

Aus der Betriebsärztlichen Untersuchungsstelle
der Universität Würzburg
Leiter: Prof. Dr. med. F. W. Schardt

**Charakteristika ergospirometrischer
und metabolischer Parameter
während submaximaler Belastung
über 100 Minuten
auf einem Fahrradergometer**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg

vorgelegt von
Florian Wenk
aus Kulmbach

Würzburg, Juni 2005

Referent: Herr Prof. Dr. med. F.W. Schardt
Koreferent: Frau Prof. Dr. med. C. E. Angermann
Dekan: Herr Prof. Dr. med. G. Ertl

Tag der mündl. Prüfung: 21. September 2005

Der Promovend ist Arzt.

Meinen Eltern

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	MUSKELSTOFFWECHSEL, ENERGIEBEREITSTELLUNG UND GRUNDLAGEN DER LAKTATBASIERTEN LEISTUNGSDIAGNOSTIK	4
2.1	Muskelstoffwechsel und Energiebereitstellung	4
2.1.1	Skelettmuskulatur: Aufbau und Funktion	4
2.1.2	Die anaerob-alkalotische Phase der Energiebereitstellung: ATP- und KP-Spaltung	9
2.1.3	Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten	11
2.1.4	Energiebereitstellung aus Fetten	17
2.1.5	Energiebereitstellung aus Proteinen	19
2.1.6	Regulation der Energiebereitstellung	20
2.2	Kompensationsmechanismen und Trainingseffekte aufgrund von körperlicher Belastung	22
2.2.1	Kompensationsmechanismen in der Muskelzelle	23
2.2.2	Kompensation durch Herz und Kreislauf	24
2.2.3	Kompensation durch Ventilation	25
2.3	Überblick über Methoden der laktatbasierten Leistungsdiagnostik	26
2.3.1	Definition der anaeroben Schwelle (AS)	26
2.3.2	Entwicklung der Schwellenmodelle	27
2.3.3	Jüngste Entwicklungen	29
3	FRAGESTELLUNG	30
4	PROBANDEN, MATERIAL UND METHODEN	31
4.1	Probandengut	31
4.1.1	Probanden der Gruppe A: gut-trainierte Radrennfahrer (n=13)	32
4.1.2	Probanden der Gruppe B: trainierte Tourenfahrer (n=5)	33
4.2	Messaufbau	34
4.2.1	Messungen und Umgebungsbedingungen	34
4.2.2	Geräte	35
5	TESTABLÄUFE	38
5.1	Test 1: Stufenleistungstest	38
5.2	Tests unter konstanten Intensitäten	39
5.2.1	Test 2: Herzfrequenz-konstante Einheit auf $HF_{3,0\text{mmol/l}}$	40

5.2.2	Test 3: Leistungs-konstante Einheit auf $W_{3,0\text{mmol/l}}$	40
6	ERGEBNISSE	42
6.1	Test 1 (Stufentest)	42
6.1.1	Maximallaktat	42
6.1.2	Respiratorischer Quotient RQ	42
6.1.3	Maximale Sauerstoffaufnahme $VO_{2\text{max}}$	42
6.1.4	Maximaler Sauerstoffpuls (O_2/HF) _{max}	42
6.1.5	Maximale Herzfrequenz HF _{max}	43
6.1.6	Maximale Leistung W_{max}	43
6.2	Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit)	43
6.2.1	Verlauf der Laktatkonzentrationen	43
6.2.2	Verlauf des Respiratorischen Quotienten RQ	44
6.2.3	Verlauf der Leistung als Faktor von $W_{3,0\text{mmol/l}}$	45
6.2.4	Verlauf der Sauerstoffaufnahme VO_2	45
6.2.5	Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF	45
6.3	Test 3 (leistungs-konstante Einheit)	46
6.3.1	Verlauf der Laktatkonzentrationen	46
6.3.2	Verlauf des Respiratorischen Quotienten RQ	47
6.3.3	Verlauf der Herzfrequenz als Faktor von $HF_{3,0\text{mmol/l}}$	47
6.3.4	Verlauf der Sauerstoffaufnahme VO_2 als Faktor von $VO_{2\text{max}}$	48
6.3.5	Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF	48
7	DISKUSSION	49
7.1	Übersicht	49
7.2	Maximalwerte von VO_2 , Herzfrequenz und Leistung	50
7.3	$HF_{3,0\text{mmol/l}}$, $W_{3,0\text{mmol/l}}$ und Laktatkonzentrationen	50
7.4	Respiratorischer Quotient	52
7.5	Relative Leistung und relative Herzfrequenz	52
7.5.1	"cardiac drift" durch Hyperthermie und Dehydrierung	52
7.5.2	"cardiac drift" durch Abfall der Muskeleffizienz	53
7.6	Relative Sauerstoffaufnahme VO_2/kg	54
7.7	Schlussfolgerungen	55
8	ZUSAMMENFASSUNG	57
9	APPENDIX	59

9.1	Probandenfragebögen und Einverständniserklärungen	59
9.1.1	Einverständniserklärung zu Test 1	59
9.1.2	Einverständniserklärung zu Test 2 und 3	61
9.2	Tabellen mit Testdaten	63
9.2.1	zu Test 1 (Stufentest)	64
9.2.2	zu Test 2 (herzfrequenzkonstante Einheit)	76
9.2.3	zu Test 3 (leistungskonstante Einheit)	88
10	LITERATURVERZEICHNIS	100
	DANKSAGUNG	
	CURRICULUM VITAE	

1 EINLEITUNG

Radsport ist eine der faszinierendsten und zugleich anspruchsvollsten Sportarten überhaupt. Die Radwettbewerbe auf den verschiedenen Oberflächen und Profilen von Straße, Bahn und unwegsamem Gelände stellen höchste Anforderungen an die Athleten. Die Distanz der Wettkämpfe reicht von 200 m im Bahnsprint über Eintages- bis zu mehrwöchigen Etappenrennen von 4000 km Länge. Zudem ist Radsport ein wichtiger Bestandteil in kombinierten Ausdauersportarten wie Duathlon und Triathlon.

Jede dieser Disziplinen stellt an den Radrennsportler ihre besonderen Ansprüche, denen er mit seiner individuellen Begabung und entsprechendem Training versucht, gerecht zu werden. Erfolgreiche Fahrer zeichnen sich – abgesehen von ihrer großen taktischen Erfahrung und technisch ausgefeilten Sportgeräten – durch ihr körperliches Leistungsvermögen und ihre physiologischen Parameter aus. Durch diese Fähigkeiten nehmen sie unter allen Sportlern eine herausragende Stellung ein (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Ausgewählte physiologische Parameter als Beispiel der maximalen Leistungsfähigkeit von Weltklasseradfahrern (nach [23])

Physiologische Variablen		
maximale Leistung W_{max}	(W)	400 - 600
relative Maximalleistung/kg Körpergewicht	(W/kg)	6,5 - 8,0
maximale Sauerstoffaufnahme absolut $VO_{2,max}$	(l/min)	5,4 - 7,0
relative maximale Sauerstoffaufnahme $VO_{2,max}/kg$	(ml/kg/min)	75 - 90
Ökonomie	(W/l/min)	> 78

In den vergangenen Jahrzehnten wurden viele Untersuchungen über Biomechanik und Stoffwechsel während sportlicher Betätigung durchgeführt, um die Zusammenhänge zwischen Metabolismus und erbrachter Leistung zu verstehen und optimal zur Trainings- und Wettkampfplanung nutzbar zu machen. Tab. 2 skizziert anhand von ausgewählten Weltrekorden die Bedeutung der verschiedenen Stoffwechselwege bei unterschiedlichen Bahnradisziplinen.

Tab. 2: Ausgewählte Weltrekorde auf der Bahn mit entsprechenden Geschwindigkeiten und geschätzter Beitrag der einzelnen Energiesysteme zur erbrachten Leistung (nach [23]). Fußnoten: (1) aufgestellt in großer Höhe (2) aufgestellt in "Superman"-Sitzposition (diese Position ist inzwischen nicht mehr UCI-konform)

Disziplin	Weltrekord (min:sek)	Geschw. (km/h)	Beitrag der einzelnen Energiesysteme (%)		
			anaerob- alaktazid	anaerob- glykolytisch	aerob
200 m Sprint					
- Männer	00:09,865	72,985	40	55	5
- Frauen	00:10,831	66,476	40	55	5
Einzelzeitfahren					
- Männer (1000 m) ⁽¹⁾	00:58,875	61,146	10	40	50
- Frauen (500 m)	00:34,010	52,926	20	45	35
Einerverfolgung					
- Männer (4000 m) ^(1,2)	04:11,114	57,344	1	14	85
- Frauen (3000 m)	03:30,974	51,191	1	24	75
Mannschaftsverfolgung					
- Männer (4000 m)	03:57,185	60,712	1	24	75
Stundenweltrekord					
- Männer ⁽²⁾	60:00,000	56,375	1	4	95
- Frauen ⁽²⁾	60:00,000	48,159	1	4	95

In allen Ausdauersportarten sollte es daher Ziel der mit dem Athleten zusammenarbeitenden Betreuer sein – basierend auf den Leistungstests - entsprechende Vorgaben für den Sportler zu erstellen. Diese entsprechen seiner aktuellen und individuellen Leistungsfähigkeit. Als Trainingsvorgaben sollen durch sie die körperlichen Voraussetzungen für die anstehenden Wettkämpfe geschaffen werden. Im Rennen dienen die Vorgaben zu einer - soweit vorhersehbar - optimalen Strategie.

Mit der immer größeren Leistungsdichte der Athleten und den Fortschritten der Diagnostik in den vergangenen Jahrzehnten steigt die Bedeutung der bestmöglichen Vorbereitung. Auch die Ansprüche an die Leistungsdiagnostik nehmen dadurch zu. Inzwischen wird sie nicht nur von Topathleten und Amateuren genutzt, sondern auch Teilnehmer der Fitness-Bewegung greifen

verstärkt auf diese Möglichkeit zurück. Noch immer kommt dabei gerade dem Laktat als metabolischem Parameter eine große Bedeutung zu.

Ziel dieser Studie war die Darstellung und Interpretation des Stoffwechselgeschehens in zwei 100-minütigen Untersuchungseinheiten submaximaler Belastung, um die leistungstest-gestützte Trainings- und Wettkampfplanung zu optimieren. Basierend auf einem Stufenleistungstest wurden bei zwei Gruppen von Radsportlern unterschiedlichen Trainingszustandes metabolische und respiratorische Stoffwechselfparameter untersucht und so der Umfang der Vorhersagbarkeit von Ausdauerleistungen submaximaler Intensität aufgrund eines Leistungstests bewertet.

2 MUSKELSTOFFWECHSEL, ENERGIEBEREITSTELLUNG UND GRUNDLAGEN DER LAKTATBASIERTEN LEISTUNGSDIAGNOSTIK

2.1 Muskelstoffwechsel und Energiebereitstellung

2.1.1 Skelettmuskulatur: Aufbau und Funktion

Das ausführende Organsystem für die körperliche Arbeit ist die Skelettmuskulatur. Sie besteht aus länglichen, mehrkernigen Zellen, den quergestreiften Muskelfasern, die über Sehnen gelenkübergreifend an den Knochen des Skeletts ansetzen. Der Anteil dieses größten Organs des Menschen am Körpergewicht macht etwa 36–44% aus und ist geschlechts-, alters- und trainingsabhängig. In Ruhe verbraucht die Muskulatur etwa 15-20% der aufgenommenen Sauerstoffmenge, die unter Belastung bis auf 85% des gesamten Herzzeitvolumens ansteigen kann [27].

2.1.1.1 Motorische Einheit

Die physiologische Kontraktionseinheit der Muskulatur besteht jedoch nicht nur in der einzelnen Muskelfaser, sondern letztendlich in der sog. **motorischen Einheit**. Dies ist die funktionelle Einheit von Muskelfasern und dem sie innervierenden alpha-Motoneuron (Skelett-Motoneuron). Das Innervationsverhältnis, d.h. die Zahl der innervierten Muskelfasern pro Motoneuron, sowie die Zusammensetzung des Muskels aus den verschiedenen Muskelfasertypen (vgl. Tab. 3) ist vom Energiestoffwechsel und der Kontraktionskraft des jeweiligen Muskels abhängig. Es reicht von 5-10 Muskelfasern/Motoneuron (z.B. feinregulierte Augenmuskeln) bis zu 1000 Muskelfasern/Motoneuron bei grobmotorischen Muskeln mit großer Kraftentwicklung, wie es z.B. beim M. gluteus maximus als Bestandteil der Trittschlinge im Radsport der Fall ist [27]. Es ist wichtig, festzustellen, dass alle von einem alpha-Motoneuron innervierten Muskelfasern aus demselben Fasertyp bestehen, und dass die unterschiedliche Kraftentwicklung lediglich durch Rekrutierung unterschiedlich vieler motorischer Einheiten entsteht.

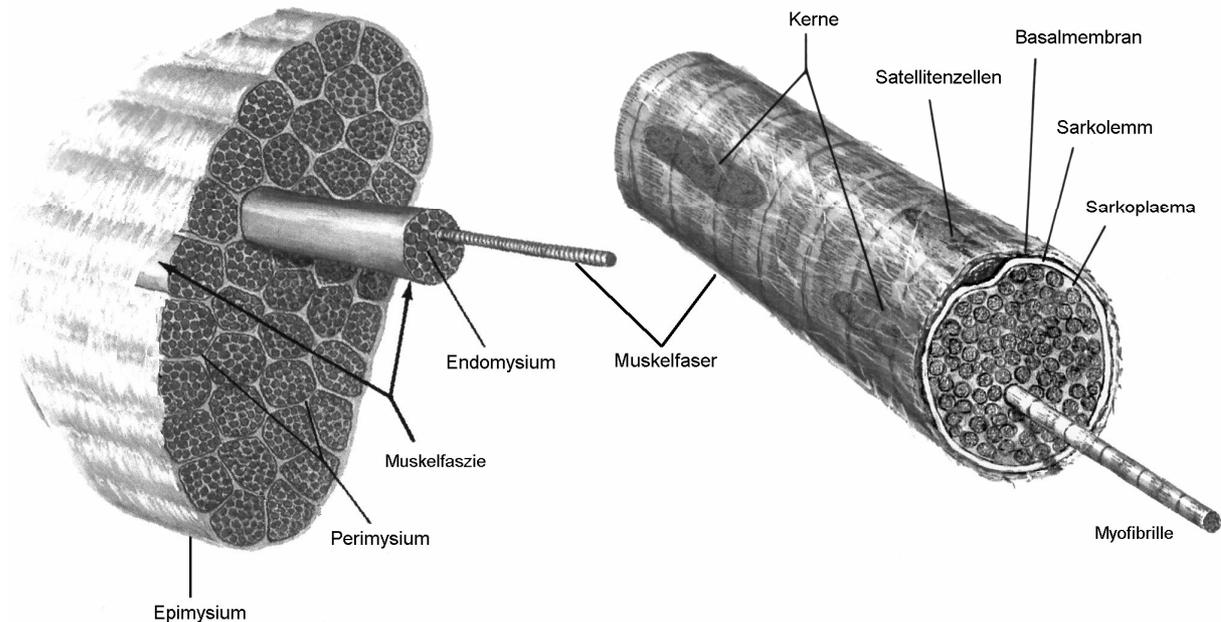


Abb. 1: Aufbau der Muskelfaser bestehend aus den kontraktilen Elementen Myofibrille und Aktin-/Myosin-Filamenten. Diese können sich gegeneinander verschieben und auf diese Weise durch multiple Einzelverkürzungen eine große mechanische Kontraktion bewirken (aus [41])

2.1.1.2 Muskelfaser-Typen

Nach der Charakteristik der jeweiligen motorischen Einheit werden **zwei Gruppen von Muskelfasern** unterschieden. Die Einteilung erfolgt in langsame (Typ I bzw. Typ S, "slow") und schnelle (Typ II bzw. Typ F, "fast") Einheiten. Bei letzteren differenziert die Wissenschaft noch in ermüdungsresistente (Typ FR, "fatigue-resistant") und schnellermüdbare (Typ FF, "fast-fatiguable") Fasern.

Zudem existiert eine Klassifizierung nach der **Muskelmorphologie** in rote und weiße Muskelfasern. Eine Übersicht über die Charakteristika der unterschiedlichen Muskelfasertypen gibt Tab. 3.

Fasern des roten Typs sind dank ihrer hohen Dichte an Mitochondrien, ihrem Reichtum am Sauerstoffspeicher Myoglobin sowie ihrem hohen Anteil an basischen Aminosäuren (v.a. Histidin als Puffer gegen Übersäuerung) für Dauerleistungen prädestiniert [41].

Dabei weist der langsam-rote **Typ I (Typ S)** die geringste Ermüdbarkeit auf. Seine Rekrutierungsschwelle ist gering, d.h. bei Muskularbeit wird er als erster aktiviert.

Tonische Entladungen und ein hoher oxidativer Metabolismus ("oxidativer Fasertyp") sowie eine geringe glykolytische Enzym- und Myosin-ATPase-Aktivität stellen als Parameter der aeroben Energiegewinnung die optimalen Voraussetzungen für statische Haltearbeit und tonische Ausdauerleistung dar.

Tab. 3: Ausgewählte Eigenschaften motorischer Einheiten und Muskelfasertypen mit den zugehörigen alpha-Motoneuronen (nach [27, 41])

Histochemie bzw. Motorische Einheit	Typ I bzw. Typ S	Typ IIa bzw. Typ FR	Typ IIb bzw. Typ FF
Charakteristik	langsam ("slow")	schnell ("fast")	
Morphologie	"roter Typ"		"weißer Typ"
Ermüdbarkeit	sehr gering	gering	groß
Myosin-ATPase	niedrig	hoch	hoch
glykolyt. Enzyme	niedrig	hoch	hoch
oxid. Metabolismus	hoch	mittelhoch	gering
Hauptstoffwechsel	aerob	aerob/anaerob	anaerob
alpha-Motoneurone:			
Rekrutierungsschwelle	niedrig	mittel	hoch
Entladung	tonisch	tonisch/phasisch	phasisch

Der ebenfalls zu den roten Fasern gehörige **Typ IIa (Typ FR)** verfügt über einen gemischt aerob-anaeroben Stoffwechsel mit immer noch geringer Ermüdbarkeit, jedoch mit hohen Aktivitäten sowohl des glykolytischen als auch des oxidativen Metabolismus. Es gibt Hinweise, dass letzterer sogar die oxidative Kapazität der Typ I-Fasern übertrifft [32]. Mit einer mittleren Rekrutierungsschwelle und phasisch-tonischen Grundeigenschaften stellt er den ermüdungsresistenten, schnell-roten Intermediärtyp als Mittelstellung zwischen rein aeroben (Typ I) und rein anaeroben Muskelfasern (Typ IIb) dar. Zusammen mit Muskelfasern des Typs IIb bildet der Typ IIa die Gruppe der sog. glykolytischen Fasern.

Die schnellermüdbaren, schnell-weißen Muskelfasern des **Typs IIb (Typ FF)** sind mit ihrem rein anaeroben Stoffwechsel auf große Kraftentwicklung bei kurzer, phasischer Leistungsdauer ausgelegt. Aufgrund ihrer hohen Rekrutierungsschwelle kommen sie erst bei großer Belastung, wie z.B. einem Sprint im Radsport, zum Einsatz. Sie besitzen die höchsten Aktivitäten der glykolytischen Enzyme und Myosin-ATPase

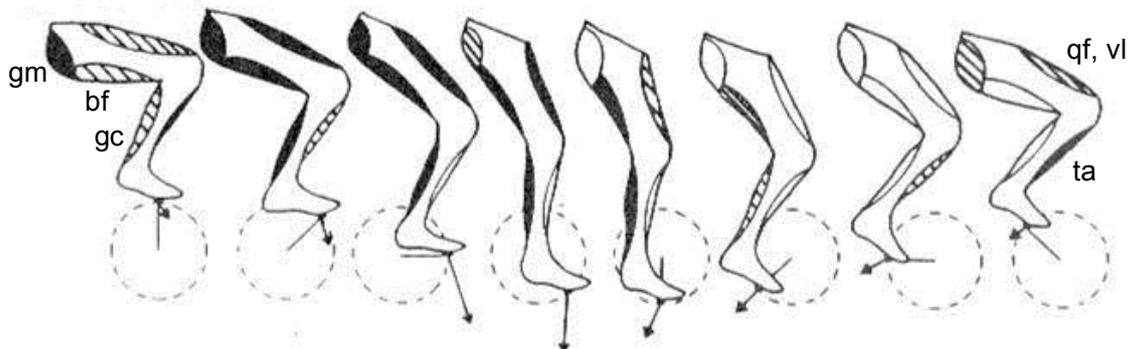
und weisen dementsprechend nur eine geringe Fähigkeit zum oxidativen Metabolismus auf.

Der langsamkontrahierende Muskelfasertyp I wird bei leichter und mittelschwerer Arbeit zuerst aktiviert. Auch unter schwererer Arbeit wird seine Aktivität aufrecht erhalten. Jedoch nimmt proportional zur ansteigenden Arbeitsintensität auch die Rekrutierung der schnellen motorischen Einheiten, nämlich des Typs IIa gefolgt vom Typ IIb, zu. Bei Ausdauerleistungen auf einem Niveau von mehr als 80% der maximalen Sauerstoffaufnahme ($VO_2\text{max}$) wird von einer Aktivierung aller genannten Muskelfasertypen ausgegangen. Gerade während längerdauernder submaximaler Ausdauerbelastung nimmt jedoch die Rekrutierung von Typ II-Fasern mit der Belastungsdauer zu. Sie ersetzen damit den Kraftbeitrag der Fasern des Typs I, deren Glykogenvorräte während der intensiven Belastung zur Neige gehen [9].

Die Verteilung der Fasertypen variiert nicht nur zwischen einzelnen Muskeln eines Individuums, wie bereits erläutert, sondern auch von Sportler zu Sportler abhängig von der dominierenden Belastungsart. Nach Gleeson [9] enthalten die Beine von Elite-Sprintern in der Leichtathletik zu ca. 60% Typ II-Fasern, während professionelle Marathonläufer bis zu 90% über Fasern des Typs I verfügen.

Coyle et al. [1] untersuchten im Radsport mittels muskelbiopischer Analyse einen der wichtigsten Muskeln der sog. Trittschlinge für die Tretphase im Radsport (vgl. Tab. 4). Ziel war die Feststellung von Unterschieden in der Muskelmorphologie und daraus resultierender Effekte für die Kraftentwicklung. Bei zwei Gruppen von Radrennfahrern unterschiedlichen Leistungsniveaus fand sich eine direkte Korrelation zwischen der Dauer der Rennsportkarriere und dem Anteil an Typ-I-Fasern im M. vastus lateralis. Zudem wies die Gruppe der Radrennfahrer auf nationalem Leistungsniveau eine größere Kraft im Tretzyklus auf als die Gruppe der Radrennfahrer auf regionalem Niveau. Unabhängig vom höheren Myoglobingehalt kann dies als Resultat des höheren Anteils an Typ I-Muskelfasern sowie der um 23% besseren Kapillarisation gewertet werden (vgl. Tab. 5). Dies ist ein Beispiel für die Trainingseffekte auf physiologische Adaptation und Leistungssteigerung in Ausdauersportarten.

Tab. 4 / Abb. 2: An der Tretbewegung im Radsport beteiligte Muskeln, sog. Trittschlinge. Im jeweiligen Tretzyklus aktivierte Muskeln sind schwarz gekennzeichnet (nach [13])



Funktion	Flexion (Beugung) (Zugphase)	Extension (Streckung) (Tretphase)
Oberschenkel	M. rectus femoris (nicht in Abb.) M. iliopsoas (nicht in Abb.)	M. gluteus maximus (gm) M. biceps femoris (bf)
Unterschenkel	M. gastrocnemius (gc) M. biceps femoris (bf)	M. quadriceps femoris (qf) M. vastus lateralis (vl)
Fuß	M. tibialis anterior (ta)	M. gastrocnemius (gc)

Tab. 5: Unterschiede in Muskelhistochemie und Myoglobin in zwei Gruppen von Radrennfahrern unterschiedlicher Leistungsklassen anhand einer Biopsie aus dem M. vastus lateralis, einem der wichtigsten Muskeln der Tretphase im Radsport. Angabe der Myoglobin-Konzentration relativ zur Muskelprotein-Konzentration ($g \cdot kg^{-1} \cdot p$) (nach [1])

		Radrennfahrer auf nationalem Niveau		Radrennfahrer auf regionalem Niveau	
		Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Fasertyp (%)	I	66,5	±3,7	52,9	±5,7
	Ila	32,8	±3,6	41,5	±4,6
	Ilb	0,7	±0,7	5,1	±1,9
Faserquerschnitt (μm^2)		6406	±470	7104	±615
Kapillarisierung	Kapillaren/Faser	2,90	±0,15	2,64	±0,16
	Kapillaren/mm²	464	±25	377	±22
Myoglobin ($g \cdot kg^{-1} \cdot p$)		33,5	±8,9	26,0	±1,4

2.1.2 Die anaerob-alkalotazide Phase der Energiebereitstellung: ATP- und KP-Spaltung

Energiegrundlage für alle Zellen im Organismus ist Adenosintriphosphat (ATP). Auch alle energieabhängigen Prozesse in der Muskelzelle, seien es die Aufrechterhaltung der Ionengradienten zwischen den Zellkompartimenten oder die kontraktile Mechanismen, werden durch die Hydrolyse von ATP zu Adenosindiphosphat (ADP) und einer anorganischen Phosphatgruppe (P_i) angetrieben:



Den limitierenden Einfluss von ATP auf die Ausdauerleistung verdeutlicht die Definition der Ausdauer als Fähigkeit, bei Muskeltätigkeit verbrauchtes ATP fortlaufend zu resynthetisieren [14].

Voraussetzung für die Muskelkontraktion ist die Bindung von ATP an die Köpfe des Myosinmoleküls. Nach elektrischer Erregung durch ein alpha-Motoneuron werden aus dem sarkoplasmatischen Retikulum der Muskelfaser Kalziumionen freigesetzt, die zu einer Veränderung der räumlichen Struktur des Tropomyosins führen und die Bindungsstellen für Myosin freigeben. Durch ATP-Spaltung zu ADP und Phosphat (P_i) sowie die dabei freiwerdende Energie erfolgt die sog. Ruderbewegung der Myosinköpfchen mit einer Verkürzung der Muskelfaser (vgl. Abb. 1).

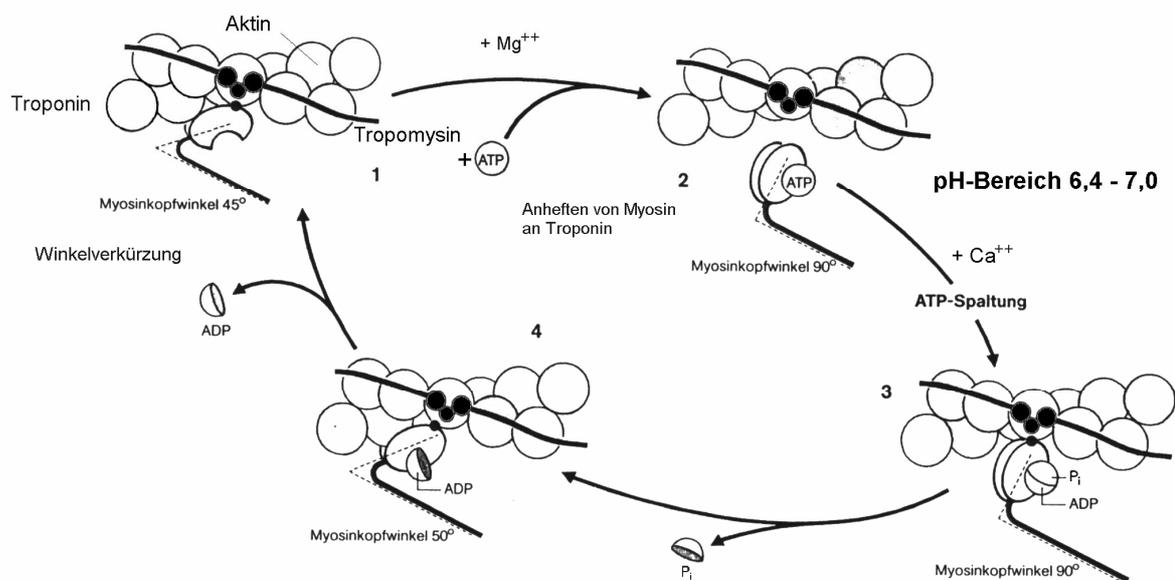


Abb. 3: Biochemische Vorgänge während der Muskelkontraktion (nach [27]).

Von großer Bedeutung für die Leistungsphysiologie ist neben der essentiellen guten Kapillarisation der Muskulatur (vgl. Abb. 4), die eine Minderperfusion der Muskelfasern mit Sauerstoff angesichts der großen einwirkenden Kräfte während der Kontraktion minimiert, auch die Abhängigkeit der zellulären Mechanismen vom umgebenden Milieu. Sowohl die Anlagerung von Kalziumionen an Troponin als auch die Aktivität der ATP-spaltenden ATPase und der Enzyme in anaeroben Teil der Glykolyse und Lipolyse sind abhängig vom jeweils herrschenden pH-Wert. Bei einem Abfall des pH-Wertes in der Muskelzelle unter einen Wert von 6,3 durch Übersäuerung werden diese Vorgänge blockiert und eine Kontraktionsfähigkeit der Muskelfaser limitiert [41].

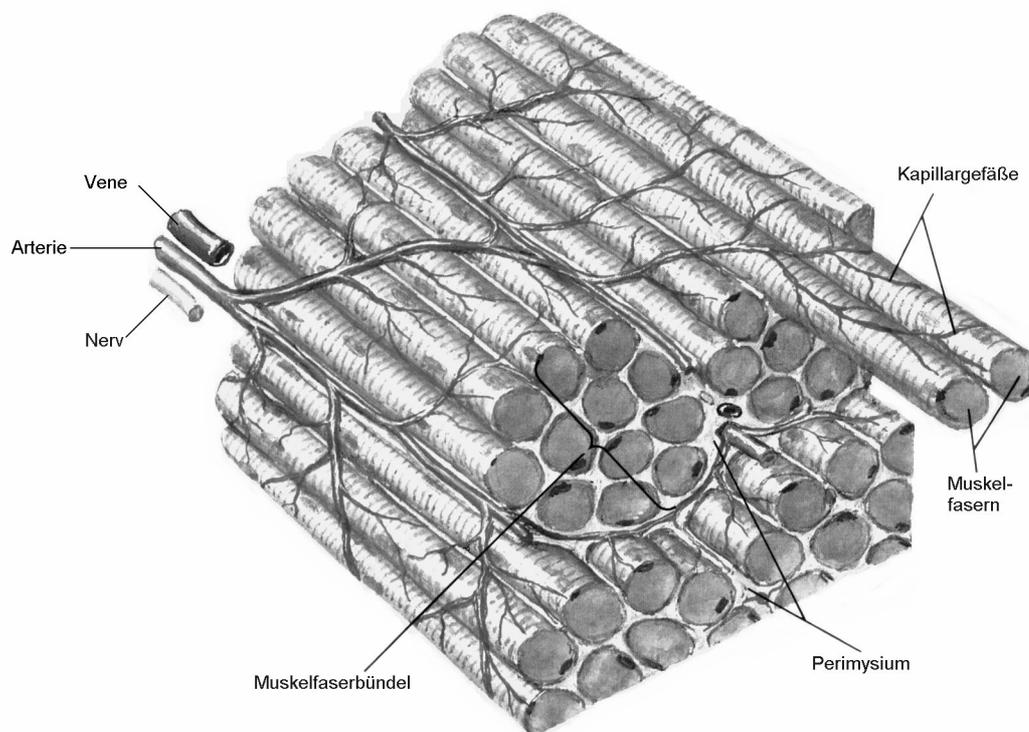


Abb. 4: Gefäßversorgung und Kapillarisation der Muskulatur (aus [41]).

Jedoch ist in den Muskelzellen mit ca. 5 mmol/kg (etwa 3,4 g) nur eine geringe Menge an ATP vorhanden, die keineswegs eine Energiereserve darstellt. Deshalb ist eine schnelle ATP-Resynthese durch den Transfer einer Phosphatgruppe von Kreatinphosphat (KP), der zweiten Energiequelle der Muskulatur, auf ADP notwendig:



KP ist in der Muskelzelle in etwa in der drei- bis vierfachen Konzentration von ATP vorhanden [32]. Jedoch fällt die KP-Konzentration bereits nach wenigen Sekunden maximaler Belastung durch die gerade genannte Kreatinkinase-Reaktion auf nahezu Null ab. Diese beiden sehr limitierten Mechanismen der schnellen Energiebereitstellung werden in der Trainingswissenschaft unter dem Begriff der **anaerob-alkalischen Phase** zusammengefasst, da sie keinen Sauerstoff bedürfen und auch kein Laktat produzieren.

Um eine bestimmte Leistung über längere Zeit erbringen zu können, sind entsprechende Mengen an ATP essentiell. Zudem ist eine ATP-Konzentration in der Zelle von mindestens 40% des Ruhewertes nötig. Unter dieser Konzentration können wesentliche Funktionsmechanismen der Zellen, vornehmlich die Ausbildung des Membranpotentials durch Ionengradienten, nicht mehr in ausreichendem Maße stattfinden [14]. Alternative Mechanismen der Energielieferung müssen somit unter Ausdauerbelastung nach Erschöpfung der ATP- und KP-Reserven einspringen.

