

**Ausgewählte
leistungsdagnostische Verfahren
im Straßenradsport zur Trainingssteuerung**

Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung
für das Lehramt für die Sekundarstufe II,
dem Staatlichen Prüfungsamt für Erste Staatsprüfungen
für Lehrämter an Schulen
in Köln vorgelegt
von:

Timo Stötzer

Köln, 03.09.2004

PD Dr. H. Lötzerich

Institut für Natursport und Ökologie
der
Deutschen Sporthochschule Köln

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der im Text verwendeten Abkürzungen

1	Einleitung	1
2	Straßenradspport	4
2.1	Disziplinen.....	4
2.2	Leistungsbeeinflussende Faktoren.....	4
2.3	Straßenradspport als typische Langzeitausdauersportart.....	5
3	Grundlagen der Arbeitsphysiologie	8
3.1	Anaerob-alaktazide Energiegewinnung.....	8
3.2	Anaerob-laktazide Energiegewinnung.....	8
3.3	Aerobe Energiegewinnung.....	9
4	Trainingssteuerung und Trainingsbereiche	11
5	Leistungsdiagnostische Verfahren	13
5.1	Eckpunkte zur Geschichte der Leistungsdiagnostik.....	13
5.2	Messparameter.....	16
5.2.1	Parameter des Herz-Kreislaufsystems.....	16
5.2.2	Parameter des Atmungssystems.....	16
5.2.3	Parameter des Energiestoffwechsels.....	17
5.3	Laktatleistungsdiagnostik.....	18
5.4	Spiroergometrie.....	21
6	Umfrage zur Leistungsdiagnostik in Deutschland	22
6.1	Problemstellung.....	22
6.2	Vorgehensweise.....	22
6.3	Ergebnisse der Umfrage.....	24

7	Laktatgestützte Leistungsdiagnostik.....	28
7.1	Laktatschwellenkonzepte.....	28
7.1.1	Mader-Schwelle.....	28
7.1.2	Fixe 3 mmol/l-Schwelle.....	29
7.1.3	Simon-Schwelle.....	31
7.1.4	Dickhuth-Schwelle.....	32
7.1.5	Keul-Schwelle.....	33
7.1.6	Stegmann-Schwelle.....	34
7.1.7	Laktatsenke.....	36
7.2	Mögliche Probleme der Laktatleistungsdiagnostik in der Praxis.....	37
7.2.1	Streuungsbereich des MaxLass.....	38
7.2.2	Übereinstimmung der MaxLass-Leistung mit der ermittelten Schwellenleistung.....	41
7.2.3	Einfluss des Belastungsprotokolls auf die Schwelle.....	45
7.2.3.1	<i>Laktatkinetik und Zeitkonstante.....</i>	45
7.2.3.2	<i>Einfluss unterschiedlicher Belastungssteigerungen.....</i>	46
7.2.3.3	<i>Einfluss der Pausendauer.....</i>	51
7.2.3.4	<i>Einfluss der Vorbelastung.....</i>	54
7.2.4	Einfluss des Ernährungszustandes auf die Schwelle.....	57
7.2.5	LLK – Spiegelbild des Metabolismus?.....	64
8	Spiroergometrische Leistungsdiagnostik.....	66
8.1	Hintergrund.....	66
8.1.1	Ventilatorische Schwelle.....	67
8.1.2	Respiratorischer Kompensationspunkt.....	69
8.2	Spiroergometrie in der Praxis.....	70
8.2.1	Untersuchungspraxis.....	70
8.2.2	Mögliche Probleme der Spiroergometrie in der Praxis.....	71
8.2.2.1	<i>Zuverlässigkeit der Schwellenkriterien.....</i>	72

8.2.2.2 Einfluss des Belastungsprotokolls auf die Schwellen- bestimmung.....	73
8.2.2.3 Einfluss des Belastungsprotokolls auf die VO_2max	77
8.2.2.4 Einfluss des Ernährungszustandes auf die respira- torischen Schwellen.....	78
9 Fazit.....	81
10 Zusammenfassung.....	85
11 Quellenverzeichnis.....	87
11.1 Literaturverzeichnis.....	87
11.2 Internetquellen.....	100
11.3 Telefonische Auskünfte.....	100
11.4 Abbildungsverzeichnis.....	101
11.5 Tabellenverzeichnis.....	103
12 Anhang.....	104

Verzeichnis der im Text verwendeten Abkürzungen

A \ddot{A} O ₂	Atemäquivalent für Sauerstoff
A \ddot{A} CO ₂	Atemäquivalent für Kohlendioxid
Abb.	Abbildung
ADP	Adenosindiphosphat
AMP	Adenosinmonophosphat
AMV	Atemminutenvolumen
ANS	anaerobe Schwelle
AS	aerobe Schwelle
ATP	Adenosintriphosphat
BDR	Bund Deutscher Radfahrer e.V.
bzw.	beziehungsweise
bzgl.	bezüglich
ca.	circa
d.h.	das heißt
DLV	Deutscher Leichtathletik Verband
Hf	Herzfrequenz
ICSPE	International Council of Sports and Physical Education
Kap.	Kapitel
k.A.	keine Angabe
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
KP	Kreatinphosphat
Lass	Laktat-steady-state
LLK	Laktatleistungskurve
LZA	Langzeitausdauer
MaxLass	maximales Laktat-steady-state
min	Minute
ml	Milliliter
mmol/l	Millimol pro Liter
m/s	Meter pro Sekunde
PetO ₂	endexpiratorischer Sauerstoffpartialdruck
PetCO ₂	endexpiratorischer Kohlendioxidpartialdruck

PoW	Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung
RCP	respiratorischer Kompensationspunkt
RTF	Radtourenfahren
RQ	respiratorischer Quotient
s	Sekunde
sd	Standardabweichung
s.o.	siehe oben
sog.	sogenannte
u.a.	und andere
usw.	und so weiter
v	Geschwindigkeit
v_{mittel}	arithmetisches Mittel der Geschwindigkeit
VCO_2	Kohlendioxidabgabe
VO_2	Sauerstoffaufnahme
$VO_{2\text{max}}$	maximale Sauerstoffaufnahme
VT	ventilatorische Schwelle
W	Watt
$x_{L\text{mittel}}$	arithmetisches Mittel der Laktatkonzentration
z.B.	zum Beispiel
ZIV	Zweirad-Industrie-Verband e.V.

1 Einleitung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind „Ausgewählte leistungsdiagnostische Verfahren im Straßenradspport zur Trainingssteuerung“. Straßenradspport erfreut sich zunehmenden Interesses. Dies ist u.a. daran zu erkennen, dass sich im Jahr 2003 der Marktanteil der Modellgruppe „Rennmaschinen und Fitness-Bikes“ um 50 Prozentpunkte von zwei auf drei Prozent erhöhte (ZWEIRAD-INDUSTRIE-VERBAND e.V. (ZIV) 2004). Bei einem Gesamtbestand der Fahrräder in Deutschland von ca. 66 Millionen Stück (ZIV 2004a) entspricht dies einer absoluten Steigerung von 1,3 Millionen auf knapp 2 Millionen Sporträder. Die Fitness-Bikes, die es seit 2003 gibt, sind als Sportgeräte für „Jedermann, [...] Sportkanone oder Gelegenheitssportler“ (ZIV 2004b) gedacht. Dahinter steht das Konzept der Gesunderhaltung bzw. die Steigerung der Leistungsfähigkeit. Die Erhöhung des Marktanteils der auf sportliches Fahren ausgerichteten Radmodelle passt zu dem Trend, dass sich Ausdauersportarten seit Jahren immer größerer Beliebtheit erfreuen. Zu erkennen ist dies z.B. an den seit Jahren steigenden Teilnehmerzahlen bei Marathonläufen. Nicht zuletzt durch die Erfolge Jan Ullrichs bei der „Tour de France“ und das größere Medieninteresse an Radgroßveranstaltungen rückte in den letzten Jahren auch der Straßenradspport zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses der aktiven Ausdauersportler und derjenigen, die es werden wollen.

Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt an der wachsenden Zahl entsprechender Veranstaltungen. Zum einen ist hier das sog. „Radtourenfahren“ (RTF) zu nennen, eine Veranstaltungsform, bei der zwar sportliches Fahren im Vordergrund steht, jedoch weder Zeit- noch Ranglistenwertung vorgenommen werden. Eine genaue Zahl dieser RTF-Veranstaltungen lässt sich nicht benennen, da für diese beim Bund Deutscher Radfahrer e.V. (BDR) keine Meldepflicht besteht. Jedoch bieten etwa 1000 Vereine in Deutschland entsprechende Veranstaltungen an, mit steigender Tendenz (RUBIN 2004). Zum anderen gibt es eine größer werdende Zahl von Jedermann-Rennen, die im Gegensatz zu den vorgenannten Veranstaltungen auf abgesperrten Straßen, mit Zeitwertung und Rangliste stattfinden. Ein Beispiel stellt der „HEW-Cyclastics-Cup“ in Hamburg dar, der erstmalig im Jahr 2001 mit einem Teilnehmerfeld von 10.000 Startern veranstaltet wurde. Für 2004 werden 14.000 Radfahrer zugelassen,

wobei eine Mehrnachfrage von 1000 - 2000 Sportlern erwartet wird (WIEGAND 2004). Ein weiteres Beispiel ist das Jedermann-Rennen „Rund um den Henninger Turm“, welches 2002 zum ersten Mal mit 750 Teilnehmern gestartet wurde. 2003 gingen 1.700 Radfahrer und am 1. Mai 2004 bereits 2.500 an den Start (MÜLLER 2004). Die genannten Veranstaltungsformen bieten damit für alle Leistungsgruppen ein sportliches Betätigungsfeld, vom Breiten- bis hin zum ambitionierten Leistungssportler.

