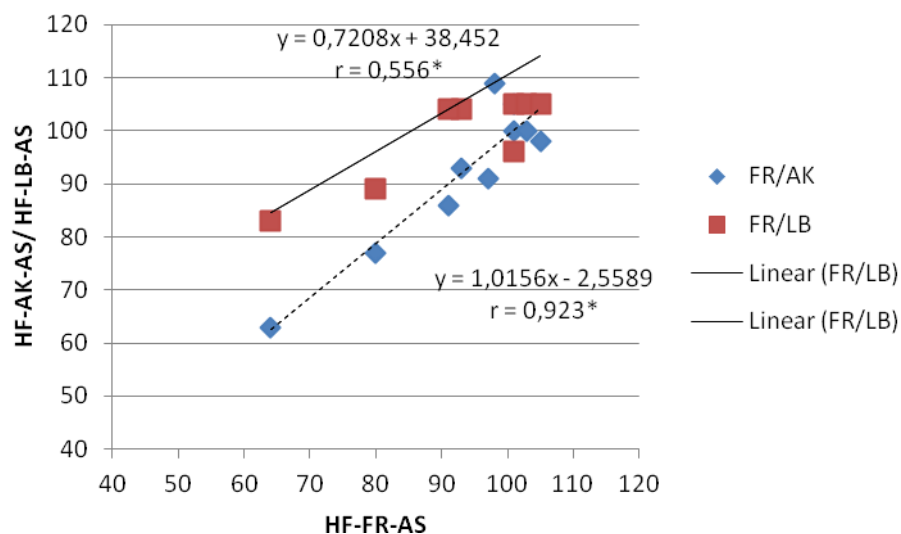


Abbildung 4: Korrelationsuntersuchungen der HF (bpm) bei FR(Fahrrad)/AK(Armkurbel), sowie FR/LB(Laufband) an der aeroben Schwelle (AS). (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

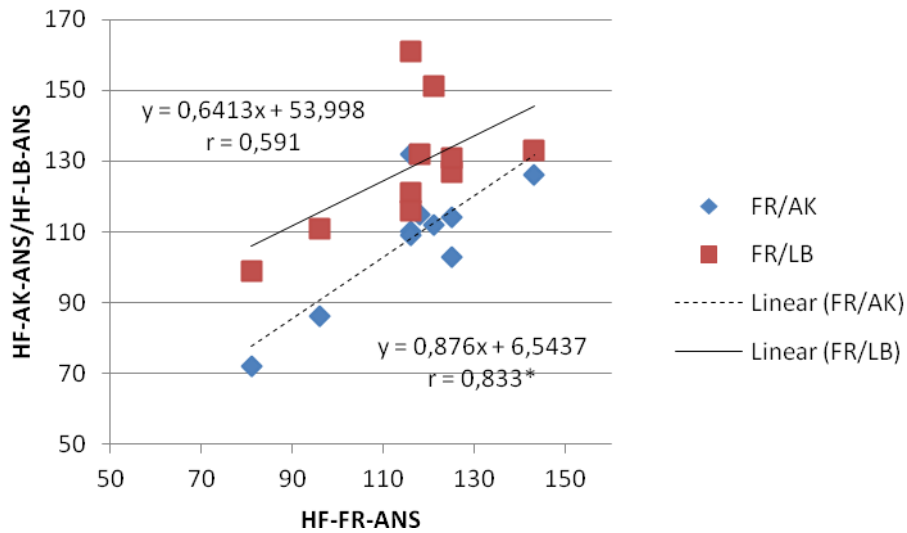


Abbildung 5: Korrelationsuntersuchungen der HF (bpm) bei FR(Fahrrad)/AK(Armkurbel), sowie FR/LB(Laufband) an der anaeroben Schwelle (ANS). (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

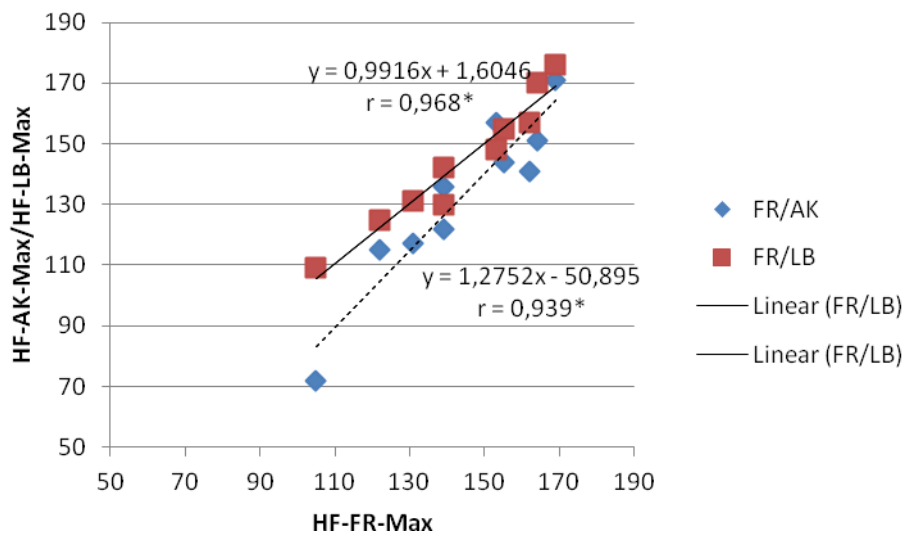


Abbildung 6: Korrelationsuntersuchungen der HF (bpm) bei FR(Fahrrad)/AK(Armkurbel), sowie FR/LB(Laufband) bei maximaler Belastung (Max). (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

3.4.2 Leistung

In diesem Kapitel folgt eine differenzierte Darstellung der mechanisch erbrachten Leistung (P_{mech}) und der erbrachten metabolischen Leistung (P_{met}) jeweils in Watt. P_{mech} wurde am LB mittels der Formel nach Schulz et al.³⁴ berechnet. Zur Berechnung von P_{met} wurde die Formel nach Wolf et al.³¹ herangezogen.

Betrachtet man die erbrachte mechanische Leistung P_{mech} (Tabellen 4, 6, 8), dann sieht man, dass es an allen Messpunkten einen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Belastungsformen gab. Die Patienten erreichten am Laufband eindeutig die höchsten Leistungen. Die Differenz zwischen LB und AK betrug am LTP1 95 Watt (129W:34W; Abbildung 7), am LTP2 111 Watt (164W:53W; Abbildung 9) und 120 Watt bei maximaler Belastung (203W:83W; Abbildung 13). Die Unterschiede zwischen FR und AK waren ebenfalls signifikant und betrugen am LTP1 22 Watt (56W:34W), 49 Watt am LTP2 (102W:53W) und unter maximaler Belastung 74 Watt (157W:83W). Zwischen LB und FR ergaben sich ebenfalls signifikante Unterschiede: 73 Watt am LTP1 (129W:56W), 62 Watt am LTP2 (164W:102W) und 46 Watt bei MAX (203W:157W).

Bezüglich der berechneten metabolisch erbrachten Leistung (P_{met}) fanden sich auf allen Belastungsstufen signifikante Unterschiede (Tabelle 4, 6, 8). Einzig bei LTP1 (Abbildung 7) gab es zwischen FR und AK keinen signifikanten Unterschied (Differenz 9 Watt; 51W:42W). Bei LTP2 (Abbildung 9) und MAX (Abbildung 13) lagen die Unterschiede von FR zu AK konstant bei 30 Watt. Die Unterschiede zwischen LB und AK blieben hier ebenso relativ gleich mit 72 Watt bei LTP2 und 64 Watt bei MAX. Zwischen LB und FR betrugen die Unterschiede 49 Watt (LTP1), 42 Watt (LTP2) und 34 Watt bei maximaler Belastung.

3.4.2.1 Leistung an der aeroben Schwelle (AS) - LTP1

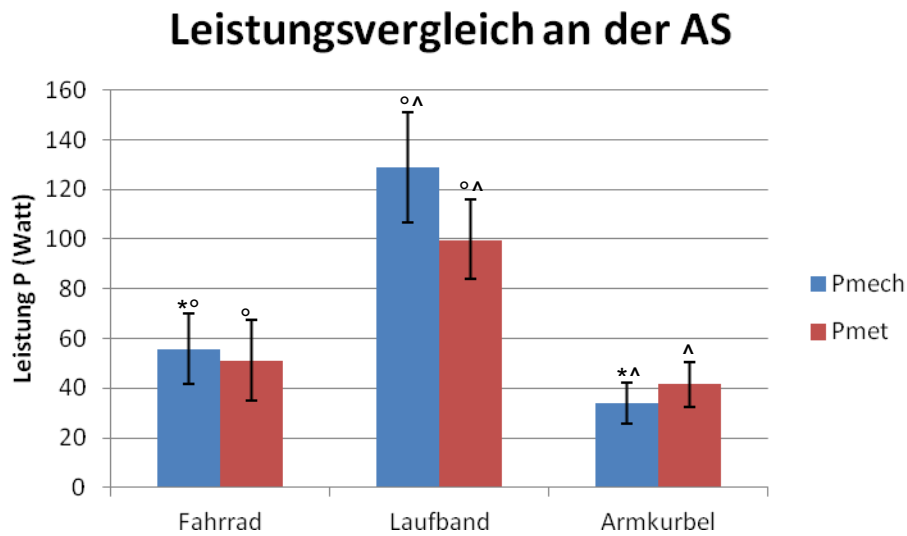


Abbildung 7: Darstellung der erzielten Leistungen P_{mech} und P_{met} (Watt) an der aeroben Schwelle (AS) - LTP1; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

Im Vergleich der relativen Leistung in Bezug zur jeweiligen P_{max} (Abbildung 8), fanden sich bei %P_{mech} signifikante Unterschiede zwischen FR (36,5 % ± 8,3) und LB (65 % ± 8,1) bzw. AK (43 % ± 10,9) und LB (65 % ± 8,1). Zwischen FR und AK wurde kein signifikanter Unterschied gefunden. Für %P_{met} galt dasselbe. FR (42 % ± 5,6), AK (47 % ± 11) und LB (63,4 % ± 6,4).