Nachfolgend wird eine Übersicht über die verschiedenen weiteren Mechanismen der Energiebereitstellung im Muskelstoffwechsel unter Ausdauerbelastung, nämlich aus Kohlenhydraten (aerob und anaerob), Fetten und Proteinen, gegeben.

2.1.3 Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten

Anders als die geringe Menge an KP stellen die Glykogenspeicher des Organismus ein großes und sehr variables Energiedepot dar. Nach ihrer Aufnahme werden Kohlenhydrate – nach teilweiser Umwandlung und Speicherung in der Leber – als Glukose insulinabhängig in die Muskelzellen transportiert. Die Speicherung erfolgt am Ort des Erfolgsorgans in Form von Glykogen, einem stark verzweigten Amylopektinmolekül. In der Regel macht dieses Reservekohlenhydrat einen Anteil von ca. 14-18 g pro kg Skelettmuskel aus. Zusätzlich zur im Skelettmuskel selbst gespeicherten Menge an Glykogen kann die arbeitende Muskulatur zudem auf Blutglukose zurückgreifen, die aus den Leberspeichern gespeist wird. Insgesamt betragen aber die Leberspeicher mit insgesamt etwa 80 g Glykogen deutlich weniger als die Glykogenspeicher der Skelettmuskulatur (vgl. Tab. 6) [32].

Tab. 6: Durchschnittliche Energiespeicher beim 70 kg schweren Mann (15% Körperfettanteil). Die Zahlen für Blutglukose enthalten die Glukosemenge der Extrazellulärflüssigkeit. Nur ein kleiner Teil des angegebenen Proteins ist während der Ausdauerbelastung verfügbar [32].

	Gewicht (g)	Energie (kJ)
Leberglykogen	80	1280
Muskelglykogen	350	5600
Blutglukose	10	160
Protein	12 000	204 000
Fett	10 500	388 500

Bis zur Entstehung von CO_2 und H_2O aus einem Molekül Glukose ist das Durchlaufen von insgesamt vier Stoffwechselwegen notwendig:

- 1. Glykolyse:** Abbau der Glukose zu Pyruvat (ggf. mit dem Umweg der Laktatbildung)
- 2. Pyruvatdehydrogenase-Reaktion:** Umwandlung von Pyruvat zu Acetyl-CoA
- 3. Zitratzyklus:** Abbau von Acetyl-CoA zu CO_2
- 4. Atmungskette:** Verbrennung der Wasserstoffatome aus dem Kohlenhydratabbau.

Auf rein aerobem Wege, dem sog. **aerob-alaktazidem Abbau**, werden so aus einem Molekül Glukose **36 bzw. 38 Mol ATP** gewonnen.

2.1.3.1 Überblick über die aerobe und anaerobe Glykolyse

Zur Energiebereitstellung werden aus dem in der Muskelzelle sowie dem in der Leber gespeichertem Glykogen einzelne Glukosemoleküle abgespalten. Im Zytosol läuft der rein anaerobe Teil der Glykolyse ab. In einem ersten Schritt wird Glukose durch das Enzym Hexokinase (in der Leber: Glukokinase) ATP-abhängig phosphoryliert. Das entstehende Molekül Glukose-6-Phosphat kann aufgrund der fehlenden Eigenschaft, Zellmembranen zu überwinden, die Muskelzelle nicht mehr verlassen. Die weiteren Schritte der Glykolyse-Reaktion sind Abb. 5 zu entnehmen.

Die Nettobilanz der **aeroben Glykolyse** beträgt pro Mol Glukose 2 Mol Pyruvat sowie 2 Mol ATP und 2 Mol $\text{NADH}+\text{H}^+$:



Unter Abwesenheit von Sauerstoff besteht die Möglichkeit zur Energiebereitstellung über die **anaerobe Glykolyse**, den **anaerob-laktaziden Stoffwechselweg**. Hier unterscheidet sich die Energiegewinnung aus Kohlenhydraten von der aus Fetten und Proteinen. Die anaerobe Glykolyse stellt den einzigen Mechanismus zur Aufrechterhaltung der Energiebereitstellung in Sauerstoffmangelsituationen dar. ATP wird dabei aus ADP und Phosphat gewonnen. Durch Bildung von Laktat aus Pyruvat mittels der Laktat-Dehydrogenase wird hierbei NAD^+ wieder regeneriert und erhält damit die Aldolasereaktion und Glykolyse aufrecht.



Die Energiebilanz der anaeroben Glykolyse ist mit einem Nettogewinn von nur 2 Mol ATP pro Mol Glukose deutlich geringer als die der aeroben Glykolyse (Nettogewinn von 8 Mol ATP).

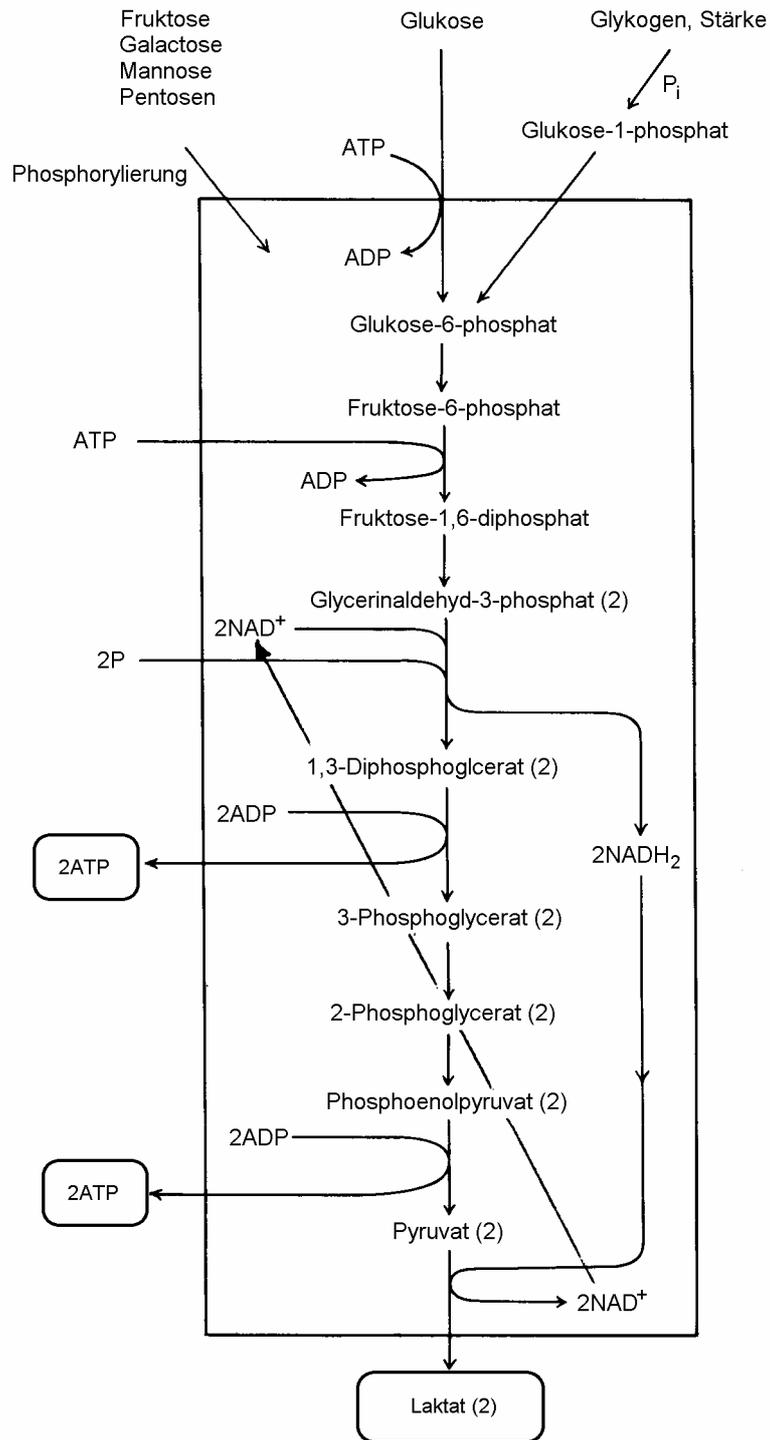


Abb. 5: Verlauf der aeroben und anaeroben Glykolyse im Zytosol der Zelle. Endprodukt des aeroben Abbaus sind 2 Mol Pyruvat. Laktat stellt eine Sackgasse des anaeroben Stoffwechsels dar. Es ist erkennbar, dass NADH₂ bei der Reduktion

von Pyruvat zu Laktat zu NAD^+ oxidiert werden muss, damit die Aldolasereaktion und Glykolyse aufrecht erhalten werden können [41].

Der Abbau des gebildeten Laktats erfolgt – nach Transport über das Blut – unter besserer Sauerstoffversorgung in Leber, Herzmuskel oder ruhenden Skelettmuskeln nach Rückoxidation zu Pyruvat. Über den Cori-Zyklus kann Glukose wieder aufgebaut werden bzw. die Endoxidation mittels der aeroben Glykolyse in den Mitochondrien erfolgen.

2.1.3.2 Pyruvatdehydrogenase-Reaktion

Unter **aeroben Bedingungen** wird Pyruvat durch das Enzym Pyruvatdehydrogenase in Azetyl-Coenzym A (Azetyl-CoA) verstoffwechselt. Es kann in der Folge in den Zitratzyklus eintreten. Bei dieser oxidativen Decarboxylierung entsteht zudem CO_2 sowie $\text{NADH}+\text{H}^+$, das im weiteren Verlauf über die Atmungskette als Energielieferant dient (Gewinnung von 3 Mol ATP durch Verbrennung der Wasserstoffatome).

Pyruvatdehydrogenase-Reaktion: **Pyruvat \rightarrow Azetyl-CoA + CO_2 + $\text{NADH}+\text{H}^+$**

2.1.3.3 Zitratzyklus (Krebszyklus)

Der Substratumsatz im Zitratzyklus, einem Fließgleichgewicht, wird vor allem durch die mitochondriale ATP-Konzentration bestimmt [41]. Ihr Absinken führt zur Stimulation des Zitratzyklus. Er stellt zusammen mit der benachbarten Atmungskette den gemeinsamen Stoffwechselweg für die Endoxidation von Produkten des Kohlenhydrat-, Fett- und Proteinstoffwechsels dar, die durch die Pyruvatdehydrogenase-Reaktion sowie Azetyl-CoA für den Zitratzyklus vorbereitet wurden (vgl. Abb. 6).

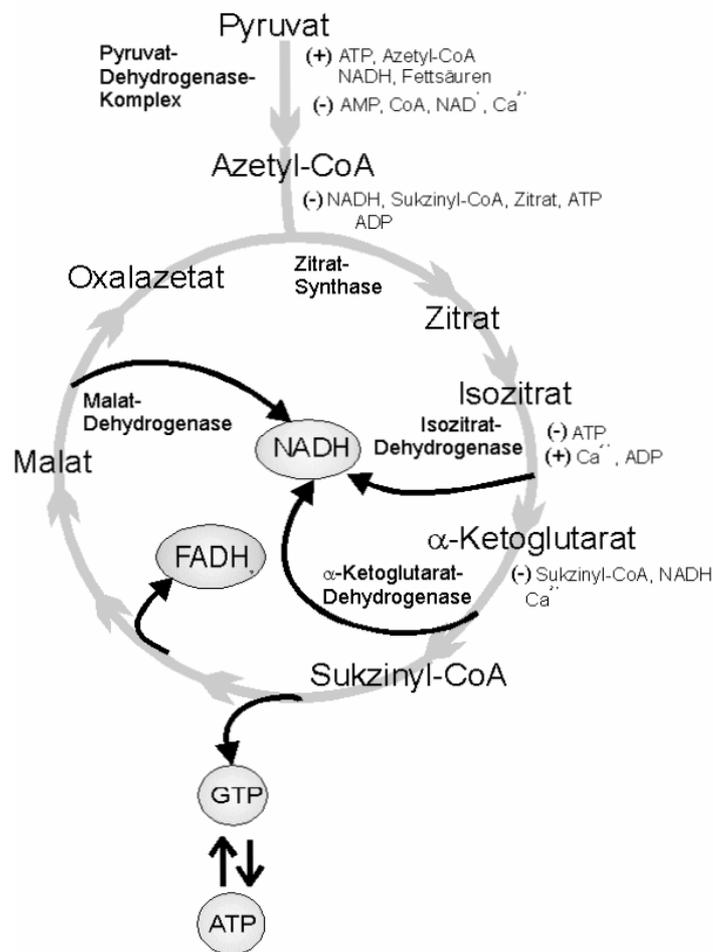


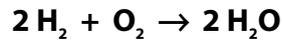
Abb. 6: Überblick über den Zitratzyklus [41].

Durch oxidativen Abbau entsteht im Zitratzyklus pro Mol Azetyl-CoA direkt nur ein Mol ATP bzw. GTP. Jedoch liefern die gebildeten Reduktionsäquivalente, gebunden in 3 Mol NADH+H⁺ und 1 Mol FADH₂, in der nachgeschalteten Atmungskette durch Verbrennung nochmals ATP (3 Mol ATP pro Mol NADH+H⁺, 2 Mol ATP pro Mol FADH₂). Die Gesamtbilanz von Zitratzyklus und Atmungskette zusammen beträgt somit 12 Mol ATP pro Mol Azetyl-CoA.

2.1.3.4 Atmungskette

Die bereits angesprochene Energiegewinnung aus den Reduktionsäquivalenten NADH+H⁺ und FADH₂ geschieht in der Atmungskette. Wie auch die vorangegangenen Stoffwechselforgänge ist sie in den Mitochondrien der Zelle lokalisiert. Die dabei ablaufenden Reaktionen können kurz in der sog.

Knallgasreaktion, der Verbrennung von Wasserstoff durch Sauerstoff zu Wasser, zusammengefasst werden:



In entschärfter Form wird die durch den Elektronenfluss über Enzymsysteme freigesetzte Energie zum Aufbau von ATP genutzt (vgl. hierzu entsprechende Lehrbücher der Biochemie).

2.1.4 Energiebereitstellung aus Fetten

Die Fettspeicher des Menschen befinden sich, wie die Kohlenhydratspeicher, sowohl in der Muskulatur selbst als auch extramuskulär (v.a. Unterhautfettgewebe und abdominelle Fettdepots). Sie sind je nach Körperfettanteil des Athleten von sehr variabler Größe, stellen jedoch mit einem Brennwert von 37 kJ/g Fett (vgl. Tab. 6) ein außerordentlich energiereiches Substrat für den Stoffwechsel dar (im Vergleich: 1 Gramm Kohlenhydrate besitzt lediglich einen Brennwert von 16 kJ). Bei körperlicher Belastung steht das in der Muskelzelle selbst gespeicherte Fett bereits nach 15-20 Minuten als Energielieferant zur Verfügung, während das für Fett aus extramuskulären Speichern erst nach ca. 40-45 Minuten der Fall ist [41].

Der Abbau von Fettsäuren zu Kohlendioxid und Wasser dient, wie auch der Kohlenhydrat-Abbau, der ATP-Bildung. Der erste Schritt besteht in der Aktivierung und nachfolgenden Zerlegung von Fettsäuren. Diese ist wiederum in den Mitochondrien lokalisiert. Produkt dieser sogenannten β -Oxidation (oder Lipolyse) ist nicht direkt ATP, sondern Azetyl-CoA sowie FADH_2 und $\text{NADH}+\text{H}^+$ (vgl. Abb. 7).

Azetyl-CoA wird weiter über den Zitratzyklus und die Atmungskette verstoffwechselt (vgl. Kap. 2.1.3.3 und 2.1.3.4). Die in der β -Oxidation anfallenden Produkte FADH_2 und $\text{NADH}+\text{H}^+$ werden ebenfalls in der Atmungskette oxidiert, um als Coenzyme weiterhin dem Abbau aktivierter Fettsäuren zur Verfügung zu stehen. Dies macht deutlich, dass der Fettsäureabbau nur unter aeroben Bedingungen und nicht, wie der Kohlenhydratabbau, auch anaerob unter Sauerstoffmangel ablaufen kann.

Die Energiebilanz des Fettstoffwechsels – nach Durchlaufen der Lipolyse, des Zitratzyklus und der Atmungskette – beträgt jeweils 12 Mol ATP pro Mol Azetyl-CoA

sowie je 3 Mol ATP pro gebildetem $\text{NADH} + \text{H}^+$ und je 2 Mol ATP pro gebildetem FADH_2 .

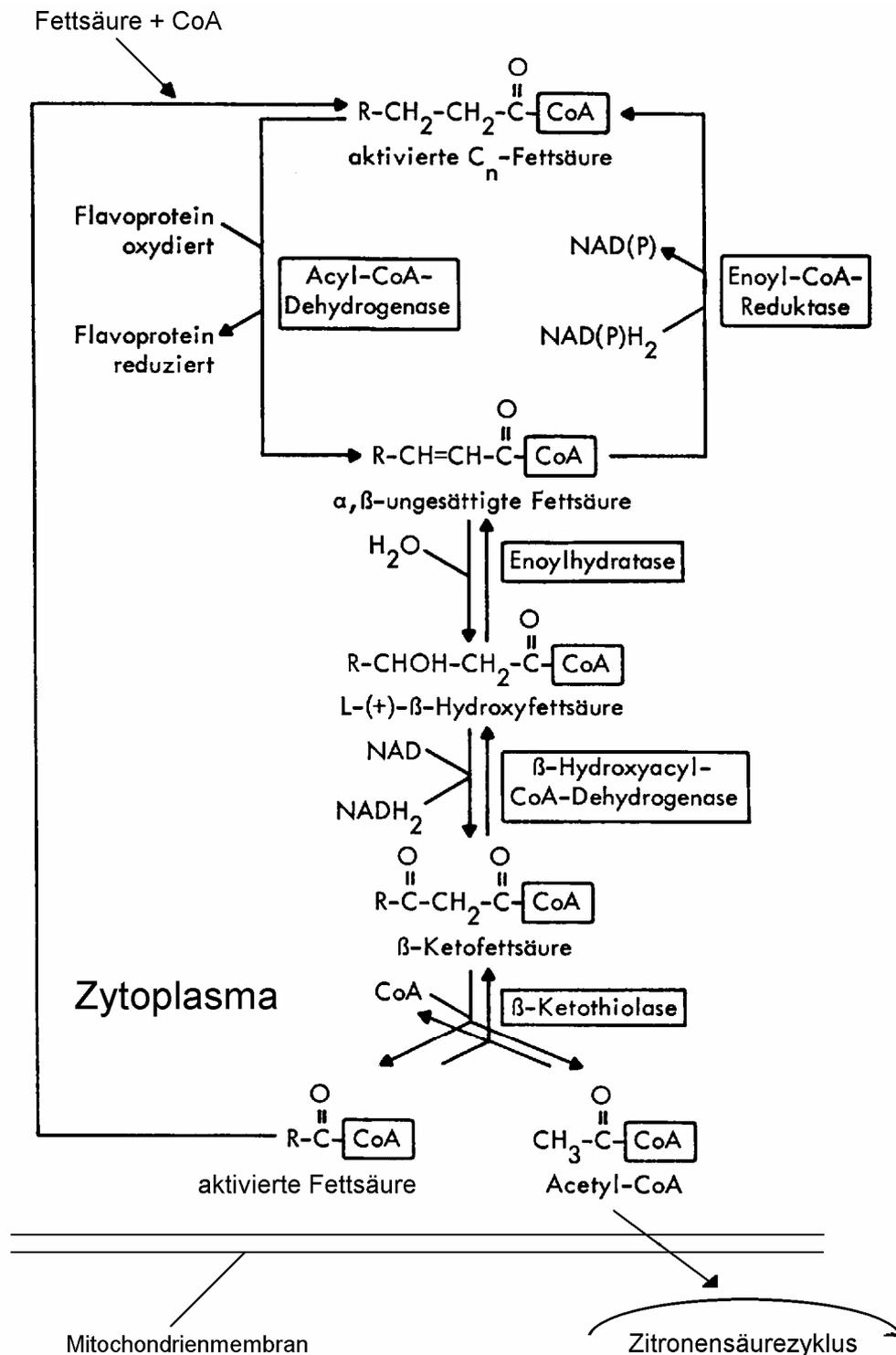


Abb. 7: Überblick über die β -Oxidation (Lipolyse) und Verlängerung der Fettsäuren durch Umkehr der β -Oxidation [41].

2.1.5 Energiebereitstellung aus Proteinen

Die Hauptfunktionen von Proteinen ("Eiweiß") bestehen in strukturellen (z.B. Aufbau der Muskelfibrillen) oder funktionell-regulatorischen Aufgaben (z.B. Enzyme und Hormone). Trotz der großen Proteindepots im menschlichen Körper (vgl. Tab. 6) konnte nachgewiesen werden, dass der Beitrag von Proteinen zum gesamten Energiebedarf während einer Ausdauerleistung nur etwa 3-6% beträgt [32]. Dieser Anteil variiert je nach Art der Belastung und abhängig von der Diät des Athleten.

Die 20 Aminosäuren, Grundbausteine der Proteine, können hinsichtlich ihrer Funktion und Endprodukte in drei Gruppen eingeteilt werden:

1. ketoplastische Aminosäuren:

Bei ihrem Abbau entstehen Acetyl-CoA oder dessen Ketonkörper-Vorstufe Acetoacetat. Beide können in den Zitratzyklus eingeschleust werden, bilden aber keine Grundlage zur Neusynthese von Glukose (sogenannte Glukoneogenese).

2. glukoplastische Aminosäuren:

Bei ihrem Abbau entsteht ein Zwischenprodukt des Zitratzyklus oder Pyruvat. Hierbei ist nicht nur der Abbau im Rahmen des Zitratzyklus möglich, sondern auch ein Aufbau von Glukose.

3. gemischt-plastische Aminosäuren:

Bei ihrem Abbau entstehen sowohl keto- als auch glukoplastische Produkte.

Nach Ende einer Trainingseinheit nehmen Proteinabbau, aber auch Proteinsynthese zu. Durch Ausdauertraining und entsprechende sportspezifische Diät resultiert insgesamt eine anabole Stoffwechsellage. Hierbei überwiegt die Proteinsynthese, und benötigte Strukturen werden aufgebaut. In jüngster Zeit konnte gezeigt werden, dass ein optimaler Effekt durch die Zufuhr von essentiellen Aminosäuren (ca. 7 g essentielle Aminosäuren oder ca. 20 g qualitativ hochwertiges Protein) kombiniert mit ca. 50-100 g einer Kohlenhydratquelle noch vor der Belastung erreicht wird. Auf die Muskulatur bezogen bedeutet das eine Zunahme des Querschnitts jeder Muskelfaser (sog. Hypertrophie) mit einem entsprechenden Kraftzuwachs. Durch Ausdauertraining ist jedoch kein großer Zuwachs an Muskelmasse zu erwarten. Statt dessen ist sogar eine Abnahme des Muskelproteinanteils insgesamt möglich. Als Anpassung an wiederholte Belastungsreize setzt eine schnellere Proteinantwort ein [32].

2.1.6 Regulation der Energiebereitstellung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass ATP die wesentliche Grundlage des Energiestoffwechsels der Zelle bildet.

Tab. 7: Maximale Raten der ATP-Resynthese [32]

Hydrolyse von Kreatinphosphat	440 $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$ / g Muskulatur
Bildung von Laktat	180 $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$ / g Muskulatur
Oxidation von Kohlenhydraten	40 $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$ / g Muskulatur
Oxidation von Fetten	20 $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$ / g Muskulatur

Tab. 8: Das Zusammenspiel der verschiedenen Energiequellen, die der Muskulatur zur Verfügung stehen, erlaubt die optimale Kombination von Leistung und Ausdauer. Die Kapazität des oxidativen Metabolismus ist unlimitiert, da das System kontinuierlich auch während der Ausdauerbelastung nachgefüllt wird [32].

	Kapazität (J/kg)	Leistung (W/kg)
ATP-/KP-Hydrolyse	400	800
Laktatbildung	1000	325
Oxidativer Metabolismus		200

Die **ATP-/KP-Hydrolyse** stellt aufgrund ihrer hohen Resyntheserate und Leistung von 800 W/kg das primäre Substrat für Kurzzeitbelastungen dar (Tab. 7). Ihre Kapazität von nur 400 J/kg ist jedoch bereits nach wenigen Sekunden Maximalbelastung erschöpft (Tab. 8).

Die **Oxidation von Kohlenhydraten und Fetten** ist mit einer ATP-Resyntheserate von 40 bzw. 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$ / g Muskulatur prädestiniert für die Energiebereitstellung bei prolongierter Belastung. Zudem wird das System des oxidativen Metabolismus während Ausdauerbelastung kontinuierlich gespeist. Die im Vergleich zur kurzzeitig hohen Leistung durch ATP-/KP-Hydrolyse nur geringe Leistung des oxidativen Metabolismus von 200 W/kg ist daher nicht limitiert.

Die **Laktatbildung** nimmt mit einer maximalen ATP-Resyntheserate von 180 $\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$ / g Muskulatur sowie einer Kapazität von 100 J/kg und einer Leistung von 326 W/kg eine Mittelstellung zwischen der anaeroben-alkalotischen ATP-/KP-

Hydrolyse und der aerob-alkalotaziden Glykolyse und Lipolyse ein. Allein durch den anaerob-alkalotaziden Stoffwechsel ist es möglich, Ausdauerleistungen unter Sauerstoffmangel zu vollbringen.

Zur grafischen Verdeutlichung der verschiedenen Phasen der Substratbereitstellung während Belastung vgl. Abb. 8. Man beachte den abnehmenden Beitrag des anaeroben Stoffwechsels (sowohl des anaerob-alkalotaziden als auch des anaerob-alkalotaziden Anteils) mit zunehmender Belastungsdauer und die korrespondierende Zunahme des aerob-alkalotaziden Stoffwechsels (Tab. 9).

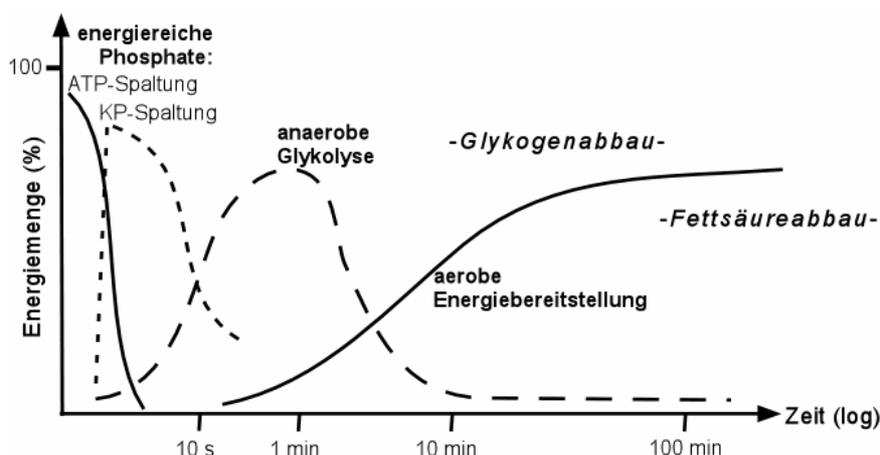


Abb. 8: Zeitlicher Überblick über die verschiedenen Phasen der Energiebereitstellung bei zunehmender Belastungsdauer (nach [25])

Tab. 9: Anteile von anaerober und aerober Energiebereitstellung bei maximaler Intensität unterschiedlicher Belastungsdauer [32]

Belastungsdauer	% anaerob (anaerob-alkalotazid und anaerob-laktazid)	% aerob (aerob-alkalotazider Stoffwechsel)
10 s	90	10
60 s	70	30
5 min	30	70
30 min	5	95
60 min	2	98
120 min	1	99

2.2 Kompensationsmechanismen und Trainingseffekte aufgrund von körperlicher Belastung

Unbestritten ist, dass die körperliche Leistung im Ausdauersportbereich vor allem durch die Protonenkonzentration, also die Übersäuerung der arbeitenden Muskulatur begrenzt wird [40]. Von entscheidender Bedeutung sind somit die Kompensationsmechanismen, die dazu führen, dass der Athlet über einen möglichst langen Zeitraum Leistung über den aeroben Stoffwechsel erbringt bzw. den anaeroben Stoffwechsel kompensieren kann.

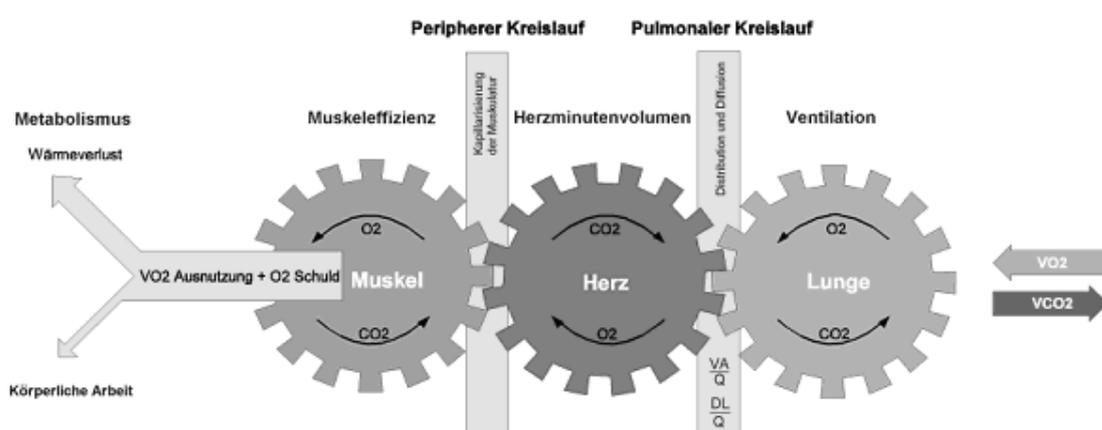


Abb. 9: Schema des Ineinandergreifens der physiologischen Systeme und Mechanismen während körperlicher Belastung (nach [48] mod. von Schardt F. [41])

Diese Kompensationsmechanismen betreffen mit Ventilation, Herz, Muskulatur sowie Metabolismus alle miteinander verwobenen physiologischen Systeme (vgl. Abb. 9) und werden durch körperliche Belastung wie Training und Wettkampftätigkeiten stimuliert (vgl. Tab. 10).

Tab. 10: Kompensationsmechanismen und Trainingseffekte aufgrund von körperlicher Belastung [40]

1. Muskelzelle:

- biochemisch:
 - a. Zunahme der Enzymaktivitäten in Zitratzyklus und Atmungskette durch Training
 - b. verstärkte Lipolyse während körperlicher Belastung und auch durch Training

	c. mögliche Zunahme der Glycerin-3-phosphat- und Malat-Aspartat-Shuttles durch Training
	d. mögliche Zunahme intrazellulärer Puffer (z.B. Anserine, Carnosine, Myoglobin, Mosin) durch Training
	e. $\text{NADH}_2 + \text{NADP}$, $\text{NAD} + \text{NADPH}_2$
	f. Zunahme von Metaboliten mit hohem pK-Wert (ADP, Kreatinin, Phosphate, AMP, IMP)
	g. verbesserte Laktatutilisation besonders in der nicht-arbeitenden Muskulatur
	h. Reduktion von Laktat und Pyruvat durch Alanin-Transaminase in der Muskulatur
- morphologisch:	a. Zunahme der Anzahl an Mitochondrien mit vergrößerter Innenfläche
	b. vermehrte Einlagerung von Neutralfett

2. Herz und Kreislauf:

- Zunahme Herzminutenvolumen (HMV)
 - verbesserte Kapillarisation der Muskulatur
 - Haldane-Effekt im desoxygenierten Blut
 - Bohr-Effekt bei Übersäuerung (z.B. Laktazidose) mit vermehrter O_2 -Abgabe von Hämoglobin
-

3. Ventilation:

- vermehrte CO_2 -Abgabe durch verbesserte alveoläre Ventilation
 - damit verbesserte Oxygenierung des Blutes
-

2.2.1 Kompensationsmechanismen in der Muskelzelle

Durch Ausdauertraining ist es möglich, die Konzentrationen bestimmter Enzyme von Zitratzyklus und Atmungskette um das 1,5- bis 2-fache pro Gramm Muskulatur zu erhöhen [40]. Die Kapazität des aeroben Stoffwechsels nimmt damit deutlich zu. Zudem wird aufgrund von Ausdauertraining die Rate der Lipolyse verstärkt, die nicht zur Laktatbildung beiträgt.

Das im anaerob-laktaziden Stoffwechsel gebildete Laktat kann über verschiedene Puffermechanismen kompensiert werden, die ebenfalls durch Training beeinflussbar sind:

- Höhere Konzentrationen an Glycerin-3-phosphat- und Malat-Aspartat-Shuttles ermöglichen eine höhere Übertragungsrate von

Reduktionsäquivalenten durch die Mitochondrienmembran auf die Atmungskette.