Einhergehend mit der zunehmenden Begeisterung für Ausdauersportarten ist in den letzten Jahren auch ein gesteigertes Interesse an leistungsdiagnostischen Verfahren zu beobachten. Eine zunehmende Sensibilisierung für den eigenen Körper und ein gesteigertes Gesundheitsbewusstsein der Breitensportler dürften Gründe dafür sein. Die Tatsache, dass in entsprechender Fachliteratur (vgl. JANNSEN 1996, vgl. HOTTENROTT und ZÜLCH 2000) solche Verfahren zur Trainingssteuerung empfohlen werden, stützt diese These gleichermaßen. Früher stand die Leistungsdiagnostik ausschließlich Spitzensportlern zur Verfügung. Mittlerweile haben jedoch entsprechende Institute die breite Masse als Zielgruppe entdeckt. Die Klientel dieser Einrichtungen ist folglich sehr heterogen. Während Kaderathleten im Radsport an zentralen Stützpunkten untersucht werden, wenden sich ambitionierte Leistungssportler mit und ohne Amateurlizenz sowie Breitensportler gleichermaßen an Arztpraxen und Institute. Was die letztgenannten betrifft, so ist häufig die Leistungsdiagnostik deren einzige Erwerbsquelle. In den meisten Fällen müssen die Kosten dabei von den Sportlern getragen werden (ELSENBACH 2001, S. 90).

Am häufigsten kommen wegen der großen Bedeutung der Ausdauer im Straßenradsport Verfahren zum Einsatz, mit denen die Ausdauerleistungsfähigkeit bestimmt werden soll. Aus den Ergebnissen dieser Tests werden Trainingsbereiche festgelegt und Trainingsempfehlungen abgeleitet. Die Sportler sollen damit einerseits in die Lage versetzt werden, Überlastungen zu vermeiden und andererseits ihr Training optimal im Sinne einer Leistungssteigerung steuern zu können. Dabei wurde im Laufe der Jahrzehnte eine immense Anzahl verschiedener Testverfahren entwickelt. Von jedem dieser Verfahren wird behauptet, dass damit eine optimale Steuerung der sportlichen Betätigung, entsprechend der individuellen Zielsetzung ermöglicht wird. In der vorliegenden Arbeit soll

an einer Auswahl von Einrichtungen zur Leistungsdiagnostik überprüft werden, ob diese dem Anspruch, den die Branche an sich stellt, gerecht werden. Dabei stehen folgende Fragen im Mittelpunkt:

- Welche leistungsdiagnostischen Verfahren werden aktuell durchgeführt?
- Inwiefern eignen sich die Verfahren zur Trainingssteuerung?
- Für welche Sportlergruppen sind die Verfahren geeignet?

Um die Thematik zu bearbeiten, erfolgt zu Beginn eine Charakterisierung der Disziplinen des Straßenradsports im Breiten- und Leistungssport als Langzeitausdauerleistungen (Kapitel 2) sowie eine Beschreibung der Grundlagen der Arbeitsphysiologie (Kap. 3). Im folgenden wird der Begriff „Trainingssteuerung“ definiert, und es werden im Radsport übliche Trainingsbereiche dargestellt (Kap. 4). In Kap. 5 geht es um verschiedene leistungsdiagnostische Verfahren und die Vorstellung notwendiger Messparameter bevor in Kap. 6 die Ergebnisse der Umfrage hinsichtlich aktuell angewandter Verfahren vorgestellt werden. Anhand verschiedener Studien erfolgt eine Darstellung der Probleme, die sich bei der Leistungsdiagnostik in der Praxis ergeben und eine Beurteilung gewonnener Ergebnisse erschweren (Kap. 7 und Kap. 8).

2 Straßenradspport

2.1 Disziplinen

Der Straßenradspport lässt sich in verschiedene Disziplinen einteilen, die in verschiedenen Alters- und Leistungsklassen als Wettkämpfe ausgetragen werden. LINDNER (1996, S. 133) unterscheidet acht Disziplinen: Straßeneinzel-, Kriteriums-, Rundstrecken- und Etappenrennen sowie Einzel-, Paar-, Mannschafts- und Bergzeitfahren. Entsprechende Wettkämpfe in diesen Disziplinen finden auf abgesperrten Straßen statt. Der Besitz einer Amateurlizenz berechtigt zur Teilnahme an Rennen entsprechend der Leistungsklasse. Fahrer (aller Leistungsstärken) ohne Lizenz können an einer wachsenden Zahl von Jedermann-Rennen teilnehmen.

Weiterhin nennt SCHMIDT (2001, S. 34) noch den Radtouristikbereich. Dieser ist zwar nicht als Disziplin aufzufassen und nicht zwangsläufig auf Wettkämpfe ausgelegt, auf Grund des zunehmenden Interesses von Freizeitsportlern am Radsport bedarf die Gruppe der Radtouristiker im Rahmen dieser Arbeit aber einer besonderen Erwähnung. Je nach Intention, Leistungsvermögen und Ambitionen der Sportler sind hier alle Dimensionen und Intensitäten der vorgeannten Wettkampfdisziplinen denkbar. Die Veranstaltungen finden ohne Zeitznahme meistens auf nicht gesperrten Straßen statt, die Sportler müssen sich an die Straßenverkehrsordnung halten.

2.2 Leistungsbeeinflussende Faktoren

Das Bestreiten der oben genannten Wettkämpfe oder das Überwinden einer bestimmten Distanz im Radtouristikbereich stellt je nach Belastungsart unterschiedliche Anforderungen an Mensch und Material.

LINDNER (1996, S. 133ff) nennt für den Leistungssport sechs Faktoren und misst ihnen je nach Disziplin unterschiedliche Bedeutung zu. Da aber, wie in Kap. 2.1 gezeigt, auch im Breitensport Wettkampfambitionen und entsprechende Intensitäten nicht von der Hand zu weisen sind (SCHMIDT

2001, S. 34), wird die Gültigkeit dieser Faktoren auch für den Breitensport angenommen:

- physische Leistungsfaktoren in den Dimensionen Ausdauer, Kraft und Schnelligkeit
- psychische Leistungsfaktoren (z.B. Motivation)
- technisch-koordinative Leistungsfaktoren (z.B. Trettechnik)
- taktische Leistungsfaktoren
- äußere Faktoren (z.B. Wetter)
- Geräte- und Ausrüstungsfaktoren

Der physischen Leistungsfähigkeit, insbesondere der Ausdauerleistungsfähigkeit, räumt LINDNER dabei eine dominierende Stellung ein (1994, S. 14). Auf eine genaue Betrachtung der übrigen genannten Faktoren und deren Aufschlüsselung nach verschiedenen Disziplinen wird verzichtet, da sie für diese Arbeit eine untergeordnete Rolle spielen. Im Hinblick auf die zu diskutierenden Aspekte der Arbeit soll im folgenden nur die Bedeutung der Ausdauer im StraßenradSPORT herausgearbeitet werden.

2.3 StraßenradSPORT als typische Langzeitausdauersportart

Nach NEUMANN (1984, S. 561) sind Aktivitäten, die länger als zehn Minuten und bis zu mehreren Stunden dauern, der Langzeitausdauer (LZA) zuzuordnen. Mit zunehmender Belastungsdauer kommt es zu einer Verschiebung der Form der Energiebereitstellung von anteilig anaerob zu fast ausschließlich aerob. Daher unterteilt Neumann den sehr langen Bereich der Langzeitausdauer. Das Schema sieht eine Einteilung in vier Unterbereiche (I-IV) vor: Langzeitausdauer I (10-35 Minuten), II (35-90 Minuten), III (90-360 Minuten) und IV (mehr als 360 Minuten). Somit lassen sich alle oben genannten Bereiche des StraßenradSPORTS der Langzeitausdauer zuordnen.

Der Vollständigkeit halber sind noch die Kurzeitausdauer (1-2 Minuten) und die Mittelzeitausdauer (2-10 Minuten) zu nennen. Diese spielen allerdings wegen der Streckenlängen im StraßenradSPORT eine zu vernachlässigende Rolle.

Tabelle 1 zeigt deutlich, dass mit zunehmender Belastungsdauer der anaerobe Anteil der Energiebereitstellung abnimmt, im Gegenzug der aerobe Anteil zunimmt. LINDNER (1996) und SCHMIDT (2001) nennen Anteile, die den Werten Neumanns ähnlich sind.