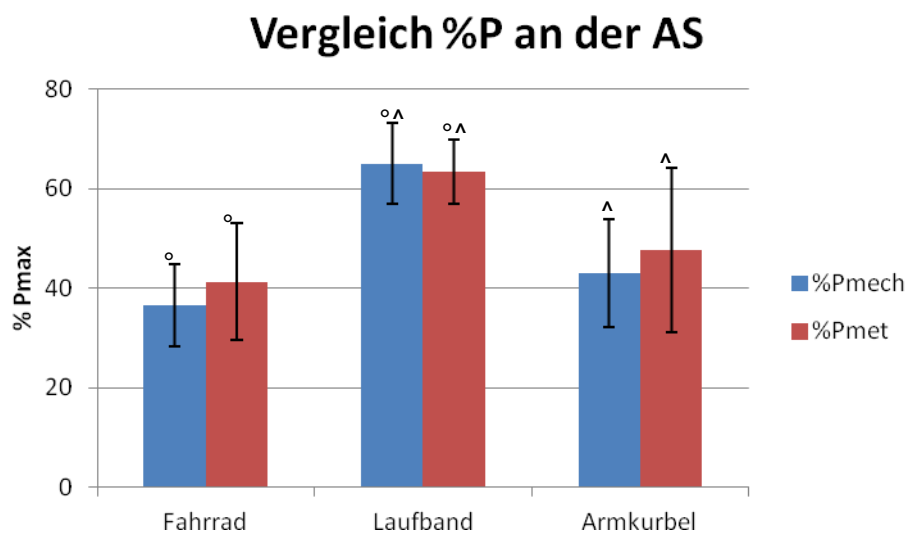


Abbildung 8: Darstellung der relativen Leistung %P_{mech} und %P_{met} an der aeroben Schwelle (AS) - LTP1; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

3.4.2.2 Leistung an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2

Leistungsvergleich an der ANS

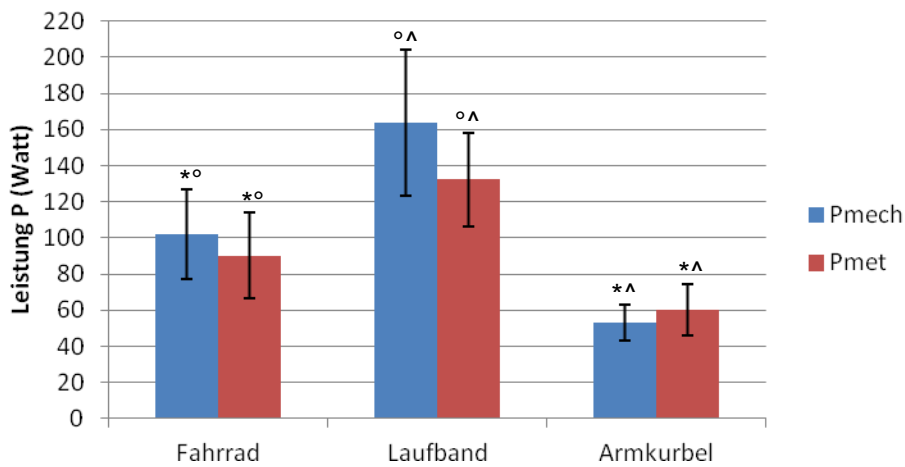


Abbildung 9: Darstellung der erzielten Leistungen P_{mech} und P_{met} (Watt) an der anaeroben Schwelle (ANS) – LTP2; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

Betrachtet man die relativen Leistungen in Bezug zur jeweiligen P_{max} (Abbildung 10), findet man bei $\%P_{mech}$ signifikante Unterschiede zwischen FR (66 % \pm 9,6) und LB (81,2 % \pm 6,6) bzw. AK (67 % \pm 11,3) und LB (81,2 % \pm 6,6). Zwischen FR und AK fand sich kein signifikanter Unterschied. Dasselbe galt für $\%P_{met}$. FR (71 % \pm 11,9), AK (66,2 % \pm 13,1) und LB (83,3 % \pm 6,3).

Vergleich %P an der ANS

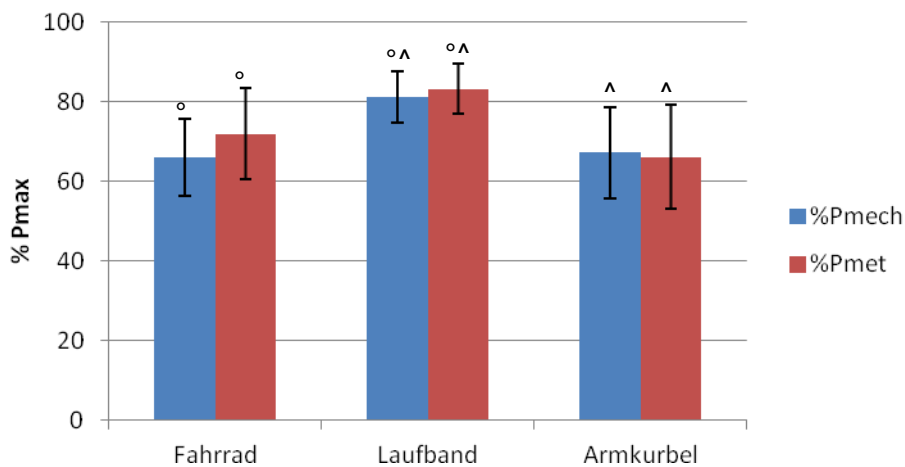


Abbildung 10: Darstellung der erzielten Leistungen $\%P_{mech}$ und $\%P_{met}$ an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

In den Korrelationsanalysen der Leistungen an der ANS fanden sich für die mechanisch erbrachte Leistung (P_{mech}) statistische Zusammenhänge zwischen FR und AK $r=0,92$ sowie für FR und LB $r=0,87$ (Abbildung 11).

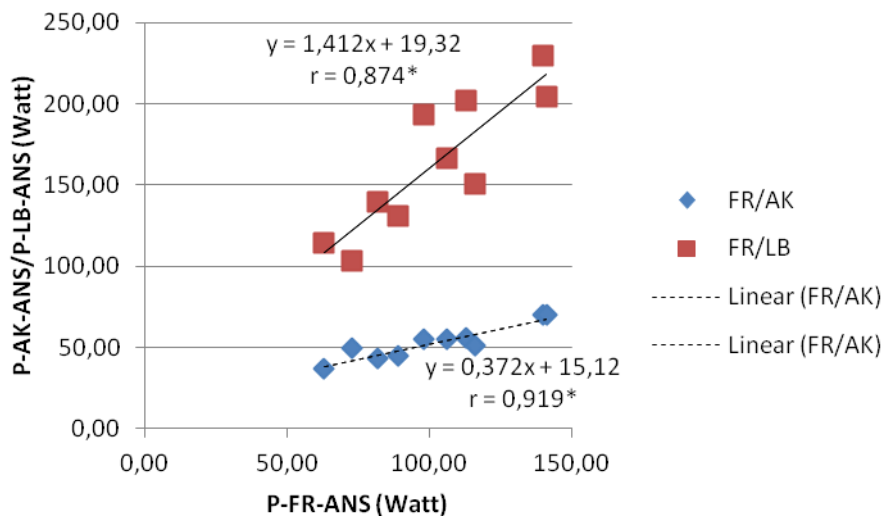


Abbildung 11: Korrelationsanalyse der erbrachten Leistungen (P_{mech}) in Watt an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2. (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

In der Analyse der metabolischen Leistungen (P_{met}) an der ANS gab es statistische Zusammenhänge zwischen den Untersuchungen am FR und LB $r=0,76$ und zwischen FR und AK $r=0,88$ (Abbildung 12).

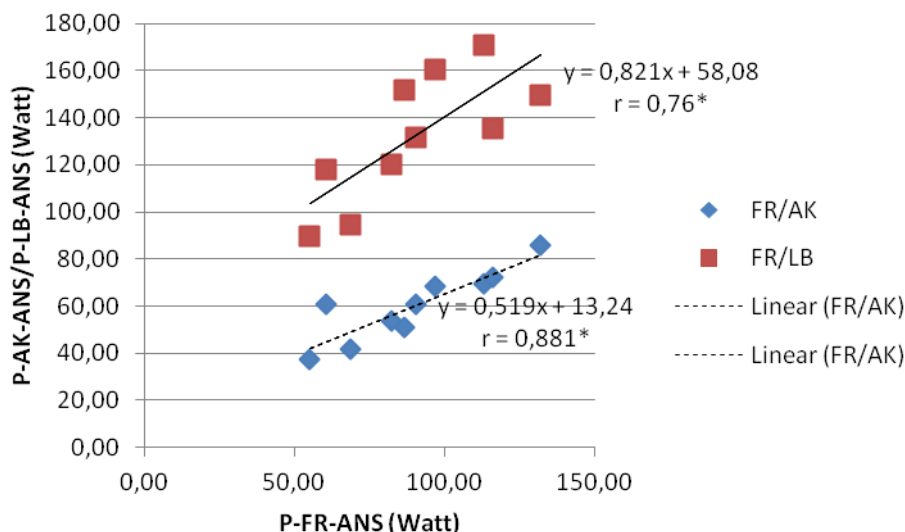


Abbildung 12: Korrelationsanalysen der metabolisch erbrachten Leistung (P_{met}) in Watt an der anaeroben Schwelle (ANS) - LTP2. (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

3.4.2.3 Leistung Maximal

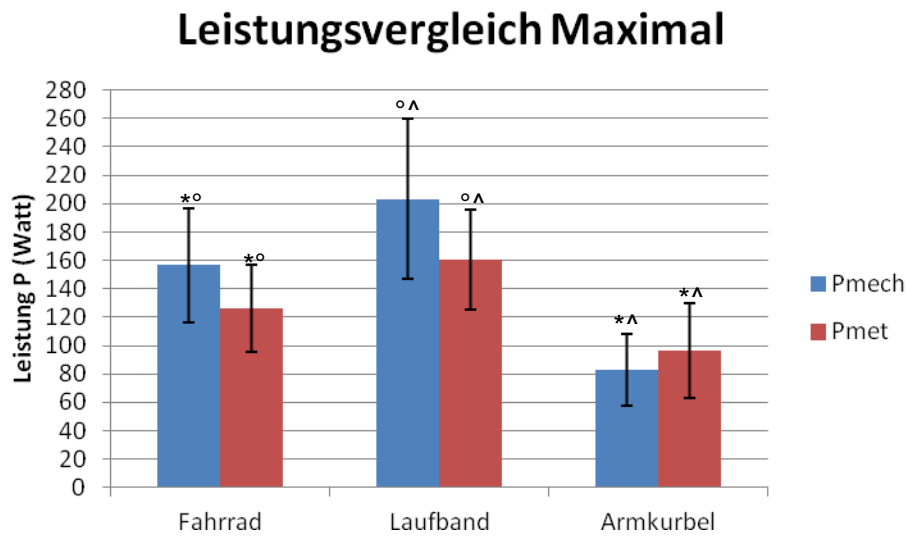


Abbildung 13: Darstellung der erzielten maximalen Leistungen Pmech und Pmet (Watt); signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

Die Korrelationsuntersuchungen der maximal erreichten Leistungen ergab für Pmech statistische Zusammenhänge zwischen FR und LB $r = 0,92$, bzw. zwischen FR und AK $r = 0,93$ (Abbildung 14).