- Eine Zunahme intrazellulärer Puffer sowie von Metaboliten mit hohem pK-Wert gleicht die Säureäquivalente des Laktats aus.
- Eine Übertragung von Reduktionsäquivalenten von NADH_2 auf NADP ermöglicht weitere anabole Prozesse.
- Bei Trainierten ist ein besserer Laktatabbau möglich. Dies gilt sowohl für die arbeitende als auch für die nicht-arbeitende Muskulatur und besonders für den Herzmuskel.
- Laktat wird bei Ausdauersportlern in erhöhtem Umfang durch Alanintransaminase reduziert, die Pyruvat zu Alanin metabolisiert.

Morphologisch lässt sich in der ausdauertrainierten Muskulatur eine erhöhte Mitochondrienanzahl mit vergrößerter Innenfläche nachweisen. Eine vermehrte Einlagerung von Neutralfetten in die Muskelzellen korreliert mit der o.g. erhöhten Lipolyse-Rate.

Diese Mechanismen des Laktataustauschs und -abbaus sowie eine höhere Kapillardichte in der arbeitenden Muskulatur erhalten Kapazität und Ausdauerleistung unter hohen Intensitäten [33].

2.2.2 Kompensation durch Herz und Kreislauf

Die im Stoffwechsel anfallenden Metaboliten werden mit Hilfe des Herz-Kreislauf-Systems abtransportiert. Es stellt die Grundlage für die Zellatmung dar, da es die Zellen mit dem essentiellen Sauerstoff versorgt. Durch Training wird eine deutliche Erhöhung des Herzminutenvolumens und der Muskelkapillarisation beobachtet. Die Ausschöpfung des Blutsauerstoffgehaltes in der arbeitenden Muskulatur ist bei Sportlern besonders gut [40] und wird durch den Haldane-Effekt unterstützt. Zudem kommt es bei einem pH-Abfall unter Belastung aufgrund von Laktatbildung (sogenannte Laktazidose) zu weiteren Reaktionen des kardiovaskulären Systems:

- verstärkte Freisetzung von CO_2 und Kalium mit nachfolgender Vasodilatation,
- Aktivierung von zentraler und peripherer Zirkulation [24] und

- verstärkte Sauerstoffabgabe in der Peripherie (Bohr-Effekt) [40].

Dadurch wird mit zunehmender Übersäuerung das Angebot an Sauerstoff erhöht und ein aerober Metabolismus gefördert

2.2.3 Kompensation durch Ventilation

Die Ventilation dient während Belastung nicht nur der Sauerstoffaufnahme, sondern stellt mit der Abgabe von Kohlendioxid den wohl bedeutendsten Kompensationsmechanismus dar. Im Gegensatz zu den begrenzten und erschöpfbaren Mechanismen in Muskelzelle und Blut ist die Kompensationsfähigkeit der Ventilation unlimitiert. Aufgrund der durch Training verbesserten alveolären Ventilation erfolgt eine höhere CO₂-Abgabe und O₂-Aufnahme, was zu einer besseren Oxygenierung des Blutes beiträgt [40].

Bei Ausdauerbelastung ist eine zunehmende O₂-Aufnahme (VO₂) eng mit ebenfalls ansteigender CO₂-Abgabe (VCO₂) gekoppelt. Die Methode der Ergospirometrie lässt die Messung dieser Volumina zu. Als dimensionslose Größe kann hieraus der Respiratorische Quotient berechnet werden:

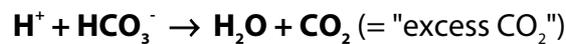
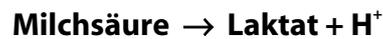
$$RQ = VCO_2 / VO_2$$

Tab. 11: Der Respiratorische Quotient als Indikator verschiedener Anteile von Glykolyse und β-Oxidation (nach [14, 34])

RQ	% Glukose (Glykolyse)	% Fett (β-Oxidation)
0,71	0	100
0,775	25	75
0,85	50	50
0,925	75	25
1,0	100	0

Anhand des gemessenen RQ-Wertes kann mittels stöchiometrischer Berechnungen auf die verschiedenen Anteile von Fett- und Kohlenhydratverbrennung am momentanen Stoffwechselgeschehen geschlossen werden (Tab. 11). Eine reine Verbrennung von Proteinen entspräche einem RQ von 0,80, ist jedoch für Ausdauerbelastungen kaum relevant.

Bei laktaziden Belastungen entsteht durch das säurepuffernde Bikarbonat (HCO_3^-) zusätzlich nicht-metabolisches CO_2 . Durch Abatmung dieses sogenannten "excess CO_2 " können RQ-Werte von mehr als 1,0 gemessen werden [34]:



Aufgrund dieser Mechanismen erreichen gut aerob trainierte Athleten bei Stufentests in der Regel sowohl hohe maximale Laktatkonzentrationen (über 10 mmol/l) als auch hohe maximale RQ-Werte (über 1,15). Hierbei ist zu beachten, dass bei eher kurzzeitorientierten Radsportlern ein tendenziell höherer maximaler RQ gemessen werden kann als bei Ausdauerorientierten. Bei letzteren sinkt aufgrund des umfangreichen aeroben Trainings oft die Azidosetoleranz des Organismus [34].

2.3 Überblick über Methoden der laktatbasierten Leistungsdiagnostik

2.3.1 Definition der anaeroben Schwelle (AS)

Nach Haber [14] steht für den Begriff der anaeroben Schwelle in der Literatur weder eine einheitliche Definition noch ein einheitliches Konzept zur Verfügung. Grundsätzlich basieren alle Schwellenkonzepte, die nachfolgend kurz vorgestellt werden, auf Lauf- oder Radergometertests mit stufenförmig ansteigender rektangulärer Belastung. Durch das Erheben von Messwerten metabolischer, respiratorischer und hämodynamischer Parameter am Ende jeder Phase des Stufentests erhält der Untersucher ein Ausbelastungsprofil des jeweiligen Athleten.

2.3.2 Entwicklung der Schwellenmodelle

2.3.2.1 Respiratorische Definition der AS

Schon im frühen 20. Jahrhundert wurden von Fletcher, Hopkins, Hill und Meyerhof umfangreiche Studien über die Energiebereitstellung und die vertiefte Atmung während körperlicher Belastung durchgeführt, die sich bereits mit der Rolle des Laktats befassten und eine erste respiratorische Definition der Schwellentheorien darstellten [24].

Hollmann bezeichnet lt. Haber [14] diejenige Stufe mit dem geringsten Atemäquivalent als "Punkt des optimalen Wirkungsgrades". Die respiratorische Definition der AS nach Wasserman aus dem Jahr 1994 basiert dagegen auf der Steigung des in der Ergospirometrie gemessenen VCO_2 .

2.3.2.2 Metabolische Definition der AS

In den siebziger Jahren wurde der leistungslimitierende Faktor der Laktatbildung durch die damit verbundene Übersäuerung der Muskulatur allgemein anerkannt. Zur gleichen Zeit wurde von Jorfeldt 1978 erstmals eine Sättigung der Laktatfreisetzung bei 4-5 mmol/kg Muskel beschrieben. Jacobs und Kaiser beobachteten 1982 einen engen Zusammenhang zwischen der Laktatkonzentration in Muskulatur und Blut. Alle diese Studien unter submaximaler Belastung verwendeten jedoch Testprotokolle von nur bis zu 20 Minuten Dauer [24].

In der Folge wurden diverse Studien unter Steady-state-Bedingungen durchgeführt, die sich auf die physiologisch-rationalen Gegebenheiten der Laktatkinetik beriefen. Londree und Ames charakterisierten so den "**maximal lactate steady-state**" (maxLASS). Von Hagberg/Coyle und Farrell wurde der Zeitpunkt, ab dem in einem Leistungstest die gemessene Plasmalaktatkonzentration unvermeidlich zunahm, als **OPLA** (onset of plasma lactate accumulation) beschrieben. Er lag nach deren Studien 1,0 mmol/l über der Laktatkonzentration bei 40-60% der VO_{2max} [24].

Sjödin und Jacobs definierten 1981 den **OBLA** (onset of blood lactate accumulation) als die Belastungsintensität, bei der während eines kontinuierlichen Testprotokolls (Phasendauer 4 Minuten) ein Nettolaktatanstieg auf 4,0 mmol/l erfolgte [42].

Der Begriff der sogenannten **aerob-anaeroben Schwelle**, dem Übergang vom aeroben zum anaerob-laktaziden Stoffwechsel während eines Leistungstests bei

Läufers, wurde 1976 von Mader et al. begründet [31] und in der Folge eng mit einer Laktatkonzentration von 4,0 mmol/l verknüpft. Die nur bedingte Übertragbarkeit dieser so gewonnenen Testergebnisse auf den Trainingsprozess wurde von den Autoren selbst beobachtet [18] und die fixe Laktatschwelle auf 3,0 mmol/l verringert [5].

Kindermann et al. entwickelte zur gleichen Zeit die **Theorie des "aerob-anaeroben Übergangs"** bei einer Laktatkonzentration von wiederum 4,0 mmol/l im Stufentest auf dem Radergometer (Phasendauer 3 Minuten) [26].

Kurze Zeit später wurde diese Theorie von Teilen derselben Forschungsgruppe modifiziert und die Leistung bei maximalem Laktatsteadystate mittels der **Individuellen Anaeroben Schwelle** (individual anaerobic threshold, IAT) bestimmt [44, 45].

Bis heute werden Trainingsintensitäten dank handlicher Laktatmessgeräte größtenteils anhand der in einem Leistungstest gemessenen Laktatkonzentrationen bestimmt. Die entstehende Laktatleistungskurve hat exponentielle Form. Inzwischen existiert zudem eine Vielzahl von Schwellenmodellen basierend auf der IAT. Die Unterschiede bestehen im Wesentlichen in verschiedenen geometrischen und mathematischen Berechnungen, die jeweils die unterschiedliche Steigerung in den verschiedenen Stufentests berücksichtigen müssen (Tab. 12).

Tab. 12: Übersicht über verschiedene radsportspezifische Testprotokolle

Testprotokoll	Leistung zu Testbeginn (W)	Leistungssteigerung pro Phase (W)	Phasendauer (min)
Belgien (KU Leuven)	100	40	8
Deutschland (Freiburg)	100	20	3
Schweiz (Swiss Olympic)	100	30	3
Österreich (nach [14])	50	50	1

2.3.3 Jüngste Entwicklungen

Im Zuge der weiteren Verbesserung der ergospirometrischen Messgeräte wurde in jüngster Zeit eine Ergänzung bzw. Alternative zur weit verbreiteten laktat-basierten Leistungsdiagnostik gefordert. 1997 stellen Hoogeveen und Schep [21] den Sinn von uniformen Laktatschwellen in Frage. Haber [14] propagiert die alleinige Verwendung der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_2max) eines Athleten zu dessen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. Auch in Untersuchungen von Zappe [52] fanden sich Anhalte auf eine hohe Beeinflussbarkeit metabolisch bestimmter Schwellenmodelle.

3 FRAGESTELLUNG

Die Überwachung und Protokollierung der Ausdauerleistung in Training und Wettkampf stellt heute dank modernster mobiler und stationärer Geräte für Leistungssportler kein Problem mehr dar. In zunehmendem Maße werden auch Freizeitsportlern diese Möglichkeiten der Trainingssteuerung zuteil.

Leistungstests sind die Grundlage aller Trainingsaktivitäten, jedoch werfen verschiedenste Testprotokolle und Auswertungsmethoden zur Feststellung der momentanen Leistungsfähigkeit und somit der individuellen Trainingsbereiche die Frage auf, wie sich die unterschiedlichen Parameter unter Langzeitbelastung (also gerade in Ausdauersportarten wie dem Radsport) verhalten.

In dieser Arbeit sollte insbesondere der Verlauf der hierzulande bei Leistungstests etablierten Parameter Herzfrequenz und Laktat über die Zeit beobachtet werden. Ein weiteres Augenmerk galt den Atemgaswerten sowie der erbrachten Leistung.

Es stellten sich im einzelnen folgende Fragen:

1. Wie verhalten sich während einer herzfrequenzkonstanten Belastung über 100 Minuten ($HF_{3,0\text{mmol/l}}$ aufgrund des Stufentests) Laktatkonzentration, erbrachte Leistung sowie Respiratorischer Quotient, Sauerstoffaufnahme und Sauerstoffpuls?
2. Wie verhalten sich während einer leistungskonstanten Belastung über 100 Minuten ($W_{3,0\text{mmol/l}}$ aufgrund des Stufentests) Laktatkonzentration, erbrachte Leistung sowie Respiratorischer Quotient, Sauerstoffaufnahme und Sauerstoffpuls?
3. Welche Rückschlüsse lassen die Ergebnisse auf den Stoffwechsel der Probanden während dieser Tests sowie die Aussagefähigkeit des laktatbasierten Stufenleistungstests nach dem hier verwendeten Protokoll "100-20-3" zu?

4 PROBANDEN, MATERIAL UND METHODEN

4.1 Probandengut

Um möglichst vergleichbare sportliche Gegebenheiten zwischen den Athleten voraussetzen zu können, wurden 18 männliche Probanden getestet, die primär Straßenradspport betrieben. Alle Probanden waren an Trainingseinheiten über mehrere Stunden Dauer gewöhnt. Die Sportspezifität wurde durch die Verwendung eines Radergometers gewährleistet.

Tab. 13: Kriterien für die Einteilung in trainierte, gut-trainierte, Elite- und Weltklasse-Radsportler (nach [23]) mit orientierender Angabe korrespondierender Bereiche physiologischer Parameter.

Training/Rennstatus	Trainierte (Tourenfahrer, Gruppe B)	Gut-trainierte (Radrennfahrer, Gruppe A)	Elite	Weltklasse
Trainingseinheiten	2-3/Woche	3-7/Woche	5-8/Woche	5-8/Woche
Trainingsdauer	30-60 min	60-240 min	60-360 min	60-360 min
Trainingshintergrund	1 Jahr	3-5 Jahre	5-15 Jahre	5-30 Jahre
Renntage/Jahr	0-10	0-20	50-100	90-110
UCI-Rang	--	--	erste 2000	erste 200
Physiolog. Variablen				
Wmax (W)	250-400	300-450	350-500	400-600
Wmax (W/kg)	4,0-5,0	5,0-6,0	6,0-7,0	6,5-8,0
VO ₂ max (l/min)	4,5-5,0	5,0-5,3	5,2-6,0	5,4-7,0
VO ₂ max (ml/kg/min)	64-70	70-75	72-80	75-90
Ökonomie (W/l/min)	72-74	74-75	76-77	>78

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf Probanden aus dem Bereich der Radrennfahrer (Gruppe A, n=13). Ergänzend hierzu wurde die Testserie noch an einer kleineren Vergleichsgruppe von Tourenfahrern (Gruppe B, n=5) durchgeführt. Die Klassifikation deckte sich mit den von Jeukendrup et al. publizierten Kriterien, die sich um eine konsequente und eindeutige Nomenklatur in Studien aus dem Bereich des Radrennsports bemüht [23]. Hierbei steht der Trainingsumfang und Rennstatus

eines Athleten im Vordergrund und es besteht keine unbedingte Abhängigkeit von (maximalen oder submaximalen) physiologischen Variablen (vgl. Tab. 13).

4.1.1 Probanden der Gruppe A: gut-trainierte Radrennfahrer (n=13)

Gruppe A umfasste 13 Straßenradrennfahrer, die sich aus den UCI-Rennklassen Amateur-Elite (19 Jahre und älter: n=9) und -Junioren (U19, 17 mit 18 Jahren: n=4; in den Datentabellen mit Stern (*) gekennzeichnet) rekrutierten. Ihr wettkampforientiertes Training bestand ganzjährig aus 5-7 Trainingseinheiten pro Woche und zusätzlichen Straßenrennen. Die Jahreskilometerleistung hatte für Elite-Fahrer inkl. Rennkilometern mindestens 15000 km/a, für U19-Fahrer mindestens 12000 km/a zu betragen. Der Mittelwert der Jahreskilometerleistung der Gruppe A betrug 16885 ± 3056 km/a (Median 15000 km/a).

Tab. 14: Anthropometrische und sportspezifische Daten der Probanden der Gruppe A (Radrennfahrer). Mit Stern (*) gekennzeichnet sind U19-Fahrer.

Gruppe A (n=13)	Größe (cm)	Körper- gewicht (kg)	Alter (a)	Radsport seit (a)	Jahres- leistung (km)
A01	173	56,0	23	5	18000
A02	179	64,0	22	4	15000
A03*	182	72,0	18	1	15000
A04	182	67,0	22	5	21000
A05*	181	64,0	17	4	12000
A06	184	69,0	22	10	23000
A07	180	64,0	25	7	15000
A08	173	64,0	30	2	15000
A09	183	71,0	26	4	20000
A10*	184	75,0	18	5	17500
A11	173	67,5	20	8	15000
A12*	184	62,0	18	2	18000
A13	176	63,0	24	5	15000
Mittelwert	179,5	66,04	21,9	4,8	16885
SD	$\pm 4,4$	$\pm 4,96$	$\pm 3,8$	$\pm 2,5$	± 3056
Median	181	64	22	5	15000

Bei einem Durchschnittsalter von $21,9 \pm 3,8$ (Median 22) Jahren wurde Radsport als Leistungssport im Mittel seit $4,8 \pm 2,5$ (Median 5) Jahren betrieben. Die vor der Testserie gemessene Körpergröße betrug im Mittel $179,5 \pm 4,4$ cm (Median 181 cm), das Körpergewichts im Mittel $66,04 \pm 4,96$ kg (Median 64 kg).

Die anthropometrischen und sportspezifischen Daten der einzelnen Probanden aus Gruppe A können Tab. 14 entnommen werden.

4.1.2 Probanden der Gruppe B: trainierte Tourenfahrer (n=5)

Der Gruppe B wurden als Vergleichsgruppe gleicher Altersstruktur ($21,4 \pm 2,3$ Jahre, Median 21 Jahre) 5 Radfahrer zugewiesen, die ohne Wettkampforientierung zwischen 2000 und 10000 km/a (im Mittel 5300 ± 3493 km/a, Median 3500 km/a) absolvierten.

Die mittlere Körpergröße der Sportler der Gruppe B betrug $180,2 \pm 2,8$ (Median 181) cm, das mittlere Körpergewicht $75,70 \pm 3,96$ kg (Median 76 kg). Radsport wurde im o.g. Umfang seit $4,6 \pm 2,0$ (Median 5) Jahren betrieben. In Tab. 15 finden sich die anthropometrischen und sportspezifischen Daten der einzelnen Probanden aus Gruppe B.

Tab. 15: Anthropometrische und sportspezifische Daten der Probanden der Gruppe B (Tourenfahrer)

Gruppe B (n=5)	Körper- größe (cm)	Körper- gewicht (kg)	Alter (a)	Radsport seit (a)	Jahres- leistung (km)
B01	181	77,0	20	7	10000
B02	184	81,5	25	2	8000
B03	178	72,0	22	6	2000
B04	181	76,0	21	3	3500
B05	177	72,0	19	5	3000
<i>Mittelwert</i>	<i>180,2</i>	<i>75,70</i>	<i>21,4</i>	<i>4,6</i>	<i>5300</i>
<i>SD</i>	<i>$\pm 2,8$</i>	<i>$\pm 3,96$</i>	<i>$\pm 2,3$</i>	<i>$\pm 2,0$</i>	<i>± 3493</i>
<i>Median</i>	<i>181</i>	<i>76</i>	<i>21</i>	<i>5</i>	<i>3500</i>

4.2 Messaufbau

4.2.1 Messungen und Umgebungsbedingungen

Die Messungen erfolgten von Juli bis Oktober 2002 im Labor der Betriebsärztlichen Untersuchungsstelle der Universität Würzburg, 170 m üNN. Die Wetterbedingungen waren für alle Probanden auf intra-individueller Basis vergleichbar. Trotz der natürlichen Wetteränderungen zwischen Juli und Oktober konnten keine systematischen Einfüsse des unterschiedlichen Klimas auf die Probanden festgestellt werden. Die Tests wurden bei einer durchschnittlichen Temperatur von $25,0 \pm 2,11$ °C und konstanter Luftfeuchtigkeit von 56% durchgeführt.

Die Probanden waren angewiesen, sich auf die Tests wie auf ein Radrennen vorzubereiten. So sollten sie intensive Belastungen und Wettkämpfe in den vorangegangenen 48 Stunden unterlassen. Um die Variabilität der Glykogenvorräte und –utilisation während der Testreihe möglichst zu reduzieren, wurde den Probanden nahegelegt, während der Testteilnahme eine normale Diät zu sich zu nehmen. Um die Variabilität bezüglich zirkadianem Rhythmus und Fitnesslevel zu minimieren, wurden jeder Proband jeweils zur gleichen Tageszeit innerhalb eines Zeitraums von 15 Tagen getestet, wobei mindestens je 3 Tage zwischen den einzelnen aufeinanderfolgenden Tests lagen.

Während der Tests wurde ein Standventilator verwendet, dessen Intensität nach den individuellen Wünschen in vier Stufen geregelt werden konnte. Aufgrund der kontinuierlichen Einzelatemzuganalyse mittels einer Atemmaske war es den Sportlern nicht möglich, während der Tests Flüssigkeit zu sich zu nehmen. Aus diesem Grund wurden die Athleten aufgefordert, innerhalb der letzten 45 Minuten vor Testbeginn 500 ml Mineralwasser zu trinken. Jedem Test ging eine Aufwärmphase voraus, in der sich die Probanden an das Ergometer gewöhnen und noch etwaige Anpassungen der Sitzposition vornehmen konnten.

Die Testreihe wurde nur an gesunden Probanden durchgeführt, die keine akuten Gesundheitseinschränkungen und auch keine kardiovaskulären Vorerkrankungen aufwiesen. Zum Ausschluss von Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems wurde mit dem ersten Test ein EKG aufgezeichnet.

Vor Beginn der Testreihe erklärte sich jeder Proband nach umfangreicher Aufklärung mit Ablauf, Ziel und möglichen Risiken der Untersuchung sowie mit der Verwendung und Veröffentlichung der Daten in anonymisierter Form (Datenschutz) einverstanden (vgl. Appendix, 9.1 Probandenfragebögen und Einverständniserklärungen).

Ausdrücklich wurde jeder Athlet vor Beginn der Tests darauf hingewiesen, dass es ihm jederzeit freistand, den Test aufgrund von Unwohlsein oder Übelkeit abubrechen. Zur eigenen Trainingsplanung standen den Probanden nach Abschluss des dritten Tests alle Daten in Kopie zur Verfügung.

4.2.2 Geräte

4.2.2.1 Ergometrie

Die Tests wurden auf einem Ergometer der Marke Ergoline ER900 (Jaeger-Toennies, Würzburg, Deutschland) durchgeführt. Um Sportspezifität gewährleisten und die von der Wettkampfmaschine gewohnte Sitzposition voraussetzen zu können, konnten die Athleten ihre Sitzposition auf dem Radergometer individuell anpassen. Dazu dienten Rennpedale der Systeme Look (Look, Nevers, France) oder Time (Time, Varennes-Vauzelles, France) in Kombination mit den eigenen Radschuhen der Probanden. Ein in Höhe und Neigung verstellbarer Rennsattel, ein Kurbelsatz der Länge 172,5 mm sowie eine variable Multipositions-Lenkereinheit ermöglichten eine optimale Anpassung der Ergonomie. Auf einem Display in Lenkermitte konnten die Athleten die momentane Trittfrequenz ablesen.

Mit Ausnahme des ersten, triangulär-rektangulären Vita-maxima-Tests, den sie im Sitzen zu absolvieren hatten, war es den Athleten angesichts der langen Testdauer beim zweiten und dritten Test erlaubt, alle 20 Minuten nach der erfolgten Abnahme der kapillaren Blutprobe für bis zu 2 Minuten aus dem Sattel in den Wiegetritt zu gehen. Über eine Steuereinheit mit Display am Lenkkopf konnten dem Ergometer durch den Untersucher neben der Trittfrequenz auch Puls und Leistung entnommen werden.

4.2.2.2 Ergospirometrie

Die Atemvolumina und -gase wurden während aller Tests kontinuierlich über eine Atemmaske (Totraumvolumen ca. 50 ml) und über einen O₂/CO₂-Gasanalysator der

Marke Jaeger-Toennies, Modell Oxycon Pro (Jaeger-Toennies, Würzburg, Deutschland), ermittelt. Vor jedem Test wurden die Sauerstoff- und Kohlendioxidanalysatoren mit Industriegasen bekannter Konzentrationen kalibriert.

4.2.2.3 Herzfrequenzmonitoring

Um etwaige Herzfehler oder -rhythmusstörungen des Probanden zu erkennen, wurde der erste Test unter EKG-Monitoring durch ein 12-Kanal-EKG der Marke Hellige (Hellige, Deutschland) durchgeführt, das auch die Herzfrequenz an den PC lieferte.

Im zweiten und dritten Test ermittelten wir die Herzfrequenz über einen Brustgurt und Funkempfänger der Marke Polar (Polar Electro Oy, Kempele, Finland), der die Daten an die Rechereinheit weiterleitete.

4.2.2.4 Rechner und Software, statistische Analyse

Zur Steuerung der Versuchsabläufe sowie zur Protokollierung wurde ein Rechner mit Intel-Pentium-Prozessor verwendet. Sauerstoffaufnahme (VO_2), Kohlendioxidproduktion (VCO_2), Respiratorischer Quotient (RQ), Sauerstoffpuls (O_2/HF) sowie Herzfrequenz (HF) und Leistung wurden mittels der Software JLAB, Version 4.53.1.15 (Jaeger-Toennies, Würzburg, Deutschland), berechnet und dargestellt. Zur Datenanalyse wurde Microcal Origin, Version 5.0, verwendet. Aufgrund der relativ geringen Anzahl von Probanden wurden statistische Vergleiche zwischen den Daten nicht erhoben.

4.2.2.5 Laktatmonitoring

Die jeweilige Laktatkonzentration wurde kapillär aus dem hyperämisierten Ohrläppchen bestimmt. Um Fehlmessungen zu vermeiden wurde dabei jeweils der erste Blutstropfen verworfen. Zur Messung diente ein Messgerät der Firma Arkray, Mod. Lactate Pro (Arkray, Inc., Kyoto, Japan). Nach vorangegangener Kalibrierung wurde ein Tropfen kapillären Blutes (etwa 5 μl) auf den Teststreifen aufgebracht. Die automatische Messung erfolgte innerhalb der folgenden 60 Sekunden über ein amperometrisches Verfahren mittels einer Enzymreaktion. Der Messbereich des Gerätes betrug 0,8-23,3 mmol/l.

5 TESTABLÄUFE

5.1 Test 1: Stufenleistungstest

Als erster Test wurde ein Stufenleistungstest bis zur Erschöpfung mit EKG und Spirometrie durchgeführt. Diese symptomlimitierte, maximale Ergometrie mit stufenförmig ansteigender, rektangulär-triangularer Belastung erfolgte, um

- kardiovaskuläre Probleme auszuschließen,
- die maximale Leistungsfähigkeit des Athleten festzustellen und
- die Intensitäten für den zweiten und dritten Test festzulegen.

Während einer Adaptationsphase an das Ergometer wurden die Probandendaten in das Computerprogramm eingegeben, EKG-Elektroden sowie Atemmaske angelegt sowie eine Messung des Ruhelaktats durchgeführt. In einer einminütigen Ruhephase wurden die Puls- und die Atemgaswerte in Ruhe ermittelt. Mit Beginn des Testprotokolls startete jeder Athlet bei einer zu tretenden Leistung von 100 W. Nach einer Phasenzeit von je 3 Minuten wurde die Leistung computergesteuert um jeweils 20 W gesteigert. Dieses Protokoll ist das im Bund Deutscher Radfahrer (BDR) etablierte und stellt das in Deutschland gebräuchlichste Stufenleistungstestprotokoll für Radsportler dar.

Um die Vergleichbarkeit der Probanden zu gewährleisten, aber auch ihren persönlichen Fahrstilen entgegenzukommen, wurde keine fixe Trittfrequenz vorausgesetzt. Statt dessen wurden sie korrespondierend zu Ergebnissen von Lucía et al. [30] gebeten, ihre Trittfrequenz konstant zwischen 80 und 110 Umdrehungen/Minute zu halten. Am Ende jeder Phase wurde das aktuelle Laktat mittels eines Blutstropfens aus dem hyperämisierten Ohrläppchen bestimmt.

Die Probanden waren angewiesen, diesen Test bis zur Erschöpfung durchzufahren, um so möglichst die Maximalwerte an Laktatkonzentration, Herzfrequenz, Leistung und Sauerstoffaufnahme zu erreichen.

Unter Laborbedingungen bietet dieser Testaufbau unserer Meinung nach die beste Möglichkeit, darzustellen, wie weit die Vorhersage von Trainingsintensitäten aufgrund eines gebräuchlichen Stufenleistungstestprotokolls möglich ist.

5.2 Tests unter konstanten Intensitäten

Aufgrund der in Test 1 gewonnenen Daten wurden für jeden Probanden individuell die Intensitäten für die nachfolgenden zwei Tests berechnet, bestehend aus:

- **Test 2:** herzfrequenz-konstante Einheit über insgesamt 100 Minuten
- **Test 3:** leistungs-konstante Einheit über insgesamt 100 Minuten.

Die Testdauer von 100 Minuten wurde gewählt, weil diese eine realistische Dauer für intensives Ausdauertraining, aber auch für Wettkämpfe, z.B. Einzelzeitfahren, darstellt.

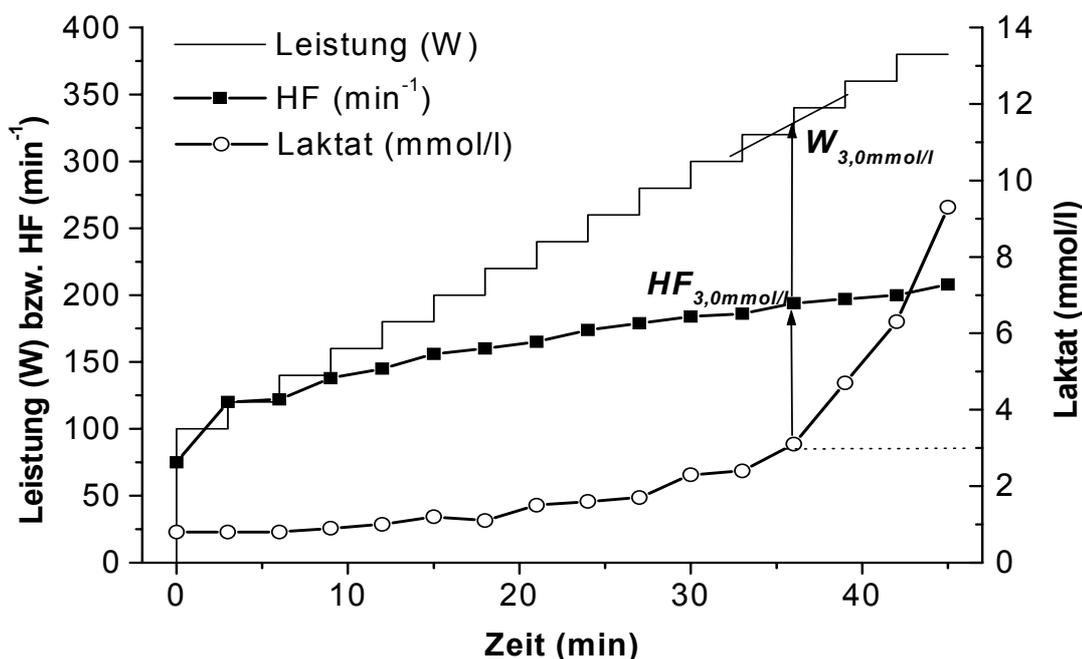


Abb. 10: Beispiel für die Bestimmung der Intensitäten für Test 2 und Test 3 anhand von Test 1 des Probanden A10. Es verdeutlicht die Bestimmung der $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ und $W_{3,0\text{mmol/l}}$ aufgrund der Kurve der gemessenen Laktatkonzentrationen. Beachte die Annahme von linearen Verläufen zur genauen Bestimmung der Intensitäten, hier verdeutlicht am Beispiel der $W_{3,0\text{mmol/l}}$.

Basis der Berechnung war die in Test 1 gewonnene individuelle Laktatkurve jedes Probanden. Die bei einer Laktatkonzentration von 3,0 mmol/l im Stufentest gemessene Herzfrequenz $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ war die Ziel-Herzfrequenz für Test 2, die korrespondierend erbrachte Leistung $W_{3,0\text{mmol/l}}$ die Ziel-Leistung für Test 3. War nicht direkt eine Laktatkonzentration von exakt 3,0 mmol/l bei Phasenende gemessen worden, so wurden die Intensitäten durch Berechnung aus dem vor- und nachgeordneten Messwerten bestimmt, wobei ein linearer Verlauf von Laktatkonzentration, Herzfrequenz und Leistung in diesem Bereich vorausgesetzt wurde (vgl. **Abb. 10**). Somit konnte davon ausgegangen werden, dass in keinem Fall eine Überschätzung der Intensitäten, sondern eher eine Unterschätzung stattfand.

5.2.1 Test 2: Herzfrequenz-konstante Einheit auf $HF_{3,0\text{mmol/l}}$

In Test 2 begannen die Probanden nach Aufwärm- und Ruhephase wiederum bei 100 W. Um möglichst einen Zeitraum von ca. 90 Minuten unter herzfrequenzkonstanten Bedingungen untersuchen zu können, wurde die Leistung um 15 W/Minute gesteigert bis die Ziel-Herzfrequenz $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ erreicht war. Danach wurde der automatische Anstieg der Leistung gestoppt und die Herzfrequenz wurde durch eine Reduzierung der Leistung in Schritten von 5 W konstant gehalten.