Die gleichsinnig abnehmenden Laktatkonzentrationen stehen in direktem Zusammenhang mit der zunehmend aeroben Energiegewinnung. Die steigende Konzentration der freien Fettsäuren im Blut ist ein Indiz für die zunehmende Bedeutung des Fettstoffwechsels bei lang andauernder Belastung. Der Energiebevorratung in Form von Glykogen kommt ebenfalls eine große Bedeutung zu. Die Herzfrequenzen nehmen mit zunehmender Belastungsdauer ab, weisen aber alters- und trainingsbedingt eine große Streuung auf.

Funktionssystem	Parameter	KZA (1–2 min)	MZA (>2–10 min)	LZA I (>10– 35 min)	LZA II (>35– 90 min)	LZA III (>90– 360 min)	LZA IV (>360 min)
Blutkreislauf	Herzfrequenz (Schläge · min ⁻¹)	185–200	190–210	180–190	175–190	150–180	120–170
Sauerstoffaufnahme	% V _{O₂max}	95–100	95–100	90–95	80–95	60–85	50–80
Energiebereitstellung	% Aerob	50	80	85	95	98	99
	% Anaerob	50	20	15	5	2	(1)
Energieverbrauch	kJ · min ⁻¹	160	120	110	105	80	75
	kJ total	160–320	320–1200	1200–3700	3900–8400	8500–25 300	>27 000
Glykogenabbau	% Glykogen im Muskel	10	30	40	60	80	95
Stoffwechsel	Freie Fettsäuren (mmol · l ⁻¹)	0.5	0.5	0.8	1.0	2.0	2.5
	Laktat (mmol · l ⁻¹)	18	20	14	8	4	2
	3-Hydroxybutyrat (μmol · l ⁻¹)	50	50	80	150	500	700
	Harnstoff (Δ mmol · l ⁻¹)	0–1	1	1–2	2–3	3–6	4–8
	Alanin (μmol · l ⁻¹)	500	500	400	350	250	200
	Tyrosin (Δ μmol · l ⁻¹)	20	20	30	35	40	10
	Cortisol (μmol · l ⁻¹)	400*	400*	350*	(300)	(400)	(500)

* Belastung KZA = Kurzzeitdauer; MZA = Mittelzeitdauer; LZA I–IV = verschiedene Unterabschnitte der Langzeitdauer

Tab. 1: Inanspruchnahme verschiedener funktioneller Systeme bei Ausdauerbelastungen, [NEUMANN 1993, S. 565].

Es ist weiterhin zu sehen, dass länger dauernde Leistungen mit einem geringeren Prozentsatz der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) erbracht werden. Dies macht die Notwendigkeit deutlich, dass für sehr gute Leistungen bei Langzeitbelastungen einerseits eine hohe maximale Sauerstoffaufnahmefähigkeit abrufbar sein muss. Andererseits ist es von Vorteil, wenn ein hoher Anteil der VO_{2max} über möglichst lange Zeit genutzt werden kann. Bei männlichen

Straßenradprofis finden sich maximale relative Sauerstoffaufnahmen von 70 - 85 ml/(min*kg) (NEUMANN 1993, S. 563; KLINKE und SILBERNAGL 2003, S. 530).

Weitere Voraussetzung für gute Leistungen ist die genetisch bedingte Verfügbarkeit ermüdungsresistenter, langsamer Typ-ST-Muskelfasern (Straßenradfahrer weisen maximale Anteile von 70-95% auf (NEUMANN 1993, S. 565)). Ebenso spielen hohe Diffusionskapazitäten für Sauerstoff durch die Zellmembranen, hohe Sauerstoffbindungs- und -transportkapazitäten sowie eine hohe muskuläre Mitochondriendichte eine große Rolle. Von Bedeutung sind ebenfalls eine hohe Funktionalität der Enzyme der Atmungskette und eine Zunahme der Lipid- und Glykogendepots in den Muskeln (vgl. SCHMIDT und THEWS 1987; KNECHTLE 2002, S. 57). Nach KNECHTLE (2002, S. 60) steigt beispielsweise der Glykogengehalt in der Beinmuskulatur durch langfristiges Ausdauertraining von durchschnittlich 12 g pro kg Muskelfeuchtgewicht auf 17 - 18 g. Ein Training mit niedriger Intensität und hohem Umfang über Monate und Jahre bewirkt im Sinne der verschiedenen vorgenannten leistungsbestimmenden Aspekte eine optimale Anpassung des Körpers an die Belastung (HECK 1990, S. 64; KNECHTLE 2002, S. 18). Wie in Kap. 4 näher beschrieben, bezeichnet man ein solches Training als „Grundlagentraining“.

Eine gut entwickelte Grundlagenausdauer ist somit die Grundvoraussetzung für Dauerbelastungen, nicht zuletzt weil sie „eine hohe Trainingsverträglichkeit, Ermüdungswiderstands- und Regenerationsfähigkeit bewirkt und sicherstellt, dass ermüdungsbedingte Leistungsverluste [...] hinausgezögert werden“ (MARTIN et al. 1993, S. 173). Von der Grundlagenausdauer ist die spezielle Ausdauer zu unterscheiden, die z.B. entscheidend ist für die Entwicklung des Renntempos oder des Durchhaltevermögens bei intensiver Beanspruchung. Da die spezielle Ausdauer durch Trainingsmaßnahmen hoher Intensität erworben wird, ist der Anteil am Training wesentlich geringer als der des Grundlagentrainings, welches nach SCHMIDT (2001, S. 57) 70-90% der Trainingskilometer umfasst.

3 Grundlagen der Arbeitsphysiologie

Zur Energiegewinnung finden in den Muskelzellen des Körpers unterschiedliche Stoffwechselprozesse statt. Es werden folgende Prozesse unterschieden: anaerob-alkalotazide, anaerob-laktotazide und aerobe. Dabei nimmt die Geschwindigkeit der Energiegewinnung (Energieflussrate) kontinuierlich ab, das umsetzbare Energiepotential jedoch zu (vgl. STOCKHAUSEN 1996). Die Energiekapazitäten, die im folgenden bei der Beschreibung der Prozesse in Klammern angegeben werden, beziehen sich auf einen 75 kg schweren Mann, dessen Muskelmasse 28 kg beträgt. Das molekulare Substrat der Energiegewinnung ist bei allen Arten der Energiegewinnung das Adenosintriphosphat (ATP), bei dessen Spaltung zu Adenosindiphosphat (ADP) und einem Phosphatrest Energie freigesetzt wird.

3.1 Anaerob-alkalotazide Energiegewinnung

Die anaerob-alkalotazide Energiegewinnung steht am Beginn einer Belastung. Die Energie wird ohne Sauerstoffverbrauch und ohne Produktion von Milchsäure gewonnen. Dies geschieht direkt über Spaltung von in den Zellen gelagertem ATP. Die gespeicherten Vorräte (4 kJ) reichen allerdings nur für wenige Muskelkontraktionen aus (DE MARÉES 2002, S 362). Anschließend erfolgt die Energiegewinnung mit Hilfe der Kreatinphosphatspeicher (15 kJ) der Zellen (KLINKE und SILBERNAGL 2003, S. 520). Dabei wird ATP aus ADP und Kreatinphosphat (KP) gewonnen, welches dann unter Energiefreisetzung gespalten werden kann.

3.2 Anaerob-laktotazide Energiegewinnung

Nach etwa 30 s sind auch die KP-Speicher leer, so dass die anaerobe Glykolyse (anaerob-laktotazide Energiegewinnung) hauptsächlich für die notwendige Energie sorgt. Dabei wird Glukose im Zytoplasma unter Energiefreisetzung zu Pyruvat umgebaut. Sofern es wegen Sauerstoffmangels zu keiner Weiterverarbei-

tung des Pyruvats in den Mitochondrien kommt (vgl. Kap. 3.3), dissoziiert dieses weiter zu Laktat und Wasserstoffionen. Dies ermöglicht im folgenden eine schnelle ATP-Gewinnung. Das Laktat akkumuliert zunächst im Muskel, dann im Blut und wird so im Körper verteilt. Es kann dann in anderen Muskelfasern (rote Typ-ST-Muskelfasern) und im Herzmuskel weiter abgebaut oder in der Leber zu Glykogen aufgebaut werden (KLINKE und SILBERNAGL 2003, S. 521).

Die anfallenden Wasserstoffionen werden zunächst über Pufferungssysteme abgefangen. Sind die Pufferkapazitäten wegen einer zu hohen Laktatkonzentration erschöpft, fallen der pH-Wert des Muskels und, etwas verzögert, der des Blutes immer weiter ab, so dass es zu einer Azidose kommt. Dadurch werden essentielle Enzymsysteme gehemmt, bis eine ATP-Resynthese nicht mehr möglich ist. Zu beachten ist, dass für einen Abbruch einer Belastung nicht die Laktatproduktion allein ausschlaggebend ist, sondern dass der Saldo aus Produktion, Transport zu den Eliminationsorten und die Elimination selbst betrachtet werden muss (KNECHTLE 2002, S. 50f).

Das Problem zu hoher Belastungen besteht darin, dass vermehrt Pyruvat gebildet wird. Gleichzeitig steht den Mitochondrien nicht genügend Sauerstoff zur Verfügung, um das gesamte Pyruvat zu verarbeiten. In diesem Fall kommt es zur vorgenannten Dissoziation zu Laktat und Wasserstoffionen mit den entsprechenden Konsequenzen einer Azidose.