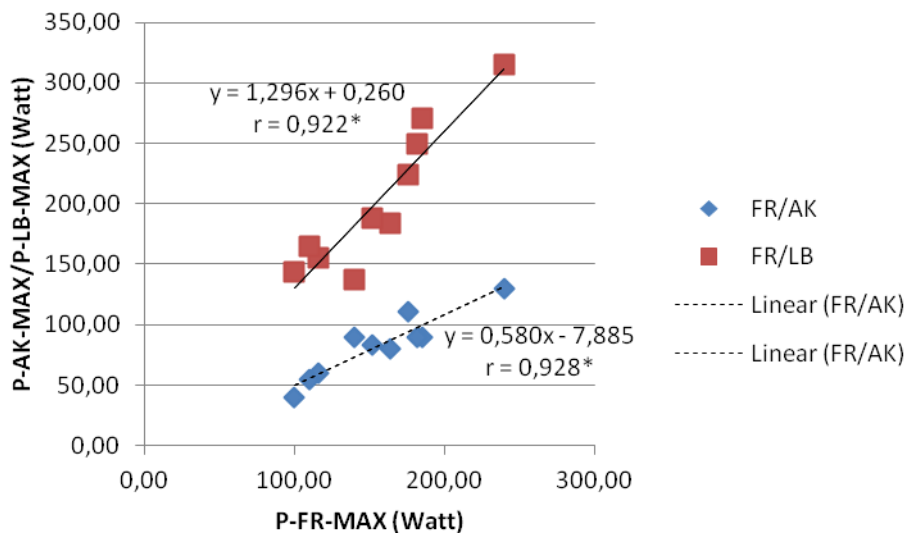


Abbildung 14: Korrelationsanalyse der maximalen Pmech (Watt) zwischen FR/AK und FR/LB. (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

Für die Korrelationsuntersuchung der maximal metabolisch erbrachten Leistung (Pmet) in Watt ergaben sich ebenfalls signifikante Zusammenhänge für FR und AK $r=0,92$, sowie FR und LB $r=0,91$ (Abbildung 15).

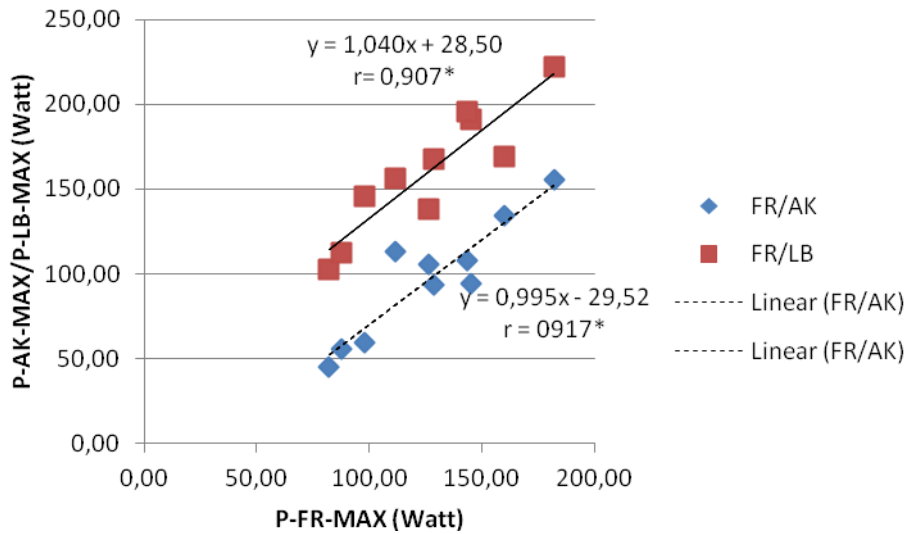


Abbildung 15: Korrelationsanalyse der maximalen Pmet (Watt) zwischen FR/AK und FR/LB. (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

3.4.3 Laktatkonzentration

In Bezug auf die Laktatkonzentrationen fanden sich signifikante Unterschiede zwischen FR und AK am LTP1, sowie zwischen FR und LB am LTP2. In Ruhe und unter maximaler Belastung gab es keine signifikanten Unterschiede (Tabelle 11).

	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
Ruhe	1,42	0,38	1,39	0,23	1,34	0,28
LTP1	1,91*	0,31	2,41*	0,35	2,23	0,56
LTP2	3,59°	0,44	3,79	0,48	4,6°	1,04
MAX	7,49	2,17	7,15	2,36	7,53	2,14

Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichungen des Laktats an den Messpunkten; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

In Abbildung 16 sind die Verläufe des Laktats in Bezug zur relativ erbrachten mechanischen Leistung (%Pmax) dargestellt. Die Verläufe von AK und FR sind sehr ähnlich. Der Verlauf am LB wirkt durch den, im Verhältnis zu AK (43 ± 11 % Pmax) und FR (36 ± 8 % Pmax), späten LTP1 bei 65 ± 8 % Pmax stark

unterschiedlich. Der LTP2 lag beim FR im Mittel bei $66 \pm 10 \%$, bei der AK bei $67 \pm 11 \%$ und am LB bei $81 \pm 7\%$ der maximal erreichten Leistung.

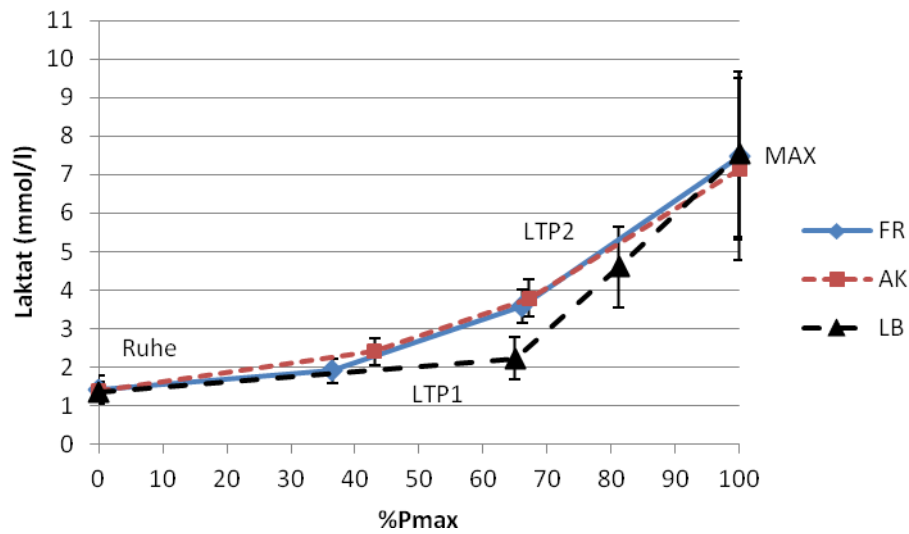


Abbildung 16: Verlauf der Laktatkonzentrationen (mmol/l) in Bezug zu %Pmax (Pmech).

In Abbildung 17 werden die Laktatkurven im Verhältnis zur %HFmax dargestellt. Man sieht dabei, dass die drei Kurven einen ähnlichen Verlauf haben. Der LTP1 lag bei der AK bei $71 \pm 9\%$ der maximalen Herzfrequenz, am FR bei $65 \pm 8\%$ und am LB bei $73 \pm 5\%$ der HFmax. Bezüglich des LTP2 ergaben sich für das FR im Mittel $81 \pm 8\%$, an der Armkurbel $83 \pm 9\%$, und am FR $89 \pm 4\%$ der maximalen Herzfrequenz.

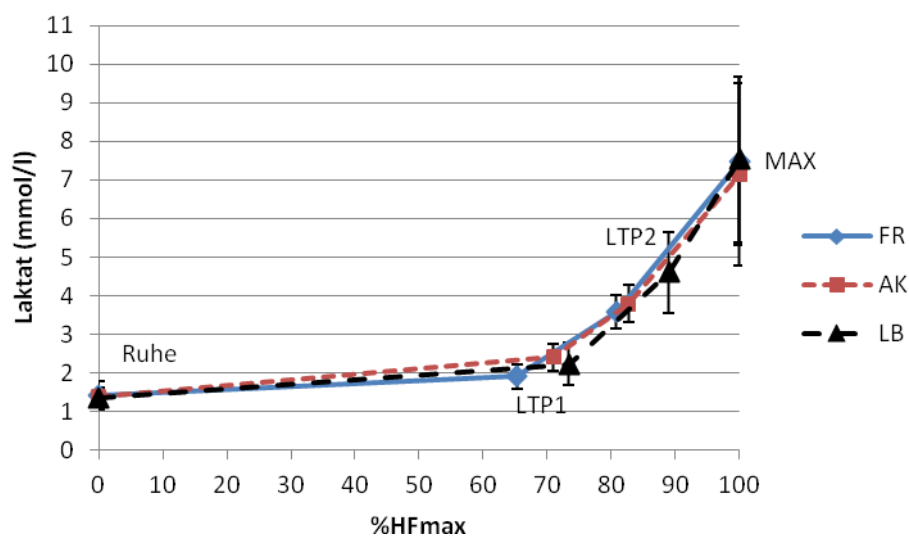


Abbildung 17: Verlauf der Laktatkonzentrationen (mmol/l) in Bezug zu %HFmax.

3.4.4 Ventilation

In Bezug auf die Ventilation konnten am LTP1, LTP2 und bei maximaler Belastung, signifikante Unterschiede zwischen AK und LB bzw. zwischen FR und LB festgestellt werden.

	Fahrrad		Armkeurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
Ruhe	13,60	2,46	13	2,37	13,9	2,62
LTP1	27,73°	7,06	28,53 [^]	5,07	41,47 ^{°^}	5,19
LTP2	43,94°	9,99	39,74 [^]	6,82	64,23 ^{°^}	10,78
MAX	73,64°	25,13	66 [^]	18,92	90,4 ^{°^}	20,19

Tabelle 12: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ventilation an den Messpunkten; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkeurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkeurbel-Laufband

In den Kurvenverläufen sieht man, dass die Differenz zwischen FR und AK mit Dauer der Belastung zunimmt, jedoch fand sich zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied. Desweiteren kann man bei genauer Betrachtung im Bereich des LTP2 bei allen Verfahrensarten eine Zunahme des Anstiegs der Ventilation feststellen (Abbildung 18).

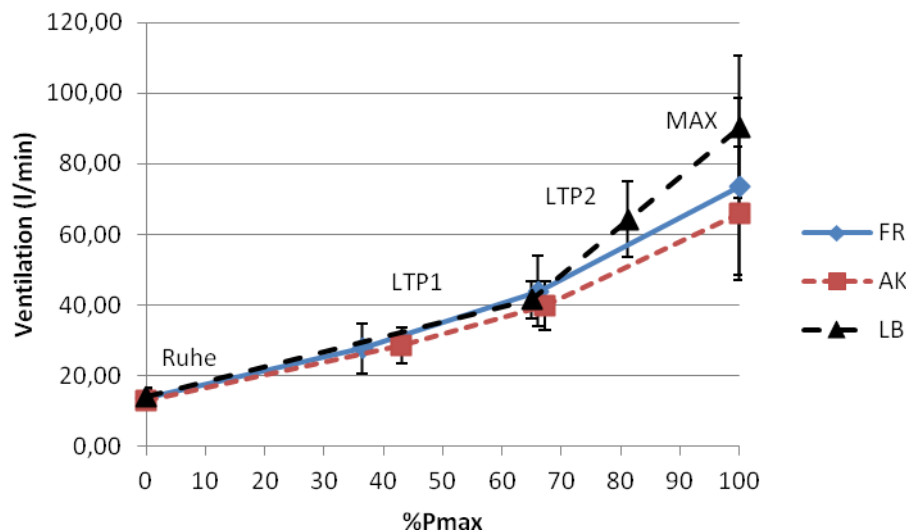


Abbildung 18: Verlauf der Ventilation (l/min) in Bezug zu %Pmax (Pmech).