Die erbrachte Leistung sowie die Atemgase wurden kontinuierlich, die Laktatkonzentration in Ruhe und nach jeweils 10 Minuten protokolliert.

Nach insgesamt 100 Minuten wurde die Einheit beendet. Folgende Kriterien führten zu einer vorzeitigen Termination des Tests:

- Erschöpfung des Probanden
- Übelkeit, Unwohlsein
- Unterschreiten einer Trittfrequenz von 80 min^{-1}

5.2.2 Test 3: Leistungs-konstante Einheit auf $W_{3,0\text{mmol/l}}$

Wie in Test 2 wurde auch in Test 3 die Leistung beginnend mit 100 W um jeweils 15 W/min gesteigert, bis die individuell errechnete Ziel-Leistung $W_{3,0\text{mmol/l}}$ erreicht wurde. Danach wurde $W_{3,0\text{mmol/l}}$ konstant gehalten, und die Aufzeichnung der physiologischen

Parameter erfolgte wie in Test 2. Die gesamte Dauer der Einheit betrug ebenfalls 100 Minuten. Ein vorzeitiger Abbruch erfolgte anhand der bei Test 2 geschilderten Kriterien.

6 ERGEBNISSE

6.1 Test 1 (Stufentest)

Detaillierte, probandenbezogene Daten von Test 1 können Abb 11 und Tab. 18 - Tab. 29 des Appendix entnommen werden.

6.1.1 Maximallaktat

Die maximale Laktatkonzentration der Athleten der Gruppe A (gemessen am Ende der letzten durchgeführten Phase) lag in Test 1 im Mittel bei $9,05 \pm 2,34$ mmol/l (Median 9,6 mmol/l). Die Bandbreite war außerordentlich groß und reichte von 5,0 mmol/l (Proband A11) bis 13,5 mmol/l (Proband A13).

Bei den Sportlern der Gruppe B lag das Maximallaktat im Mittel bei $10,04 \pm 1,76$ mmol/l (Median 10,1 mmol/l), also etwa 1 mmol/l höher als in Gruppe A. Insgesamt wurde eine geringere Bandbreite als bei Gruppe A festgestellt: Proband B01 erreichte maximal 7,2 mmol/l, Proband B02 11,9 mmol/l.

6.1.2 Respiratorischer Quotient RQ

Anhand eines RQ von 1,0 und höher bei Abbruch des Stufentests konnte bei allen Probanden beider Gruppen Ausbelastung vorausgesetzt werden.

6.1.3 Maximale Sauerstoffaufnahme VO_2 max

Die maximale Sauerstoffaufnahme VO_2 max lag in Gruppe A gemittelt bei $4155,5 \pm 430,9$ ml/min. Bezogen auf das jeweilige Körpergewicht des Athleten entspricht dies einer mittleren relativen max. Sauerstoffaufnahme VO_2 max/kg von $62,92 \pm 4,46$ ml/min/kg.

Bei Gruppe B wurde eine VO_2 max von gemittelt $3937,10 \pm 469,87$ ml/min, entsprechend einer VO_2 max/kg von $51,90 \pm 4,19$ ml/min/kg gemessen. Damit lagen die Werte der Probanden aus Gruppe B deutlich unter denen der Gruppe A.

6.1.4 Maximaler Sauerstoffpuls (O_2 /HF)max

Bei Gruppe A wurde ein maximaler Sauerstoffpuls (O_2 /HF)max von $22,35 \pm 3,13$ ml gemessen. Auf das Körpergewicht bezogen sind dies im Mittel $0,338 \pm 0,037$ ml/kg.

In Gruppe B fallen diese Werte wiederum geringer aus: der maximale Sauerstoffpuls beträgt lediglich $20,90 \pm 2,39$ ml, relativ zum Körpergewicht $0,275 \pm 0,020$ ml/kg.

6.1.5 Maximale Herzfrequenz HFmax

Die maximale Herzfrequenz HFmax in beiden Gruppen war nahezu identisch: $196,6 \pm 7,1$ min⁻¹ in Gruppe A, $197,8 \pm 6,3$ min⁻¹ in Gruppe B.

Bezogen auf eine Laktatkonzentration von 3,0 mmol/l wurden die Unterschiede im Trainingszustand deutlich. Wiesen die Athleten aus Gruppe A bei 3,0 mmol/l eine Herzfrequenz ($HF_{3,0\text{mmol/l}}$) von $178,4 \pm 9,4$ min⁻¹, entsprechend $90,69 \pm 2,78\%$ ihrer HFmax, auf, so erreichten die Probanden aus Gruppe B mit $173,6 \pm 4,8$ min⁻¹ bereits bei $87,80 \pm 1,72\%$ ihrer HFmax die 3,0 mmol/l-Marke.

6.1.6 Maximale Leistung Wmax

Die maximale Leistung Wmax betrug in Gruppe A $340,0 \pm 40,8$ W, was einer relativen Leistung von $5,14 \pm 0,39$ W/kg Körpergewicht entspricht.

Die Sportler der Gruppe B erreichten lediglich Maximalwerte von gemittelt $312,0 \pm 36,3$ W, entsprechend $4,12 \pm 0,33$ W/kg.

Die Leistung bei einer Laktatkonzentration von 3,0mmol/l ($W_{3,0\text{mmol/l}}$) war, wie die $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ bei Gruppe A deutlich höher ($278,5 \pm 52,6$ W) als bei Gruppe B ($241,2 \pm 40,5$ W).

6.2 Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit)

Detaillierte, probandenbezogene Daten von Test 2 können Abb. 12 und Tab. 30 - Tab. 41 des Appendix entnommen werden.

6.2.1 Verlauf der Laktatkonzentrationen

Wie schon in Test 1 wurde auch in den beiden Tests über 100 Minuten trotz vergleichbarer Ruhewerte gerade bei den gemessenen Laktatkonzentrationen eine große Bandbreite zwischen den einzelnen Athleten festgestellt. Die in der graphischen Darstellung im Tabellenanhang gemittelten Kurven beziehen sich daher auf die den jeweiligen Test bis zur 100. Minute durchfahrenden Probanden.

Während bei Gruppe A in Test 2 die Laktatkonzentrationen der Probanden ab der 30. Minute kontinuierlich auf bis zu $1,78 \pm 0,82$ mmol/l zu Testende abfielen, konnte in der herzfrequenz-konstanten Einheit ab der 30. Minute ein Ausfall von Sportlern festgestellt werden. Die gemittelte Zeit des Testabbruches lag in Minute $51 \pm 13,4$ bei einer Laktatkonzentration von $3,64 \pm 1,56$ mmol/l. Die Bandbreite der Laktatwerte bei vorzeitigem Testabbruch reicht von 1,3 bis 5,3 mmol/l. Weitere Parameter bei vorzeitigem Testabbruch können Tab. 16 entnommen werden.

Tab. 16: Parameter bei vorzeitigem Abbruch von Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

	Gruppe A (n=8) Radrennfahrer		Gruppe B (n=0) Tourenfahrer	
	Mittel	SD	Streubreite	Mittel SD Streubreite
HF _{3,0mmol/l} (min ⁻¹)	176,0	± 9,97	164-192	- kein vorzeitiger Abbruch -
Faktor von HFmax	0,895	± 0,028	0,865-0,950	
Laktat _{max} (mmol/l)	3,64	± 1,56	1,3-5,3	
RQ	0,97	± 0,14	0,85-1,20	
Leistung (W)	274	± 22,5	250-305	
Faktor von W _{3,0mmol/l}	0,887	± 0,087	0,764-0,980	
O ₂ /HF (ml)	20,78	± 3,31	16,6-24,8	
Faktor von (O ₂ /HF)max	0,862	± 0,11	0,735-1,036	
VO ₂ /kg (ml/min/kg)	52,5	± 8,53	40,7-63,2	
Faktor von VO ₂ max	0,824	± 0,095	0,708-0,955	
Abbruchzeit (min)	51	± 13,4	30-65	

Alle Probanden aus Gruppe B fuhren Test 2 bis zur 100. Minute durch. Dabei fiel der Laktatspiegel nach einem Maximum von $4,84 \pm 1,94$ mmol/l in der 20. Minute kontinuierlich auf $1,86 \pm 1,09$ mmol/l in der 100. Minute ab.

6.2.2 Verlauf des Respiratorischen Quotienten RQ

In unserer Studie weist der Respiratorische Quotient eine viel geringere Streubreite auf als die Laktatkonzentrationen. In beiden Gruppen zeigte der RQ in der herzfrequenz-konstanten Einheit ein Maximum in der 20. Minute. Bei den

durchfahrenden Probanden von Gruppe A und Gruppe B verhielt er sich von der 30. Minute bis zur 100. Minute relativ konstant (Gr. A: $0,947 \pm 0,152$; Gr. B: $0,954 \pm 0,065$). In Gruppe A fiel dabei Proband A08 auf, der mit von Beginn an kontinuierlich ansteigenden RQ-Werten (Maximum in der 100. Minute mit einem RQ von 1,27) den sonst recht niedrigen Trend der übrigen Sportler brach.

6.2.3 Verlauf der Leistung als Faktor von $W_{3,0\text{mmol/l}}$

Die Leistung wird in den vorliegenden Daten als Faktor der Leistung bei 3,0 mmol/l Laktatkonzentration ($W_{3,0\text{mmol/l}}$) angegeben.

In beiden Gruppen musste sie nach Erreichen der Ziel-Herzfrequenz $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ kontinuierlich reduziert werden, um ein weiteres Ansteigen der Herzfrequenz zu verhindern. Das Maximum in Gruppe A lag bei einem Faktor von $1,046 \pm 0,080 \times W_{3,0\text{mmol/l}}$ in der 20. Minute, in Gruppe B bei $1,060 \pm 0,098 \times W_{3,0\text{mmol/l}}$ in der 10. Minute. Während die durchfahrenden Athleten der Gruppe A in der 100. Minute noch in der Lage waren, $83,8 \pm 9,6\%$ ihrer $W_{3,0\text{mmol/l}}$ bei konstanter Herzfrequenz $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ zu treten, waren es bei Gruppe B lediglich $73,9 \pm 10,3\%$ der $W_{3,0\text{mmol/l}}$.

6.2.4 Verlauf der Sauerstoffaufnahme VO_2

In Test 2 fällt der deutliche direkte Zusammenhang zwischen relativer Sauerstoffaufnahme VO_2/kg und der geforderten Leistung auf. Dies äußert sich in der herzfrequenz-konstanten Einheit durch einen zur sinkenden Leistung parallelen Abfall der VO_2/kg . Als Faktor von $VO_{2\text{max}}$ fällt die Sauerstoffaufnahme nach einem Maximum in der 15. Minute von $0,888 \pm 0,071$ (Gruppe A) bzw. $0,912 \pm 0,076$ (Gruppe B) linear auf $0,677 \pm 0,129$ (Gruppe A) bzw. $0,705 \pm 0,099$ (Gruppe B) ab.

6.2.5 Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF

Mit dem Sauerstoffpuls verhielt es sich ebenso. In Minute 15 wurden $98,7 \pm 4,9\%$ (Gruppe A) bzw. $98,3 \pm 6,6\%$ (Gruppe B) des in Test 1 gemessenen Maximalwertes erreicht. In Minute 100 betrug der Sauerstoffpuls noch $73,5 \pm 13,5\%$ (Gruppe A) bzw. $73,0 \pm 8,1\%$ des $(O_2/HF)_{\text{max}}$ aus dem Stufentest.

6.3 Test 3 (leistungs-konstante Einheit)

Detaillierte, probandenbezogene Daten von Test 3 können Abb. 13 und Tab. 42 - Tab. 52 des Appendix entnommen werden.

6.3.1 Verlauf der Laktatkonzentrationen

Im leistungs-konstanten Test 3 beendeten nur 3 von 13 (Gruppe A) bzw. nur 2 von 5 Probanden (Gruppe B) die komplette Einheit. Wie auch in Test 2 ist bei den Probanden der Gruppe A, die den Test nach 100 Minuten beendeten, das niedrige Niveau des mittleren Laktatspiegels beeindruckend. Ihre mittlere maximale Laktatkonzentration erreicht nur $2,67 \pm 0,92$ mmol/l in der 20. Minute und sinkt auf $2,07 \pm 1,42$ mmol/l in der 100. Minute ab.

Die gemittelte Zeit des Testabbruches bei Gruppe A lag in Minute $49 \pm 13,5$ (Abbruch zwischen der 30. und 70. Minute) bei einer Laktatkonzentration von $4,43 \pm 1,62$ mmol/l. Die Bandbreite der Laktatwerte bei vorzeitigem Testabbruch liegt höher als in Test 2 und reicht von 2,6 bis 8,1 mmol/l. Weitere Parameter bei vorzeitigem Testabbruch können Tab. 17 entnommen werden.

Tab. 17: Parameter bei vorzeitigem Abbruch von Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

	Gruppe A (n=10) Radrennfahrer			Gruppe B (n=3) Tourenfahrer		
	Mittel	SD	Streubreite	Mittel	SD	Streubreite
HF _{3,0mmol/l} (min ⁻¹)	296,5	± 43,3	235-360	237,3	± 43,0	194-280
Faktor von HF _{max}	0,839	± 0,034	0,783-0,900	0,770	± 0,068	0,693-0,834
Laktat _{max} (mmol/l)	4,43	± 1,62	2,6-8,1	3,70	± 2,78	1,90-6,90
RQ	0,98	± 0,10	0,86-1,15	0,95	± 0,12	0,94-0,96
Leistung (W)	184,4	± 0,85	176-196	184,3	± 11,5	173-196
Faktor von W _{3,0mmol/l}	1,028	± 0,044	0,919-1,091	1,049	± 0,048	1,006-1,101
O ₂ /HF (ml)	17,96	± 4,11	10,1-22,4	17,87	± 3,55	14,4-21,5
Faktor von (O ₂ /HF) _{max}	0,770	± 0,17	0,474-0,955	0,884	± 0,066	0,809-0,935
VO ₂ /kg (ml/min/kg)	51,66	± 11,34	29,0-64,8	44,3	± 7,02	36,2-48,5
Faktor von VO ₂ _{max}	0,811	± 0,161	0,650-1,029	0,862	± 0,051	0,804-0,901
Abbruchzeit (min)	49,0	± 13,5	30-70	53,3	± 15,3	40-70

In Gruppe B wird nach gemittelt $53,3 \pm 15,3$ Minuten die 3. Einheit abgebrochen. Die mittlere Laktatkonzentration bei vorzeitigem Testabbruch liegt bei $3,70 \pm 2,78$ mmol/l. Die den leistungs-konstanten Test vollständig absolvierenden Probanden aus Gruppe B weisen das Maximum ihrer mittleren Laktatkonzentration in der 30. Minute auf ($3,60 \pm 2,02$ mmol/l). Bis zur 100. Minute ($3,05 \pm 1,34$ mmol/l) erfolgt ein Abfall. Diese Mittelung der Laktatkonzentrationen in Gruppe B während Test 3 ist nur eingeschränkt beurteilbar, da die sinkende Tendenz deutlich durch den Laktatanstieg von Proband B02 ab der 80. Minute gebremst wird.

Besonders hervorzuheben ist, dass bei den durchfahrenden Athleten in beiden Gruppen nach der 75. Minute ein leichter Laktatanstieg erfolgt. Dies ist zurückzuführen auf die jeweils ansteigenden Laktatwerte eines einzigen Sportlers (Proband A12 bzw. B02). Wie dem Tabellenanhang zu entnehmen ist, weisen diese Athleten korrespondierend zur steigenden Laktatkonzentration einen Anstieg im RQ auf. Bezüglich der relativen Sauerstoffaufnahme und des relativen Sauerstoffpulses schlägt sich dies in sinkenden Werten nieder.

6.3.2 Verlauf des Respiratorischen Quotienten RQ

Wie schon in Test 2 verläuft der RQ bei den Durchfahrenden von Gruppe A in Test 3 ab der 10. Minute relativ konstant bei etwa 0,95 und beträgt in der 100. Minute $0,953 \pm 0,101$, entsprechend einer gemischten Verbrennung von 70% Kohlenhydraten und 30% Fett.

Bei Gruppe B erfolgt in der Mittelung aufgrund des Athleten B02 ein deutlicher Anstieg des Mittelwertes ab der 75. Minute ($0,990 \pm 0,113$) auf einen Wert von $1,025 \pm 0,134$ in der 100. Minute, entsprechend verstärkter Glykolyse bei diesem Athleten.

6.3.3 Verlauf der Herzfrequenz als Faktor von $HF_{3,0\text{mmol/l}}$

Die Herzfrequenz wird in den vorliegenden Daten als Faktor der Herzfrequenz bei 3,0 mmol/l Laktatkonzentration ($HF_{3,0\text{mmol/l}}$) angegeben. Sowohl in Gruppe A als auch in Gruppe B stieg im Verlauf des leistungs-konstanten Tests die Herzfrequenz an. Bei Gruppe A erreichten die durchfahrenden Probanden zu Testende gemittelt $97,9 \pm 3,7\%$ ihrer $HF_{3,0\text{mmol/l}}$.

Bei den Probanden der Gruppe B, die 100 Minuten durchfuhren, erreichte die Herzfrequenz unter konstanter Leistung bereits in der 40. Minute den in Test 1 gemessenen Maximalwert (100% bzw. Faktor 1,0) und stieg bis zur 100. Minute auf gemittelt $105,1 \pm 3,9\%$ der $HF_{3,0\text{mmol/l}}$.

6.3.4 Verlauf der Sauerstoffaufnahme VO_2 als Faktor von $VO_{2\text{max}}$

Bei der relativen Sauerstoffaufnahme in Test 3 ist in beiden Gruppen nur ein geringer Abfall über die Zeit festzustellen, so dass von einem relativ konstanten Verlauf, parallel zur geforderten Leistung wie in Test 2, ausgegangen werden kann.

Bei den Probanden aus Gruppe A, die den Test erst in der 100. Minuten beendeten, liegt das Maximum in der 20. Minute (Faktor $0,806 \pm 0,125 \times VO_{2\text{max}}$). In der 100. Minute wird ein Faktor von gemittelt $0,702 \pm 0,115$ gemessen.

In Gruppe B beträgt das mittlere Maximum den Faktor $0,835 \pm 0,002$ (20. Minute), der Mittelwert in der 100. Minute den Faktor $0,747 \pm 0,110 \times VO_{2\text{max}}$.

6.3.5 Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF

Der Sauerstoffpuls reduziert sich im Verlauf von Test 3 bei den durchfahrenden Probanden aus Gruppe A von $94,0 \pm 9,1\%$ (20. Minute) des maximal im Stufentest gemessenen Wertes auf $79,1 \pm 12,6\%$ (100. Minute).

Bei Gruppe B beläuft sich das Maximum in der 20. Minute ebenfalls auf gemittelt $94,0 \pm 3,1\%$, der Endwert in der 100. Minute beträgt $77,5 \pm 11,4\%$ von $(O_2/HF)_{\text{max}}$.

7 DISKUSSION

7.1 Übersicht

Auf einem Radergometer wurden die Verläufe von Laktat, Respiratorischen Quotienten, Sauerstoffaufnahme und Sauerstoffpuls, Leistung sowie Herzfrequenz unter Ausdauerbelastung untersucht. Nur wenige Autoren beschreiben die genannten Parameter über einen längeren Zeitraum, und es ist uns keine Untersuchung mit einer Testdauer von 100 Minuten bekannt, die dem Niveau submaximaler Intensitäten entsprach.

Zwar sind heute laktat-basierte Schwellenmodelle (sowohl nach individueller als auch fixer Bestimmung) weit verbreitet und akzeptiert, doch ist die Diskussion über das ideale Protokoll eines Schwellenstufentests und die Methodik zur Leistungsbestimmung und Trainingsplanung noch immer im Fluss. Eine sinnvolle Beurteilung über die Reichweite der Vorgaben basierend auf einem bestimmten Stufentestprotokoll ist jedoch Voraussetzung für eine solide Trainingsplanung.

Bei der vorliegenden Versuchsreihe wurde angesichts der verschiedenen o.g. Theorien und der Unabhängigkeit zwischen Laktat- und Ventilationsschwellen [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] auf die Berechnung von individuellen Schwellen verzichtet. Um die Intensitäten für die Vorgaben des 2. und 3. Tests dieser Studie zu bestimmen, wurde auf Basis des in Deutschland gebräuchlichsten Testprotokolls für Radsportler (Bund Deutscher Radfahrer (BDR), Beginn mit 100 W, Steigerung um 20 Watt pro 3 Minuten) eine fixe Laktatkonzentration von 3,0 mmol/l verwendet. Dadurch lagen die berechneten Intensitäten im aerob-anaeroben Stoffwechselbereich der verschiedenen etablierten Schwellenkonzepte von 2,0 bis 4,0 mmol/l [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] und resultierten in der vorliegenden Untersuchung in submaximalen Intensitäten.

Nach einem Stufentest (Test 1) hatten zwei Gruppen von gut-trainierten Radrennfahrern (Gruppe A, n=13) und trainierten Tourenfahrern (Gruppe B, n=5) zwei weitere Tests über je 100 Minuten zu absolvieren: eine herzfrequenzkonstante Einheit (Test 2) sowie eine leistungskonstante Einheit (Test 3). Die Intensitäten entsprachen der individuellen Herzfrequenz ($HF_{3,0\text{mmol/l}}$ in Test 2) bzw. der individuellen Leistung ($W_{3,0\text{mmol/l}}$ in Test 3) im Stufentest. Ein solcher Transfer von Parametern basierend auf der individuellen Laktatkurve in einem Leistungstest wird von den Autoren der diversen Laktatschwellenkonzepte propagiert und ist gängige Praxis der Trainingsplanung.

7.2 Maximalwerte von VO_2 , Herzfrequenz und Leistung

Im Stufentest wurden für die absoluten Maximalwerte von HFmax und Wmax keine signifikanten Unterschiede zwischen Gruppe A und Gruppe B beobachtet. Dagegen erreichte Gruppe A im Stufentest deutlich höhere Werte an maximaler Sauerstoffaufnahme $VO_{2\text{max}}$ und relativer Leistung (Watt pro kg Körpergewicht) als Gruppe B. Dies spricht für die gute Anpassung des Körpers an die intensiveren Trainings- und Wettkampftätigkeiten der Athleten von Gruppe A und die darauf basierende Einteilung der Probanden aufgrund von Umfang und Struktur ihrer sportlichen Aktivität nach Jeukendrup et al. **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**.

7.3 $HF_{3,0\text{mmol/l}}$, $W_{3,0\text{mmol/l}}$ und Laktatkonzentrationen

Das komplette Absolvieren der herzfrequenz-konstanten Einheit durch die schlechter trainierten Tourenfahrer aus Gruppe B mag an der geringeren mittleren Zielherzfrequenz dieser Gruppe ($HF_{3,0\text{mmol/l}}$ $173,6 \pm 4,8 \text{ min}^{-1}$ resp. $87,8 \pm 1,72\%$ der HFmax) liegen. Die bei den gut-trainierten Athleten der Gruppe A im Mittel deutlich höhere absolute wie auch relative Herzfrequenz bei einer Laktatkonzentration von 3,0 mmol/l ($178,4 \pm 9,4 \text{ min}^{-1}$ resp. $90,7 \pm 2,78\%$ der HFmax) kann durch den Einfluss des intensiven Ausdauertrainings auf die Laktatkinetik der Probanden erklärt werden. Dieses führt bei gut-trainierten Ausdauersportlern zu einer besseren Laktatelimination **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**. Im einzelnen sind dies folgende spezifische Anpassungen des Organismus **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht**

gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]:

- Zunahme der Kapillardichte und Mitochondrienmasse,
- höhere Laktatclearance-Rate, mit einer Abnahme der Bedeutung des Säure-Basen-Status der Muskulatur als Leistungslimitierung,
- höhere oxidative Kapazität des anaeroben Teils der Glykolyse und des Zitratzyklus mit einer Zunahme der aeroben Enzyme pro Gramm Muskulatur,
- höhere Kapazität der Laktatoxidation sowie
- Zunahme der Laktat-Transportrate über das Sarkolemm ins Interstitium der Zelle.

Nach O'Toole et al. [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] verringert eine hohe Laktatclearance-Rate in hochtrainierten Ausdauersportlern die Bedeutung des Säure-Basen-Status der Muskulatur als limitierenden Faktor für körperliche Leistung. Dagegen gewinnen andere Faktoren wie Herzmuskelermüdung [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] und die thermoregulatorischen Gegebenheiten des Organismus [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] an Bedeutung. Dies ist auch an den Werten derjenigen Probanden ersichtlich, die die Tests vorzeitig beenden.

Die in unserer Studie deutlich unter der Berechnungsgrundlage von 3,0 mmol/l liegenden mittleren Laktatspiegel beider Gruppen in beiden Tests legen keine Korrelation zwischen den Laktatkonzentrationen aus dem Stufentest und denen während Ausdauerbelastung nahe. Wie Hoogeveen und Schep [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] feststellten, erschwert die hohe individuelle Variabilität der Plasmalaktatkonzentrationen jeden Versuch, Trainingsvorgaben zu treffen. Sie verdeutlichten dies an Elite-Triathleten in einem auf einem Schwellentest basierenden Einzelzeitfahren über 40 km. Wir konnten nun zeigen, dass dies zudem sowohl für herzfrequenz- als auch für leistungs-konstante Einheiten gilt.

7.4 Respiratorischer Quotient

Sowohl in Test 2 als auch in Test 3 entspricht in beiden Gruppen der bis zur 100. Minute recht konstante Verlauf des RQ mit nur einer geringen Streubreite einer gemischten Utilisation von ca. 70% Kohlenhydraten und 30% Fett. Dies ist Nachweis einer bedeutenden Lipolyse selbst unter submaximalen Intensitäten.

Die Schwierigkeit in der Interpretation dieser Daten beruht darin, dass die Höhe des gemessenen RQ nicht definitiv auf die Ausdauerleistung des betreffenden Athleten übertragen werden kann. Die Varianz des inter-individuellen RQ kann durch die in unterschiedlichem Maße ablaufende Produktion von sog. Exzess- CO_2 aufgrund von Hyperventilation hervorgerufen werden, die zur spirometrischen Bestimmung eines Gemisches aus metabolischem und respiratorischen RQ führt. Der wahre metabolische RQ wird so durch die zusätzliche CO_2 -Abgabe maskiert, die einen bekannten physiologischen Mechanismus für die Elimination von Säureäquivalenten aufgrund des entstehenden Metaboliten Laktat darstellt [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**].

7.5 Relative Leistung und relative Herzfrequenz

Die Verlaufskurven von relativer Leistung (bezogen auf $W_{3,0\text{mmol/l}}$) bzw. relativer Herzfrequenz (bezogen auf $HF_{3,0\text{mmol/l}}$) in Test 2 und 3 werden dominiert vom Effekt des "cardiac drift". Leistungsphysiologisch finden sich für den Anstieg der Herzfrequenz bei konstanter Leistung bzw. den Abfall der Leistung bei konstanter Herzfrequenz in der Literatur zwei Erklärungsansätze:

7.5.1 "cardiac drift" durch Hyperthermie und Dehydrierung

Nach Gonzales-Alonso et al. [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] steigt die Herzfrequenz während intensiver Ausdauerbelastung um etwa 9 % aufgrund von Hyperthermie und Dehydrierung. Ursache ist ein Anstieg der Körpertemperatur. Daraus resultiert eine höhere Herzfrequenz, da ein erhöhter Blutfluss zur schweißgekühlten Haut aufrechterhalten werden muss. Die dadurch verstärkte Wärmeabgabe an die Umgebung wirkt einem Anstieg der Körpertemperatur entgegen [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden**

werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.].

Eng mit der Hyperthermie sind die Effekte der Dehydrierung verknüpft. Ein Verlust an Plasmavolumen aufgrund von erhöhter Transpiration sowie Blutpooling in den unteren Extremitäten und der Haut führen zu einem verminderten Schlagvolumen. Daraufhin steigt die Herzfrequenz, damit das notwendige Herzzeitvolumen aufrechterhalten werden kann **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**.

7.5.2 "cardiac drift" durch Abfall der Muskeffizienz

Woledge **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]** vertritt die These, dass der Herzfrequenz-Anstieg zum Teil auch auf ein gesteigertes zentrales Kommando zurückzuführen ist. Dies sei als Folge eines Abfalls der Muskeffizienz zu verstehen, die mit Erschöpfung assoziiert ist.

Die in der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Daten bestätigen diese Faktoren. In Test 2 musste bei beiden Gruppen die Leistung reduziert werden, um die $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ konstant zu halten.

Der Abfall der relativen Leistung in Gruppe B nach der 60. Minute ist höher als in Gruppe A, was – übereinstimmend mit Lucía et al. **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]** – wiederum auf die höhere Ausdauerleistungsfähigkeit der gut-trainierten Athleten in Gruppe A zurückgeführt werden kann.

Dazu korrespondierend kann in Test 3 ein kontinuierlicher Anstieg der Herzfrequenz bei gleichbleibender Leistung festgestellt werden. Hierbei sind die Werte der relativen Herzfrequenz bei den vorzeitig den Test abbrechenden Probanden höher als deren $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ (Gr. A: Faktor $1,035 \pm 0,027$ der $HF_{3,0\text{mmol/l}}$; Gr. B: Faktor $1,049 \pm 0,048$). Es ist interessant festzustellen, dass der Mittelwert der Durchfahrenden aus Gruppe B ihre $HF_{3,0\text{mmol/l}}$ bereits ab der 50. Minute übersteigt. Die Finisher aus Gruppe A hingegen bleiben im gesamten Test 3 unter ihrer $HF_{3,0\text{mmol/l}}$.

Wie bereits genannt, fiel in der vorliegenden Untersuchung auf, dass Dehydrierung eine nicht zu unterschätzende Rolle für die Ausdauerleistung des Athleten spielt. Dies trifft vor allem für die Zeit nach der 50. Minute zu, die in beiden Tests und bei

beiden Gruppen den mittleren Zeitpunkt der vorzeitigen Testbeendigung markiert. Eine Flüssigkeitsaufnahme kurz vor der 100-minütigen submaximalen Belastung, wie sie in dieser Studie als Mittel der Standardisierung gewählt wurde, könnte somit einen weniger günstigen Effekt auf die Ausdauerleistung des einzelnen Probanden haben als es vielleicht eine kontinuierliche Rehydrierung hätte.

7.6 Relative Sauerstoffaufnahme VO_2/kg

Der enge Zusammenhang zwischen der relativen Sauerstoffaufnahme und der geforderten Leistung, die ein Athlet erbringen muss **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**, wird durch die kontinuierliche Abnahme der VO_2/kg bei den durchfahrenden Athleten im herzfrequenz-konstanten Test 2 und ihren beinahe konstanter Verlauf im leistungs-konstanten Test 3 deutlich.

Eine Reduzierung der Leistung führt zu einem verringerten Sauerstoffbedarf des Organismus. Eine Abnahme der relativen VO_2/kg sowie des Sauerstoffpulses sind die Folge. Dazu kommen die bereits beschriebenen Effekte, die ebenfalls herzfrequenz-steigernd wirken: Hyperthermie, Dehydrierung und Muskelermüdung.

Wir fanden in unserer Studie dagegen keinen VO_2 -Anstieg während der leistungs-konstanten Einheit (Test 3), wie er von Swensen et al. **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]** berichtet und als langsame Komponente der Sauerstoffaufnahme bezeichnet wurde **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**.

Eindrucksvoll sind die nahezu parallel verlaufenden Graphen von relativer Sauerstoffaufnahme, Respiratorischem Quotienten und relativer Leistung (Test 2) bzw. relativer Herzfrequenz (Test 3) **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**. Die Streubreite von VO_2 ist deutlich geringer als die der gemessenen Laktatkonzentrationen. Aufgrund dieser Daten sind die Vorstellungen von Haber **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]** nachvollziehbar, Ausdauertraining auf den individuellen VO_{2max} -Werten eines Athleten aufzubauen. Dabei kommt unseres Erachtens dem Watt-gesteuerten Training eine hohe Bedeutung zu, da die Sauerstoffaufnahme eng mit der geforderten Leistung korreliert und wir hierbei so deutliche Einflussfaktoren wie hingegen bei der Herzfrequenz nicht ausmachen konnten.

7.7 Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zu den Veröffentlichungen der Laktatschwellenmodelle fanden wir in unserer Studie keine Möglichkeit, laktat-basierte Intensitäten aus dem verwendeten Leistungstest auf submaximale Ausdauerleistungen von 100 Minuten Dauer zu übertragen. Die von Hoogeveen und Schep **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]** beschriebene hohe individuelle Variabilität der Laktatkonzentrationen wird von den durch Maughan und Burke **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]** genannten Faktoren des Stoffwechsels während Ausdauerbelastung gestützt. Die vorliegende Untersuchung widerlegt die These, den Metabolismus sowohl herzfrequenz- als auch leistungs-konstanter Einheiten durch Laktatwerte aus dem Schwellenstufentest vorherzusagen zu können.