3.3 Aerobe Energiegewinnung

Die aerobe Energiegewinnung wird in den Mitochondrien vollzogen, wofür Sauerstoff benötigt wird. Wenn nach und nach die Ventilation der Belastung angepasst wird und genügend Sauerstoff in die Muskelzellen gelangt, beginnt die aerobe Glykolyse und etwas verzögert die Lipolyse. Der große Vorteil dieser Prozesse liegt darin, dass große Mengen Energie gewonnen werden können. Nachteilig ist ein geringerer Energiefluss pro Zeit als bei den anderen Prozessen.

Das im Plasma entstandene Pyruvat wird zu aktivierter Essigsäure (Acetyl-Coenzym-A) umgebaut. Die weitere Verstoffwechslung findet in den hinter-

einandergeschalteten Kreisläufen Zitronensäurezyklus und Atmungskette statt. Durch mehrere Umbauprozesse wird ständig ATP nachgebildet. Das im Körper gespeicherte Glykogen reicht bei intensiver Belastung maximal bis zu 90 Minuten (NEUMANN 1993, S. 566), so dass auch diese Vorräte (4600 kJ) begrenzt sind (KLINKE und SILBERNAGL 2003, S. 520). Mit zunehmender Belastungsdauer spielt daher die Lipolyse eine Rolle, bei der freie Fettsäuren durch β -Oxidation zu Acetyl-Coenzym-A abgebaut werden. Danach sind die Abbauprozesse für Lipolyse und Glykolyse identisch. Wegen der hohen Energiedichte der Fette ist dieses Energiereservoir (300 000 kJ) nahezu unerschöpflich (ebda). Bei einer intensiven Belastung im Bereich von 80-90% der VO_{2max} können Fettsäuren nicht mehr in die Mitochondrien eingeschleust werden, so dass dieser Energiepool nicht länger zur Verfügung steht (KNECHTLE 2002, S. 50f). Dies macht deutlich, weshalb lang andauernde Leistungen nur mit geringer Intensität bestritten werden können.

Von Bedeutung ist im Leistungssport weiterhin die Proteolyse, die Energiegewinnung aus Aminosäuren. Sie spielt eine zunehmende Rolle, wenn die Hauptenergieträger erschöpft sind (vgl. STOCKHAUSEN 1996). Dabei wird Stickstoff in Form von Ammoniak frei, dessen Konzentration dadurch im Blut ansteigt und das als Harnstoff ausgeschieden wird. Die Aminosäuren stammen aus dem Blut oder werden durch katabole Vorgänge aus den Muskelzellen direkt gewonnen. Dies bedeutet, dass der Körper sich seiner Leistungsgrundlage beraubt. Eine weitere Ammoniakquelle ist der Purinnukleotidzyklus (vgl. LOWENSTEIN 1990). Wenn bei intensiven Belastungen in hohem Maß ATP umgesetzt wird, kommt es zur Resynthese des ATPs aus zwei ADP, wobei vermehrt AMP (Adenosinmonophosphat) anfällt. Über einen Zwischenschritt wird dieses zu Ammoniak umgebildet, welches im Blut nachgewiesen werden kann. Der Vorteil dieser Art der ATP-Gewinnung liegt in der hohen Energiebildungsrate.

4 Trainingssteuerung und Trainingsbereiche

CARL und GROSSER (1992, S. 528) definieren den Begriff der „Trainingssteuerung“ wie folgt:

„Trainingssteuerung bezeichnet zusammenfassend die gezielte (kurz- und längerfristige) Abstimmung aller Maßnahmen der Trainingsplanung, des Trainingsvollzugs [...], der Wettkampf- und Trainingskontrollen und der Trainings- und Wettkampfauswertung zur Veränderung des sportlichen Leistungszustandes (Trainingszustandes) im Hinblick auf das Erreichen sportlicher Leistungen und Erfolge.“

In dieser Arbeit soll in Anlehnung an WEINECK (1994, S. 47) das Trainingssystem darüber hinaus als Regelkreis verstanden werden, mit Hilfe dessen die Ist-Werte der sportlichen Leistung den perspektivischen Soll-Werten angenähert werden können. Dabei unterstützen leistungsdiagnostische Verfahren eine zielgerichtete Trainingssteuerung (ebda, S. 55). Beschreiben lässt sich Training über die Faktoren Trainingsintensität, Trainingsumfang, Belastungsdichte, Belastungsdauer und Trainingshäufigkeit (SCHMIDT 2001, S. 39f).

Vor dem Hintergrund, dass sich sportliche Belastungen oft in Grenzbereichen der körperlichen Leistungsfähigkeit abspielen, wird deutlich, dass Spitzensportlern im Training keine Fehler unterlaufen dürfen, um den Anschluss an die Konkurrenz nicht zu verlieren. Fehler in diesem Sinne sind z. B. ein zu geringer Trainingsumfang, zu hohe Intensitätsanteile (NEUMANN 1994, S. 49), unzureichende Erholungsphasen oder eine zu frühe Aufnahme des wettkampfspezifischen Trainings. Ein optimal gesteuertes Training kann das Erreichen der Höchstform günstigstenfalls auf den Wettkampftag genau ermöglichen. Oftmals verfolgen auch ambitionierte Freizeitsportler dieses Ziel. Im Leistungssport ist der Wettkampf der tiefere Sinn des Trainings, und im Abschneiden zeigt sich, ob das Training erfolgreich war oder nicht. Diese Instanz ist im Breiten- und Gesundheitssport nicht immer zu finden. Dennoch ist „in diesen Bereichen Training auch ohne Wettkampf möglich“ (ebda) und erfolgt nicht ohne Sinn. Neben der Leistungssteigerung dient Training hier der Gesundwerdung oder der Gesunderhaltung. Die Steuerung ist daher auch in die-

sem Bereich sinnvoll. Dadurch besteht die Möglichkeit, Training effektiver zu gestalten bzw. Belastungen, die der Gesundheit abträglich sind zu vermeiden (BERG 1993, S. 283).

Eine Einteilung des Trainings in verschiedene Intensitätsbereiche erleichtert dessen Planung und Durchführung. Darüber hinaus ist durch die Nomenklatur auch dem interessierten Laien die Intention der jeweiligen Belastungsintensität verständlich. Die Einteilung nach LINDER (1994, S. 38ff; 1996, S. 148ff) gilt im Radsport als allgemein anerkannt und wird mit Blick auf die jeweilige Stoffwechselsituation und Zielsetzung dargestellt.

- Das **Kompensatorisches Training** dient der Regeneration bzw. Erwärmung, stellt die niedrigste Intensität dar und wird unter rein aeroben Stoffwechselverhältnissen durchgeführt.
- Das **Grundlagentraining** stellt den wichtigsten Trainingsbereich dar, um eine hohe aerobe Kapazität zu entwickeln und zu stabilisieren. Die Energiebereitstellung erfolgt ausschließlich aerob.
- Das Training im **Entwicklungsbereich** soll die wettkampfspezifische Ausdauer entwickeln und dient der Verbesserung des Stehvermögens und der Laktattoleranz. Daher muss der Stoffwechsel im aerob-anaeroben Übergang beansprucht werden.
- Das Ziel des Trainings im **Spitzenbereich** ist die Mobilisation anaerober Reserven sowie die Entwicklung der Schnelligkeit und Schnelligkeitsausdauer. Es handelt sich um eine Belastung hoher bis maximaler Intensität im anaeroben Bereich.
- Beim **Schnellkraftbereich** handelt es sich um ein Antrittstraining von wenigen Sekunden, das die Verbesserung der Maximal- und Schnellkraft zum Ziel hat. Die Stoffwechsellage ist alaktazid.
- Die Ermüdungswiderstandsfähigkeit, um hohe Frequenzen mit hoher Übersetzung fahren zu können, wird über das Training im **Kraftausdauerbereich** entwickelt. Die Energiebereitstellung erfolgt am aerob-anaeroben Übergang.

5 Leistungsdiagnostische Verfahren

Nach BACHL und Mitarbeitern (1994, S. 165) versteht man unter Leistungsdiagnostik die „Diagnose der Leistungsfähigkeit des Organismus bzw. seiner Teilsysteme und deren leistungsbestimmende Faktoren bezogen auf eine spezifische motorische Belastung.“ GROSSER und NEUMAIER (1988, S. 34) erweitern die Leistungsdiagnostik noch um den Aspekt der Überprüfung der Effektivität der eingesetzten Trainingsmittel. Dies macht die enge Verknüpfung von Trainingsplanung, Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung deutlich (BERG 1993, S. 283; RÖCKER und DICKHUTH 1994, S. 27).

Da es, wie aus der Darstellung in Kap. 4 hervorgeht, in den einzelnen Trainingsbereichen immer um das Ansprechen verschiedener Stoffwechselbereiche geht, sind für Trainer und Sportler möglichst genaue Kenntnisse über Belastungsreaktionen notwendig. Um das Training entsprechend den metabolischen Verhältnissen im Körper durchführen zu können, andererseits aber auch um unerwünschte Überlastungszustände zu verhindern, werden verschiedene sportmedizinische Diagnostikverfahren herangezogen.