3.4.5 Sauerstoffaufnahme - VO₂

In Abbildung 19 wird der Verlauf der Sauerstoffaufnahme dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit ist die VO₂ in ml/min/kg dargestellt. Die Sauerstoffaufnahme am LB war, abgesehen vom Ruhezustand, während der gesamten Belastung signifikant am höchsten. Zwischen FR und AK konnten, bis auf den LTP1, ebenfalls signifikante Unterschiede festgestellt werden (Tabelle 13).

	Fahrrad		Armkurbel		Laufband	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
Ruhe	4,36	1,08	4,54	1,18	4,68	0,99
LTP1	11,11°	2,36	9,91^	2,28	18,59°^	3,72
LTP2	16,85*°	3,2	12,63*^	2,93	23,3°^	4,2
MAX	22,35*°	4,72	18,15*^	6,33	27,56°^	6,25

Tabelle 13: Mittelwerte und Standardabweichungen der Sauerstoffaufnahme in ml/min/kg an den Messpunkten; signifikanter Unterschied: $p < 0,05$ *Fahrrad-Armkurbel, °Fahrrad-Laufband, ^Armkurbel-Laufband

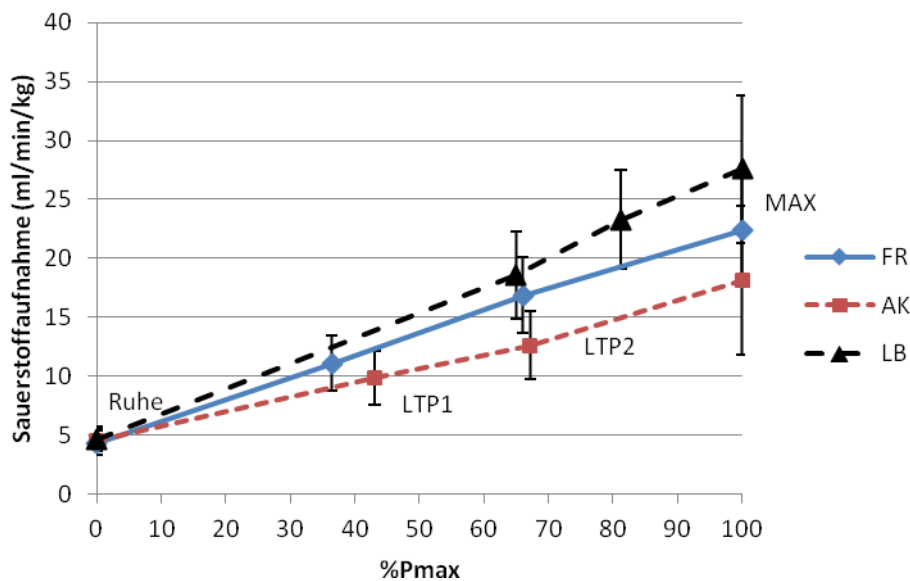


Abbildung 19: Verlauf der Sauerstoffaufnahme in ml/min/kg in Bezug zu %Pmax (Pmech).

Die Korrelationsanalyse der VO₂max ergab für den Vergleich von FR und LB einen signifikanten Zusammenhang von $r=0,91$. Noch besser waren die Ergebnisse der Untersuchung beim Vergleich von FR und AK mit $r=0,98$ (Abbildung 20).

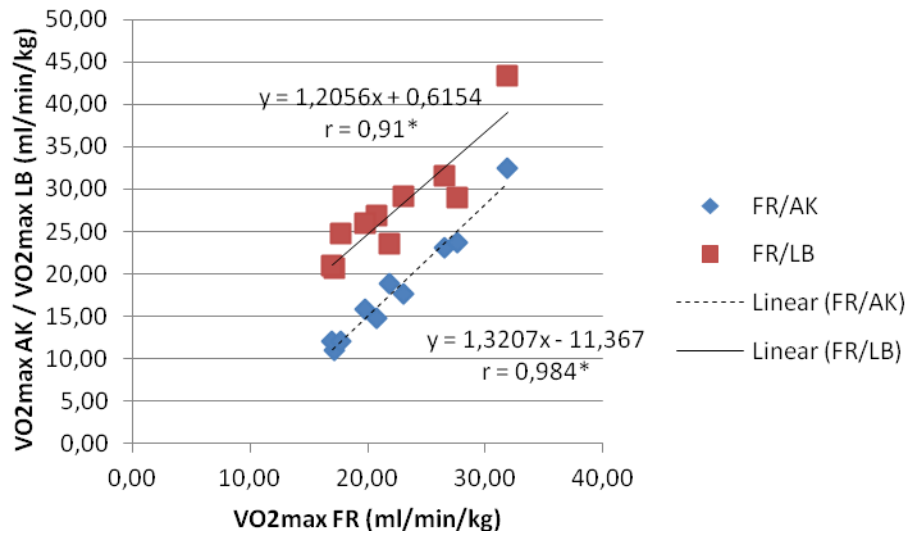


Abbildung 20: Korrelationsanalysen der VO₂max. (*signifikanter Zusammenhang bei $p < 0,05$)

4 Diskussion

In der abschließenden Diskussion werden die wichtigsten Parameter der Leistungsfeststellung, die Herzfrequenz, die Leistung, die Sauerstoffaufnahme sowie die Laktatkonzentration, noch einmal ausführlich besprochen und mit Ergebnissen anderer Arbeiten verglichen. Im Rahmen der Untersuchungen konnten viele Unterschiede zwischen den Belastungsformen gefunden werden. Überraschenderweise gab es speziell zwischen FR und AK gute Korrelationen, die einen Rückschluss auf Empfehlungen für die AK-Belastung zuließen. Auch zwischen FR und LB gab es Zusammenhänge, welche jedoch differenziert betrachtet werden und den Inhalt zukünftiger Untersuchungen bilden sollten. Vor allem die Auswirkungen auf abzuleitende Trainingsempfehlungen werden im Folgenden besprochen.

4.1 Die Beschreibung der Schwellen

Zur Bestimmung der aeroben Schwelle (AS) und der anaeroben Schwelle (ANS), wurden die Laktat Turn Points 1 und 2 herangezogen. Im Vergleich zu den ventilatorischen Schwellen VT1 und RCP/VT2 zeigten sich auf niedrigen Belastungsstufen keine signifikanten Unterschiede. Im Bereich des ANS jedoch lagen die Werte der Herzfrequenz, der Sauerstoffaufnahme und des Laktats deutlich höher. In Zusammenschau mit dem berechneten Herzfrequenz-Knickpunkt (HRTP) erschien die Verwendung der Laktat-basierten Schwellen als bessere Variante. Zwischen HRTP und LTP2 fanden sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich Leistung, Herzfrequenz und Laktat. Diese Tatsache findet man auch bei Pokan et al.³⁵

4.2 Herzfrequenz

Die Untersuchungen bezüglich des Herzfrequenzverhaltens unter ansteigender Belastung ergaben, dass die Herzfrequenz am LB zu jedem Zeitpunkt der Untersuchung am höchsten lag und an der AK am niedrigsten. Im Ruhezustand fand sich interessanterweise ein knapp signifikanter Unterschied ($p=0,024$) zwischen FR und AK von 7 bpm, welcher am ehesten durch die unterschiedliche Sitzposition zu erklären war. Zwischen FR und LB bzw. LB und AK ergaben sich in Ruhe jedoch keine signifikanten Unterschiede.

An der aeroben Schwelle (LTP1) fanden sich signifikante Unterschiede zwischen der Herzfrequenz am LB 106 ± 15 bpm und der Herzfrequenz am FR 93 ± 12 bpm sowie an der AK 92 ± 13 bpm. Zwischen FR und AK fand sich an diesem Punkt bezüglich der absoluten Werte kein Unterschied. Bestimmt man die relative Herzfrequenz bezogen auf die jeweilige maximale Herzfrequenz %HFmax, findet man jedoch nur einen signifikanten Unterschied zwischen Fahrrad 65 ± 8 % und Laufband 73 ± 5 %. Die Werte der AK lagen hier bei 71 ± 9 %. Eine Erklärung hierfür ist die maximale Herzfrequenz, welche an der AK signifikant am niedrigsten war. Die prozentuellen Werte stimmen gut mit den Resultaten der Studie von Hofmann et al. von 2001 überein. Dabei ergaben sich bei FR-Ergometrien 65-68 % der HFmax für den LTP1.³⁶

Bezüglich der anaeroben Schwelle ergaben sich bei allen drei Verfahren signifikante Unterschiede. Am FR lag die HF im Mittel 7 bpm höher als an der AK. Der Unterschied zwischen LB und FR betrug 13 bpm, und zwischen LB und AK 20bpm. Verglichen mit den Ergebnissen von Roecker et al.³⁷, dessen Studie zwischen Fahrrad und Laufband einen Unterschied von 20 bpm beschreibt, gab es hier doch einen deutlichen Unterschied. Die Schwelle lag am Fahrrad bei 81 ± 8 %, bei der Armkurbelergometrie bei 83 ± 9 % und am Laufband bei 89 ± 4 % der maximalen Herzfrequenz. Diese Ergebnisse stimmen mit den Untersuchungen von Hofmann et al.³⁸ überein und auch Wolf et al. beschreibt die anaerobe Schwelle in seiner Studie bei 85% der HFmax (an einem Kollektiv von koronarkranken Patienten [n=50] mit normaler bis leicht eingeschränkter LVEF, wobei 11 Patienten LVEF <45 % aufwiesen).³¹

Die ermittelten HRTP's lagen für das FR bei 81 ± 10 %, an der AK bei 83 ± 8 % und am LB bei 90 ± 4 % der maximalen Herzfrequenz. Dies stimmt mit den angegebenen Werten für den HRTP in der Literatur überein, in welcher der HRTP bei 60-90% der maximalen Herzfrequenz beschrieben wird. Desweiteren wurde kein signifikanter Unterschied zwischen LTP2 und HRTP bezüglich der HF gefunden, auch dieses Ergebnis wird durch unterschiedliche Studien bestätigt.^{22,}

^{36, 35}

Die Korrelationsanalysen an der ANS ergaben einen signifikanten Zusammenhang zwischen FR und AK von $r=0,833$ bei $p<0,05$. Das bedeutet, die HF an der anaeroben Schwelle bei AK Belastungen kann mit Hilfe der HF an der ANS am FR hergeleitet werden. Die Formel hierfür wäre:

$$HF_{ANS-AK} = 0,87 \times HF_{ANS-FR} + 6,5.$$

Die Formel hat vor allem für die Vorgabe von Trainingsherzfrequenzen an der AK Bedeutung, da in der Literatur mehrfach die ANS als Orientierungspunkt für Trainingsempfehlungen angegeben wird.³¹

Im Vergleich der HF bei maximaler Belastung konnte der Autor zwischen FR und LB keine signifikanten Unterschiede feststellen. Diese Ergebnisse unterscheiden sich von den Untersuchungen von Roecker et al.³⁷ und Caputo et al., welcher bei untrainierten Personen ($n=11$) deutlich signifikante Unterschiede der HFmax feststellen konnte.³⁸ Zwischen AK und FR bzw. LB gab es jeweils signifikante Unterschiede. Diesen Unterschied für AK und LB stellte auch Schrieks et al.³⁹ fest. Bei Männern ($n=16$) lag die Differenz in ihrer Studie im Mittel bei 19 bpm. In dieser Untersuchung gab es im Mittel einen Unterschied von 11 bpm.