Dies wird insbesondere verständlich, wenn man die Zeitdauer betrachtet, die zum Erreichen eines Steady-State-Gleichgewichts physiologischer Parameter während eines Leistungstests nötig ist. Während sich Herzfrequenz und VO_2 bereits nach wenigen Minuten im Steady-State befinden, dauert es bei Laktat bis zu 12 Minuten, bis ein Gleichgewicht erreicht ist **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**. Auch Foxdal et al. beobachteten bei der Auswertung von Intensitäten, die aus einem Leistungstest mit weniger als 12 Minuten Stufendauer resultierten, dass sie zu keiner zuverlässigen Schätzung von Intensitäten für Ausdauerleistungen bei Laktat-Steady-State führten **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**.

Solch lange Stufentests hingegen, deren größter Teil im Bereich submaximaler Intensitäten läge, sind für Ausdauerathleten nicht praktikabel. Selbst wenn man einem solchen Protokoll folgt, besteht im sehr variablen Ausmaß der Glykogenspeicherung im Muskel immer noch ein großer, unbekannter Einfluss auf das Testergebnis **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**.

Dagegen fällt – basierend auf den Intensitäten von Test 1 – für die geforderten Ausdauerleistungen eine deutlich höhere Korrespondenz auf zwischen Sauerstoffaufnahme, Leistung und Herzfrequenz als mit der jeweiligen Laktatkonzentration. Zur Trainings- und Wettkampfsteuerung erscheinen uns diese Parameter sinnvoller als der metabolische Parameter Laktat [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**].

Unsere Daten stützen die These von Haber [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**], dass - basierend auf Stufenleistungstests - die Sauerstoffaufnahme die ideale Möglichkeit zur Vorhersage der Trainingsintensität und der Trainingsüberwachung im Radsport darstellen könnte – ohne Rücksicht darauf, ob die Trainingseinheit herzfrequenz- oder leistungs-konstant erfolgt. Die Bedeutung einer auf der Sauerstoffaufnahme basierenden Leistungsdiagnostik gegenüber herzfrequenz- oder laktatbasierten Methoden könnte umso bedeutender sein, da sich in der vorliegenden Studie bei der Sauerstoffaufnahme keine korrelierenden Effekte zu "cardiac drift" und Dehydrierung zeigten. Dagegen stellte sich in unseren Untersuchungen jedoch ein direkter, linearer Zusammenhang mit der geforderten Leistung dar. Die erbrachte Leistung mittels eines Kraftmessers in Training und Wettkampf genau zu überwachen stellt heute im Radsport technisch kein Problem mehr dar [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**].

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass

1. Leistungstests mit einer Stufendauer von 3 Minuten weder eine verlässliche Schätzung des Laktat-Steady-States eines Athleten noch eine Voraussage über den Stoffwechsel während Ausdauerleistungen bei konstanten Intensitäten zulassen,
2. in Gruppen von Athleten mit unterschiedlichem Trainingshintergrund VO_2 , Leistung und HF eine viel höhere Übereinstimmung zwischen stufenförmiger und herzfrequenz- bzw. leistungs-konstanter Belastung darstellen als der metabolische Parameter Laktat,

3. die erbrachte Leistung zusammen mit der Herzfrequenz des Athleten die ideale Methode zur Bestimmung von Trainingsintensitäten und zur Trainingsüberwachung darstellt.

8 ZUSAMMENFASSUNG

In Ausdauersportarten wie dem Radsport sind die Laktatkonzentrationen des Sportlers in einem Stufenleistungstest die traditionellen Parameter zur Festlegung der Herzfrequenz-Trainingsbereiche. Da bisher nur wenige Autoren die physiologischen Parameter während längerer Ausdauerbelastung betrachteten, werden in der vorliegenden Studie metabolische wie auch spirometrische Parameter von 18 Radsportlern in zwei Tests über jeweils 100 Minuten Dauer untersucht.

Die Aufteilung der Probanden in zwei Gruppen erfolgte aufgrund ihrer Trainings- und Rennaktivität. Gruppe A umfasste 13 gut-trainierte Straßenradrennfahrer, die ganzjährig ein wettkampforientiertes Training sowie Straßenrennen bestritten. Gruppe B bestand als Vergleichsgruppe gleicher Altersstruktur aus 5 gut-trainierten Tourenfahrern, die ohne Wettkampforientierung deutlich weniger Jahreskilometer als Gruppe A absolvierten.

Basierend auf dem Stufenleistungstestprotokoll des Bundes Deutscher Radfahrer (BDR; Start bei 100 Watt, Steigerung der Leistung um 20 Watt pro 3 Minuten) hatten die Probanden einen zweiten Test unter konstanter Herzfrequenz- sowie einen dritten Test unter konstanter Leistungsvorgabe zu bestreiten. Während aller drei Tests wurden Laktat, Respiratorischer Quotient, Sauerstoffaufnahme und Sauerstoffpuls, Leistung sowie Herzfrequenz aufgezeichnet. Die Intensitäten für die beiden 100-minütigen Tests wurden aufgrund der individuellen Werte des einzelnen Athleten bei einer Laktatkonzentration von 3,0 mmol/l im Leistungstest berechnet. Unter Laborbedingungen bietet dieser Testaufbau unserer Meinung nach die beste Möglichkeit, darzustellen, wie weit die Vorhersage von Trainingsintensitäten aufgrund eines gebräuchlichen Stufenleistungstestprotokolls möglich ist.

Die in der vorliegenden Studie deutlich unter der Berechnungsgrundlage von 3,0 mmol/l liegenden mittleren Laktat Spiegel beider Gruppen in beiden 100-minütigen Tests legen keine Korrelation zwischen den Laktatkonzentrationen aus dem Stufentest und denen während Ausdauerbelastung nahe (Test 2: $1,78 \pm 0,82$ mmol/l (Gr. A) resp. $1,86 \pm 1,09$ mmol/l (Gr. B); Test 3: $2,07 \pm 1,42$ mmol/l (Gr. A) resp. $3,05 \pm 1,34$ mmol/l (Gr. B)).

Sowohl in Test 2 als auch in Test 3 entspricht in beiden Gruppen der bis zur 100. Minute recht konstante Verlauf des RQ um jeweils 0,95 einer gemischten Utilisation

von ca. 70% Kohlenhydraten und 30% Fett. Dies ist Nachweis einer bedeutenden Lipolyse während langer Ausdauerbelastungen selbst unter submaximalen Intensitäten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass

1. Leistungstests mit einer Stufendauer von 3 Minuten weder eine verlässliche Schätzung des Laktat-Steady-States eines Athleten noch eine Voraussage über den Stoffwechsel während Ausdauerleistungen bei konstanten Intensitäten zulassen,
2. in Gruppen von Athleten mit unterschiedlichem Trainingshintergrund VO_2 , Leistung und HF eine viel höhere Übereinstimmung zwischen stufenförmiger und herzfrequenz- bzw. leistungskonstanter Belastung darstellen als der metabolische Parameter Laktat,
3. die erbrachte Leistung zusammen mit der Herzfrequenz des Athleten die ideale Methode zur Bestimmung von Trainingsintensitäten und zur Trainingsüberwachung darstellt.

9 APPENDIX

9.1 Probandenfragebögen und Einverständniserklärungen

9.1.1 Einverständniserklärung zu Test 1

BAYERISCHE JULIUS-MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
WÜRZBURG

- Betriebsärztliche Untersuchungsstelle –



Persönliche Daten:

_____	_____	<input type="checkbox"/> m <input type="checkbox"/> w	_____	_____
Name	Vorname	Geschlecht	Geb.datum	Alter
_____	_____	_____	_____	_____
Verein	Jahreskm ca.	aktiv seit	Größe	Gewicht
Klasse:	<input type="checkbox"/> Sonstige	Disziplin(en):		
<input type="checkbox"/> Amateur C	<input type="checkbox"/> GS-3	<input type="checkbox"/> Straße	<input type="checkbox"/> Cyclocross	
<input type="checkbox"/> Amateur B	<input type="checkbox"/> GS-2	<input type="checkbox"/> Bahn	<input type="checkbox"/> MTB	
<input type="checkbox"/> Amateur A	<input type="checkbox"/> GS-1			

Einverständniserklärung – Test 1

Hiermit erkläre ich mich bereit, von der Betriebsärztlichen Untersuchungsstelle der Universität Würzburg einen Leistungstest auf dem Fahrradergometer mit Bestimmung von EKG, Puls, Atemgaszusammensetzung und Laktatwerten durchführen zu lassen. Ziel der Untersuchung ist das Verhalten von Puls und Laktat unter Langzeitbelastung. In der Untersuchung wird die maximale Leistungsfähigkeit ermittelt und der Proband ausbelastet. Über mögliche Risiken, wie z.B. eventuelle Herzrhythmusstörungen oder Übelkeit etc., wurde ich aufgeklärt.

Bei mir sind folgende Vorerkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems bekannt:

Ich nehme regelmäßig die folgenden Medikamente ein:

Ich habe noch diese konkreten Fragen:

Nach Darstellung des o.g. Untersuchungsablaufs und –zwecks sowie unter Hinweis auf die möglichen Risiken erkläre ich mich mit der Teilnahme an der Untersuchung einverstanden.

Datenschutz: Ich willige zudem ein, dass die im Rahmen der Untersuchung von mir durch persönliche Angabe sowie durch den Testaufbau unmittelbar erhobenen Daten wie Name, Geburtsdatum, Adresse, Wattzahlen, Laktat-, EKG-, Puls- und Atemgaswerte zum Zweck der Erforschung des Verlaufs und einer eventuellen Korrelation dieser Parameter gesammelt und ausgewertet und auch für eine evtl. weitere Forschung verwendet werden dürfen. Die so gewonnenen Daten werden nur in anonymisierter Form veröffentlicht und nach erfolgtem dritten Test gratis zur Verfügung gestellt. Falls eine personenbezogene Veröffentlichung erfolgen soll, wird eine gesonderte Einwilligung eingeholt.

Datum, Unterschrift

9.1.2 Einverständniserklärung zu Test 2 und 3

BAYERISCHE JULIUS-MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
WÜRZBURG
- Betriebsärztliche Untersuchungsstelle –



Name:
Geb.datum:
konst. HF: /min
konst. Leistung: Watt

Einverständniserklärung – Test 2 und 3

Hiermit erkläre ich mich bereit, von der Betriebsärztlichen Untersuchungsstelle der Universität Würzburg, basierend auf dem vorangegangenen Leistungstest, die folgenden Tests auf dem Fahrradergometer mit Bestimmung von EKG, Puls, Atemgaszusammensetzung und Laktatwerten durchführen zu lassen. Ziel der Untersuchung ist das Verhalten von Puls und Laktat unter Langzeitbelastung über 90 Minuten.

Die Intensitäten beider Tests entsprechen den Puls- und Wattwerten bei 3 mmol/l Laktat des vorangegangenen Leistungstests, in meinem Fall

/min (Test 2, herzfrequenzkonstant) bzw.

Watt (Test 3, leistungskonstant).

Über mögliche Risiken, wie z.B. eventuelle Herzrhythmusstörungen oder Übelkeit etc., wurde ich aufgeklärt. Ich habe noch diese konkreten Fragen:

Nach Darstellung des o.g. Untersuchungsablaufs und –zwecks sowie unter Hinweis auf die möglichen Risiken erkläre ich mich mit der Teilnahme an der Untersuchung einverstanden.

Datenschutz: Ich willige zudem ein, dass die im Rahmen der Untersuchung von mir durch persönliche Angabe sowie durch den Testaufbau unmittelbar erhobenen Daten wie Name, Geburtsdatum, Adresse, Wattzahlen, Laktat-, EKG-, Puls- und Atemgaswerte zum Zweck der Erforschung des Verlaufs und einer eventuellen Korrelation dieser Parameter gesammelt und ausgewertet und auch für eine evtl. weitere Forschung verwendet werden dürfen. Die so gewonnenen Daten werden nur in anonymisierter Form veröffentlicht und nach erfolgtem dritten Test gratis zur Verfügung gestellt. Falls eine personenbezogene Veröffentlichung erfolgen soll, wird eine gesonderte Einwilligung eingeholt.

Datum, Unterschrift

9.2 Tabellen mit Testdaten

Legende der verwendeten Abkürzungen:

VO₂	Sauerstoffaufnahme	(ml/min)
VO₂/kg	Sauerstoffaufnahme/kg Körpergewicht	(ml/min/kg)
O₂/HF	Sauerstoffpuls	(ml)
O₂/HF/kg	Sauerstoffpuls/kg Körpergewicht	(ml/kg)
RQ	Respiratorischer Quotient	
HF	Herzfrequenz	(min ⁻¹)
W	Leistung	(W)
Wmax/kg	maximale Leistung/kg Körpergewicht	(W/kg)
HF_{3,0mmol/l}	HF bei Laktatkonzentration von 3,0 mmol/l	(min ⁻¹)
%HFmax	Anteil an maximaler Herzfrequenz	(%)
W_{3,0mmol/l}	Leistung bei Laktatkonzentration von 3,0 mmol/l	(W)
*	U19-Fahrer (Gruppe A)	
SD	Standardabweichung	
nd	keine Daten verfügbar	

9.2.1 zu Test 1 (Stufentest)

9.2.1.1 Abb 11.1 -Abb 11.5: Grafische Darstellung der Testdaten von Gruppe A und Gruppe B in Test 1 (Stufentest)

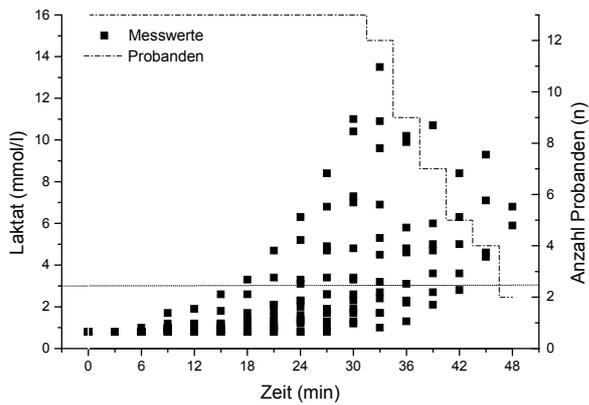


Abb 11.1a: Laktatkonzentrationen bei Probanden der Gruppe A in Test 1

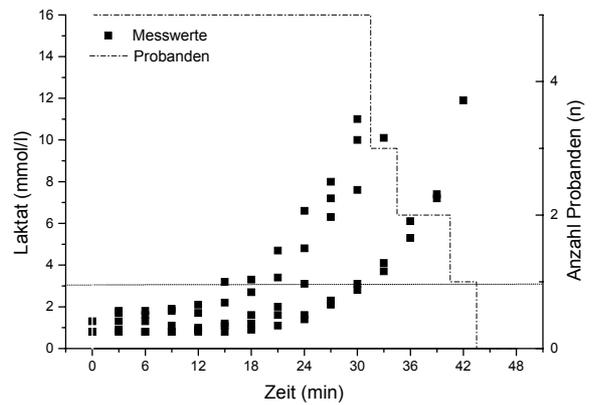


Abb 11.1b: Laktatkonzentrationen bei Probanden der Gruppe B in Test 1

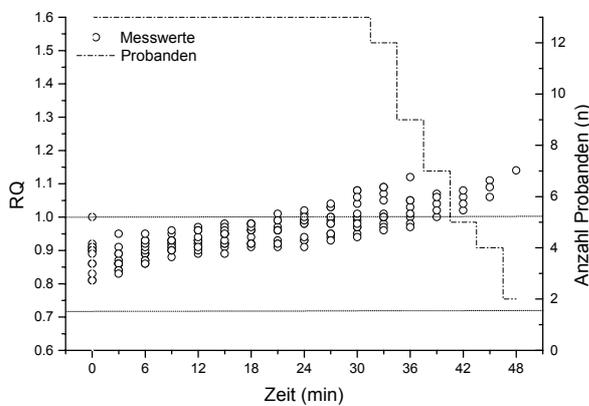


Abb 11.2a: Verlauf des RQ bei Probanden der Gruppe A in Test 1

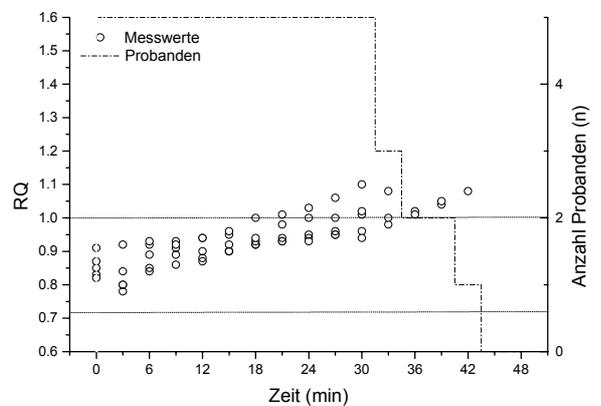


Abb 11.2b: Verlauf des RQ bei Probanden der Gruppe B in Test 1

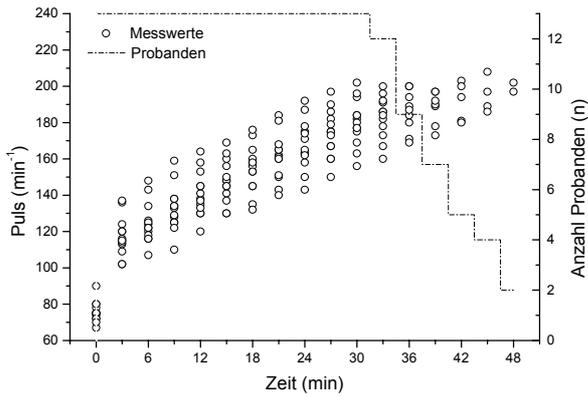


Abb 11.3a: Verlauf der HF bei Probanden der Gruppe A in Test 1

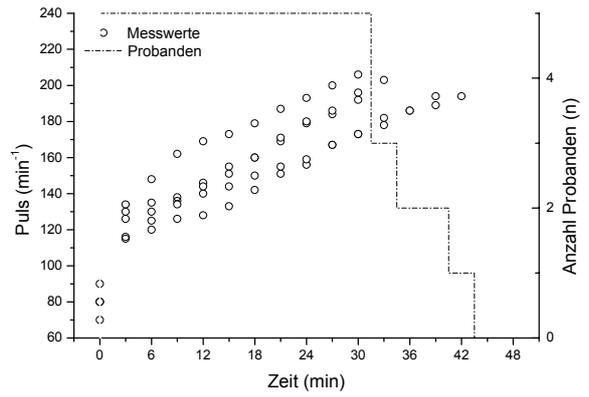


Abb 11.3b: Verlauf der HF bei Probanden der Gruppe B in Test 1

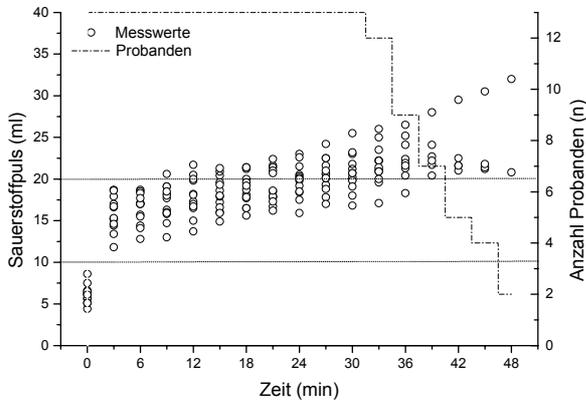


Abb 11.4a: Verlauf des Sauerstoffpulses O_2 /HF bei Probanden der Gruppe A in Test 1

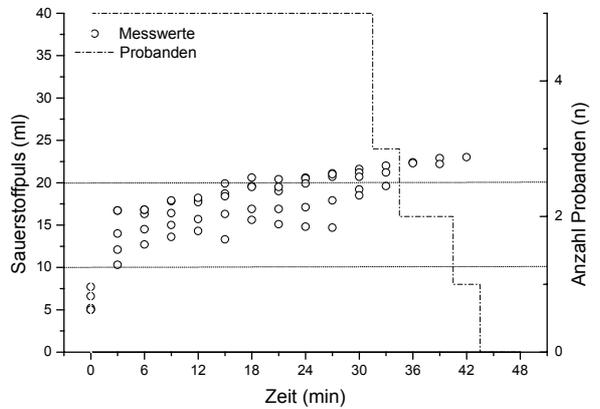


Abb 11.4b: Verlauf des Sauerstoffpulses O_2 /HF bei Probanden der Gruppe B in Test 1

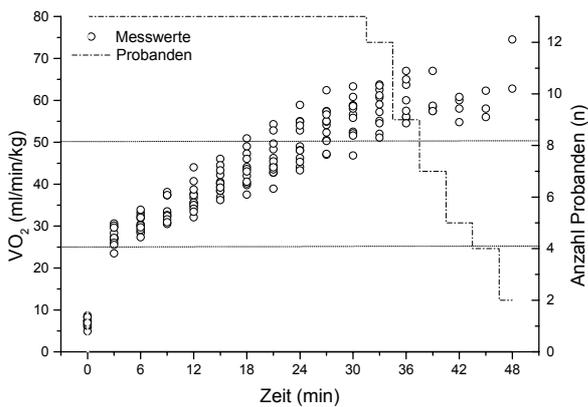


Abb 11.5a: Verlauf der relativen Sauerstoffaufnahme VO_2 /kg bei Probanden der Gruppe A in Test 1

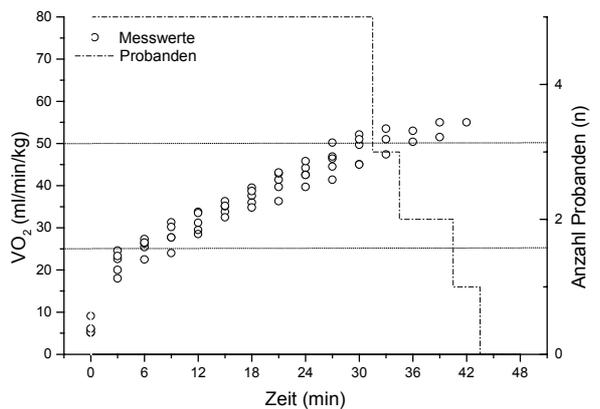


Abb 11.5b: Verlauf der relativen Sauerstoffaufnahme VO_2 /kg bei Probanden der Gruppe B in Test 1

9.2.1.2 Tab. 18 – Tab. 23: Tabellarische Übersichten über die Messwerte von Gruppe A in Test 1

	Laktat _{max} (mmol/l)	VO ₂ max (ml/min)	VO ₂ max/kg (ml/min/kg)	(O ₂ /HF) _{max} (ml)	O ₂ /HF/kg (ml/kg)	HFmax (min ⁻¹)	Wmax (W)	Wmax/kg (W/kg)	HF _{3,0mmol/l} (min ⁻¹)	%HFmax	W _{3,0mmol/l} (W)
A01	10,4	3500,0	62,5	18,0	0,321	202	280	5,00	179	88,6	210
A02	10,7	4160,0	65,0	23,1	0,361	189	340	5,31	164	86,7	270
A03*	8,4	4320,0	60,0	22,6	0,314	203	360	5,00	183	90,1	303
A04	5,9	4187,5	62,5	21,3	0,318	202	400	5,97	192	95,0	348
A05*	10,9	3968,0	62,0	21,1	0,330	191	300	4,69	170	89,0	238
A06	6,8	5140,5	74,5	30,0	0,435	197	400	5,80	181	91,9	360
A07	10,2	4288,0	67,0	22,2	0,347	200	320	5,00	183	91,5	270
A08	9,6	3776,0	59,0	21,2	0,331	186	300	4,69	164	88,2	235
A09	7,1	4473,0	63,0	25,7	0,362	186	380	5,35	171	91,9	330
A10*	9,3	4350,0	58,0	22,5	0,300	208	380	5,07	193	92,8	317
A11	5,0	4387,5	65,0	24,4	0,361	192	340	5,04	182	94,8	294
A12*	9,9	3565,0	57,5	18,5	0,298	200	320	5,16	184	92,0	255
A13	13,5	3906,0	62,0	20,0	0,317	200	300	4,76	173	86,5	190
<i>Mittel</i>	<i>9,05</i>	<i>4155,5</i>	<i>62,92</i>	<i>22,35</i>	<i>0,338</i>	<i>196,6</i>	<i>340,0</i>	<i>5,14</i>	<i>178,4</i>	<i>90,69</i>	<i>278,5</i>
<i>SD</i>	<i>2,34</i>	<i>430,9</i>	<i>4,46</i>	<i>3,13</i>	<i>0,037</i>	<i>7,07</i>	<i>40,8</i>	<i>0,39</i>	<i>9,4</i>	<i>2,78</i>	<i>52,6</i>
<i>Median</i>	<i>9,6</i>	<i>4187,5</i>	<i>62,5</i>	<i>22,2</i>	<i>0,33</i>	<i>200</i>	<i>340</i>	<i>5,04</i>	<i>181</i>	<i>91,5</i>	<i>270</i>

Tab. 18: Maximalwerte von Gruppe A in Test 1 (Stufentest) mit berechneten Vorgaben für Test 2 (HF_{3,0mmol/l}) und Test 3 (W_{3,0mmol/l})

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
A01	0,8	0,8	0,8	1,2	1,2	1,8	2,6	3,4	5,2	6,8	10,4						
A02	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	0,9	0,8	1,0	2,3	2,6	3,3	4,5	5,8	10,7			
A03*	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	1,2	1,8	1,9	2,7	4,6	6,0	8,4		
A04	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	1,1	1,3	1,3	1,3	1,7	2,2	2,7	3,6	4,4	5,9
A05*	0,8	0,8	0,8	0,9	1,1	1,2	1,7	2,1	3,1	4,7	7,3	10,9					
A06	0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,7	1,0	1,3	2,1	2,8	4,6	6,8
A07	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,1	1,3	2,0	2,6	3,4	5,3	10,2				
A08	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,1	1,4	2,1	3,3	4,9	7,0	9,6					
A09	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0	1,2	1,7	2,3	3,6	5,0	7,1	
A10*	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2	1,1	1,5	1,6	1,7	2,3	2,4	3,1	4,7	6,3	9,3	
A11	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	1,4	1,9	2,6	3,2	4,8	5,0			
A12*	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	1,0	1,3	1,8	2,3	3,4	4,8	6,9	9,9				
A13	0,8	0,8	1,0	1,7	1,9	2,6	3,3	4,7	6,3	8,4	11,0	13,5					

Tab. 19: Laktatkonzentrationen (mmol/l) von Gruppe A in Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
A01	0,81	0,89	0,92	0,93	0,97	0,98	0,98	0,99	1,01	1,03	1,08						
A02	0,90	0,86	0,89	0,95	0,96	0,97	0,96	0,96	0,98	0,98	0,99	1,00	1,05	1,07			
A03*	1,00	0,86	0,89	0,91	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,95	0,98	1,00	1,04	1,06		
A04	0,92	0,91	0,93	0,92	0,93	0,95	0,98	1,01	0,99	0,99	1,00	1,01	1,03	1,06	1,08	1,11	1,14
A05*	0,81	0,87	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,99	1,00	1,04	1,07					
A06	0,91	0,86	0,91	0,88	0,91	0,91	nd										
A07	0,91	0,84	0,86	0,90	0,89	0,89	0,91	0,92	0,93	0,95	0,97	1,00	1,05				
A08	0,90	0,86	0,87	0,91	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00	1,01	1,05					
A09	0,90	0,89	0,92	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,94	0,95	0,97	0,97	0,98	1,00	1,02	1,06	
A10*	0,83	0,86	0,87	0,90	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	1,02	1,04	1,09	
A11	0,86	0,84	0,93	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96	0,99	0,98	0,98	1,00	1,01				
A12*	0,86	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	1,02	1,03	1,08	1,09	1,12				
A13	0,89	0,83	0,86	0,90	0,91	0,95	0,98	0,99	1,00	1,04	1,06	1,09					

Tab. 20: Verlauf des RQ von Gruppe A in Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
A01	80	115	120	134	153	160	173	184	192	197	202						
A02	72	102	107	110	120	130	135	143	150	160	169	173	180	189			
A03*	74	113	124	128	135	141	145	150	163	167	177	182	189	197	203		
A04	67	120	126	133	138	148	153	160	163	167	175	178	184	190	194	197	202
A05*	75	114	125	134	141	148	158	162	171	175	182	191					
A06	75	109	116	125	130	137	145	151	158	160	163	167	171	178	181	189	197
A07	78	124	134	138	145	150	156	165	175	182	184	192	200				
A08	75	116	122	129	137	145	153	161	165	175	180	186					
A09	80	115	118	125	130	130	132	140	143	150	156	160	169	173	180	186	
A10*	75	120	122	138	145	156	160	165	174	179	184	186	194	197	200	208	
A11	72	102	116	122	133	145	158	160	162	173	177	184	187	192			
A12*	90	136	143	151	158	163	165	168	178	186	194	196	200				
A13	70	137	148	159	164	169	176	181	187	190	196	200					

Tab. 21: Verlauf der HF (min^{-1}) von Gruppe A in Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
A01	7,3	30,6	33,2	37,4	44,0	46,0	50,9	54,3	58,9	62,4	63,3						
A02	8,2	29,8	32,5	37,4	37,7	40,5	44,1	46,2	48,1	54,1	56,6	60,7	63,7	67,0			
A03*	7,4	26,7	29,8	33,1	36,7	39,3	42,0	44,4	49,0	52,3	52,5	55,1	56,0	58,4	60,0		
A04	5,9	27,2	28,7	32,3	35,5	36,9	39,8	42,7	44,1	47,0	52,1	52,0	56,1	57,5	60,8	62,3	62,8
A05*	4,9	27,3	31,9	33,5	35,6	38,4	43,6	45,4	52,8	54,9	58,8	62,5					
A06	6,6	27,0	28,3	30,7	34,7	40,1	nd	(74,5)									
A07	6,2	28,3	30,4	32,6	37,4	42,2	49,0	48,3	55,0	57,4	58,7	63,8	67,0				
A08	8,6	30,1	32,0	38,1	40,7	44,5	47,3	52,8	54,9	57,3	58,0	59,0					
A09	6,4	27,2	30,2	32,4	35,0	38,4	40,2	42,8	46,2	50,5	55,8	57,2	60,0	58,7	54,8	56,0	
A10*	7,5	23,5	27,3	30,5	32,1	36,2	37,5	38,9	43,3	47,2	46,8	51,1	54,5	57,4	58,0	58,0	
A11	7,1	26,0	29,1	31,6	34,1	40,2	43,0	43,5	48,0	55,0	60,8	63,5	65,0				
A12*	8,3	25,5	29,7	30,9	33,4	39,2	40,6	44,0	45,3	50,3	51,6	54,5	57,5				
A13	6,9	29,6	33,9	37,4	38,7	43,3	46,0	49,7	54,0	56,6	58,6	61,2					

Tab. 22: Verlauf der relativen Sauerstoffaufnahme VO_2/kg (ml/min/kg) von Gruppe A in Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
A01	5,6	15,2	15,7	15,8	17,0	16,0	16,5	16,7	17,5	17,8	18,0						
A02	7,5	18,7	18,7	20,6	20,5	20,9	21,4	21,4	20,5	21,6	21,2	22,2	22,4	22,7			
A03*	6,2	16,6	18,5	19,1	21,7	20,4	21,2	21,6	23,0	22,5	21,8	22,2	21,3	21,7	21,6		
A04	6,1	15,2	15,5	16,3	17,3	17,2	18,1	17,9	18,4	19,3	19,9	19,6	20,4	20,4	21,0	21,2	20,8
A05*	4,4	15,3	17,0	16,0	17,0	16,6	17,7	17,8	19,8	20,1	20,7	21,1					
A06	5,7	17,9	17,0	17,7	19,8	19,6	20,0	21,0	21,5	22,5	23,0	25,0	26,5	28,0	29,5	30,5	32,0
A07	5,1	14,4	14,4	15,9	16,5	17,9	19,6	18,5	20,3	20,6	20,2	21,4	21,9				
A08	6,6	17,0	17,1	18,2	18,2	18,6	18,7	20,7	20,1	20,6	20,7	20,9					
A09	5,1	16,7	18,3	19,1	20,0	21,3	21,4	22,4	22,6	24,2	25,5	26,0	25,2	24,1	21,6	21,4	
A10*	6,4	14,6	17,0	18,0	16,7	18,0	17,8	17,9	19,2	20,1	19,8	20,9	21,6	22,2	22,5	21,8	
A11	6,5	18,6	17,7	18,5	18,1	19,3	19,2	18,6	20,0	21,0	23,2	23,5	24,1				
A12*	6,1	11,8	12,8	13,0	13,7	14,9	15,6	16,2	15,9	17,0	16,8	17,1	18,3				
A13	8,6	13,4	14,1	14,7	15,0	15,9	16,5	17,3	18,5	18,8	19,1	20,0					

Tab. 23: Verlauf des Sauerstoffpulses (ml) von Gruppe A in Test 1 (Stufentest).