Wie in Kap. 2 hervorgehoben, spielt die aerobe Leistungsfähigkeit im Straßenradsport wegen der Einordnung in den Langzeitausdauerbereich die wichtigste Rolle. Daher finden in der vorliegenden Arbeit nur solche leistungsdiagnostischen Verfahren Beachtung, die auf eine Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit abzielen. Außerdem kann im Rahmen dieser Arbeit nur auf Diagnostikverfahren eingegangen werden, die im Labor zur Anwendung kommen.

5.1 Eckpunkte zur Geschichte der Leistungsdiagnostik

Zur Bestimmung der menschlichen Höchstleistungsfähigkeit haben HILL und Mitarbeiter (1925) das Kriterium der maximalen Sauerstoffaufnahme beschrieben. Die VO_{2max} umfasst alle an der Leistungserbringung beteiligten Mechanismen (äußere Atmung, Gasaustausch in der Lunge, Herzzeitvolumen, O_2 -Transport im Blut, belastungsgerechte Blutverteilung, O_2 -Aufnahme in die Muskulatur). Deshalb wird sie als Bruttokriterium der kardio-pulmonal-

metabolischen Kapazität bezeichnet (vgl. KNIPPING 1929; MEYER und KINDERMANN 1999, S. 285). In den folgenden Jahrzehnten wurden die eingesetzten Apparaturen so weit verbessert, dass sie wissenschaftlichen Ansprüchen genügen. Ab dem Jahr 1954 wurden in der Medizinischen Universitätsklinik Köln routinemäßig Untersuchungen auf dem Fahrradergometer vorgenommen (HOLLMANN 1999, S. 323). Die Bestimmung der VO_{2max} setzt jedoch eine bei Patienten nicht unkritische Ausbelastung voraus und ist darüber hinaus von der Motivation des Untersuchten abhängig.

Auf der Suche nach submaximalen Belastungsmethoden stieß der Kölner Arbeitskreis in stufenförmig ansteigenden Belastungstests auf unterschiedliche Laktatkonzentrationen in arteriellem und venösem Blut (Differenzen von ca. 15%). Ebenso wurde ein sehr ähnlicher Kurvenverlauf von Atemminutenvolumen (AMV) und arterieller Laktatkonzentration beobachtet, wobei es erst in höheren Belastungsstufen zu steileren Kurvenverläufen kam (HOLLMANN 1995, S. 290). Die logische Schlussfolgerung aus diesen Untersuchungen war, dass „in einem bestimmten Belastungsbereich ein Maximum an Sauerstoff mit einem Minimum an Ventilation und Laktatproduktion aufgenommen“ wurde (ebda).

Diese „höchste Belastungsstufe [...], die noch aerob abgedeckt war,“ wurde als „Punkt des optimalen Wirkungsgrad der Atmung bezeichnet (PoW)“ (HOLLMANN 1999, S. 325). Entsprechende Zuordnungen der gemessenen Herzfrequenzen zu den an diesem Punkt erbrachten Leistungen führten zu dem Begriff der „Puls-Dauerleistungsgrenze“ (ebda). WASSERMANN und Mitarbeiter (1964) bestätigten später die Untersuchungsergebnisse und prägten den Begriff der „anaerobic threshold“, der mit dem PoW identisch ist und im deutschsprachigen Raum als „aerobe Schwelle“ bezeichnet wird.

Ein enzymatisches Analyseverfahren ermöglichte eine schnellere, problemlosere Bestimmung der Laktatkonzentration in Blutproben als zu Forschungsbeginn und rückte die Analyse der Laktatleistungskurven (LLK) gegenüber einer Analyse der Ventilationskurven mit Bestimmung des PoW in den Vordergrund. Bis 1973 wurde dabei Blut durch Punktion einer Fingerkuppe gewonnen. Danach ging man zur Blutentnahme aus Ohrläppchen über, die durch Salbe hyperämisiert wurden. Dadurch wurden quasi-arterielle Laktatkonzentrationen gewonnen. MADER und Mitarbeiter (1976) bestimmten auf diese Weise in einem

Test mit stufenweise ansteigender Belastung die sogenannte „aerob-anaerobe Schwelle“ bei einer Laktatkonzentration von 4 mmol pro Liter Blut (mmol/l) als Kriterium der Dauerleistungsgrenze. Eine mit dieser Laktatkonzentration korrespondierende Leistung konnte in Untersuchungen über längere Zeit (20 Minuten bis 1 Stunde) aufrecht erhalten werden. Höhere Belastungen hingegen führten zu höheren Laktatwerten und Belastungsabbruch.

Aus der Kritik heraus, dass die Belastungen bei der fixen 4 mmol/l-Schwelle für Sportler mit hoher Ausdauerleistungsfähigkeit zu hoch seien, wurden in den folgenden Jahren und Jahrzehnten weitere Verfahren entwickelt (HECK und ROSSKOPF 1994, S. 111). Diese beruhen ebenfalls auf dem Prinzip, aus submaximalen Belastungen mittels Messen der Laktatkonzentrationen Rückschlüsse auf die aerobe Leistungsfähigkeit zu ziehen und Empfehlungen hinsichtlich optimaler Trainingsintensitäten zu geben: Beispiele sind die Verfahren nach KEUL, BERG, STEGMANN, BUNC, SIMON, TEGTBUR, DICKHUTH und WASSERMANN, die teilweise Gegenstand dieser Arbeit sind.

Mit einigen der genannten Verfahren (Hollmann, Wassermann) soll die Belastung bestimmt werden, bei der eine rein aerobe Energiegewinnung gerade nicht mehr möglich ist (HECK et al. 1985, S. 20). Bei den übrigen Methoden verbirgt sich hinter der „Schwelle“ die Belastung, bei der Laktatproduktion und -elimination gerade noch im Gleichgewicht stehen sollen, also das höchst mögliche Laktat-steady-state erreicht wird (HECK und ROSSKOPF 1993, S. 347). Mit der Vielfalt der Verfahren ging eine entsprechende Vielfalt der Schwellenbezeichnungen einher mit unterschiedlichen Bezeichnungen für gleiche metabolische Zusammenhänge. Für die weitere Bearbeitung soll daher die begriffliche Einteilung nach KINDERMANN und Mitarbeiter (1978) dienen. Demnach werden unterschieden: die „aerobe Schwelle“, die im unteren, flachen Teil der Laktatkurve zu finden ist, und die „anaerobe Schwelle“, die sich im oberen, steilen Teil der Kurve befindet (Abb. 1, S. 19). Der Bereich dazwischen wird aerob-anaerober Übergangsbereich genannt.

5.2 Messparameter

Im folgenden werden die physiologischen Parameter beschrieben, die bei den in dieser Arbeit beschriebenen leistungsdiagnostischen Untersuchungen erhoben werden und die für die Feststellung der Schwellen wichtig sind.

5.2.1 Parameter des Herz-Kreislaufsystems

Die **Herzfrequenz** (H_f) ist gleich der Zahl der Herzschläge pro Minute. Sie passt sich höheren Belastungen ohne Verzögerung an. Wenn die Belastungsintensität ein bestimmtes Maß nicht übersteigt, kommt es nach zwei bis fünf Minuten gleichbleibender Belastung zu einem sog. steady-state (HECK 1990a, S. 77).

5.2.2 Parameter des Atmungssystems

Das **Atemminutenvolumen** (AMV), auch als Ventilation bezeichnet, wird in Litern pro Minute angegeben und ist das Gasvolumen, das in einer Minute ausgeatmet wird (HECK 1990a, S. 76; NEUMANN und SCHÜLER 1994, S. 75). Eine belastungsbedingte Steigerung des AMV in Form der Hyperventilation kann als Versuch der respiratorischen Kompensation einer metabolischen Azidose verstanden werden (NEUMANN und SCHÜLER 1994, S. 75; WINTER et al. 1994, S.20).

Das **Atemäquivalent für Sauerstoff** ($A\ddot{A}O_2$) gibt an, wie viel Luft ventiliert werden muss, um einen Liter Sauerstoff aufzunehmen. Das $A\ddot{A}$ ist der Quotient aus Ventilation und Sauerstoffaufnahme und erlaubt Einblick in die Ökonomie der Atmung (HECK 1990a, S. 76; NEUMANN und SCHÜLER 1994, S. 78f).

Das **Atemäquivalent für Kohlendioxid** ($A\ddot{A}CO_2$) gibt, bezogen auf das aktuelle AMV, an, wie viel Luft ventiliert werden muss, um einen Liter Kohlendioxid abzugeben (WINTER et al. 1994, S. 20).

5.2.3 Parameter des Energiestoffwechsels

Die **Sauerstoffaufnahme** (VO_2) gilt als „summative Messgröße für die O_2 -aufnehmenden, O_2 -transportierenden und O_2 -verwertenden Funktionssysteme des Organismus.“ (NEUMANN und SCHÜLER 1994, S. 80). Darunter ist die Menge Sauerstoff (in Litern) zu verstehen, die aus der eingeatmeten Luft pro Minute extrahiert wird (HECK 1990a, S. 87). Unter $\text{VO}_{2\text{max}}$ versteht man die höchst mögliche Sauerstoffaufnahme.