Die Korrelationsanalysen ergab zwischen LB und AK ein Ergebnis von $r=0,92$ bei einem p Wert $<0,001$. Dieser Zusammenhang lässt den Schluss zu, dass man von der HFmax des LB auf die HFmax der AK schließen kann. Dies konnte in der Arbeit von Schrieks et al.³⁹ nicht festgestellt werden. Auch die Korrelation zwischen FR und AK ließ mit $r=0,94$ und $p<0,001$ den Schluss zu, von einer maximalen HF am FR auf die maximale HF an der AK zu schließen. Die Formeln hierfür würden lauten:

$$HF_{max-AK} = 1,28 \times HF_{maxFR} - 50,9$$

$$HF_{max-AK} = 1,22 \times HF_{maxLB} - 43,7.$$

Diese Formeln eignen sich für die Voraussage der maximalen Herzfrequenz an der Armkurbel aufgrund der HFmax bei den zwei gängigsten Ergometrieformen LB und FR. Jedoch sollte die Einsetzbarkeit, vor praktischer Anwendung der Formel, durch Studien an mehreren Probanden des untersuchten Kollektives bestätigt werden.

In diesem Fall zeigt sich die Schwierigkeit, Trainingsempfehlungen anhand einer Leistungsuntersuchung am FR für andere Belastungsformen vorzugeben. Das einfache Übernehmen der Herzfrequenzen vom FR würde zu einer Überforderung der Patienten an der AK führen und zu einer vermutlich nicht trainingswirksamen Belastung am LB. In der aktuellen Literatur findet man bezüglich Trainingsintensitäten häufig Empfehlungen, die sich an der maximalen Herzfrequenz orientieren.^{31,37,40} Für die Sekundärprävention werden zum Beispiel 60-85% der HFmax als Trainingsbereich empfohlen.³¹ Ausgehend von der in dieser Arbeit berechneten mittleren maximalen HF von 144 bpm am FR, ergibt dies eine Trainingsherzfrequenz von 86 - 115 bpm. Übernimmt man dieses recht breite „Trainingsfenster“ direkt auf die beiden anderen Verfahren, würde es dabei am LB wohl zu einer Unterforderung der Probanden kommen. An der Armkurbel könnte es jedoch beim Training im oberen Frequenzbereich zu einer Überlastung der Patienten kommen. Mit Zuhilfenahme der oben angeführten Korrelationsformel zwischen FR und AK, beträgt die Trainingsherzfrequenz für die AK 80 – 106 bpm. In diesem Bereich ist, bezogen auf die Mittelwerte dieser Untersuchung, ein sicheres Trainieren bei gleichzeitig trainingswirksamer Belastung an der Armkurbel gegeben. Das Trainingsmaximum liegt in diesem Fall unter der mittleren ANS und dem H RTP. Die Bestimmung des H RTP wird in der Literatur im Zusammenhang mit Trainingsempfehlungen als sinnvoll angesehen, *„um eine myokardiale Überlastung zu vermeiden.“*³⁵

In dieser Studie war es für den Autor nicht möglich von der Herzfrequenz am FR auf die Herzfrequenz am LB zu schließen. Zwar gab es, wie in vielen Studien beschrieben, auch in dieser Arbeit Unterschiede zwischen den beiden Verfahren an der aeroben Schwelle und anaeroben Schwelle, jedoch konnte bei maximaler Belastung kein Unterschied in der HFmax gefunden werden. Die Korrelationsanalysen bei maximaler Belastung zeigten zwar einen hohen Zusammenhang zwischen FR und LB, aber die deutlichen Unterschiede an den submaximalen Messpunkten ließen, hinsichtlich der daraus folgenden Konsequenzen bezüglich der Ableitung von Trainingsbereichen, eine Vorhersage für die maximale Herzfrequenz am LB nicht zu. Diese Unsicherheit findet sich in ähnlicher Form auch bei Roecker et al. in seiner Studie im Vergleich von FR und LB Untersuchungen.³⁷ Aus den Resultaten zieht der Autor den Schluss, dass für

Trainingsempfehlungen bezüglich FR und LB eine jeweils individuelle Bestimmung der maximalen Herzfrequenz sinnvoll erscheint.

4.3 Leistung

Will man die erbrachte Leistung an unterschiedlichen Belastungsformen miteinander vergleichen, kommt es zunächst immer wieder zur gleichen Frage: Ist ein Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Leistungsangaben überhaupt möglich? Speziell zwischen Laufbandbelastungen und Fahrradbelastungen tritt dieses Problem auf. Die Leistungsangabe am Laufband erfolgt mit Hilfe der erzielten Laufgeschwindigkeit und dem Steigungswinkel, während am Fahrrad die Leistung in Form von Watt gemessen werden kann. Das wiederum bedeutet: will man die Leistungen vergleichen, muss man zunächst die erzielte Laufgeschwindigkeit am LB in Watt umrechnen. Dieser Umrechnung haben sich in der Vergangenheit viele Forschungsgruppen gewidmet und es wurden mehrere international verwendete Formeln entwickelt.³⁴ Die am häufigsten angewandte Formel ist jene die von Nowacki et al. entwickelt wurde. Sie bezieht sich auf die Gesetze der schiefen Ebene und lautet:

$$P(\text{Watt}) = m * g * v * \sin\alpha,$$

wobei m die Körpergewicht in kg, g die Erdbeschleunigung (9,81 m/s²), v die Laufgeschwindigkeit in m/s, und α den Steigungswinkel des Laufbandes in Grad bedeutet.³⁴ Betrachtet man die Formel, dann sieht man, dass sie für Steigungen von 0° immer 0 Watt Leistung berechnet. Als weitere Umrechnungsformeln konnten in der Arbeit von Härtel Formeln gefunden werden, die von den Laufbandherstellern Woodway GmbH (Formel nach Schulz) und von h/p/cosmos sport & medical gmbh (Formel nach Eschenbacher), zur Umrechnung in Watt verwendet werden.³⁴

Aufgrund der Ausführungen von Härtel hat sich der Autor für die Umrechnungsformel nach Schulz entschieden. Das bedeutet, die für das LB unter „Pmech“ angeführten Wattzahlen wurden alle nach folgender Formel berechnet:

$$P(\text{Watt}) = (1,065 + 0,0511 * n + 9,322 * 10^{-4} * n) * v * m/4,$$

wobei n die Steigung in %, v die Geschwindigkeit in m/s und m das Körpergewicht in kg angibt.³⁴

Da jedoch nie alle individuellen Voraussetzungen der Probanden in die oben angeführten Formeln eingerechnet werden können, können diese Berechnungen nur als Schätzungen angesehen werden.³⁴ Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Form des Leistungsvergleiches angestrebt, nämlich der Vergleich der metabolischen Leistung (Pmet) mit der mechanischen Leistung (Pmech). Die Pmet soll dabei Rückschlüsse auf die innere Beanspruchung bei den verschiedenen Belastungsformen erlauben. Mit Hilfe einer von Wolf et al.³¹ (2011) publizierten Formel ist es nämlich möglich, ausgehend von der Sauerstoffaufnahme VO₂ respektive den Metabolischen Einheiten (MET; 1 MET= 3,5 ml O₂/min/kg) und dem Körpergewicht, auf die metabolisch erbrachte Leistung, ebenfalls in Watt, zu schließen.³¹ Die hierzu verwendete Formel lautet:

$$P_{\text{met}} (\text{Watt}) = 0,28 (\text{Mets}-1) * \text{Körpergewicht (kg)}.^{31}$$

Hierbei sollen nicht die erzielten Leistungen Pmet und Pmech gleichgesetzt werden, das wäre aufgrund des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik auch nicht erlaubt, es soll vielmehr der Verlauf und das Verhalten der Leistungen zueinander betrachtet werden.³¹

4.3.1 Mechanische Leistung - Pmech im Vergleich

Der Vergleich der mechanisch erbrachten Leistungen (Pmech) am FR, AK, und LB, ergab auf allen Belastungsniveaus signifikante Unterschiede, wobei die Leistung am LB im gesamten Verlauf am höchsten lag und die Leistung an der AK am niedrigsten.

Im Bereich der aeroben Schwelle betrug der Unterschied zwischen FR und AK im Mittel 22 Watt (61% der FR Leistung), zwischen LB und FR 73 Watt, was einem Faktor von 2,3 bzw. 43 % der LB Leistung entsprach, und zwischen LB und AK 95 Watt. Das bedeutet, die Leistung am LB betrug hier das 3,7 fache der Leistung an der AK, bzw. 26% der LB Leistung. Dieser große Unterschied beruht vermutlich auf der, durch die Umrechnungsformel, überschätzten Leistung an den niedrigen Belastungsstufen am LB. Diese Tatsache konnte auch Härtel in seinen Untersuchungen feststellen.³⁴

An der anaeroben Schwelle betrug der Unterschied zwischen FR und AK 49 Watt, das entsprach einem Faktor von 1,9. Bei FR und LB betrug der Unterschied 62 Watt, das bedeutet einen Faktor von 1,6 und zwischen LB und AK 111 Watt, das entsprach einem Faktor von 3,0.

Maximal waren die Unterschiede ebenfalls signifikant und betrugen für FR und AK 74 Watt. Die Leistung am FR war 1,9-mal höher als auf der AK. Der Leistungsunterschied von LB zu FR reduzierte sich auf 46 Watt (Faktor 1,3) und zwischen LB und AK sank der Unterschied auf den Faktor 2,4 bzw. 120 Watt. Diese Aufstellungen zeigen, dass der relative Unterschied zwischen dem LB und den beiden anderen Belastungsformen mit Fortdauer der Belastung deutlich abnimmt. Dies bestärkt die oben angeführte Annahme der Überschätzung der LB Leistung am Beginn der Belastung.