9.2.1.3 Tab. 25 – Tab. 29: Tabellarische Übersichten über die Messwerte von Gruppe B in Test 1

	Laktat _{max} (mmol/l)	VO ₂ max (ml/min)	VO ₂ max/kg (ml/min/kg)	(O ₂ /HF) _{max} (ml)	O ₂ /HF/kg (ml/kg)	HFmax (min ⁻¹)	Wmax (W)	Wmax/kg (W/kg)	HF _{3,0mmol/l} (min ⁻¹)	%HFmax	W _{3,0mmol/l} (W)
B01	7,2	4235,0	55,0	23,0	0,299	194	340	4,42	172	88,7	280
B02	11,9	4482,5	55,0	23,5	0,288	194	360	4,42	175	90,2	284
B03	10,1	3852,0	53,5	19,5	0,271	203	300	4,17	178	87,7	238
B04	10,0	3876,0	51,0	20,7	0,272	192	280	3,68	166	86,5	210
B05	11,0	3240,0	45,0	17,8	0,247	206	280	3,89	177	85,9	194
<i>Mittel</i>	<i>10,04</i>	<i>3937,10</i>	<i>51,90</i>	<i>20,90</i>	<i>0,2754</i>	<i>197,8</i>	<i>312,0</i>	<i>4,12</i>	<i>173,6</i>	<i>87,80</i>	<i>241,2</i>
<i>SD</i>	<i>± 1,76</i>	<i>± 469,87</i>	<i>± 4,19</i>	<i>± 2,39</i>	<i>± 0,0197</i>	<i>± 6,3</i>	<i>± 36,3</i>	<i>± 0,33</i>	<i>± 4,8</i>	<i>± 1,72</i>	<i>± 40,5</i>
<i>Median</i>	<i>10,1</i>	<i>3876</i>	<i>53,5</i>	<i>20,7</i>	<i>0,272</i>	<i>194</i>	<i>300</i>	<i>4,17</i>	<i>175</i>	<i>87,7</i>	<i>238</i>

Tab. 24: Maximalwerte von Gruppe B in Test 1 (Stufentest) mit berechneten Vorgaben für Test 2 (HF_{3,0mmol/l}) und Test 3 (W_{3,0mmol/l})

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
B01	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,1	1,4	2,1	3,1	3,7	5,3	7,2			
B02	1,3	1,3	1,3	1,1	1,0	1,1	1,2	1,6	1,6	2,3	2,8	4,1	6,1	7,4	11,9		
B03	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	1,2	1,6	2,0	3,1	6,3	7,6	10,1					
B04	0,8	1,8	1,8	1,8	1,7	2,2	2,7	3,4	4,8	7,2	10,0						
B05	0,8	1,7	1,6	1,9	2,1	3,2	3,3	4,7	6,6	8,0	11,0						

Tab. 25: Laktatkonzentrationen (mmol/l) von Gruppe B in Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
B01	0,83	0,80	0,85	0,86	0,87	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,98	1,02	1,04			
B02	0,87	0,80	0,92	0,91	0,90	0,92	0,93	0,93	0,93	0,95	0,94	1,00	1,01	1,05	1,08		
B03	0,85	0,78	0,84	0,89	0,88	0,90	0,92	0,94	0,95	0,96	1,01	1,08					
B04	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,95	0,94	0,98	1,00	1,00	1,02						
B05	0,82	0,84	0,89	0,92	0,94	0,96	1,00	1,01	1,03	1,06	1,10						

Tab. 26: Verlauf des RQ von Gruppe B in Test Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
B01	80	116	120	126	128	133	142	151	156	167	173	178	186	194			
B02	90	130	135	138	140	144	150	155	159	167	173	182	186	189	194		
B03	80	115	125	136	146	155	160	169	179	184	196	203					
B04	80	126	130	134	144	151	160	171	180	186	192						
B05	70	134	148	162	169	173	179	187	193	200	206						

Tab. 27: Verlauf der HF (min^{-1}) von Gruppe B in Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
B01	5,9	22,6	25,4	27,7	29,5	33,8	36,0	41,4	44,2	46,9	49,7	51,0	53,0	55,0			
B02	9,1	24,6	27,3	27,7	31,2	32,5	34,8	36,3	39,7	41,4	45,1	47,4	50,4	51,5	55,0		
B03	5,1	20,0	22,5	24,0	28,5	35,1	37,6	39,7	42,6	46,4	52,1	53,5					
B04	5,2	18,0	26,3	31,3	33,8	36,3	39,5	42,9	45,8	50,2	51,0						
B05	6,1	23,3	26,5	30,2	33,5	35,2	38,7	43,1	42,5	44,5	45,0						

Tab. 29: Verlauf der relativen Sauerstoffaufnahme VO_2/kg ($\text{ml}/\text{min}/\text{kg}$) von Gruppe B in Test 1 (Stufentest).

Zeit (min)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Stufe (W)	0	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
B01	6,6	16,7	16,3	17,8	17,9	19,9	20,6	20,4	20,6	21,1	21,6	22,0	22,4	22,9			
B02	7,7	16,7	16,8	16,4	17,7	18,7	19,6	19,0	20,5	20,7	21,2	21,2	22,3	22,2	23,0		
B03	5,2	14,0	14,5	15,0	15,7	16,3	16,9	16,9	17,1	17,9	19,2	19,6					
B04	5,0	10,3	16,8	17,9	18,2	18,4	19,5	19,5	19,9	21,0	20,7						
B05	5,0	12,1	12,7	13,6	14,3	13,3	15,6	15,1	14,8	14,7	18,5						

Tab. 29: Verlauf des Sauerstoffpulses (ml) von Gruppe B in Test 1 (Stufentest).

9.2.2 zu Test 2 (herzfrequenzkonstante Einheit)

9.2.2.1 Abb. 12.1 -Abb. 12.6: Grafische Darstellung der Testdaten von Gruppe A und Gruppe B in Test 2 (herzfrequenzkonstante Einheit). Daten der durchfahrenden Probanden gemittelt.

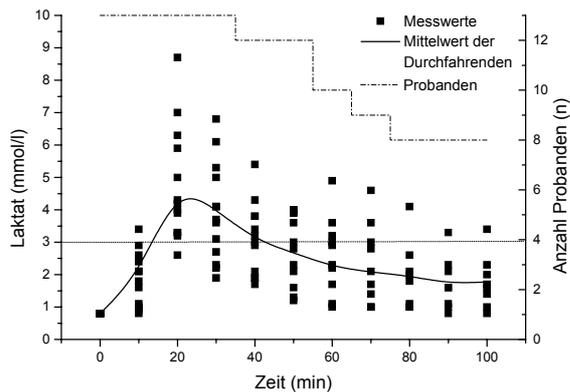


Abb. 12.1a: Laktatkonzentrationen bei Probanden der Gruppe A in Test 2.

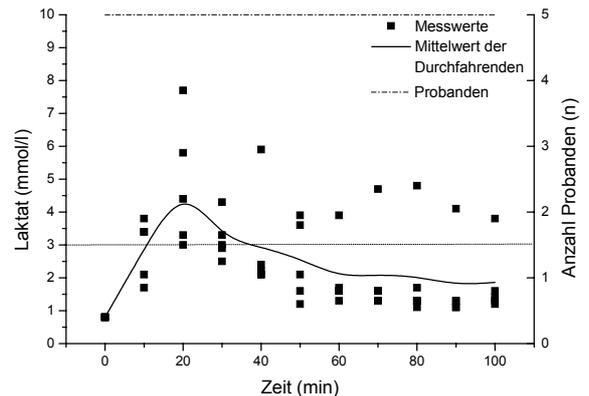


Abb. 12.1b: Laktatkonzentrationen bei Probanden der Gruppe B in Test 2.

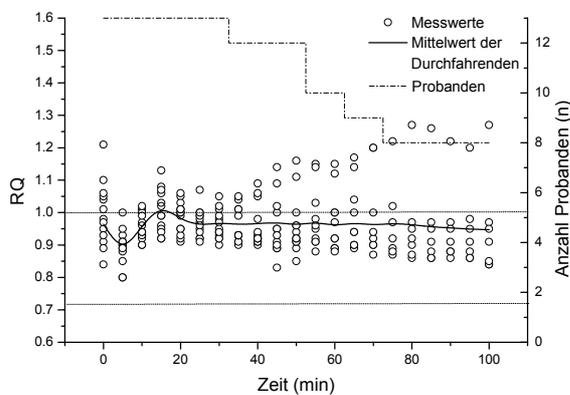


Abb. 12.2a: Verlauf des RQ bei Probanden der Gruppe A in Test 2.

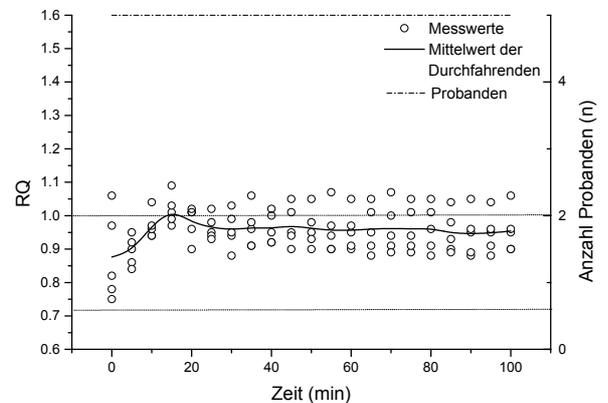


Abb. 12.2b: Verlauf des RQ bei Probanden der Gruppe B in Test 2.

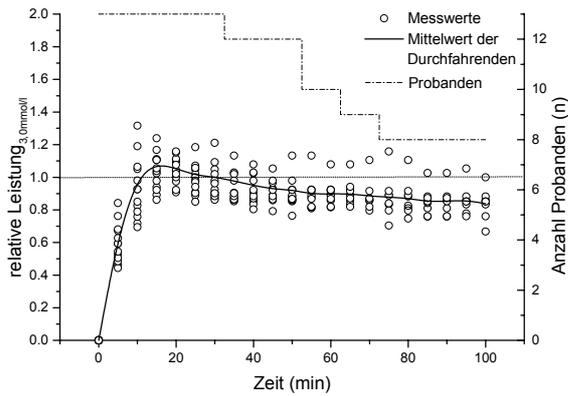


Abb. 12.3a: Verlauf der relativen Leistung (als Faktor von $W_{3,0\text{mmol/l}}$) bei Probanden der Gruppe A in Test 2.

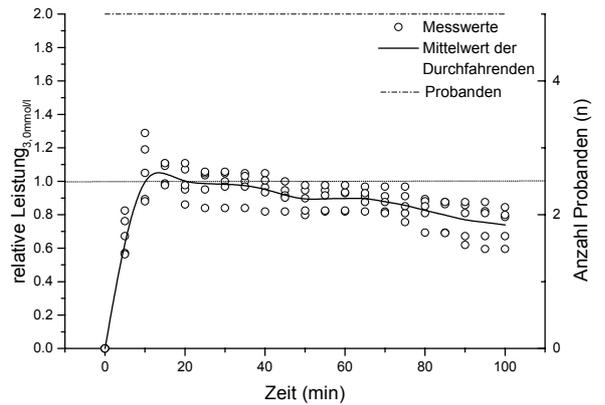


Abb. 12.3b: Verlauf der relativen Leistung (als Faktor von $W_{3,0\text{mmol/l}}$) bei Probanden der Gruppe B in Test 2.

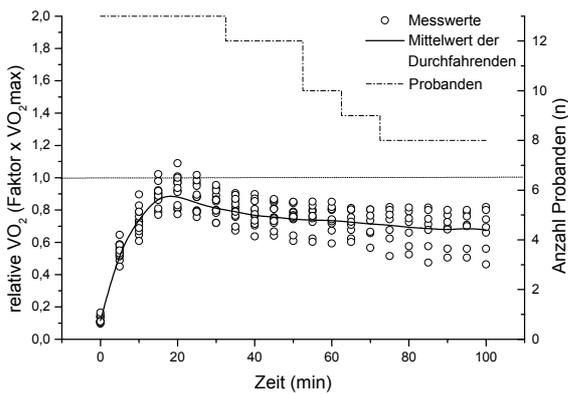


Abb. 12.4a: Verlauf der relativen VO_2 (als Faktor von $VO_{2,max}$) bei Probanden der Gruppe A in Test 2.

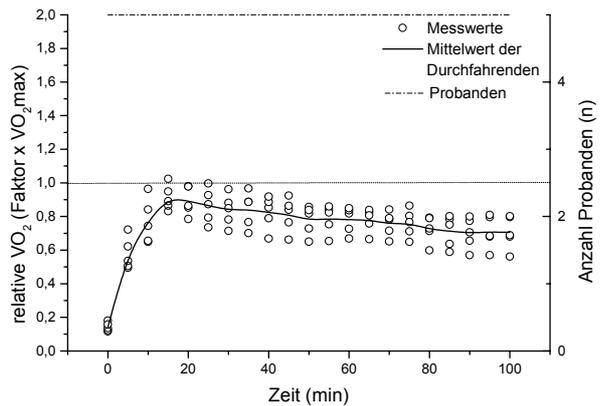


Abb. 12.4b: Verlauf der relativen VO_2 (als Faktor von $VO_{2,max}$) bei Probanden der Gruppe B in Test 2.

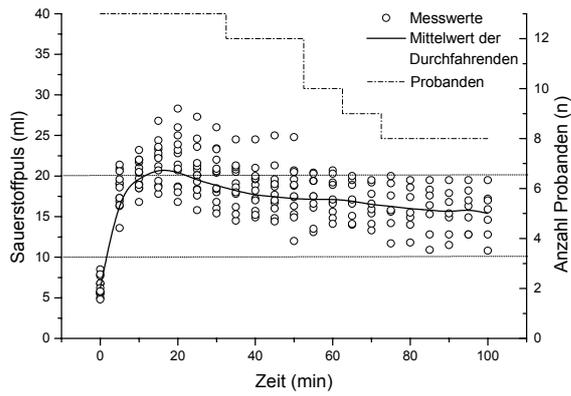


Abb. 12.5a: Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF bei Probanden der Gruppe A in Test 2.

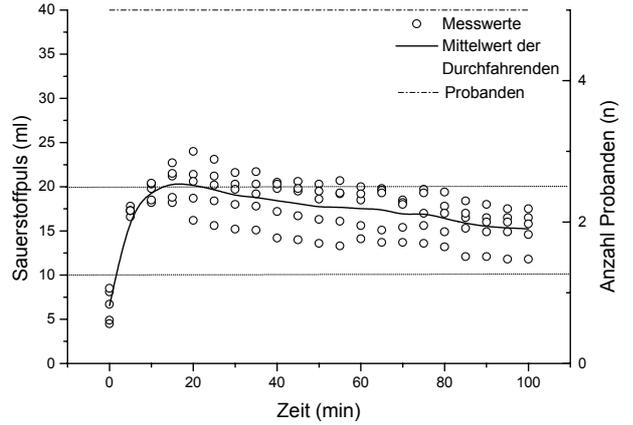


Abb. 12.5b: Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF bei Probanden der Gruppe B in Test 2.

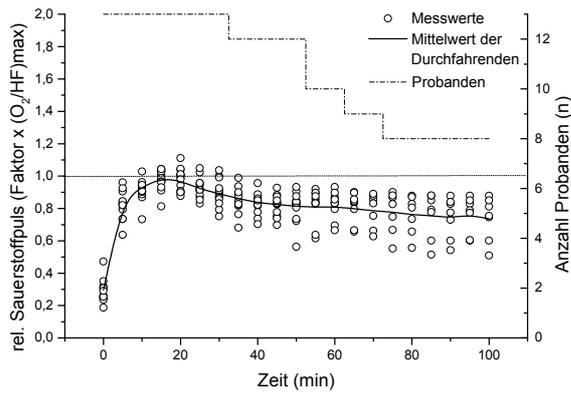


Abb. 12.6a: Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) bei Probanden der Gruppe A in Test 2.

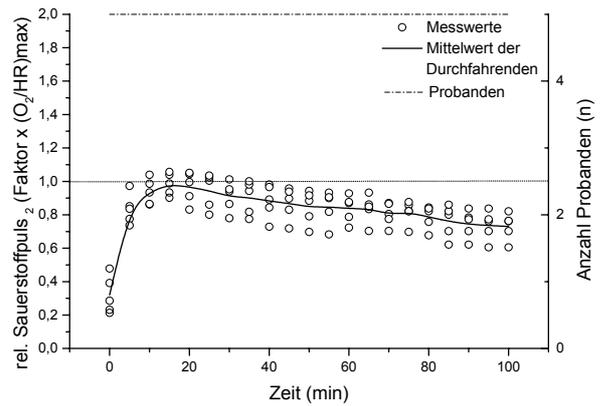


Abb. 12.6b: Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) bei Probanden der Gruppe B in Test 2.

9.2.2.2 Tab. 18 – Tab. 35: Tabellarische Übersichten über die Messwerte von Gruppe A in Test 2

Zeit (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
A01	<0,8	2,1	3,2	2,2	1,7	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
A02	<0,8	1,8	2,6	2,3	1,9	1,6	1,1	1,0	1,1	1,1	0,8
A03*	<0,8	1,1	4,2	2,7	2,1	2,1	1,7	1,4	1,0	0,8	1,4
A04	<0,8	1,0	3,9	6,1	3,8	3,6	3,2	3,0	2,6	2,3	2,3
A05*	<0,8	2,6	8,7	6,8	5,4	3,9	2,9	2,8	2,1	2,1	2,0
A06	<0,8	0,9	3,3	1,9	1,9	1,3					
A07	<0,8	1,6	5,0	3,7	3,0	2,3	2,2	1,7	2,0	1,6	1,7
A08	<0,8	2,4	6,3	4,1	3,8	3,9	3,6	3,6	4,1	3,3	3,4
A09	<0,8	0,8	4,0	5,0	4,3	4,0					
A10*	<0,8	1,0	7,0	5,3							
A11	<0,8	2,1	5,9	3,6	3,4	3,0	3,0				
A12*	<0,8	2,9	3,3	3,1	3,2	4,0	4,9	4,6			
A13	<0,8	3,4	4,3	4,1	2,9	2,8	2,3	2,1	1,8	1,6	1,6
<i>Mittel</i>	<i>0,80</i>	<i>1,82</i>	<i>4,75</i>	<i>3,92</i>	<i>3,12</i>	<i>2,81</i>	<i>2,59</i>	<i>2,36</i>	<i>1,96</i>	<i>1,73</i>	<i>1,78</i>
<i>SD</i>	<i>0,00</i>	<i>0,84</i>	<i>1,77</i>	<i>1,53</i>	<i>1,12</i>	<i>1,09</i>	<i>1,19</i>	<i>1,24</i>	<i>1,04</i>	<i>0,82</i>	<i>0,82</i>
<i>Median</i>	<i>0,8</i>	<i>1,8</i>	<i>4,2</i>	<i>3,7</i>	<i>3,0</i>	<i>2,8</i>	<i>2,2</i>	<i>1,4</i>	<i>1,0</i>	<i>1,0</i>	<i>1,0</i>

Tab. 30: Laktatkonzentrationen (mmol/l) von Gruppe A in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	0,95	0,90	0,96	1,03	0,91	0,92	0,94	0,91	0,92	0,91	0,89	0,91	0,89	0,89	0,87	0,89	0,86	0,86	0,86	0,86	0,84
A02	0,91	0,80	0,93	0,96	0,92	0,92	0,90	0,90	0,90	0,89	0,91	0,88	0,89	0,90	0,90	0,87	0,90	0,88	0,88	0,88	0,84
A03*	1,10	0,93	0,97	1,02	1,01	0,97	0,98	1,01	0,98	1,00	0,96	0,98	1,00	1,00	nd						
A04	0,84	0,80	0,90	0,92	0,95	0,99	0,97	0,91	0,93	0,95	0,94	0,95	0,92	0,94	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91
A05*	1,04	0,90	1,01	1,13	1,05	0,98	1,01	1,01	1,05	1,02	1,00	1,03	1,00	1,04	1,00	1,02	0,97	0,97	0,97	0,98	0,97
A06	1,01	0,89	0,92	0,95	0,99	0,95	0,92	0,93	0,91	0,83	0,85										
A07	0,89	0,91	1,00	1,06	1,00	0,96	0,99	0,99	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,94	0,94	0,97	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
A08	1,05	0,85	0,93	1,08	1,03	1,00	1,02	1,04	1,09	1,14	1,11	1,15	1,12	1,14	1,20	1,22	1,27	1,26	1,22	1,20	1,27
A09	0,98	0,88	0,90	0,94	1,00	0,99	0,93	0,93	0,91	0,89	0,91										
A10*	0,97	0,91	0,94	0,99	1,06	1,00	0,95														
A11	1,21	0,95	0,94	0,92	0,93	0,91	0,92	0,93	0,92	0,93	0,92	0,92	0,92								
A12*	1,06	1,00	1,02	1,07	1,01	1,07	1,05	1,05	1,06	1,09	1,16	1,14	1,15	1,17	1,20						
A13	0,93	0,89	0,99	0,99	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,90	0,92	0,91	0,88	0,90	0,90	0,88	0,87	0,86	0,88	0,86	0,85
<i>Mittel</i>	<i>0,995</i>	<i>0,893</i>	<i>0,955</i>	<i>1,005</i>	<i>0,985</i>	<i>0,969</i>	<i>0,963</i>	<i>0,962</i>	<i>0,965</i>	<i>0,961</i>	<i>0,965</i>	<i>0,990</i>	<i>0,980</i>	<i>0,991</i>	<i>0,991</i>	<i>0,967</i>	<i>0,963</i>	<i>0,956</i>	<i>0,953</i>	<i>0,949</i>	<i>0,947</i>
<i>SD</i>	<i>0,984</i>	<i>0,055</i>	<i>0,041</i>	<i>0,067</i>	<i>0,049</i>	<i>0,043</i>	<i>0,045</i>	<i>0,054</i>	<i>0,069</i>	<i>0,094</i>	<i>0,094</i>	<i>0,098</i>	<i>0,100</i>	<i>0,105</i>	<i>0,134</i>	<i>0,124</i>	<i>0,141</i>	<i>0,141</i>	<i>0,124</i>	<i>0,120</i>	<i>0,152</i>
<i>Median</i>	<i>0,98</i>	<i>0,90</i>	<i>0,94</i>	<i>0,99</i>	<i>1,00</i>	<i>0,97</i>	<i>0,95</i>	<i>0,93</i>	<i>0,92</i>	<i>0,91</i>	<i>0,92</i>	<i>0,91</i>	<i>0,89</i>	<i>0,90</i>	<i>0,90</i>	<i>0,87</i>	<i>0,86</i>	<i>0,86</i>	<i>0,86</i>	<i>0,86</i>	<i>0,84</i>

Tab. 31: Verlauf des RQ von Gruppe A in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	0	0,762	1,190	1,167	1,095	1,048	1,048	1,024	1,024	0,929	0,881	0,810	0,857	0,857	0,857	0,833	0,810	0,810	0,810	0,833	0,833
A02	0	0,593	0,926	1,037	0,907	0,889	0,870	0,852	0,852	0,870	0,852	0,815	0,815	0,833	0,796	0,796	0,796	0,759	0,759	0,778	0,667
A03*	0	0,528	0,825	1,023	0,974	0,908	0,891	0,875	0,858	0,858	0,858	0,875	0,891	0,891	0,858	0,891	0,825	0,842	0,858	0,858	0,858
A04	0	0,460	0,718	0,891	1,106	1,020	0,905	0,905	0,905	0,876	0,862	0,819	0,819	0,819	0,819	0,704	0,747	0,761	0,761	0,761	0,761
A05*	0	0,672	1,050	1,239	1,113	1,071	1,092	1,029	1,029	0,966	0,924	0,924	0,924	0,924	0,861	0,840	0,882	0,882	0,882	0,882	0,882
A06	0	0,444	0,694	0,861	1,000	0,903	0,861	0,861	0,833	0,792	0,764										
A07	0	0,593	0,926	1,111	1,037	1,000	1,019	1,019	0,870	0,889	0,889	0,889	0,889	0,870	0,870	0,889	0,889	0,852	0,852	0,852	0,852
A08	0	0,681	1,064	1,106	1,043	0,979	0,979	0,979	0,979	0,979	0,979	0,915	0,915	0,915	0,915	0,915	0,915	0,872	0,872	0,851	0,851
A09	0	0,485	0,758	0,939	1,076	0,970	0,924	0,864	0,803	0,864	0,864										
A10*	0	0,505	0,789	0,978	1,151	1,057	0,962														
A11	0	0,544	0,850	1,054	1,020	0,850	0,884	0,884	0,884	0,884	0,867	0,867	0,867								
A12*	0	0,627	0,980	0,922	0,922	0,941	0,902	0,902	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,941							
A13	0	0,842	1,316	1,105	1,158	1,184	1,211	1,132	1,079	1,053	1,132	1,132	1,079	1,079	1,105	1,158	1,105	1,026	1,026	1,053	1,000
<i>Mittel</i>	<i>0,000</i>	<i>0,595</i>	<i>0,930</i>	<i>1,033</i>	<i>1,046</i>	<i>0,986</i>	<i>0,965</i>	<i>0,944</i>	<i>0,920</i>	<i>0,907</i>	<i>0,900</i>	<i>0,897</i>	<i>0,898</i>	<i>0,903</i>	<i>0,885</i>	<i>0,878</i>	<i>0,871</i>	<i>0,851</i>	<i>0,853</i>	<i>0,859</i>	<i>0,838</i>
<i>SD</i>	<i>0,000</i>	<i>0,120</i>	<i>0,187</i>	<i>0,112</i>	<i>0,080</i>	<i>0,091</i>	<i>0,103</i>	<i>0,090</i>	<i>0,088</i>	<i>0,068</i>	<i>0,089</i>	<i>0,094</i>	<i>0,075</i>	<i>0,078</i>	<i>0,096</i>	<i>0,131</i>	<i>0,110</i>	<i>0,085</i>	<i>0,085</i>	<i>0,089</i>	<i>0,096</i>
<i>Median</i>	<i>0,000</i>	<i>0,593</i>	<i>0,926</i>	<i>1,037</i>	<i>1,043</i>	<i>0,979</i>	<i>0,924</i>	<i>0,902</i>	<i>0,884</i>	<i>0,884</i>	<i>0,876</i>	<i>0,867</i>	<i>0,867</i>	<i>0,857</i>	<i>0,819</i>	<i>0,796</i>	<i>0,796</i>	<i>0,761</i>	<i>0,761</i>	<i>0,778</i>	<i>0,761</i>

Tab. 32: Verlauf der relativen Leistung (als Faktor von $W_{3,0\text{mmol/l}}$) von Gruppe A in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
A01	0,110	0,646	0,896	1,022	0,984	0,966	0,934	0,904	0,899	0,848	0,790	0,800	0,800	0,800	0,803	0,818	0,792	0,816	0,768	0,786	0,818	
A02	0,112	0,583	0,731	0,869	0,803	0,783	0,782	0,795	0,769	0,754	0,768	0,762	0,738	0,755	0,734	0,742	0,725	0,711	0,692	0,708	0,660	
A03*	0,105	0,567	0,730	0,922	0,967	0,883	0,853	0,815	0,800	0,810	0,785	0,790	0,805	0,812								
A04	0,138	0,488	0,645	0,790	0,918	0,880	0,720	0,672	0,704	0,720	0,608	0,624	0,672	0,624	0,656	0,624	0,576	0,576	0,560	0,560	0,560	
A05*	0,106	0,532	0,697	0,885	0,910	0,798	0,800	0,758	0,763	0,753	0,742	0,726	0,716	0,677	0,665	0,677	0,660	0,677	0,679	0,700	0,694	
A06	0,097	0,450	0,608	0,770	0,969	0,949	0,891	0,862	0,870	0,859	0,848											
A07	0,103	0,512	0,712	0,904	0,936	0,881	0,866	0,894	0,807	0,806	0,842	0,828	0,818	0,803	0,803	0,800	0,815	0,800	0,800	0,800	0,800	
A08	0,141	0,553	0,759	0,902	0,814	0,756	0,720	0,697	0,637	0,641	0,642	0,603	0,593	0,602	0,566	0,515	0,525	0,475	0,505	0,505	0,463	
A09	0,135	0,519	0,668	0,862	1,008	0,984	0,921	0,837	0,714	0,667	0,760											
A10*	0,152	0,531	0,688	0,888	1,090	1,017	0,955															
A11	0,112	0,588	0,788	0,980	1,000	0,895	0,862	0,869	0,855	0,868	0,851	0,852	0,851									
A12*	0,165	0,583	0,828	0,918	0,830	0,795	0,797	0,765	0,774	0,748	0,748	0,748	0,730	0,708								
A13	0,110	0,550	0,789	0,810	0,774	0,789	0,797	0,789	0,735	0,732	0,758	0,763	0,742	0,727	0,765	0,771	0,748	0,745	0,726	0,760	0,742	
<i>Mittel</i>	<i>0,116</i>	<i>0,554</i>	<i>0,745</i>	<i>0,888</i>	<i>0,888</i>	<i>0,842</i>	<i>0,809</i>	<i>0,791</i>	<i>0,764</i>	<i>0,758</i>	<i>0,742</i>	<i>0,737</i>	<i>0,736</i>	<i>0,725</i>	<i>0,713</i>	<i>0,707</i>	<i>0,692</i>	<i>0,686</i>	<i>0,676</i>	<i>0,688</i>	<i>0,677</i>	
<i>SD</i>	<i>0,015</i>	<i>0,048</i>	<i>0,074</i>	<i>0,071</i>	<i>0,080</i>	<i>0,071</i>	<i>0,073</i>	<i>0,083</i>	<i>0,077</i>	<i>0,064</i>	<i>0,078</i>	<i>0,082</i>	<i>0,076</i>	<i>0,083</i>	<i>0,088</i>	<i>0,109</i>	<i>0,109</i>	<i>0,123</i>	<i>0,107</i>	<i>0,114</i>	<i>0,129</i>	
<i>Median</i>	<i>0,110</i>	<i>0,550</i>	<i>0,730</i>	<i>0,890</i>	<i>0,910</i>	<i>0,840</i>	<i>0,800</i>	<i>0,790</i>	<i>0,770</i>	<i>0,750</i>	<i>0,760</i>	<i>0,760</i>	<i>0,740</i>	<i>0,740</i>	<i>0,700</i>	<i>0,710</i>	<i>0,690</i>	<i>0,690</i>	<i>0,690</i>	<i>0,700</i>	<i>0,680</i>	

Tab. 33: Verlauf der relativen Sauerstoffaufnahme (als Faktor von VO_{2max}) von Gruppe A in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	8,5	17,3	18,5	18,8	18,7	18,4	18,0	17,8	17,2	16,7	16,3	16,1	15,6	15,1	15,4	15,6	14,9	15,3	14,9	14,9	14,6
A02	5,7	20,9	21,7	22,4	20,7	20,1	20,6	20,5	19,6	19,1	19,6	19,4	19,2	19,5	19,2	19,1	18,6	18,3	17,9	18,2	17,2
A03*	5,5	19,0	21,0	23,3	22,8	20,8	20,4	19,1	18,9	18,7	18,8	19,4	18,9	18,9	<i>nd</i>						
A04	5,5	16,9	18,5	19,4	21,4	20,1	16,0	14,5	15,7	16,0	12,0	13,1	14,8	14,0	14,1	14,2	14,0	12,8	12,8	12,8	12,8
A05*	6,7	17,3	19,0	21,2	20,9	19,3	18,4	18,6	18,2	17,7	17,4	17,5	16,8	16,8	15,9	15,8	15,5	16,4	15,4	16,3	15,9
A06	7,7	19,1	22,0	24,4	28,3	27,3	26,0	24,5	24,5	25,0	24,8										
A07	6,8	16,3	19,7	22,8	23,2	21,2	22,0	20,8	19,7	19,6	20,7	20,4	20,7	20,0	19,5	20,0	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
A08	5,0	19,6	20,4	20,7	18,6	17,6	16,8	16,2	14,9	14,8	15,3	13,5	14,1	14,1	13,3	11,7	11,8	10,9	11,5	12,8	10,8
A09	4,8	21,4	23,2	26,8	26,0	24,6	23,4	21,1	20,0	19,0	18,9										
A10*	7,9	18,6	20,5	22,2	25,0	23,6	23,3														
A11	6,2	20,6	22,0	23,6	23,9	21,6	20,9	21,3	21,0	21,3	20,5	20,3	20,3								
A12*	5,7	13,6	16,8	17,8	16,8	15,8	15,4	15,3	15,2	14,4	14,9	16,6	16,6	16,6	16,6						
A13	5,8	16,4	18,9	18,6	18,0	18,3	18,5	18,0	17,0	17,0	17,5	17,5	17,1	17,1	17,8	17,6	17,4	17,6	16,8	17,0	17,0
<i>Mittel</i>	<i>6,29</i>	<i>18,23</i>	<i>20,17</i>	<i>21,69</i>	<i>21,87</i>	<i>20,67</i>	<i>19,98</i>	<i>18,98</i>	<i>18,49</i>	<i>18,28</i>	<i>18,06</i>	<i>17,38</i>	<i>17,41</i>	<i>16,90</i>	<i>16,48</i>	<i>16,29</i>	<i>15,96</i>	<i>15,83</i>	<i>15,54</i>	<i>15,93</i>	<i>15,40</i>
<i>SD</i>	<i>1,15</i>	<i>2,20</i>	<i>1,81</i>	<i>2,60</i>	<i>3,40</i>	<i>3,10</i>	<i>3,16</i>	<i>2,86</i>	<i>2,75</i>	<i>2,93</i>	<i>3,30</i>	<i>2,61</i>	<i>2,28</i>	<i>2,24</i>	<i>2,25</i>	<i>2,87</i>	<i>2,71</i>	<i>3,08</i>	<i>2,80</i>	<i>2,58</i>	<i>2,93</i>
<i>Median</i>	<i>5,8</i>	<i>18,6</i>	<i>20,4</i>	<i>22,2</i>	<i>21,4</i>	<i>20,1</i>	<i>20,4</i>	<i>18,6</i>	<i>18,2</i>	<i>17,7</i>	<i>17,5</i>	<i>16,6</i>	<i>16,6</i>	<i>15,1</i>	<i>14,1</i>	<i>11,7</i>	<i>11,8</i>	<i>10,9</i>	<i>11,5</i>	<i>12,8</i>	<i>10,8</i>