Die **Kohlendioxidabgabe** (VCO_2) ist das pro Minute ausgeatmete Kohlendioxidvolumen und hängt unter anderem ab von der Ventilation, der Höhe des aeroben Energieumsatzes und vom Anteil an Fett bzw. Kohlenhydraten am Energiestoffwechsel (HECK 1990a, S. 88).

Der **respiratorische Quotient** (RQ) bezeichnet das Verhältnis von VCO_2 zu VO_2 und ist dimensionslos. Bei einem Wert von 1 zeigt er an, dass die Energie nur aus der Verbrennung von Kohlenhydraten gewonnen wird. Bei Ausbelastung erreicht er Werte größer 1, da durch die belastungsbedingte Hyperventilation vermehrt Kohlendioxid abgeatmet wird (HECK 1990a, S. 89; NEUMANN und SCHÜLER 1994, S. 89).

Als **endexpiratorischer Sauerstoffpartialdruck** (PetO_2) wird der in der Ausatemluft gemessene O_2 -Partialdruck verstanden. Bei intensiver Belastung steigt der PetO_2 infolge von Hyperventilation an, da mehr O_2 eingeatmet wird als der Körper verbrauchen kann (WINTER et al. 1994, S. 20).

Beim **endexpiratorischer Kohlendioxidpartialdruck** (PetCO_2) handelt es sich um den in der Ausatemluft gemessenen CO_2 -Partialdruck. Durch belastungsbedingte Hyperventilation kann der PetCO_2 sinken (ebda).

Das bei der anaerob-laktaziden Energiegewinnung entstehende **Laktat** verteilt sich nach Bildung im Muskel und zeitverzögert im Körper. Die im Blut gemessene Konzentration ist unter anderem abhängig von Verteilungsvorgängen im Körper und der Eliminationsgeschwindigkeit in Muskeln, Herz und Leber.

5.3 Laktatleistungsdiagnostik

Nicht zuletzt wegen der Unkompliziertheit der Bestimmung der Blutlaktatkonzentration im Vergleich zu spiroergometrischen Verfahren, wurde Laktat zum bestimmenden Parameter in der Leistungsdiagnostik. Als weitere Gründe nennen RÖCKER und DICKHUTH (1996, S. 44) den messmethodischen Aufwand und methodische Unsicherheiten der Spirometrie.

Ziel der oben genannten Verfahren ist die Bestimmung der anaeroben Schwelle als Gleichgewichtspunkt zwischen Laktatproduktion und -elimination. Die sicherste Methode zur Bestimmung eines MaxLass ist die Dauerbelastungsmethode mit konstanter Leistung in mehreren Durchgängen (HECK 1990, S.23). In mehreren Tests wird dabei die Belastung erhöht bis kein Lass mehr erreicht wird. Als MaxLass-Leistung gilt hierbei die höchste Dauerleistung, bei der zwischen der 10. und 30. Minute einer Dauerbelastung die Blutlaktatkonzentration um maximal 1,0 mmol/l ansteigt (vgl. HECK 1990). BERG (1993, S. 282) spricht hier von der „metabolischen Ausdauerleistungsgrenze“. Ein solch zeitaufwändiges Verfahren ist aber weder für Athleten noch für Leistungsdiagnostik Institute durchführbar.

Als Standardtestverfahren hat sich bei Sportmedizinern und Trainern deshalb der sogenannte „Stufentest“ durchgesetzt, da er ein ausreichendes Maß an Aussagekraft bei vertretbarem Aufwand ermöglicht (HILLE und GEIGER 1993). Das Ziel ist, in einem verkürzten Verfahren die Belastung herauszufinden, die sich nach der Dauerbelastungsmethode als MaxLass-Leistung ergeben würde. Dabei wird der Sportler ausgehend von einer Anfangsleistung (gemessen in Watt) stufenweise bis zum Abbruch immer stärker belastet, wobei die verschiedenen Formen der Energiebereitstellung (vgl. Kap. 3) durchlaufen werden. Stufenlänge und Belastungssteigerung variieren dabei, einerseits je nachdem, welches Verfahren zur Bestimmung der Dauerleistungsgrenze angewandt wird und andererseits in Abhängigkeit der Erfahrungen der Untersucher mit diesen Verfahren. Die Ausgestaltung eines Tests (Anfangsleistung, Belastungsdauer pro Stufe, Belastungssteigerung) wird unter dem Begriff „Belastungsprotokoll“ zusammengefasst.

In den letzten Sekunden jeder Belastungsstufe wird dem Sportler meistens aus dem Ohrläppchen eine Blutprobe entnommen, aus der die Laktatkonzentration

bestimmt wird. Gleichzeitig werden Leistung und Herzfrequenz protokolliert. Je nach Testverfahren werden nach Belastungsabbruch noch weitere Laktatbestimmungen vorgenommen. Die gewonnenen Daten können in einem zweidimensionalen Koordinatensystem gegeneinander aufgetragen werden. Die einzelnen Laktatwerte lassen sich mittels Berechnungen über mathematische Funktionstypen miteinander verbinden. Dabei kommen Polynome 2., 3. oder 4. Grades ebenso zur Anwendung wie Exponentialfunktionen in verschiedenen Variationen (GEIGER und HILLE 1993, S. 46f; PANSOLD und ZINNER 1993, S. 102f).

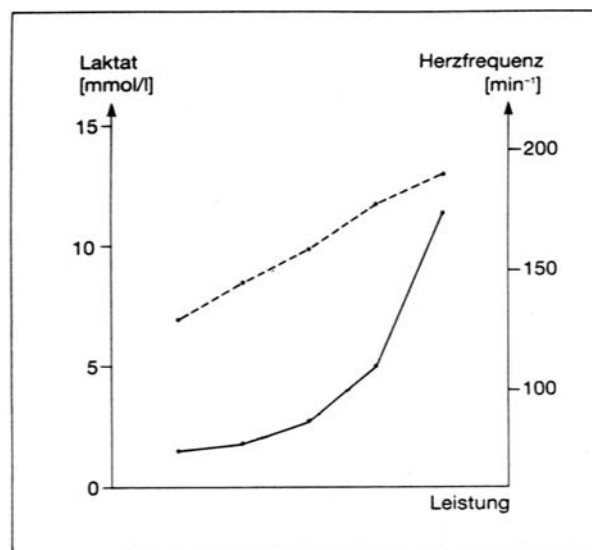


Abb.1: Laktatleistungs- (—) und Herzfrequenzkurve (-----) [nach SCHÜRCH 1987, S. 34].

Oftmals werden die Untersucher dabei von einer Computersoftware (winlactat u.a.) unterstützt. Auf diese Weise entsteht die sogenannte Laktatleistungskurve (LLK) und die leistungsabhängige Herzfrequenzkurve (Abb. 1).

In Abhängigkeit des angewandten Schwellenwertmodells wird aus dem Verlauf der LLK auf unterschiedliche Weise die anaerobe Schwelle ermittelt. Zu dieser Schwelle gehören eine entsprechende Leistung, eine Laktatkonzentration sowie eine Herzfrequenz. Von der anaeroben Schwelle ausgehend erfolgt eine Einteilung der Trainingsintensitäten entsprechend der metabolischen Verhältnisse mit entsprechender Zuordnung der Leistung und Herzfrequenz als Trainingsvorgabe. Die anaerobe Schwelle wird dabei als Dauerleistungsgrenze angesehen und entspricht einem Training im Entwicklungsbereich (vgl. Kap. 4;

LINDNER 1996, S. 150). Ziel des Ausdauertrainings ist, die anaerobe Schwelle hin zu höheren Leistungen zu verschieben. Das bedeutet, dass es erst bei höherer Belastung zu einem Anstieg der Laktatkonzentration im Blut kommt (vgl. Abb. 2) und somit die Dauerleistungsgrenze ebenfalls erst bei höherer Leistung erreicht wird.

Nach LINDNER (1994, S. 67ff) sind auch andere Entwicklungen aus veränderten Kurvenverläufen, wie Verschlechterung der Grundlagenausdauer und verbesserte anaerobe Mobilisationsfähigkeit, zu entnehmen. SCHMIDT (2001, S. 133) weist auf die Notwendigkeit standardisierter Testbedingungen hin, um Testergebnisse miteinander vergleichen zu können.

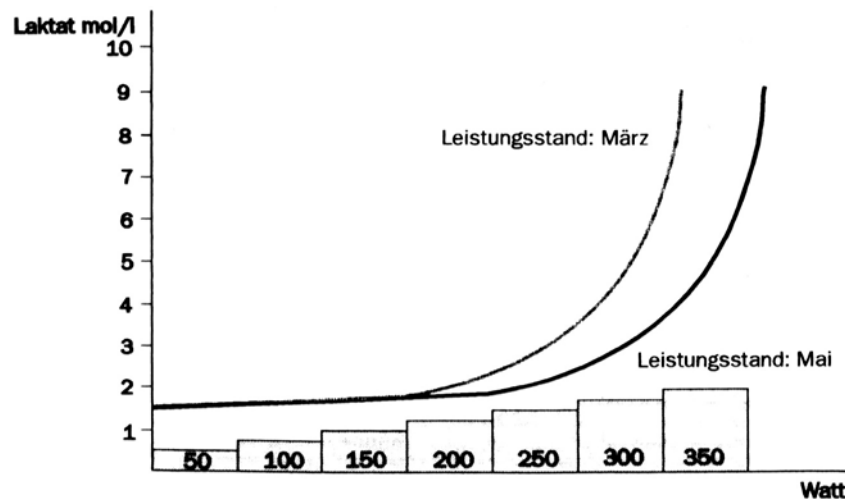


Abb.2: Rechtsverschiebung der LLK eines Sportlers im Längsschnittvergleich (von März bis Mai eines Jahres) [nach: SCHMIDT 2001, S. 134].