Die Unterschiede der Leistung von FR und AK betragen im Mittel an den Messpunkten 45%, dieses Ergebnis stimmt in etwa mit den Untersuchungen von Franklin BA überein, welcher an der AK eine 50-60 % niedrigere Leistung als am FR feststellte.⁴¹

Die anaerobe Schwelle (ANS) als wichtiger Bezugspunkt für die Trainingssteuerung lag am FR bei 66 ± 10 % der maximalen Leistung (%Pmax), an der AK bei 67 ± 11 %Pmax und am LB bei 81 ± 7 %Pmax. In den Korrelationsuntersuchungen konnte an der ANS und bei Maximaler Belastung ein hoher signifikanter Zusammenhang zwischen FR und AK, sowie zwischen FR und LB festgestellt werden. Das bedeutet, dass eine Vorhersage der Leistung von FR auf LB und FR auf AK möglich war. Nimmt man die, in der linearen Regression, für die Vorhersage der maximalen Leistung zwischen FR und AK bestimmte Formel:

$$P_{\text{max-AK}} = 0,58 * P_{\text{max-FR}} - 7,885,$$

so ergibt dies bei einer angenommenen maximalen Leistung am FR von 150 Watt, 79 Watt bzw. 53% der FR-Leistung für die AK. Dieses Ergebnis wiederum stimmt mit den Resultaten von Franklin überein.⁴¹

Eine Vorhersage der Leistung von FR auf LB wäre zwar theoretisch möglich gewesen, wurde aber aufgrund der Schätzung der LB Leistung nicht durchgeführt.

4.3.2 Äußere Belastung und Innere Beanspruchung – P_{mech} und P_{met} im Vergleich

Die Berechnung der metabolischen Leistung erbrachte ebenfalls signifikante Unterschiede auf allen Belastungsstufen. Die Leistung am LB lag im Verlauf wiederum am höchsten, die Leistungskurve am FR darunter, und am niedrigsten lag die Leistung an der AK.

Vergleicht man den Verlauf der beiden Leistungen P_{met} und P_{mech} über die gesamte Dauer der Tests, so sieht man, dass die metabolisch erbrachte Leistung (innere Beanspruchung) am FR und am LB zu jedem Zeitpunkt deutlich unter den mechanisch erbrachten Leistung (äußere Belastung) liegen (Abbildung 21). So ergaben sich für das LB Unterschiede von 29,2 Watt (22,7%) am LTP1, 31,4 Watt (19,2%) am LTP2 und 43 Watt (21,2%) am Punkt MAX. Geht man von einer Überschätzung der Formel nach Schulz³⁴ auf den niedrigen Belastungsstufen aus, dann sollte der eigentliche Verlauf der Unterschiede nicht gleichbleiben, sondern eher wie beim FR, ansteigend sein.

Für das FR konnte ein kontinuierlicher Anstieg der Differenz zwischen P_{mech} und P_{met} festgestellt werden. Am LTP1 war der Unterschied 4,5 Watt (8%), am LTP2 11,8 Watt (11,5%) und bei maximaler Belastung 30 Watt (19,2%). Daraus kann man ableiten, dass es am FR ab Erreichen der ANS, bei weiter ansteigender Belastung, zu einer Abnahme der Anstiegssteilheit der Sauerstoffaufnahme kommt. Dies stimmt mit den Untersuchungen dieser Studie auch überein. In den letzten Jahren wurde viel zum Thema „VO₂-Kinetik“ geforscht, Jones & Poole⁴² fassten diese Ergebnisse in ihren Betrachtungen zusammen. Sie fanden heraus, dass es insbesondere bei konzentrischen Muskelbelastungen, wie am FR oder der AK, über der ANS eine sogenannte „VO₂ slow component“ gibt. Sie spiegelt die Zunahme der Ineffizienz im Muskelstoffwechsel wieder und ist gekennzeichnet durch einen höheren Energieumsatz. Als Ursache dafür wird in erster Linie die Aktivierung/Rekrutierung anderer Typen von Muskelfasern bei höheren Intensitäten angesehen. Diese Typ II A Fasern kontrahieren zwar schneller und betreiben mehr anaerobe Glykolyse, sie ermüden jedoch auch leichter und haben eine geringere oxidative Kapazität, d.h. sie arbeiten weniger effizient.⁴² Bei LB-Belastungen, also bei Lauf- oder Gehbewegungen, sind Anpassungen an erhöhte

Leistungsanforderungen, z.B. durch Schrittlängenadaptierung, möglich. So kann eine Ökonomisierung im Energiestoffwechsel der arbeitenden Muskulatur erreicht werden. Im Gegensatz dazu ist es an der AK und dem FR, bei konstanter Drehzahl, nur durch Erhöhung der Kraftkomponente möglich, auf eine Steigerung der Belastung zu reagieren.

An der AK ergab sich ein von LB und FR abweichender Kurvenverlauf, da die berechnete metabolische Leistung ständig über der mechanisch erbrachten Leistung lag. Der Unterschied betrug am LTP1 7,6 Watt (18,2%), am LTP2 7 Watt (11,6%) und 13,4 Watt (13,9%) bei maximaler Belastung (Abbildung 21). Warum führt eine Belastung an der AK zu einer so viel größeren Beanspruchung des Organismus als am FR oder dem LB? Und welche Konsequenzen leiten sich davon für Trainingsempfehlungen ab? In erster Linie kann man in Zusammenschau der Ergebnisse dieser und andere Arbeiten sagen, dass die Bewegungserfahrung und dadurch die Bewegungsökonomie die größte Rolle dabei spielen. Bassett und Howley stellten in ihren Untersuchungen bezüglich dem Verhalten von Sauerstoffaufnahme und Laufgeschwindigkeit fest, dass es aufgrund von Unterschieden in der Laufökonomie, bei Läufern mit gleicher VO_2max , zu Differenzen von 10-20% in der Sauerstoffaufnahme bei gleichen submaximalen Geschwindigkeiten kam.⁴³ Die Patienten in dieser Untersuchung hatten keine Bewegungserfahrung an der AK und die Bewegung ist im Alltag der Probanden, im Gegensatz zu FR und LB, so gut wie nicht zu finden. Deshalb stellt der Autor fest, dass die schlechte Bewegungsökonomie zu dieser übermäßigen metabolischen Beanspruchung geführt hat. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass der Abbruch der Belastung in den meisten Fällen aufgrund von lokaler muskulärer Erschöpfung erfolgte und nicht aufgrund einer kardiorespiratorischen Erschöpfung. Zur Bestätigung, oder gegebenenfalls Wiederlegung dieser Hypothese, sollten weitere Untersuchungen an der AK durchgeführt werden, jedoch sollten vorher sogenannte „*familiarization sessions*“⁴³⁹ (Trainingseinheiten) zur Gewöhnung an den Bewegungsablauf durchgeführt werden.

An der AK konnte, mit Hilfe des Vergleichs und der Darstellung der metabolischen Beanspruchung in Watt, festgestellt werden, dass in dieser Studie AK-Belastungen zu einer relativ größeren metabolischen Beanspruchung geführt

haben als bei LB und FR, eine schnellere lokale Ermüdung auftrat und es dadurch rascher zu einer Ausbelastung und zum konsekutiven Belastungsabbruch kam.

Ein weiterer Beleg dafür ist der Vergleich des Sauerstoffbedarfs zur Leistungserbringung von einem Watt echter mechanischer Belastung. Für das FR betrug dies 0,14 mlO₂/kg/min pro 1 Watt, am LB 0,13 mlO₂ und an der AK 0,22 mlO₂/kg/min pro Watt.

Diese Ergebnisse haben vor allem auch praktische Bedeutung: Gibt man Trainingsvorgaben anhand von prozentuellen Leistungsvorgaben auf Basis anderer Belastungsformen, kann es zu einer metabolischen Überforderung des Patienten kommen. Aus diesem Grund sollten für Trainingsempfehlungen immer Kombinationen mehrerer Parameter (HF, VO₂, Laktat) des metabolischen und des kardiorespiratorischen Systems herangezogen werden, da nur so die gesamte Beanspruchung des Organismus abgeschätzt werden kann. Ähnliches wird auch von Pokan et al. empfohlen.³⁵

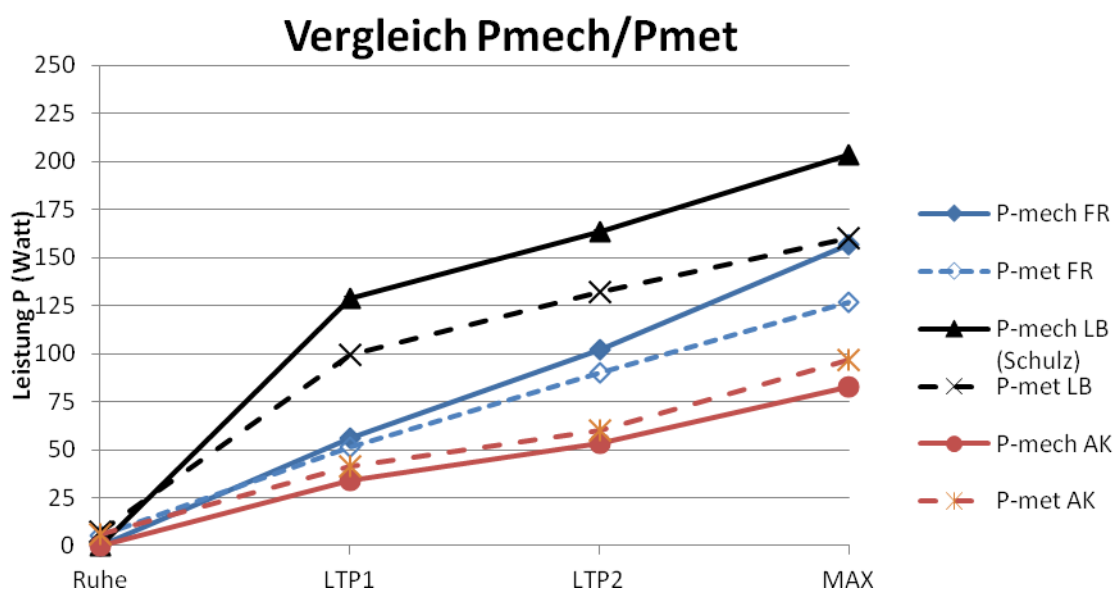


Abbildung 21: Vergleich der mechanischen Leistung (Pmech) in Watt und der metabolisch erbrachten Leistung (Pmet) in Watt, im Verlauf bei AK, FR und LB.