Tab. 34: Verlauf des Sauerstoffpulses (ml) von Gruppe A in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	0,472	0,961	1,028	1,044	1,039	1,022	1,000	0,989	0,956	0,928	0,906	0,894	0,867	0,839	0,856	0,867	0,828	0,850	0,828	0,828	0,811
A02	0,247	0,905	0,939	0,970	0,896	0,870	0,892	0,887	0,848	0,827	0,848	0,840	0,831	0,844	0,831	0,827	0,805	0,792	0,775	0,788	0,745
A03*	0,243	0,841	0,929	1,031	1,009	0,920	0,903	0,845	0,836	0,827	0,832	0,858	0,836	0,836							
A04	0,258	0,793	0,869	0,911	1,005	0,944	0,751	0,681	0,737	0,751	0,563	0,615	0,695	0,657	0,662	0,667	0,657	0,601	0,601	0,601	0,601
A05*	0,318	0,820	0,900	1,005	0,991	0,915	0,872	0,882	0,863	0,839	0,825	0,829	0,796	0,796	0,754	0,749	0,735	0,777	0,730	0,773	0,754
A06	0,257	0,637	0,733	0,813	0,943	0,910	0,867	0,817	0,817	0,833	0,827										
A07	0,306	0,734	0,887	1,027	1,045	0,955	0,991	0,937	0,887	0,883	0,932	0,919	0,932	0,901	0,878	0,901	0,878	0,878	0,878	0,878	0,878
A08	0,236	0,925	0,962	0,976	0,877	0,830	0,792	0,764	0,703	0,698	0,722	0,637	0,665	0,665	0,627	0,552	0,557	0,514	0,542	0,604	0,509
A09	0,187	0,833	0,903	1,043	1,012	0,957	0,911	0,821	0,778	0,739	0,735										
A10*	0,351	0,827	0,911	0,987	1,111	1,049	1,036														
A11	0,254	0,844	0,902	0,967	0,980	0,885	0,857	0,873	0,861	0,873	0,840	0,832	0,832								
A12*	0,308	0,735	0,908	0,962	0,908	0,854	0,832	0,827	0,822	0,778	0,805	0,897	0,897	0,897							
A13	0,290	0,820	0,945	0,930	0,900	0,915	0,925	0,900	0,850	0,850	0,875	0,875	0,855	0,855	0,890	0,880	0,870	0,880	0,840	0,850	0,850
<i>Mittel</i>	0,296	0,850	0,932	0,987	0,970	0,921	0,891	0,861	0,835	0,825	0,813	0,808	0,810	0,799	0,785	0,778	0,761	0,756	0,742	0,760	0,735
<i>SD</i>	0,077	0,075	0,050	0,049	0,068	0,057	0,087	0,098	0,081	0,072	0,119	0,116	0,089	0,090	0,106	0,129	0,119	0,143	0,127	0,113	0,135
<i>Median</i>	0,270	0,830	0,930	0,990	1,000	0,920	0,900	0,880	0,850	0,830	0,840	0,850	0,830	0,840	0,790	0,790	0,770	0,780	0,750	0,780	0,750

Tab. 35: Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) von Gruppe A in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

9.2.2.3 Tab. 36– Tab. 41: Tabellarische Übersichten über die Messwerte von Gruppe B in Test 2

Zeit (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
B01	<0,8	1,7	5,8	3,0	2,4	1,9	1,6	1,6	1,7	1,3	1,2
B02	<0,8	2,1	7,7	4,3	5,9	5,8	3,9	4,7	4,8	4,1	3,8
B03	<0,8	3,4	4,4	3,3	2,1	1,7	1,7	1,6	1,1	1,1	1,3
B04	<0,8	3,8	3,0	2,5	2,1	1,6	1,6	1,3	1,3	1,1	1,6
B05	<0,8	3,4	3,3	2,9	2,2	1,9	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4
<i>Mittel</i>	0,80	2,88	4,84	3,20	2,94	2,58	2,02	2,10	2,04	1,78	1,86
<i>SD</i>	0,00	0,92	1,94	0,68	1,66	1,80	1,06	1,46	1,56	1,30	1,09
<i>Median</i>	0,8	3,4	4,4	3,0	2,2	1,9	1,6	1,6	1,3	1,3	1,4

Tab. 36: Laktatkonzentrationen (mmol/l) von Gruppe B in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B01	1,06	0,90	0,94	1,01	1,01	0,95	0,94	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,96	0,93	0,95	0,95	0,95
B02	0,82	0,86	0,94	1,03	1,02	0,98	0,99	0,98	1,00	1,01	0,98	0,97	0,97	1,01	1,00	1,01	1,01	0,98	0,96	0,96	0,96
B03	0,97	0,95	1,04	1,09	1,01	1,02	1,03	1,06	1,02	1,05	1,05	1,07	1,05	1,05	1,07	1,05	1,05	1,04	1,05	1,04	1,06
B04	0,75	0,92	0,96	0,97	0,90	0,94	0,88	0,91	0,92	0,90	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91	0,89	0,91	0,90	0,88	0,88	0,90
B05	0,78	0,84	0,97	0,99	0,96	0,93	0,95	0,91	0,92	0,94	0,93	0,90	0,91	0,88	0,89	0,91	0,88	0,89	0,89	0,91	0,90
<i>Mittel</i>	0,876	0,894	0,970	1,018	0,980	0,964	0,958	0,964	0,962	0,970	0,962	0,956	0,956	0,960	0,962	0,960	0,962	0,948	0,946	0,948	0,954
<i>SD</i>	0,133	0,045	0,041	0,460	0,051	0,036	0,056	0,062	0,046	0,060	0,057	0,070	0,060	0,070	0,073	0,068	0,070	0,062	0,068	0,061	0,065
<i>Median</i>	0,82	0,90	0,96	1,01	1,01	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,96	0,93	0,95	0,95	0,95

Tab. 38: Verlauf des RQ von Gruppe B in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B01	0	0,571	0,893	1,107	1,071	1,036	1,000	1,000	0,964	0,946	0,946	0,946	0,929	0,911	0,911	0,911	0,893	0,875	0,857	0,821	0,786
B02	0	0,563	0,880	1,092	0,951	0,951	0,968	0,968	0,933	0,915	0,898	0,915	0,933	0,968	0,968	0,968	0,880	0,863	0,810	0,810	0,845
B03	0	0,672	1,050	0,987	0,861	0,840	0,840	0,840	0,819	0,819	0,798	0,819	0,819	0,819	0,819	0,756	0,693	0,693	0,672	0,672	0,672
B04	0	0,762	1,190	0,976	0,976	1,048	1,048	1,048	1,048	1,000	0,976	0,976	0,976	0,929	0,810	0,810	0,810	0,690	0,619	0,595	0,595
B05	0	0,825	1,289	1,108	1,108	1,057	1,057	1,031	1,005	0,902	0,825	0,825	0,825	0,876	0,876	0,851	0,851	0,876	0,876	0,876	0,799
Mittel	0,000	0,679	1,060	1,054	0,993	0,986	0,983	0,977	0,954	0,916	0,889	0,896	0,896	0,901	0,877	0,859	0,825	0,799	0,767	0,755	0,739
SD	0,000	0,116	0,180	0,067	0,098	0,092	0,088	0,083	0,087	0,066	0,076	0,071	0,070	0,056	0,066	0,083	0,081	0,099	0,115	0,117	0,103
Median	0,000	0,672	1,050	1,092	0,976	1,036	1,000	1,000	0,956	0,915	0,898	0,915	0,929	0,911	0,876	0,851	0,851	0,863	0,810	0,810	0,786

Tab. 39: Verlauf der relativen Leistung (als Faktor von $W_{3,0\text{mmol/l}}$) von Gruppe B in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B01	0,124	0,495	0,649	0,891	0,980	0,927	0,882	0,887	0,853	0,840	0,818	0,842	0,818	0,825	0,782	0,804	0,793	0,785	0,773	0,796	0,796
B02	0,136	0,505	0,655	0,831	0,853	0,793	0,782	0,767	0,789	0,765	0,729	0,753	0,727	0,758	0,715	0,711	0,713	0,636	0,655	0,680	0,680
B03	0,116	0,536	0,744	0,865	0,785	0,735	0,714	0,701	0,669	0,662	0,650	0,654	0,669	0,665	0,652	0,649	0,598	0,589	0,570	0,570	0,561
B04	0,180	0,622	0,841	0,949	0,863	0,873	0,849	0,886	0,886	0,863	0,857	0,824	0,837	0,839	0,790	0,767	0,729	0,751	0,706	0,684	0,688
B05	0,158	0,722	0,964	1,024	0,978	0,996	0,962	0,967	0,918	0,924	0,838	0,860	0,849	0,807	0,842	0,864	0,789	0,802	0,800	0,809	0,802
Mittel	0,143	0,576	0,771	0,912	0,892	0,865	0,838	0,841	0,823	0,811	0,778	0,787	0,780	0,779	0,756	0,759	0,724	0,713	0,701	0,708	0,705
SD	0,026	0,096	0,133	0,076	0,085	0,104	0,095	0,106	0,098	0,101	0,087	0,085	0,078	0,071	0,074	0,083	0,079	0,095	0,093	0,098	0,099
Median	0,140	0,540	0,740	0,890	0,860	0,870	0,850	0,890	0,850	0,840	0,820	0,820	0,820	0,810	0,780	0,770	0,730	0,750	0,710	0,680	0,690

Tab. 40: Verlauf der relativen Sauerstoffaufnahme (als Faktor von $VO_{2,max}$) von Gruppe B in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B01	4,9	17,8	19,8	22,7	24,0	23,1	21,6	21,7	20,5	20,6	20,3	20,7	20,0	19,8	18,5	19,7	19,4	18,4	18,0	17,5	17,5
B02	6,7	17,3	20,3	21,2	21,4	20,2	20,3	19,2	19,8	19,5	18,6	19,2	18,5	19,6	18,2	19,3	17,8	16,5	16,5	16,5	16,5
B03	4,5	16,6	18,2	18,2	16,2	15,6	15,2	15,1	14,2	14,0	13,6	13,3	14,1	13,7	13,7	13,6	13,2	12,1	12,1	11,8	11,8
B04	8,1	17,3	20,4	21,5	20,6	21,2	19,7	20,3	20,3	19,8	19,5	19,3	19,2	19,3	18,0	17,0	17,0	17,0	16,0	16,0	15,8
B05	8,5	17,3	18,5	18,8	18,7	18,4	18,0	17,8	17,2	16,7	16,3	16,1	15,6	15,1	15,4	15,6	14,9	15,3	14,9	14,9	14,6
<i>Mittel</i>	<i>6,54</i>	<i>17,26</i>	<i>19,44</i>	<i>20,48</i>	<i>20,18</i>	<i>19,70</i>	<i>18,96</i>	<i>18,82</i>	<i>18,40</i>	<i>18,12</i>	<i>17,66</i>	<i>17,72</i>	<i>17,48</i>	<i>17,50</i>	<i>16,76</i>	<i>17,04</i>	<i>16,46</i>	<i>15,86</i>	<i>15,50</i>	<i>15,34</i>	<i>15,24</i>
<i>SD</i>	<i>1,81</i>	<i>0,43</i>	<i>1,03</i>	<i>1,90</i>	<i>2,93</i>	<i>2,85</i>	<i>2,47</i>	<i>2,53</i>	<i>2,70</i>	<i>2,73</i>	<i>2,72</i>	<i>2,99</i>	<i>2,52</i>	<i>2,88</i>	<i>2,11</i>	<i>2,55</i>	<i>2,44</i>	<i>2,38</i>	<i>2,20</i>	<i>2,19</i>	<i>2,19</i>
<i>Median</i>	<i>6,7</i>	<i>17,3</i>	<i>19,8</i>	<i>21,2</i>	<i>20,6</i>	<i>20,2</i>	<i>19,7</i>	<i>19,2</i>	<i>19,8</i>	<i>19,5</i>	<i>18,6</i>	<i>19,2</i>	<i>18,5</i>	<i>19,3</i>	<i>18,0</i>	<i>17,0</i>	<i>17,0</i>	<i>16,5</i>	<i>16,0</i>	<i>16,0</i>	<i>15,8</i>

Tab. 41: Verlauf des Sauerstoffpulses (ml) von Gruppe B in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B01	0,213	0,774	0,861	0,987	1,043	1,004	0,939	0,943	0,891	0,896	0,883	0,900	0,870	0,861	0,804	0,857	0,843	0,800	0,783	0,761	0,761
B02	0,285	0,736	0,864	0,902	0,911	0,860	0,864	0,817	0,843	0,830	0,791	0,817	0,787	0,834	0,774	0,821	0,757	0,702	0,702	0,702	0,702
B03	0,231	0,851	0,933	0,933	0,831	0,800	0,779	0,774	0,728	0,718	0,697	0,682	0,723	0,703	0,703	0,697	0,677	0,621	0,621	0,605	0,605
B04	0,391	0,836	0,986	1,039	0,995	1,024	0,952	0,981	0,981	0,957	0,942	0,932	0,928	0,932	0,870	0,821	0,821	0,821	0,773	0,773	0,763
B05	0,478	0,972	1,039	1,056	1,051	1,034	1,011	1,000	0,966	0,938	0,916	0,904	0,876	0,848	0,865	0,876	0,837	0,860	0,837	0,837	0,820
<i>Mittel</i>	<i>0,320</i>	<i>0,834</i>	<i>0,937</i>	<i>0,983</i>	<i>0,966</i>	<i>0,944</i>	<i>0,909</i>	<i>0,903</i>	<i>0,882</i>	<i>0,868</i>	<i>0,846</i>	<i>0,847</i>	<i>0,837</i>	<i>0,836</i>	<i>0,803</i>	<i>0,814</i>	<i>0,787</i>	<i>0,761</i>	<i>0,743</i>	<i>0,736</i>	<i>0,730</i>
<i>SD</i>	<i>0,112</i>	<i>0,090</i>	<i>0,077</i>	<i>0,066</i>	<i>0,094</i>	<i>0,107</i>	<i>0,090</i>	<i>0,101</i>	<i>0,103</i>	<i>0,097</i>	<i>0,101</i>	<i>0,102</i>	<i>0,081</i>	<i>0,083</i>	<i>0,069</i>	<i>0,070</i>	<i>0,070</i>	<i>0,097</i>	<i>0,084</i>	<i>0,087</i>	<i>0,081</i>
<i>Median</i>	<i>0,290</i>	<i>0,840</i>	<i>0,930</i>	<i>0,990</i>	<i>1,000</i>	<i>1,000</i>	<i>0,940</i>	<i>0,940</i>	<i>0,890</i>	<i>0,900</i>	<i>0,880</i>	<i>0,900</i>	<i>0,870</i>	<i>0,850</i>	<i>0,800</i>	<i>0,820</i>	<i>0,820</i>	<i>0,800</i>	<i>0,770</i>	<i>0,760</i>	<i>0,760</i>

Tab. 41: Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) von Gruppe B in Test 2 (herzfrequenz-konstante Einheit)

9.2.3 zu Test 3 (leistungskonstante Einheit)

9.2.3.1 Abb. 13.1 -Abb. 12.6: Grafische Darstellung der Testdaten von Gruppe A und Gruppe B in Test 2 (leistungskonstante Einheit). Daten der durchfahrenden Probanden gemittelt.

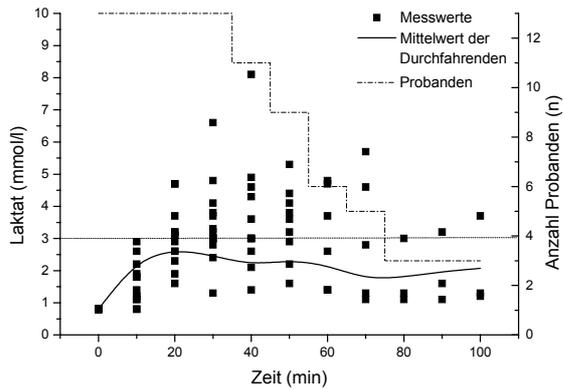


Abb. 12.1a: Laktatkonzentrationen bei Probanden der Gruppe A in Test 3.

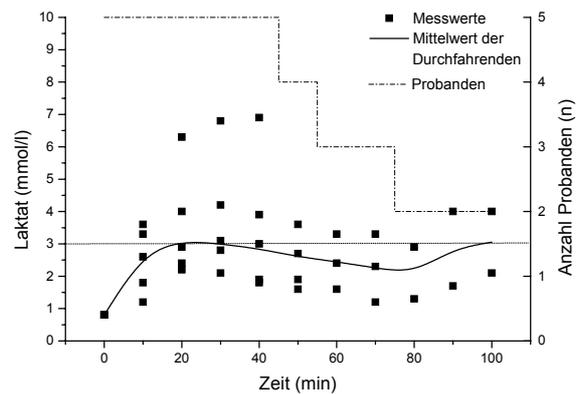


Abb. 12.1b: Laktatkonzentrationen bei Probanden der Gruppe B in Test 3.

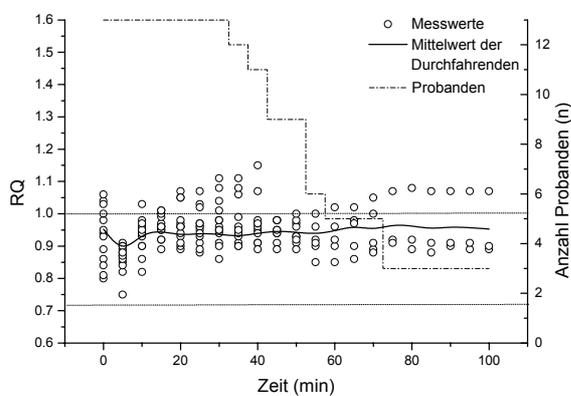


Abb. 12.2a: Verlauf des RQ bei Probanden der Gruppe A in Test 3.

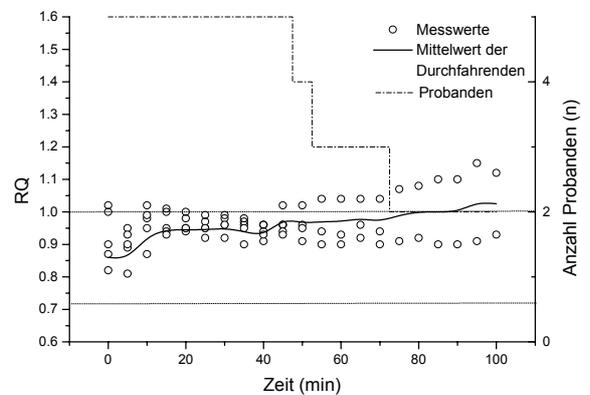


Abb. 12.2b: Verlauf des RQ bei Probanden der Gruppe B in Test 3.

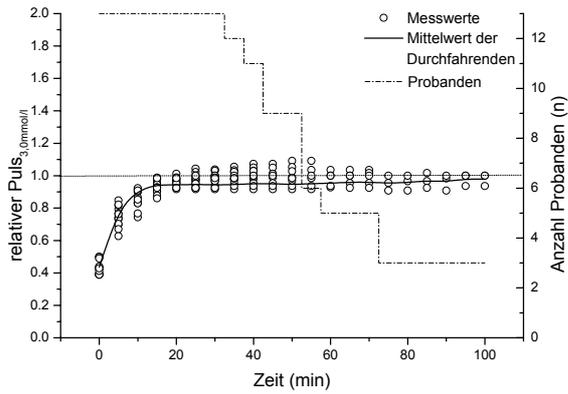


Abb. 12.3a: Verlauf der relativen HF (als Faktor von $HF_{3,0mmol/l}$) bei Probanden der Gruppe A in Test 3.

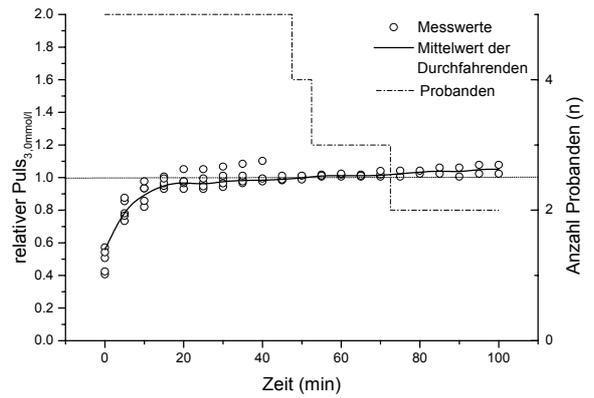


Abb. 12.3b: Verlauf der relativen HF (als Faktor von $HF_{3,0mmol/l}$) bei Probanden der Gruppe B in Test 3.

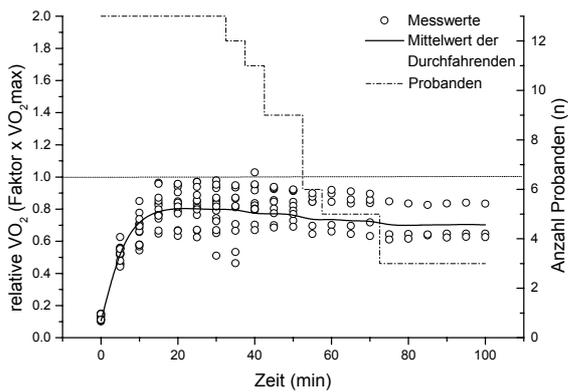


Abb. 12.4a: Verlauf der relativen VO_2 (als Faktor von $VO_{2,max}$) bei Probanden der Gruppe A in Test 3.

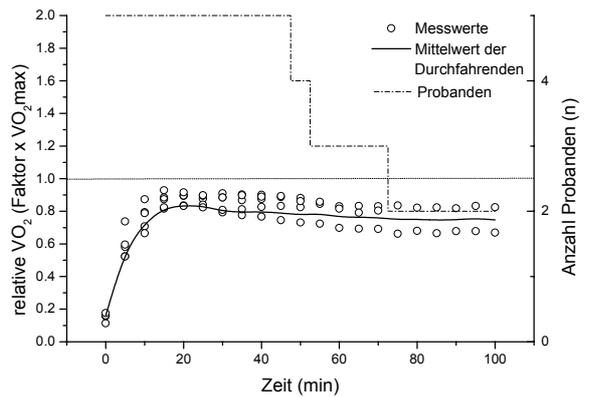


Abb. 12.4b: Verlauf der relativen VO_2 (als Faktor von $VO_{2,max}$) bei Probanden der Gruppe B in Test 3.

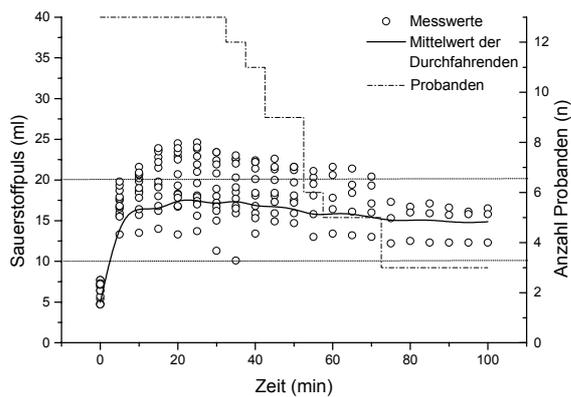


Abb. 12.5a: Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF bei Probanden der Gruppe A in Test 3.

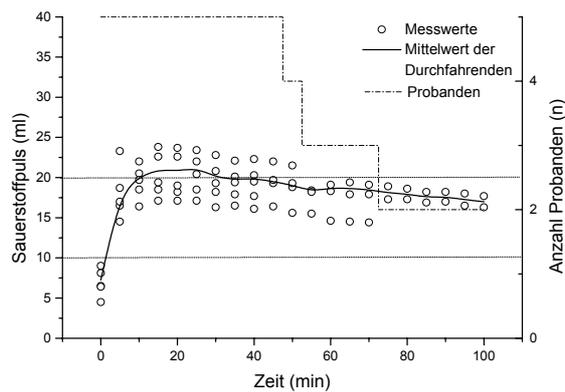


Abb. 12.5b: Verlauf des Sauerstoffpulses O_2/HF bei Probanden der Gruppe B in Test 3.

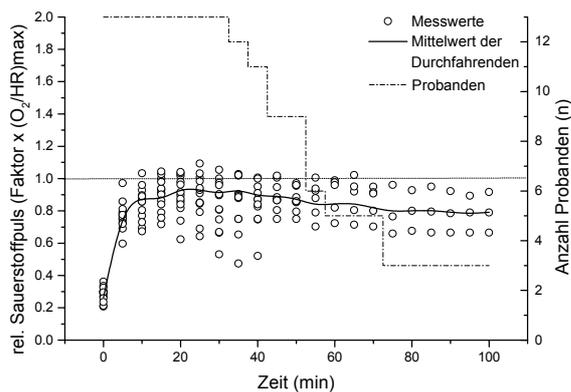


Abb. 12.6a: Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) bei Probanden der Gruppe A in Test 3.

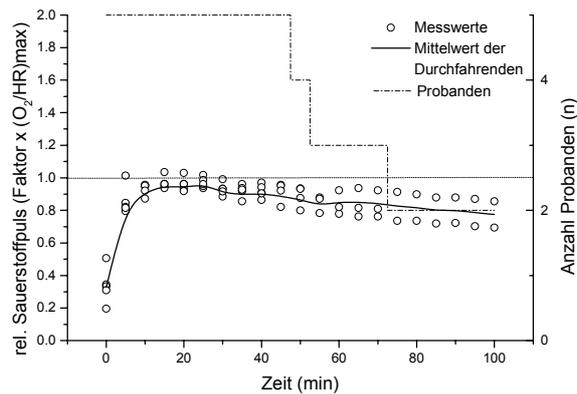


Abb. 12.6b: : Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) bei Probanden der Gruppe B in Test 3.

9.2.3.2 Tab. 41-Tab. 48: Tabellarische Übersichten über die Messwerte von Gruppe A in Test 3

Zeit (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
A01	<0,8	2,2	1,6	1,3	1,4	1,6	1,4	1,1	1,1	1,1	1,2
A02	<0,8	1,1	2,6	3,0	2,6	2,9	2,6				
A03*	<0,8	1,1	3,1	3,2							
A04	<0,8	1,2	2,3	4,1							
A05*	<0,8	2,6	3,1	3,0	3,0	3,8	4,7	4,6			
A06	<0,8	0,8	1,9	2,4	3,0						
A07	<0,8	1,8	3,7	3,8	4,3	4,1					
A08	<0,8	1,8	2,9	3,7	4,6	5,3					
A09	<0,8	0,8	4,7	6,6	8,1						
A10*	<0,8	1,4	4,7	4,8	4,9	4,4	4,8	5,7			
A11	<0,8	1,2	2,6	3,0	3,6	3,6					
A12*	<0,8	1,9	3,2	2,8	3,0	3,2	3,7	2,8	3,0	3,2	3,7
A13	<0,8	2,9	3,2	3,3	2,1	2,2	1,4	1,3	1,3	1,6	1,3
<i>Mittel</i>	<i>0,80</i>	<i>1,60</i>	<i>3,05</i>	<i>3,46</i>	<i>3,69</i>	<i>3,46</i>	<i>3,10</i>	<i>3,10</i>	<i>1,80</i>	<i>1,97</i>	<i>2,07</i>
<i>SD</i>	<i>± 0,00</i>	<i>± 0,67</i>	<i>± 0,93</i>	<i>± 1,26</i>	<i>± 1,80</i>	<i>± 1,13</i>	<i>± 1,54</i>	<i>± 2,02</i>	<i>± 1,04</i>	<i>± 1,10</i>	<i>± 1,42</i>
<i>Median</i>	<i>0,8</i>	<i>1,4</i>	<i>3,1</i>	<i>3,2</i>	<i>3,0</i>	<i>2,9</i>	<i>3,2</i>	<i>2,8</i>	<i>1,3</i>	<i>1,6</i>	<i>1,3</i>

Tab. 42: Laktatkonzentrationen (mmol/l) von Gruppe A in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	0,98	0,85	0,93	0,92	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,92	0,89	0,88	0,90	0,89	0,89
A02	0,86	0,82	0,94	0,96	0,93	0,93	0,94	0,93	0,91	0,94	0,93	0,92									
A03*	1,00	0,75	0,82	0,89	0,89	0,88	0,86														
A04	0,84	0,91	1,03	1,01	1,07	1,07	1,08	1,11													
A05*	1,04	0,87	0,98	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,97	0,85	0,85	0,86	0,88						
A06	1,03	0,90	0,95	0,95	1,05	1,03	1,04	1,06	1,07												
A07	1,06	0,84	0,86	0,92	0,91	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89										
A08	0,89	0,86	0,90	0,95	0,96	0,95	0,98	0,96	0,96	0,98	0,93										
A09	0,94	0,88	0,94	0,99	1,05	1,02	1,11	1,08	1,15												
A10*	0,80	0,89	0,90	1,00	0,97	0,96	0,98	0,94	0,97	0,94	0,96	0,96	0,96	0,98	1,00						
A11	0,81	0,87	0,96	1,01	0,98	0,97	1,01	0,99	0,98	0,98	0,98										
A12*	0,93	0,90	0,95	0,96	0,94	0,94	0,95	0,95	0,97	0,98	1,00	1,00	1,02	1,02	1,05	1,07	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
A13	0,95	0,88	0,97	0,96	0,96	0,97	0,95	0,90	0,94	0,95	0,92	0,91	0,92	0,97	0,91	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91
<i>Mittel</i>	<i>0,933</i>	<i>0,863</i>	<i>0,933</i>	<i>0,961</i>	<i>0,967</i>	<i>0,960</i>	<i>0,975</i>	<i>0,973</i>	<i>0,973</i>	<i>0,947</i>	<i>0,943</i>	<i>0,923</i>	<i>0,930</i>	<i>0,946</i>	<i>0,946</i>	<i>0,967</i>	<i>0,963</i>	<i>0,953</i>	<i>0,960</i>	<i>0,957</i>	<i>0,953</i>
<i>SD</i>	<i>0,088</i>	<i>0,043</i>	<i>0,054</i>	<i>0,063</i>	<i>0,058</i>	<i>0,055</i>	<i>0,071</i>	<i>0,072</i>	<i>0,076</i>	<i>0,032</i>	<i>0,036</i>	<i>0,052</i>	<i>0,064</i>	<i>0,065</i>	<i>0,075</i>	<i>0,090</i>	<i>0,102</i>	<i>0,102</i>	<i>0,095</i>	<i>0,099</i>	<i>0,101</i>
<i>Median</i>	<i>0,94</i>	<i>0,87</i>	<i>0,94</i>	<i>0,96</i>	<i>0,96</i>	<i>0,96</i>	<i>0,96</i>	<i>0,95</i>	<i>0,95</i>	<i>0,94</i>	<i>0,92</i>	<i>0,92</i>	<i>0,92</i>	<i>0,97</i>	<i>0,91</i>	<i>0,92</i>	<i>0,92</i>	<i>0,91</i>	<i>0,91</i>	<i>0,91</i>	<i>0,90</i>

Tab. 43: Verlauf des RQ von Gruppe A in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
A01	0,391	0,743	0,916	0,927	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,927	0,955	0,955	0,955	0,966	0,966	0,983	1,000	1,000	
A02	0,433	0,793	0,915	0,988	1,012	1,043	1,030	1,055	1,073	1,073	1,091	1,091										
A03*	0,393	0,732	0,831	0,978	0,989	1,022	1,038															
A04	0,391	0,698	0,833	0,901	0,958	0,974	0,990	1,021														
A05*	0,500	0,765	0,900	0,953	0,976	0,965	0,965	0,976	1,006	1,012	1,053	1,035	1,035	1,035	1,035							
A06	0,497	0,735	0,829	0,906	0,972	1,000	1,000	1,033	1,050													
A07	0,388	0,847	0,923	0,978	0,978	0,978	0,978	0,978	0,978	0,989	0,989											
A08	0,427	0,762	0,866	0,945	0,957	0,988	1,000	1,024	1,030	1,049												
A09	0,439	0,702	0,743	0,877	0,959	0,947	0,988	1,000	1,029													
A10*	0,389	0,627	0,767	0,860	0,927	0,927	0,938	0,953	0,953	0,953	0,969	0,984	1,000	1,000	1,016							
A11	0,412	0,670	0,852	0,929	0,951	0,951	0,967	0,984	0,995	1,011	1,027											
A12*	0,489	0,815	0,902	0,984	0,984	1,000	0,984	0,984	1,000	1,000	0,984	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,016	1,000	1,000	1,000	
A13	0,428	0,821	0,908	0,925	0,925	0,925	0,925	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,925	0,925	0,908	0,908	0,925	0,908	0,936	0,936
<i>Mittel</i>	<i>0,429</i>	<i>0,747</i>	<i>0,860</i>	<i>0,935</i>	<i>0,962</i>	<i>0,972</i>	<i>0,978</i>	<i>0,988</i>	<i>0,997</i>	<i>0,993</i>	<i>0,996</i>	<i>0,994</i>	<i>0,980</i>	<i>0,983</i>	<i>0,986</i>	<i>0,954</i>	<i>0,958</i>	<i>0,969</i>	<i>0,964</i>	<i>0,979</i>	<i>0,979</i>	
<i>SD</i>	<i>0,042</i>	<i>0,063</i>	<i>0,058</i>	<i>0,041</i>	<i>0,028</i>	<i>0,039</i>	<i>0,037</i>	<i>0,041</i>	<i>0,048</i>	<i>0,051</i>	<i>0,059</i>	<i>0,064</i>	<i>0,041</i>	<i>0,039</i>	<i>0,040</i>	<i>0,046</i>	<i>0,047</i>	<i>0,046</i>	<i>0,049</i>	<i>0,037</i>	<i>0,037</i>	
<i>Median</i>	<i>0,427</i>	<i>0,743</i>	<i>0,866</i>	<i>0,929</i>	<i>0,959</i>	<i>0,974</i>	<i>0,984</i>	<i>0,984</i>	<i>0,995</i>	<i>0,953</i>	<i>0,936</i>	<i>0,992</i>	<i>0,992</i>	<i>0,992</i>	<i>0,992</i>	<i>0,955</i>	<i>0,966</i>	<i>0,966</i>	<i>0,983</i>	<i>1,000</i>	<i>1,000</i>	