Radfahrer werden wegen der Nähe zur Sportart idealerweise auf einem Fahrradergometer getestet. Aus Gründen der Bewegungsökonomie ist es von Vorteil, wenn Sportler den Test auf ihren eigenen Rädern durchführen können oder das Ergometer die Möglichkeit bietet, die gewohnte Sitzposition einzustellen. Darüber hinaus ist es aus den gleichen Gründen sinnvoll, die eigenen Pedale und Schuhe zu benutzen (VERSTAPPEN et. al. 1982; vgl. BURKE 1986; vgl. HENKE und DE MAREES 1989; SCHMIDT 2001, S. 132).

5.4 Spiroergometrie

Durch die Entwicklung neuer Messgeräte, einem damit einhergehenden geringeren messmethodischen Aufwand und verfeinerten Messmethoden gewinnt die Spiroergometrie nach Aussagen von RÖCKER und DICKHUTH (1994) sowie MEYER und Mitarbeitern (2000, S. 81) wieder an Bedeutung. Die Belastung erfolgt, ähnlich der in der Laktatdiagnostik, über einen stufenförmigen Anstieg oder ein kontinuierlich ansteigendes Rampenprotokoll, für Radfahrer wiederum günstigstenfalls in einem Test auf dem eigenen Rad. Der Sportler trägt dabei eine luftdicht abgeschlossene Atemmaske. Ein- und Ausatemluft werden in Analysatoren auf ihre Gaszusammensetzung hin untersucht. „Breath-by-breath“-Messverfahren erlauben heutzutage eine genaue Analyse der Ventilationsparameter bei jedem Atemzug. Untersuchungsziel ist nach NEUMANN und SCHÜLER (1994, S. 241) die subjektive Ausbelastung in 12 -15 Minuten.

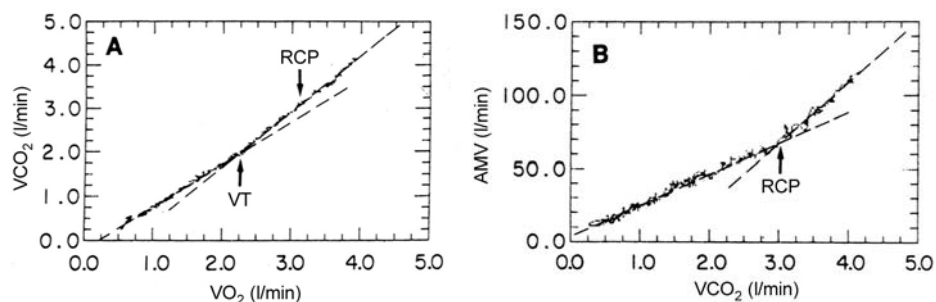


Abb.3: Gegeneinander aufgetragene Ventilationsparameter zur Schwellenbestimmung: in A: Kohlendioxidabgabe (VCO_2) gegen Sauerstoffaufnahme (VO_2); in B: Atemminutenvolumen (AMV) gegen Sauerstoffaufnahme (VO_2). Knickpunkte im Kurvenverlauf werden als respiratorische Schwellen gedeutet (VT: ventilatorische Schwelle; RCP: respiratorischer Kompensationspunkt) [nach BEAVER et al. 1986, S. 2022].

Auch bei der Spiroergometrie werden die protokollierten Daten in ein Koordinatensystem gegeneinander aufgetragen (Abb. 3). Aus den Kurvenverläufen wird dann auf sog. „respiratorische Schwellenwerte“ geschlossen. Eine genauere Betrachtung dieser Schwellen erfolgt in Kap. 8.

6 Umfrage zur Leistungsdiagnostik in Deutschland

6.1 Problemstellung

Wie bereits in der Einleitung verdeutlicht wurde, gibt es eine große Anzahl verschiedener Verfahren zur Diagnostik der Ausdauerleistungsfähigkeit. Aus den Testergebnissen werden Trainingsempfehlungen und Trainingsbereiche abgeleitet. Diese Vorgaben sollen die Sportler vor Überlastungszuständen schützen und ihnen helfen, das Training im Sinne einer Leistungssteigerung zielgerichtet zu steuern. Einheitliche Qualitätsstandards, nach denen Untersuchungen durchgeführt und Testergebnisse ausgewertet werden müssen, gibt es im Bereich der Leistungsdiagnostik nicht. Daher ist denkbar, dass mit der Vielfalt grundsätzlicher Methoden der Diagnostikverfahren, eine weitere Differenzierung dieser Methoden durch die individuelle Ausgestaltung durch die Untersucher einhergeht. Daraus ergibt sich die Frage nach der Eignung der verschiedenen Verfahren zur Trainingssteuerung. Grundlage dieser Beurteilung sollen in dieser Arbeit solche Verfahren sein, die aktuell in der Praxis angewendet werden.

6.2 Vorgehensweise

Die Internetplattform der Zeitschrift „Tour“ weist auf ihren Seiten 63 Adressen von „Instituten für Leistungsdiagnostik und Trainingsplanung“ aus dem gesamten Bundesgebiet sowie von einem Institut aus Österreich aus (www.TOUR-MAGAZIN.de 2004). Aus der Aufstellung gehen Institutsname, Anschrift, Telefonnummer (in den meisten Fällen) und, sofern von den Instituten unterhalten, Internet- und Emailadresse hervor. Zu fast allen Instituten finden sich Kurzinformationen zu angebotenen Untersuchungen. Angaben zur Größe und Reputation der Institute werden nicht gemacht.

Das Institutsverzeichnis war Grundlage telefonischer Anfragen bzgl. der zur Anwendung kommenden leistungsdiagnostischen Verfahren. Die Interviews fanden in einem Zeitraum von zwei Wochen statt. Die Befragung ist bedingt repräsentativ. Da sich in der Liste viele Adressen von Ärzten befinden, ist

theoretisch denkbar, dass jeder Arzt, der über ein Fahrradergometer verfügt, in Zusammenarbeit mit einem Labor entsprechende Untersuchungen durchführen kann. Des Weiteren gibt es auch Olympiastützpunkte und Bundesleistungszentren, in denen Untersuchungen durchgeführt werden, deren Adressen aber nicht aufgeführt sind. Da sich die Zeitschrift „Tour“ aber einer großen Leserschaft erfreut, gibt die Befragung einen guten Überblick über die von Freizeitsportlern wahrscheinlich in Anspruch genommenen Untersuchungsverfahren. Dies trifft auch auf Leistungssportler zu, die nicht von entsprechenden Institutionen betreut werden (Amateurfahrer mit Lizenz, aber ohne Kaderzugehörigkeit).

Die Gespräche wurden in Form eines strukturierten Interviews ausschließlich mit Personen geführt, die zu diesem Zeitpunkt für Durchführung und Auswertung der Untersuchungen im jeweiligen Institut verantwortlich waren. Zu Beginn des Gesprächs wurde geklärt, ob das jeweilige Institut die Fahrradergometrie im Sitzen als leistungsdiagnostisches Verfahren anbietet. Des Weiteren wurde in Erfahrung gebracht, ob der Sportler nach der Testauswertung Vorgaben für verschiedene Trainingsbereiche im Sinne einer Trainingssteuerung erhält und ob diese Vorgaben von der anaeroben Schwelle aus bestimmt werden. Diese drei Aspekte wurden von allen Instituten bejaht. Im weiteren Verlauf des Gesprächs wurden den Untersuchern folgende Fragen gestellt:

1. Wird zusätzlich zur Ergometrie eine begleitende Spirometrie angeboten?
2. Ist es möglich, die eigenen Pedale am Ergometer anzubringen bzw. sich auf dem eigenen Fahrrad testen zu lassen oder kann stattdessen die Sitzposition genau eingestellt werden?
3. Welches Belastungsprotokoll sehen Sie für einen ambitionierten Straßenradfahrer vor, dessen Gesamtstrecke pro Jahr etwa 12000 km beträgt und der gelegentlich an Jedermann-Rennen teilnimmt?
4. Bestimmen Sie durch den Test die aerobe Schwelle? *Wenn dies bejaht wurde:* Als Fixwert oder als individuelle Schwelle?

5. Bestimmen Sie durch den Test die anaerobe Schwelle als Fixwert oder als individuelle Schwelle?
6. Welche Methode wenden Sie bei der Schwellenbestimmung an und auf wen geht dieses Verfahren zurück?
7. Wie viel Euro kostet eine entsprechende Untersuchung mit Auswertung und Intensitätsvorgaben für das Training?
8. *Bei Anbietern der Spirometrie wurde weiterhin gefragt:* Bestimmen Sie die $VO_{2\max}$ in demselben Test?