4.4 VO₂ und VO₂max

Die VO₂max gilt als wichtigster Prädiktor der körperlichen Leistungsfähigkeit. Wie zu erwarten waren die Werte bei diesem Patientengut entsprechend

eingeschränkt. Im Mittel lagen die Werte an der AK bei $18,2 \pm 6,3$ ml/min/kg, am FR bei $22,4 \pm 4,7$ ml/min/kg und am LB bei $27,6 \pm 6,3$ ml/min/kg. Nach der Einteilung von Weber³² (Tabelle 2) lagen die Patienten damit im Bereich der Leichten – Moderaten Herzinsuffizienz. Bezogen auf die $VO_2\max$ lag die ANS am FR im Mittel bei 75% der $VO_2\max$, an der AK bei 70%, und am LB bei 85%.

Die Sauerstoffaufnahme am LB lag dabei an allen Messpunkten signifikant am höchsten. Zwischen FR und AK gab es, mit Ausnahme an der AS, ebenfalls signifikante Unterschiede. Die AK Werte betragen verglichen mit den Werten am FR 89% an der AS, 75% an der ANS und 81% bei der $VO_2\max$. Die $VO_2\max$ lag also an der AK 19% niedriger als am FR. Wassermann et al.⁴⁴ beschreibt die $VO_2\max$ der AK bei 50-70% der $VO_2\max$ am FR. In den Untersuchungen dieser Arbeit liegt sie damit im Mittel 10% höher.

Verglichen mit dem LB waren die Unterschiede noch deutlicher: 53% an der AS, 54% an der ANS und an der AK betrug die $VO_2\max$ 65% der $VO_2\max$ am LB. Im Vergleich mit der aktuellen Studie von Schrieks et al.³⁹ fand sich diesbezüglich ein Unterschied von etwa 7%, da in ihren Untersuchungen bei gesunden Männern (n=16) die $VO_2\max$ an der AK mit 58% der $VO_2\max$ am LB ermittelt wurde. Jedoch werden in früheren Studien von Sanada et al.⁴⁵ und Bar-Or & Zwiren (1975) Vergleiche angeführt, bei denen die AK $VO_2\max$ bei 68% bzw. 63% der $VO_2\max$ am LB lag.³⁹ Die Untersuchungen von Sanada et al. fanden an 18-22 jährigen College-Schwimmern statt, die eine deutlich höhere Masse an Skelettmuskulatur am Oberkörper als die Durchschnittspopulation aufwiesen. Je mehr Muskelmasse an der Bewegung beteiligt ist, desto höher sind auch die erreichten $VO_2\max$ Werte. Diese Erklärung findet man in mehreren Untersuchungen in der Vergangenheit.^{7,39} Dies spielt besonders an der AK eine Rolle. In den Untersuchungen dieser Studie kann das jedoch nicht als Erklärung für die kleinere Differenz dienen.

Aufgrund von Vergleichen mit früheren Arbeiten konnten folgende Begründungen für diese Tatsache gefunden werden: 1. In der Vergangenheit wurde in vielen Studien übereinstimmend festgestellt, dass Belastungen, welche kleinere Mengen an Skelettmuskulatur erfordern, höhere $VO_2\max$ -Werte pro Muskeleinheit

verursachen als Belastung mit Ganzkörperbewegungen.⁴⁵ Die Ursache hierfür liegt einerseits darin, dass der belasteten Muskulatur relativ mehr Blut zugeführt wird und andererseits in der Fähigkeit der Muskulatur, den Blutfluss in der belasteten Muskulatur extrem zu erhöhen und somit die Sauerstoffaufnahme überproportional zu steigern.⁴³ 2. Da bei diesem Untersuchungskollektiv die Leistungsfähigkeit nach oben hin aufgrund der eingeschränkten Herzleistung begrenzt war und das HMV als der limitierende Faktor der VO_2 max in FR und LB Belastungen angesehen wird,^{43,46} tritt dieser Effekt hier noch deutlicher zum Vorschein, da ein Erreichen einer höheren VO_2 max am LB gar nicht möglich war. Aus diesem Grund reduziert sich die Differenz zwischen den einzelnen Belastungsformen. Die Bestätigung dieser Hypothesen liefert die Studie von Magnusson et al.⁴⁷ der in seinen Untersuchungen feststellte, dass Patienten mit chronischer Herzinsuffizienz, wenn kleine Muskelgruppen beansprucht werden, gleich hohe Blutflüsse in der Muskulatur erreichen können wie Gesunde, während, wenn mehr Muskulatur beansprucht wird, der Blutfluss in der Muskulatur (und in anderen Körperregionen) und die VO_2 max deutlich abnehmen.

Zwischen FR und LB waren die Unterschiede geringer, aber an allen Punkten signifikant: an der AS betrug die VO_2 59% der VO_2 am LB, an der ANS 72%, und die VO_2 max betrug 81% der ermittelten VO_2 max am LB. Diese Ergebnisse stimmen mit der Untersuchung von Caputo et al.³⁸ überein, der an einer Gruppe von untrainierten Probanden (n=11) ebenfalls einen signifikanten Unterschied in der VO_2 max zwischen LB und FR feststellen konnte. Desweiteren beschreiben Fleg et al.⁷, übereinstimmend mit diesen Ergebnissen, einen Unterschied der VO_2 max zwischen FR und LB von 10-20%.

Mit Hilfe der linearen Regression konnte sowohl zwischen FR und AK ($r=0,98$ bei $p<0,001$), und FR und LB ($r=0,91$ bei $p<0,001$) eine Voraussage bezüglich der VO_2 max in ml/min/kg getroffen werden. Die Formeln hierfür lauten:

$$VO_2\text{max-AK} = 1,3207 * VO_2\text{max-FR} - 11,367$$

$$VO_2\text{max-LB} = 1,2056 * VO_2\text{max-FR} + 0,6154.$$

4.5 Laktat und Laktat Turn Points

Am Untersuchungsbeginn wurde bei allen Patienten die Vorbelastungs-Laktatkonzentrationen gemessen. Die Werte lagen bei $1,42 \pm 0,4$ mmol/l am FR, bei $1,39 \pm 0,2$ mmol/l an der AK und bei $1,34 \pm 0,3$ mmol/l am LB. Diesbezüglich fand sich kein signifikanter Unterschied. Die Werte lagen noch im Normbereich zwischen 0,4 und 1,5 mmol/l, jedoch deutlich über dem in der Literatur angeführten Mittel von 0,9 mmol/l.⁴

Mit ansteigender Belastung nahmen die Laktat-Leistungs-Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf. Am LTP1 gab es einen signifikanten Unterschied zwischen FR ($1,91 \pm 0,3$ mmol/l) und der AK ($2,41 \pm 0,4$ mmol/l). Das LB lag hier bei $2,23 \pm 0,6$ mmol/l. Bezogen auf die dort erbrachte relative Leistung %Pmax, lag das LB mit 65 ± 8 % doch deutlich über den in der Literatur gefundenen Angaben von 45%.⁴

Im Bereich des LTP2 fand sich ein signifikanter Unterschied zwischen FR ($3,6 \pm 0,4$ mmol/l) und LB ($4,6 \pm 1$ mmol/l). Der Unterschied betrug hier im Mittel 1mmol/l. Allerdings sollte man diese Tatsache an einem größeren Kollektiv untersuchen, da die Standardabweichung am LB mit 1mmol/l sehr groß ist und der Autor vermutet, dass sich dieser Abstand auch verändern könnte. Verglichen mit Hofmann et al.⁴, der den LTP2 in einem Bereich von 45-75 %Pmax beschreibt, liegen die festgestellten Werte am FR (66 ± 10 %), bei der AK (67 ± 11 %) und am LB (81 ± 7 %) in diesem Bereich bzw. knapp darüber.

Im Bereich der maximalen Belastung gab es keine Unterschiede bezüglich der Laktatkonzentration zwischen den einzelnen Verfahren. Mit mittleren Werten von >7 mmol/l Laktat zeigte sich, dass auch Patienten mit eingeschränkter Ventrikelfunktion normal hohe Blutlaktatwerte erreichen können und dass bei allen Untersuchungen eine metabolische Ausbelastung erzielt wurde. Der Verlauf der Laktatkurven spiegelt eindeutig die vielfach beschriebene Dreiphasigkeit des Energiestoffwechsels wider.

4.6 Schlussfolgerungen und Kritik

- Eine gute Voraussage bezüglich der maximalen Herzfrequenz und der HF an der anaeroben Schwelle konnte vom FR auf die AK gemacht werden.
- Es gab keinen signifikanten Unterschied der HFmax am FR und LB.
- HRTP und LTP2 wiesen keine signifikanten Unterschiede bezüglich Leistung, HF und Laktatkonzentration auf.
- Die absoluten Laktatkonzentrationen waren mit Werten $> 7\text{mmol/l}$ für herzinsuffiziente Patienten wider Erwarten normal hoch und bei den verschiedenen Belastungsformen nicht signifikant unterschiedlich.
- Die VO_2max konnte ausgehend vom FR, für AK und LB vorhergesagt werden.
- Eine Umrechnung der Laufbandleistung (km/h und Steigung) in Watt mit Hilfe von Umrechnungsformeln ist kritisch zu betrachten und sollte nur als grobe Richtlinie dienen.
- Trainingsempfehlungen können nicht 1:1 von einer Belastungsform auf die andere übernommen werden. Dies würde zu einer Über- bzw. Unterforderung des Patienten führen.
- Trainingsempfehlungen bezüglich der Intensität sollten immer anhand der Zusammenschau von zumindest 2 Parametern unterschiedlicher Systeme getroffen werden: Laktat – metabolisch, HF – Herz-Kreislauf System, VO_2max – respiratorisch. Nur so kann das Risiko einer Überbeanspruchung minimiert werden.
- Vor Durchführung von Untersuchungen an unterschiedlichen Ergometern sollten immer „familiarization sessions“ zur Gewöhnung an die Bewegungsform durchgeführt werden.
- Bewegungsökonomie ist ein entscheidender Faktor für die metabolische Beanspruchung und die Leistungserbringung bei unterschiedlichen Bewegungsformen. Speziell an der AK führen absolut gleiche Belastungen zu relativ höherer Beanspruchung. Deshalb sollte die Vorgabe von Trainingsintensitäten vom FR für die AK besonders rücksichtsvoll erfolgen.
- Die Leistungsfähigkeit des untersuchten Patientenkollektiv war trotz der eingeschränkten Ventrikelfunktion relativ sehr gut (siehe Punkt 4.4./ Weber Klassifizierung; Tabelle 2), wodurch aus der Studie abgeleitete Aussagen

bezüglich Patienten mit noch schwereren kardialen Einschränkungen nicht empfohlen werden.

Im Rahmen dieser Studie wurden viele Fragen bezüglich des Zusammenhanges von äußerer Belastungen und innerer Beanspruchung aufgeworfen. Zur Bestätigung, oder allenfalls Widerlegung der Ergebnisse, sollten die Untersuchungen an einem größeren Kollektiv in ähnlicher Form wiederholt werden.