Tab. 44: Verlauf der relativen HF (als Faktor von HF_{3,0mmol/l}) von Gruppe A in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	0,101	0,626	0,850	0,835	0,848	0,848	0,853	0,866	0,837	0,856	0,845	0,846	0,845	0,835	0,837	0,848	0,835	0,826	0,835	0,840	0,834
A02	0,148	0,529	0,683	0,823	0,831	0,826	0,832	0,815	0,823	0,846	0,820	0,845									
A03*	0,133	0,460	0,543	0,648	0,668	0,667	0,650														
A04	0,150	0,456	0,568	0,768	0,634	0,624	0,510	0,464													
A05*	0,134	0,553	0,708	0,798	0,789	0,808	0,790	0,811	0,794	0,803	0,790	0,877	0,897	0,860	0,858						
A06	0,114	0,442	0,580	0,741	0,840	0,854	0,816	0,819	0,803												
A07	0,119	0,560	0,778	0,964	0,954	0,970	0,979	0,937	0,946	0,925	0,912										
A08	0,147	0,515	0,708	0,764	0,773	0,763	0,744	0,707	0,703	0,700	0,729										
A09	0,132	0,479	0,578	0,759	0,816	0,798	0,725	0,533	1,029												
A10*	0,147	0,522	0,657	0,852	0,940	0,969	0,931	0,934	0,916	0,931	0,917	0,898	0,919	0,910	0,895						
A11	0,111	0,555	0,738	0,957	0,957	0,938	0,952	0,948	0,954	0,938	0,922										
A12*	0,106	0,522	0,661	0,870	0,904	0,887	0,870	0,870	0,800	0,774	0,769	0,696	0,701	0,696	0,717	0,643	0,645	0,637	0,647	0,647	0,647
A13	0,111	0,552	0,694	0,666	0,665	0,671	0,669	0,665	0,669	0,685	0,690	0,645	0,660	0,645	0,632	0,610	0,615	0,642	0,623	0,627	0,626
<i>Mittel</i>	<i>0,127</i>	<i>0,521</i>	<i>0,673</i>	<i>0,803</i>	<i>0,817</i>	<i>0,817</i>	<i>0,794</i>	<i>0,781</i>	<i>0,843</i>	<i>0,829</i>	<i>0,822</i>	<i>0,801</i>	<i>0,804</i>	<i>0,789</i>	<i>0,788</i>	<i>0,700</i>	<i>0,698</i>	<i>0,702</i>	<i>0,702</i>	<i>0,705</i>	<i>0,702</i>
<i>SD</i>	<i>0,018</i>	<i>0,051</i>	<i>0,089</i>	<i>0,095</i>	<i>0,110</i>	<i>0,113</i>	<i>0,133</i>	<i>0,158</i>	<i>0,109</i>	<i>0,096</i>	<i>0,085</i>	<i>0,104</i>	<i>0,117</i>	<i>0,113</i>	<i>0,110</i>	<i>0,129</i>	<i>0,119</i>	<i>0,108</i>	<i>0,116</i>	<i>0,118</i>	<i>0,115</i>
<i>Median</i>	<i>0,132</i>	<i>0,522</i>	<i>0,683</i>	<i>0,798</i>	<i>0,831</i>	<i>0,826</i>	<i>0,816</i>	<i>0,815</i>	<i>0,803</i>	<i>0,774</i>	<i>0,769</i>	<i>0,846</i>	<i>0,845</i>	<i>0,835</i>	<i>0,837</i>	<i>0,640</i>	<i>0,650</i>	<i>0,640</i>	<i>0,650</i>	<i>0,650</i>	<i>0,650</i>

Tab. 45: Verlauf der relativen VO₂ (als Faktor von VO₂max) von Gruppe A in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	5,4	17,5	18,6	18,0	18,3	18,1	18,0	18,5	18,1	18,1	17,5	18,1	17,8	18,4	17,1	17,3	16,7	17,1	16,6	16,1	16,5
A02	6,9	17,7	19,8	21,5	20,7	21,0	20,8	20,3	20,1	20,0	19,7	20,3									
A03*	4,7	15,6	15,7	16,2	16,7	15,6	15,0														
A04	7,7	15,9	16,4	19,4	13,3	13,7	11,3	10,1													
A05*	5,7	16,5	18,4	19,8	19,3	19,6	18,9	19,1	18,4	18,4	18,1	19,5	20,6	19,4	19,3						
A06	6,4	17,9	20,2	23,7	24,5	23,8	22,4	22,5	22,4												
A07	6,4	16,7	20,6	22,8	22,9	22,9	23,4	22,6	22,2	22,6	21,2										
A08	7,1	16,8	19,0	19,1	18,2	17,9	17,1	15,9	15,9	15,9	15,9										
A09	7,7	18,7	20,7	22,2	22,5	21,9	17,2	16,8	13,4												
A10*	7,3	19,3	21,6	23,5	23,4	24,6	21,9	23,0	21,4	21,3	21,6	21,1	21,6	21,4	20,4						
A11	7,2	19,8	20,9	23,9	23,9	24,0	23,4	22,0	22,2	21,6	21,6										
A12*	4,8	13,3	13,5	14,0	17,8	17,4	16,7	16,5	15,3	14,9	14,7	13,0	13,4	13,2	13,0	12,2	12,5	12,3	12,3	12,3	12,3
A13	4,7	15,5	17,8	16,8	16,8	17,0	16,2	17,7	16,8	17,3	17,2	15,8	16,4	16,1	16,0	15,3	16,0	15,9	15,7	15,8	15,8
<i>Mittel</i>	<i>6,31</i>	<i>17,02</i>	<i>18,71</i>	<i>20,07</i>	<i>19,87</i>	<i>19,81</i>	<i>18,64</i>	<i>18,75</i>	<i>18,75</i>	<i>18,90</i>	<i>18,61</i>	<i>17,97</i>	<i>17,96</i>	<i>17,70</i>	<i>17,16</i>	<i>14,93</i>	<i>15,07</i>	<i>15,10</i>	<i>14,87</i>	<i>14,73</i>	<i>14,87</i>
<i>SD</i>	<i>1,13</i>	<i>1,76</i>	<i>2,36</i>	<i>3,19</i>	<i>3,41</i>	<i>3,50</i>	<i>3,61</i>	<i>3,73</i>	<i>3,15</i>	<i>2,66</i>	<i>2,55</i>	<i>3,07</i>	<i>3,30</i>	<i>3,16</i>	<i>2,90</i>	<i>2,57</i>	<i>2,25</i>	<i>2,50</i>	<i>2,27</i>	<i>2,11</i>	<i>2,25</i>
<i>Median</i>	<i>6,4</i>	<i>16,8</i>	<i>19,0</i>	<i>19,8</i>	<i>19,3</i>	<i>19,6</i>	<i>18,0</i>	<i>18,5</i>	<i>18,1</i>	<i>17,3</i>	<i>17,2</i>	<i>15,8</i>	<i>17,8</i>	<i>18,4</i>	<i>17,1</i>	<i>15,3</i>	<i>16,0</i>	<i>15,9</i>	<i>15,7</i>	<i>15,8</i>	<i>15,8</i>

Tab. 46: Verlauf des Sauerstoffpulses (ml) von Gruppe A in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
A01	0,300	0,972	1,033	1,000	1,017	1,006	1,000	1,028	1,006	1,006	0,972	1,006	0,989	1,022	0,950	0,961	0,928	0,950	0,922	0,894	0,917
A02	0,299	0,766	0,857	0,931	0,896	0,909	0,900	0,879	0,870	0,866	0,853	0,879									
A03*	0,208	0,690	0,695	0,717	0,739	0,690	0,664														
A04	0,362	0,746	0,770	0,911	0,624	0,643	0,531	0,474													
A05*	0,270	0,782	0,872	0,938	0,915	0,929	0,896	0,905	0,872	0,872	0,858	0,924	0,976	0,919	0,915						
A06	0,213	0,597	0,673	0,790	0,817	0,793	0,747	0,750	0,747												
A07	0,288	0,752	0,928	1,027	1,032	1,032	1,054	1,018	1,000	1,018	0,955										
A08	0,335	0,792	0,896	0,901	0,858	0,844	0,807	0,750	0,750	0,750	0,750										
A09	0,300	0,728	0,805	0,864	0,875	0,852	0,669	0,654	0,521												
A10*	0,324	0,858	0,960	1,044	1,040	1,093	0,973	1,022	0,951	0,947	0,960	0,938	0,960	0,951	0,907						
A11	0,295	0,811	0,857	0,980	0,980	0,984	0,959	0,902	0,910	0,885	0,885										
A12*	0,259	0,719	0,730	0,757	0,962	0,941	0,903	0,892	0,827	0,805	0,795	0,703	0,724	0,714	0,703	0,659	0,676	0,665	0,665	0,665	0,665
A13	0,235	0,775	0,890	0,840	0,840	0,850	0,810	0,885	0,840	0,865	0,860	0,790	0,820	0,805	0,800	0,765	0,800	0,795	0,785	0,790	0,790
<i>Mittel</i>	<i>0,284</i>	<i>0,768</i>	<i>0,844</i>	<i>0,900</i>	<i>0,892</i>	<i>0,890</i>	<i>0,839</i>	<i>0,847</i>	<i>0,845</i>	<i>0,890</i>	<i>0,876</i>	<i>0,873</i>	<i>0,894</i>	<i>0,882</i>	<i>0,855</i>	<i>0,795</i>	<i>0,801</i>	<i>0,803</i>	<i>0,791</i>	<i>0,783</i>	<i>0,791</i>
<i>SD</i>	<i>0,046</i>	<i>0,088</i>	<i>0,106</i>	<i>0,103</i>	<i>0,121</i>	<i>0,130</i>	<i>0,153</i>	<i>0,165</i>	<i>0,138</i>	<i>0,088</i>	<i>0,076</i>	<i>0,110</i>	<i>0,117</i>	<i>0,122</i>	<i>0,102</i>	<i>0,153</i>	<i>0,126</i>	<i>0,143</i>	<i>0,129</i>	<i>0,115</i>	<i>0,126</i>
<i>Median</i>	<i>0,295</i>	<i>0,766</i>	<i>0,857</i>	<i>0,911</i>	<i>0,896</i>	<i>0,909</i>	<i>0,896</i>	<i>0,885</i>	<i>0,840</i>	<i>0,865</i>	<i>0,853</i>	<i>0,902</i>	<i>0,960</i>	<i>0,919</i>	<i>0,907</i>	<i>0,770</i>	<i>0,800</i>	<i>0,800</i>	<i>0,790</i>	<i>0,790</i>	<i>0,790</i>

Tab. 48: Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) von Gruppe A in Test 3 (leistungs-konstante Einheit)

9.2.3.3 Tab. 48– Tab. 41: Tabellarische Übersichten über die Messwerte von Gruppe B in Test 3

Zeit (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
B01	<0,8	1,2	2,4	2,1	1,9	1,9					
B02	<0,8	1,8	4,0	4,2	3,9	3,6	3,3	3,3	2,9	4,0	4,0
B03	<0,8	3,3	6,3	6,8	6,9						
B04	<0,8	2,6	2,2	1,8	1,8	1,6	1,6	1,2	1,3	1,7	2,1
B05	<0,8	3,6	2,9	3,1	3,0	2,7	2,4	2,3			
<i>Mittel</i>	0,80	2,50	3,56	3,60	3,50	2,45	2,43	2,27	2,10	2,85	3,05
<i>SD</i>	0,00	1,0	1,68	2,02	2,09	0,90	0,85	1,05	1,13	1,63	1,34
<i>Median</i>	0,8	2,6	2,9	3,1	3,0	1,9	1,6	1,2	2,1	2,9	3,1

Tab. 48: Laktatkonzentrationen (mmol/l) von Gruppe B in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B01	1,02	0,89	0,95	1,00	0,98	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96										
B02	0,82	0,81	0,87	0,95	0,94	0,97	0,98	0,98	0,94	1,02	1,02	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,08	1,10	1,10	1,15	1,12
B03	1,00	0,95	1,02	1,01	1,00	0,99	0,99	0,97	0,96	0,96											
B04	0,90	0,90	0,98	0,94	0,95	0,92	0,92	0,90	0,91	0,94	0,91	0,90	0,90	0,92	0,90	0,91	0,92	0,90	0,90	0,91	0,93
B05	0,87	0,93	0,99	0,93	0,95	0,95	0,96	0,95	0,93	0,93	0,95	0,94	0,93	0,96	0,94						
<i>Mittel</i>	0,922	0,896	0,962	0,966	0,964	0,956	0,962	0,952	0,940	0,962	0,960	0,960	0,957	0,973	0,960	0,990	1,000	1,000	1,000	1,030	1,025
<i>SD</i>	0,086	0,054	0,057	0,036	0,025	0,026	0,027	0,031	0,021	0,035	0,045	0,072	0,074	0,061	0,072	0,113	0,113	0,141	0,141	0,170	0,134
<i>Median</i>	0,90	0,90	0,98	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,94	0,96	0,95	0,92	0,92	0,94	0,92	0,91	0,92	0,90	0,90	0,91	0,93

Tab. 49: Verlauf des RQ von Gruppe B in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
B01	0,407	0,733	0,820	0,930	0,930	0,930	0,942	0,965	0,983	0,983	1,006											
B02	0,571	0,766	0,857	0,949	0,966	0,966	0,989	0,989	0,989	0,989	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,023	1,023	1,006	1,023	1,023	
B03	0,506	0,781	0,933	1,006	1,051	1,051	1,067	1,084	1,101													
B04	0,542	0,855	0,934	0,964	0,976	0,946	0,964	0,976	0,976	0,988	0,988	1,018	1,018	1,018	1,018	1,042	1,042	1,060	1,060	1,078	1,078	
B05	0,424	0,876	0,977	0,994	0,977	0,994	1,011	1,011	0,994	1,011	1,011	1,011	1,023	1,011	1,040							
<i>Mittel</i>	0,490	0,802	0,904	0,969	0,980	0,977	0,995	1,005	1,009	0,993	1,003	1,012	1,016	1,012	1,021	1,024	1,033	1,042	1,033	1,051	1,051	
<i>SD</i>	0,072	0,061	0,064	0,031	0,044	0,048	0,048	0,047	0,052	0,012	0,010	0,006	0,009	0,006	0,017	0,025	0,013	0,026	0,038	0,039	0,039	
<i>Median</i>	0,506	0,781	0,933	0,964	0,976	0,966	0,989	0,989	0,989	0,988	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,023	1,023	1,006	1,023	1,023	

Tab. 50: Verlauf der relativen HF (als Faktor von $HF_{3,0\text{mmol/l}}$) von Gruppe B in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
B01	0,113	0,524	0,707	0,884	0,895	0,876	0,884	0,867	0,875	0,887	0,882											
B02	0,158	0,522	0,665	0,816	0,836	0,840	0,793	0,776	0,767	0,745	0,731	0,724	0,698	0,693	0,691	0,662	0,680	0,665	0,678	0,678	0,669	
B03	0,159	0,581	0,794	0,873	0,895	0,895	0,910	0,903	0,901													
B04	0,161	0,596	0,788	0,824	0,833	0,824	0,808	0,812	0,827	0,833	0,825	0,845	0,831	0,833	0,831	0,835	0,822	0,824	0,818	0,833	0,825	
B05	0,176	0,738	0,873	0,929	0,916	0,898	0,884	0,898	0,889	0,893	0,862	0,858	0,816	0,791	0,804							
<i>Mittel</i>	0,153	0,592	0,765	0,865	0,875	0,867	0,856	0,851	0,852	0,840	0,825	0,809	0,782	0,772	0,775	0,749	0,751	0,745	0,748	0,756	0,747	
<i>SD</i>	0,024	0,088	0,081	0,046	0,034	0,033	0,052	0,055	0,055	0,069	0,067	0,074	0,073	0,072	0,074	0,122	0,100	0,112	0,099	0,110	0,110	
<i>Median</i>	0,159	0,581	0,788	0,873	0,895	0,876	0,884	0,867	0,875	0,833	0,825	0,724	0,698	0,693	0,691	0,750	0,750	0,750	0,750	0,760	0,750	

Tab. 51: Verlauf der relativen Sauerstoffaufnahme (als Faktor von $VO_{2,max}$) von Gruppe B in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
B01	4,5	23,3	22,0	23,8	23,7	23,4	22,8	22,1	22,3	22,0	21,5											
B02	8,1	18,7	20,5	22,6	22,6	22,0	20,8	20,1	20,3	19,3	18,8	18,4	18,3	17,9	17,9	17,3	17,3	16,9	17,0	16,5	16,3	
B03	6,5	16,5	18,5	18,5	18,2	18,5	18,2	17,9	17,7													
B04	6,4	17,0	19,7	19,4	19,0	20,4	19,3	19,4	19,5	19,7	19,3	18,2	19,1	19,4	19,1	18,9	18,6	18,2	18,2	18,0	17,7	
B05	9,0	14,5	16,4	17,1	17,1	17,1	16,3	16,5	16,1	16,4	15,6	15,5	14,6	14,5	14,4							
<i>Mittel</i>	<i>6,90</i>	<i>18,00</i>	<i>19,42</i>	<i>20,28</i>	<i>20,12</i>	<i>20,28</i>	<i>19,48</i>	<i>19,20</i>	<i>19,18</i>	<i>19,35</i>	<i>18,80</i>	<i>17,37</i>	<i>17,33</i>	<i>17,27</i>	<i>17,13</i>	<i>18,10</i>	<i>17,95</i>	<i>17,55</i>	<i>17,60</i>	<i>17,25</i>	<i>17,00</i>	
<i>SD</i>	<i>1,73</i>	<i>3,32</i>	<i>2,11</i>	<i>2,82</i>	<i>2,87</i>	<i>2,55</i>	<i>2,48</i>	<i>2,14</i>	<i>2,39</i>	<i>2,30</i>	<i>2,43</i>	<i>1,62</i>	<i>2,40</i>	<i>2,52</i>	<i>2,44</i>	<i>1,13</i>	<i>0,92</i>	<i>0,92</i>	<i>0,85</i>	<i>1,06</i>	<i>0,99</i>	
<i>Median</i>	<i>6,5</i>	<i>17,0</i>	<i>19,7</i>	<i>19,4</i>	<i>19,0</i>	<i>20,4</i>	<i>19,3</i>	<i>19,4</i>	<i>19,5</i>	<i>19,3</i>	<i>18,8</i>	<i>15,5</i>	<i>14,6</i>	<i>14,5</i>	<i>14,4</i>	<i>17,3</i>	<i>17,3</i>	<i>16,9</i>	<i>17,0</i>	<i>16,5</i>	<i>16,3</i>	

Tab. 52: Verlauf des Sauerstoffpulses (ml) von Gruppe B in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

Zeit (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
B01	0,196	1,013	0,957	1,035	1,030	1,017	0,991	0,961	0,970	0,957	0,935											
B02	0,345	0,796	0,872	0,962	0,962	0,936	0,885	0,855	0,864	0,821	0,800	0,783	0,779	0,762	0,762	0,736	0,736	0,719	0,723	0,702	0,694	
B03	0,333	0,846	0,949	0,949	0,933	0,949	0,933	0,918	0,908													
B04	0,309	0,821	0,952	0,937	0,918	0,986	0,932	0,937	0,942	0,952	0,932	0,879	0,923	0,937	0,923	0,913	0,899	0,879	0,879	0,870	0,855	
B05	0,506	0,815	0,921	0,961	0,961	0,961	0,916	0,927	0,904	0,921	0,876	0,871	0,820	0,815	0,809							
<i>Mittel</i>	<i>0,338</i>	<i>0,858</i>	<i>0,930</i>	<i>0,969</i>	<i>0,960</i>	<i>0,970</i>	<i>0,931</i>	<i>0,920</i>	<i>0,918</i>	<i>0,913</i>	<i>0,886</i>	<i>0,844</i>	<i>0,841</i>	<i>0,838</i>	<i>0,831</i>	<i>0,825</i>	<i>0,818</i>	<i>0,799</i>	<i>0,801</i>	<i>0,786</i>	<i>0,775</i>	
<i>SD</i>	<i>0,111</i>	<i>0,088</i>	<i>0,035</i>	<i>0,038</i>	<i>0,043</i>	<i>0,032</i>	<i>0,039</i>	<i>0,040</i>	<i>0,040</i>	<i>0,063</i>	<i>0,063</i>	<i>0,053</i>	<i>0,074</i>	<i>0,090</i>	<i>0,083</i>	<i>0,125</i>	<i>0,115</i>	<i>0,113</i>	<i>0,110</i>	<i>0,119</i>	<i>0,114</i>	
<i>Median</i>	<i>0,333</i>	<i>0,821</i>	<i>0,949</i>	<i>0,961</i>	<i>0,961</i>	<i>0,961</i>	<i>0,932</i>	<i>0,927</i>	<i>0,908</i>	<i>0,921</i>	<i>0,876</i>	<i>0,783</i>	<i>0,779</i>	<i>0,762</i>	<i>0,762</i>	<i>0,830</i>	<i>0,820</i>	<i>0,800</i>	<i>0,800</i>	<i>0,790</i>	<i>0,780</i>	

Tab. 53: Verlauf des relativen Sauerstoffpulses (als Faktor von $(O_2/HF)_{max}$) von Gruppe B in Test 3 (leistungs-konstante Einheit).

10 LITERATURVERZEICHNIS

1. Coyle E.F., M.E. Feltner, S.A. Kautz, M.T. Hamilton, S.J. Montain, A.M. Baylor, L.D. Abraham, G.W. Petrek. 1991. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 23 (1): 93-107
2. Craig N., C. Walsh, D.T. Martin, S. Woolford, P. Bourdon, T. Stanef, P. Barnes, B. Savage. 2000. Protocols for the physiological assessment of high-performance track, road and mountain cyclists. In: Gore C.J. (editor): *Physiological tests for elite athletes*. Australian Sports Commission, 2000. Human Kinetics Pub.: pp 258-277.
3. Donovan C.M., G.A. Brooks. 1983. Endurance training affects clearance, not lactate production. *Am J Physiol* 244: E83-E92
4. Douglas P.S., M.L. O'Toole, W.D.B. Hiller, K. Hackney, N. Reichek. 1987. Cardiac fatigue after prolonged exercise. *Circulation* 76 (6): 1206-1213
5. Föhrenbach R., A. Mader, W. Hollmann. 1987. Determination of endurance capacity and prediction of exercise intensities for training and competition in marathon runners. *Int J Sports Med* 8: 11-18.
6. Foxdal P., B. Sjödín, A. Sjödín, B. Östman. 1994. The validity and accuracy of blood lactate measurements for prediction of maximal endurance running capacity. *Int J Sports Med* 15: 89-95
7. Foxdal P., A. Sjödín, B. Sjödín. 1996. Comparison of blood lactate concentrations obtained during incremental and constant intensity exercise. *Int J Sports Med* 17: 360-365
8. Gaesser G.A., D.C. Poole. 1996. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc Sports Sci Rev* 24: 35-70
9. Gleeson M. 2002. Muscle fiber types and fuel use. In: Maughan R.J., L.M. Burke (eds.): *Sports Nutrition. Olympic Handbook of Sports Medicine and Science*. Blackwell Science Ltd, Oxford: p 24

10. Gonzales-Alonso J., R. Mora-Rodriguez, P.R. Below, E.F. Coyle. 1997. Dehydration markedly impairs cardiovascular function in hyperthermic endurance athletes during exercise. *J Appl Physiol* 82: 1229-36
11. Gonzales-Alonso J., C. Teller, S.L. Andersen, F.B. Jensen, T. Hyldig, B. Nielsen. 1999. Influence of body temperature in the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 86: 1032-39
12. Grazi G., N. Alfieri, C. Borsetto, I. Casoni, F. Manfredini, G. Mazzoni, F. Conconi. 1999. The power output/heart rate relationship in cycling: Test standardization and repeatability. *Med Sci Sports Exerc* 31: 1478-83
13. Gressmann M. 1995. *Fahrradphysik und Biomechanik – Technik, Formeln, Gesetze*. 6. überarb. Auflage. Moby Dick Verlag, Kiel
14. Haber P. 2001. *Leitfaden zur medizinischen Trainingstherapie*. Springer-Verlag, Wien.
15. Hagberg J.M. 1984. Physiological implications of the lactate threshold. *Int J Sports Med* 5: 106-109 Supp
16. Hagemann P., K. Thomas, R. Ludwig. 1997. Biochemie. In: Abdolvahab-Emminger H. 1997. *Physikum exakt*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York
17. Halle M., A. Berg. 2002. Körperliche Aktivität und Lipidstoffwechsel. *Dt Zeitschr Sportmed* 53: 58-59
18. Heck H., A. Mader, G. Hess, S. Mücke, R. Müller, W. Hollmann. 1985. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med* 6: 117-130
19. Heitkamp H.-Ch., M. Holdt, K. Scheib. 1991. The reproducibility of the 4 mmol/l lactate threshold in trained and untrained women. *Int J Sports Med*, Vol 12, No 4: 363-368
20. Hoffmann P., M. Lamprecht, G. Schwaberg, R. Pokan, S.P. von Duvillard. 1998. Einfluss unterschiedlicher Diätformen auf die Laktatleistungskurve im Stufentest und das Laktatverhalten bei Dauerbelastung auf dem Fahrradergometer – eine Einzelfallstudie. *Dtsch Z Sportmedizin* 49: 82-87

21. Hoogeveen A.R., G. Schep. 1997. The plasma lactate response to exercise and endurance performance: Relationships in elite triathletes. *Int J Sports Med* 18: 526-530
22. Ivy J.L., D.L. Costill, P.J. van Handel, D.A. Essig, R.W. Lower. 1981. Alteration in the lactate threshold with changes in substrate availability. *Int J Sports Med* 2 (3): 139-142
23. Jeukendrup A.E., N.P. Craig, J.A. Hawley. 2000. The bioenergetics of world class cycling. *J Sci Med Sport* 3 (4): 414-33
24. Karlsson J., I. Jacobs. 1982. Onset of blood lactate accumulation during muscular exercise as a threshold concept. *Int J Sports Med* (3): 190-201
25. Keul J. 1969. *Muskelstoffwechsel*. A. Barth-Verlag, München
26. Kindermann W., G. Simon, J. Keul. 1979. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of workload intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol* 42: 25-34
27. Klinke R., S. Silbernagl. 1996. *Lehrbuch der Physiologie*. Georg Thieme Verlag Stuttgart/New York
28. Lajoie C., L. Laurencelle, F. Trudeau. 2000. Physiological responses to cycling for 60 minutes at maximal lactate steady state. *Can J Appl Physiol* 25 (4): 250-261
29. Lucía A., J. Pardo, A. Duránte, J. Hoyos, J.L. Chicharro. 1998. Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med* 19: 342-348
30. Lucía A., J. Hoyos, J.L. Chicharro. 2001. Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Med Sci Sports Exerc* 33 (8): 1361-66
31. Mader A., M. Heck, W. Hollmann. 1978. Evaluation of lactic acid anaerobic energy contribution by determination of post exercise lactic acid concentration of ear capillary blood in middle-distance runners and swimmers. In: Landry F., W.A.R. Orban, eds. 1978. *Exercise Physiology*. Symposia Specialists Inc., Miami, Florida. Vol 14: 187-200

32. Maughan R.J., L.M. Burke. 2002. Fuels used in exercise: carbohydrate and fat. In: Maughan R.J., L.M. Burke (eds.): Sports Nutrition. Olympic Handbook of Sports Medicine and Science. Blackwell Science Ltd, Oxford: pp 15-25
33. Messonnier L., H. Freund, C. Denis, D. Dormois, A.-B. Dufour, J.-R. Lacour. 2002. Time to exhaustion at VO_2 max is related to the lactate exchange and removal abilities. *Int J Sports Med* 23: 433-438
34. Meyer T. 2002. Der Respiratorische Quotient. *Dt Zeitschr Sportmed* 53: 29-30
35. Meyer T., H.H.W. Gabriel, M. Auracher, J. Scharhag, W. Kindermann. 2003. Metabolic profile of 4 h cycling in the field with varying amounts of carbohydrate supply. *Eur J Appl Physiol* 88: 431-437
36. Nadel E.R. 1988. Temperature regulations and prolonged exercise. In: Lamb D.R., R. Murray (eds.): Perspectives in Exercise Science and Sports Medicine, Vol. I Prolonged Exercise. Indianapolis, Benchmark Press. Inc.: pp 125-147
37. O'Toole M.L., P.S. Douglas, W.D.B. Hiller. 1989. Lactate, oxygen uptake, and cycling performance in triathletes. *Int J Sports Med* 10: 413-418
38. Rowell L.B. 1993. Cardiovascular Control. New York: Oxford University Press.
39. Schardt F.W. 1988. Einzelatemzuganalyse synchronisiert mit kontinuierlicher Bestimmung des Säure-Basen-Haushaltes. Habilitationsschrift, Universität Würzburg, Germany.
40. Schardt F.W. 1993. Kompensationsmechanismen der Muskulatur, des Kreislaufs und der Ventilation während körperlicher Belastung. *Österr J Sportmed* 01/93: 3-11
41. Schardt F.W. 2005. Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik. MKM, Lenggries/Obb.: S. 9-52
42. Sjödín B., I. Jacobs. 1981. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med* 2: 23-26

43. Smith M.F., R.C.R. Davison, J. Balmer, S.R. Bird. 2001. Reliability of mean power recorded during indoor and outdoor self-paced 40 km cycling time trials. *Int J Sports Med* 22: 270-274
44. Stegmann H., W. Kindermann, A. Schnabel. 1981. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 2: 160-165
45. Stegmann H., W. Kindermann. 1982. Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol/l lactate. *Int J Sports Med* 3: 105-110
46. Swensen T.T., C.R. Harnish, L. Beitman, B.A. Keller. 1999. Noninvasive estimation at the maximal lactate steady state in trained cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 31: 742-746
47. Urhausen A., B. Coen, B. Weiler, W. Kindermann. 1993. Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. *Int J Sports Med*, Vol 14, No 3: 134-139
48. Wasserman K., B.J. Whipp. 1975. Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Respir Dis* 112: 219-249
49. Weston A.R., K.H. Myburgh, F.H. Lindsay, S.C. Dennis, T.D. Noakes, J.A. Hawley. 1997. Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol* 75: 7-13
50. Whipp W.T., M.R. Jackman. 1994. Mitochondrial function during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1347-1354
51. Woledge R.C. 1998. Possible effects of fatigue on muscle efficiency. *Acta Physiol Scand* 162: 267-273
52. Zappe U. 1995. Beurteilung von ergospirometrischen Daten bei Patienten und Leistungssportlern. Inaugural-Dissertation, Universität Würzburg, Germany.

DANKSAGUNG

Meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. F. W. Schardt, danke ich für die Überlassung des Themas, seine fachliche Unterstützung und die anregenden Diskussionen.

Frau Professor Dr. C. E. Angermann danke ich für die Übernahme des Koreferates, Herrn Professor Dr. M. Schmidt danke ich für seine Bereitschaft, als Prüfer im Rigorosum zu fungieren.

Herrn Stefan Bedel vielen Dank für seine unermüdliche technische Unterstützung bei Testaufbau und Datenerfassung.

Des weiteren vielen Dank allen Probanden für ihren tatkräftigen Einsatz, ihre große Motivation und Ausdauer.

Ganz herzlich danke ich meinen Eltern, die mich bei dieser Arbeit und während des gesamten Studiums fortdauernd und tatkräftig unterstützen.

CURRICULUM VITAE

Vor- und Zuname: Florian Wenk

wohnhaft: Georg-Thiel-Str. 2,
D-95326 Kulmbach

geboren am: 26. April 1978

Geburtsort: Kulmbach

Schulbildung: 1984 - 1988 Besuch der Pestalozzi-Volksschule Kulmbach

1988 - 1997 Besuch des Markgraf-Georg-Friedrich-
Gymnasiums Kulmbach

27.06.1997 Beendigung des Schulbesuchs mit Erlangen der
Allgemeinen Hochschulreife (Abitur)

Studium: 1998 - 2005 Studium der Humanmedizin an der
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität
Würzburg

18.05.2005 Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
23.05.2005 Approbation als Arzt

Würzburg, im Juni 2005

F. Wenk