Literaturverzeichnis

1. Schurr S. Trainingssteuerung. In: Schurr S. Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im Ausdauersport. Winterbach: Books on Demand GmbH, Norderstedt; 2003. p. 39-41.
2. Fritsch G, Hörtnagel H. Die Sportmedizinische Untersuchung. In: Pokan R, et al. Kompendium der Sportmedizin. Wien: Springer Verlag; 2004. p. 21-30.
3. Roecker K, Prettin S, Pottgiesser T, Schumacher YO, Dickhut HH. Metabolische Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung in der Sportmedizin. Sport- und Präventivmedizin. 2010; 40 (1): 6-12.
4. Hofmann P, Wonisch M, Pokan R. Laktatleistungsdiagnostik-Durchführung und Interpretation. In: Pokan R, et al. Kompendium der Sportmedizin. Wien: Springer Verlag; 2004. p. 103-132.
5. Neumann G, Schüler KP. Sportmedizinische Funktionsdiagnostik. Sportmedizinische Schriftenreihe. 1994; 29: 45.
6. Wonisch M, Berent R, Klicpera M, Laimer H, Marko C, Pokan R, et al. Praxisleitlinien Ergometrie. Journal für Kardiologie. 2008; 15 (Suppl A): 3-14.
7. Fleg JL, Pina IL, Balady JG, Chaitman BR, Fletcher B, Lavie C, et al. Assessment of functional capacity in clinical and research applications. An advisory from the Committee on Exercise, Rehabilitation, and Prevention, Council on Clinical Cardiology, American Heart Association. Circulation. 2000 Sep; 102 (13): 1591-1597.
8. Wonisch M, Fruhwald FM, Hödl R, Hofmann P, Klein W, Kraxner W, et al. Spiroergometrie in der Kardiologie – Grundlagen der Physiologie und Terminologie. Journal für Kardiologie. 2003; 10 (9): 383-390.
9. Hofmann P, Wonisch M, Pokan R. Laktatleistungsdiagnostik-Durchführung und Interpretation. In: Pokan R, et al. Kompendium der Sportmedizin. Wien: Springer Verlag; 2004. p. 103.
10. Robergs RA, Chawalbinska-Moneta J, Mitchel JB, Pascoe DD, Houmard J, Costill DL. Blood lactate threshold differences between arterialized and venous blood. Int J Sports Med. 1990; 11: 446-451.
11. Hofmann P. Grundlagen der Laktat-Leistungs-Kurve und Bedeutung externer Einflussfaktoren: 2010: Proceedings of Jubiläumssymposium Mythos Laktat; 2010 Jun 11-16; St. Radegund, Austria.
12. Smekal G. Substratutilisation (muskulärer Energiestoffwechsel). In: Pokan R, et al. Kompendium der Sportmedizin. Wien: Springer Verlag; 2004. p. 83-101.
13. Horn F, Moc I, Schneider N, Grillhösl C, Berghold S, Lindenmeier G. Herkunft des ATP. In: Horn F, et al. Biochemie des Menschen. 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2005. p. 196-231.

-
14. Horn F, Moc I, Schneider N, Grillhösl C, Berghold S, Lindenmeier G. Stoffwechsel der Proteine und Aminosäuren. In: Horn F, et al. Biochemie des Menschen. 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2005. p. 178-180.
 15. Schurr S. Anpassungen des Körpers an Training. In: Schurr S. Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im Ausdauersport. Winterbach: Books on Demand GmbH, Norderstedt; 2003. p. 10-12.
 16. Horn F, Moc I, Schneider N, Grillhösl C, Berghold S, Lindenmeier G. Stoffwechsel der Kohlenhydrate. In: Horn F, et al. Biochemie des Menschen. 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2005. p. 85-90.
 17. Hofmann P. Laktat Shuttle Theorie und Laktat Turn Point Bestimmung: 2010: Proceedings of Jubiläumssymposium Mythos Laktat; 2010 Jun 11-16; St. Radegund, Austria.
 18. Brooks GA. Cell-Cell and intracellular lactate shuttles. *J Physiol.* 2009 Dec 1; 587 (Pt23): 5591-600.
 19. Philosophische Fakultät Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf [<http://www.phil-fak.uni-duesseldorf.de/>]. Düsseldorf, Deutschland: Wastl P, Betriebseinheit für Sportwissenschaften [<http://user.phil-fak.uni-duesseldorf.de/~wastl/>]. Available from: <http://user.phil-fak.uni-duesseldorf.de/~wastl/Wastl/MTT/PPnergie-Internet.PDF>
 20. Wassermann K, Whipp BJ, Koysl SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol.* 1973 Aug; 35(2): 236-243.
 21. Hofmann P, Pokan R, von Duvillard SP, Seibert F-J, Zweicker R, Schmid P. Heart rate performance curve during incremental cycle ergometer exercise in healthy young male subjects. *Med Sci Exerc.* 1997 June; 29 (6): 762-768.
 22. Pokan R, Hofmann P, Wonisch M, Hörtnagl H. Funktionsdiagnostik akuter und chronischer Anpassung des Herz-Kreislaufsystems an körperliche Belastungen. In: Pokan R, et al. Kompendium der Sportmedizin. Wien: Springer Verlag; 2004. p. 45-55.
 23. Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P and Codeca I. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *J Appl Physiol.* 1982 Apr; 52 (4): 869-873.
 24. Pokan R, Hofmann P, von Duvillard SP, Beaufort F, Smekal G, Gasser R, et al. The heart rate performance curve and left ventricular function during exercise in patients after myocardial infarction. *Med Sci Sports Exerc.* 1998 Oct; 30 (10): 1475-1480.
 25. Hofmann P, Jürimäe T, Jürimäe J, Purge P, Maestu J, Wonisch M, et al. HRTP, Prolonged Ergometer Exercise, and Single Sculling. *Int J Sports Med.* 2007; 28: 964-969
 26. Foster C, Porcari JP. Clinical exercise testing related to cardiovascular disease. In: Kaminsky LA. ACSM's Resource Manual for Guidelines for Exercise testing and Prescription. 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2006. p. 225-230.
 27. Heck H, Rost R, Hollmann W. Normwerte des Blutdrucks bei der Fahrradergometrie. *Deutsch Z Sportmed.* 1984; 35: 243-247.

-
28. Pescatello LS, Franklin BA, Fagard R, Farquhar WB, Kelley GA, Ray CA. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and hypertension. *Med Sci Sports Exerc.* 2004 Mar; 36 (3): 533-553.
 29. Wonisch M, Pokan R, Hofmann P. Funktionsdiagnostik akuter und chronischer Anpassung der Atmungsorgane. In: Pokan R, et al. *Kompodium der Sportmedizin.* Wien: Springer Verlag; 2004. p. 136-144.
 30. Noakes TD. How did A V Hill understand the VO₂max and the "plateau phenomenon"? Still no clarity?. *Br J Sports Med.* 2008 Jul; 42 (7): 574-580.
 31. Wolf R, Baumbach C, Habel F, Heiermann M, Sinn R. Körperliche Aktivität als kardiovaskuläre Therapie. Wie viel ist gut und sicher?. *Sport- und Präventivmedizin.* 2011; 41 (4): 10-14.
 32. Wonisch M, Fruhwald FM, Hödl R, Hofmann P, Klein W, Kraxner W, et al. Spiroergometrie in der Kardiologie – Klinische Anwendungsmöglichkeiten. *Journal für Kardiologie.* 2003; 10 (10): 440-446.
 33. Möckel M, Olschewski H, Dietz R. Herzinsuffizienz und Cor pulmonale. In: Dietel M, Suttrop N, Zeitz M. *Harrisons Innere Medizin.* 16. Auflage - Deutsche Ausgabe. Berlin: ABW Wissenschaftsverlag GmbH; 2005. p. 1466-1477.
 34. Härtel S. Entwicklung und Analyse walkingbasierter Ausdauer-testverfahren im Rahmen der medizinischen Rehabilitation. *Karlsruher sportwissenschaftliche Beiträge Band 4.* 2007; 81-99.
 35. Pokan R, Hofmann P, Smekal G, Wonisch M, Bachl N, Schmid P. Leistungsdiagnostik zur Trainingssteuerung in der Bewegungstherapie von Herz-Kreislauf-erkrankungen. *Internist Prax.* 2002; 42: 797-806.
 36. Hofmann P, Von Duvillard SP, Seibert F-J, Pokan R, Wonisch M, Lemura LM, et al. %HRmax target heart rate is dependent on heart rate performance curve deflection. *Med Sci Sports Exerc.* 2001; 33 (10): 1726 –1731.
 37. Roecker K, Striegel H, Dickhuth HH. Heart-Rate-Recommendations: Transfer between Running and Cycling Exercise?. *Int J Sport Med.* 2003; 24: 173-178.
 38. Caputo F, Denadai BS. Effects of aerobic endurance training status and specificity on oxygen uptake kinetics during maximal exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2004 Jul; 93: 87–95.
 39. Schrieks IC, Barnes MJ, Hodges LD. Comparison study of treadmill versus arm ergometry. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2011; 31: 326–331.
 40. Roecker K, Niess AM, Horstmann T, Striegel H, Mayer F, Dickhuth HH. Heart rate prescriptions from performance and anthropometrical characteristics. *Med Sci Sports Exerc.* 2002; 34 (5): 881–887.
 41. Franklin BA. Aerobic exercise training for the upper body. *Med Sci Sports Exerc.* 1989 Oct; 21 (Suppl 5): 141-8.
 42. Jones AM, Poole DC. Oxygen Uptake Dynamics: From Muscle to Mouth – An Introduction to the Symposium. *Med Sci Sports Exerc.* 2005; 37 (9): 1542–1550.

-
43. Bassett DR, Howley TE. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2000; 32 (1): 70–84.
 44. Wassermann K, Hansen J, Sue D, Stringer W, Whipp B. Clinical Exercise testing. In: Wassermann K, Hansen J, Sue D, Stringer W, Whipp B. *Principles of Exercise Testing and Interpretation Including Pathophysiology and Clinical Applications.* Philadelphia Baltimore New York London Buenos Aires Hong Kong Sydney Tokyo: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 134-156.
 45. Sanada K, Kearns CF, Kojima K, Abe T. Peak oxygen uptake during running and arm cranking normalized to total and regional skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging. *Eur J Appl Physiol.* 2005; 93: 687–693.
 46. Richardson RS, Saltin B. Human muscle blood flow and metabolism studied in the isolated quadriceps muscles. *Med Sci Sports Exerc.* 1998 Jan; 30(1): 28 –33.
 47. Magnusson G, Kaijser L, Sylvén C, Isberg B, Saltin B. Peak skeletal muscle perfusion is maintained in patients with chronic heart failure when only a small muscle mass is exercised. *Cardiovasc Res.* 1997; 33: 297-306.