6.3 Ergebnisse der Umfrage

Von den 63 Adressen des Verzeichnisses wurde das Institut aus Österreich nicht in die Befragung einbezogen, um die Umfrage auf Deutschland zu beschränken. Von den verbleibenden 62 Adressen stimmten zwei mit anderen angegebenen Instituten der Liste überein. Drei weitere Institute sind zwischenzeitlich umgezogen oder wurden geschlossen und waren aus diesem Grund nicht erreichbar. Bei acht Instituten war es im genannten Zeitraum nicht möglich, einen telefonischen Kontakt mit einem verantwortlichen Untersucher herzustellen. Insgesamt konnte mit 49 Personen ein Gespräch über zur Anwendung kommende Verfahren geführt werden. Die einzelnen Ergebnisse der Befragung können aus dem Anhang entnommen werden. Aus Datenschutzgründen sind die Datensätze anonymisiert und nur mit Nummern versehen.

Die Befragung ergab, dass bei den 49 Instituten acht verschiedene Schwellenbestimmungsmethoden zur Anwendung kommen: die Bestimmung der Schwelle nach Mader (N = 20), Simon (N = 3), Dickhuth (N = 3), Keul (N = 7), Stegmann (N = 3), eine Methode, die die anaerobe Schwelle bei einer Laktatkonzentration von 3 mmol/l annimmt (N = 2), die sog. „Lakatsenke“ (N = 1) und die respiratorische Schwellenbestimmung (N = 13) (vgl. Tab.2). Die Summe der Werte N ergibt einen Wert von 52 und ist damit größer als die

Menge der befragten Institute ($N = 49$), da von drei Instituten mehrere Verfahren gleichzeitig angewendet werden.

Die Verfahren lassen sich grob unterteilen in solche, die sich auf die Bestimmung von Blutlaktatkonzentrationen stützen und solche, denen ventilatorische Parameter zugrunde liegen. Eine Zwischenstellung nimmt die Methode nach Dickhuth ein, da die aerobe Schwelle über ventilatorische Parameter bestimmt wird, die anaerobe durch Zuschlag eines fixen Laktatwertes. Bei der Beurteilung der Verfahren wird diese Methode den laktatgestützten Verfahren zugeordnet.

Entsprechend sind 39 Untersuchungen (75 %) der Laktatdiagnostik zuzuordnen und 13 (25 %) der ventilatorischer Parameter. Laut Angaben der Untersucher werden Ergebnisse der letzteren mittels Abgleich mit dem Verlauf der parallel erhobenen LLK auf Schlüssigkeit überprüft. Lediglich ein Institut (Nr. 49) vertraut allein auf die Aussagekraft der ventilatorischen Untersuchung.

In Spalte 2 ist eine weitere Differenzierung der Schwellenbestimmungsmethoden aus Spalte 1 zu sehen. Hier sind die verschiedenen Belastungsprotokolle aufgelistet, die eingesetzt werden, um die Schwellen nach der zugehörigen Methode in Spalte 1 zu bestimmen. Die Zahlenreihen sind dabei folgendermaßen zu lesen: Die erste Zahl gibt die Anfangsbelastung in Watt an (z.B. 100 [W]), die zweite Zahl steht für das Belastungsinkrement, also die Stufenhöhe, um welche die Belastung jeweils gesteigert wird, ebenfalls in Watt (z.B. 20 [W]). Die dritte Zahl steht für die Länge einer Stufe in Minuten, also die Dauer der Belastung vor der nächsten Erhöhung (z.B. 4 [min]).

Aus der Stufenhöhe und der Stufenlänge lässt sich als Quotient die relative Belastungssteigerung in Watt pro Minute errechnen (Spalte 3). Dies erleichtert im folgenden die Vergleichbarkeit und Beurteilung der Verfahren. In Spalte 4 zeigt n an, von wie vielen Instituten das zugehörige Belastungsprotokoll (Spalte 2, gleiche Zeile) angewendet wird, um die Schwelle nach dem entsprechenden Verfahren (Spalte 1) zu bestimmen.

Unter allen Verfahren ist die Bestimmung der Schwelle nach Mader ($N = 20$) am häufigsten vertreten. Ihr Anteil an der Gesamtheit aller Verfahren liegt bei 38,5 %, während der Anteil in der Gruppe der Laktatdiagnostik 51,3 % beträgt. Mit deutlichem Abstand dahinter liegt die Bestimmung der Schwelle nach Keul.

Schwellenbestimmungsmethode [N = Anzahl]	Belastungsprotokoll [W – W – min]	Relative Belastungssteigerung [W/min]	Anzahl [n]
Mader-Schwelle (N = 20)	100 – 20 – 4	5,00	1
	100 – 20 – 3	6,67	2
	90 – 30 – 4	7,50	1
	100 – 40 – 5	8,00	3
	75 – 25 – 3	8,33	1
	100 – 50 – 5	10,00	3
	100 – 30 – 3	10,00	1
	75 – 25 – 2	12,50	1
	100 – 40 – 3	13,33	2
	80 – 40 – 3	13,33	1
	100 – 50 – 3	16,67	2
	50 – 50 – 3	16,67	1
100 – 50 – 2	25,00	1	
Fixe 3 mmol/l-Schwelle (N = 2)	80 – 40 – 5	8,00	2
Simon-Schwelle (N = 3)	90 – 40 – 3	13,33	1
	100 – 50 – 3	16,67	2
Dickhuth-Schwelle (N = 3)	100 – 20 – 3	6,67	1
	100 – 50 – 3	16,67	2
Keul-Schwelle (N = 7)	120 – 20 – 3	6,67	1
	100 – 40 – 5	8,00	1
	100 – 25 – 3	8,33	3
	50 – 50 – 3	16,67	2
Stegmann-Schwelle (N = 3)	100 – 50 – 5	10,00	1
	80 – 40 – 3	13,33	1
	50 – 50 – 2	25,00	1
Laktatsenke (N = 1)	100 – 50 – 3 / 7 Minuten Pause / 100 – 50 – 3	16,67	1
Respiratorische Schwellen (N = 13)	100 – 20 – 3	6,67	3
	100 – 30 – 4	7,50	1
	80 – 40 – 5	8,00	1
	100 – 30 – 3	10,00	2
	80 – 40 – 3	13,33	3
	50 – 50 – 3	16,67	1
	150 – 80 – 3	26,67	1
	Rampentest 80 – 30 – 1	30,00	1

Tab. 2: Umfrageergebnis: in der Praxis angewandte Schwellenbestimmungsmethoden (Spalte 1: N entspricht der Zahl der Institute, die diese Methode anwenden), Belastungsprotokolle (Spalte 2: Anfangsbelastung [W] – Stufenhöhe [W] – Stufenlänge [min]), relative Belastungssteigerung [W/min] (Spalte 3) und Häufigkeit (n) des jeweiligen Belastungsprotokolls [eigene Gestaltung].

Wiederum mit deutlich geringerem Anteil folgen die Verfahren nach Simon, Dickhuth, die fixe 3 mmol/l-Schwelle und die Laktatsenke, welche nur von einem Institut angegeben wurde. Der dreimal höhere Anteil der laktatgestützten Diagnostikverfahren gegenüber den spiroergometrischen Verfahren (75 : 25), bestätigt die These (vgl. Kap. 5.3) vom Laktat als bestimmenden Parameter in der Leistungsdiagnostik.

Wenngleich die beiden am häufigsten angewendeten Verfahren (nach Mader und nach Wassermann) zusammen einen Anteil von 63,5 % haben, kann bei acht verschiedenen Schwellenbestimmungsmethoden dennoch von Vielfalt gesprochen werden. Diese Auffassung wird durch die Vielfalt der verschiedenen Belastungsprotokolle gestützt. So lässt sich aus Tabelle 2 ersehen, dass innerhalb der Anwendung ein und derselben Schwellenbestimmungsmethode keine Einigkeit hinsichtlich der Belastungsprotokolle besteht. Für die Methode nach Mader ergab die Umfrage 13 verschiedene Belastungsprotokolle, von denen drei aber identische Belastungssteigerungen aufweisen. Damit verteilt sich die Gesamtzahl von $N = 20$ auf zehn verschiedene Belastungsanstiege. Ähnliches gilt für die übrigen Methoden: beispielhaft wählen die 13 Institute, die spiroergometrische Verfahren anwenden, acht unterschiedliche Belastungssteigerungen, die sieben Bestimmungen nach Keul verteilen sich auf vier verschiedene. Damit wird die weiter oben (vgl. Kap. 6.1.1) geäußerte Vermutung bestätigt, dass eine Differenzierung der ohnehin schon vielfältigen Schwellenbestimmungsmethoden eingetreten ist.

In Spalte 3 fällt die große Streubreite der Belastungssteigerungen auf. Bei Bestimmung der Mader-Schwelle wird beim höchsten Belastungsanstieg (25 W/min) die Leistung fünf mal so schnell erhöht wie beim niedrigsten (5 W/min). Während zwischen den Werten bei der Simon-Schwelle nur geringe Unterschiede bestehen, liegt bei den Verfahren nach Dickhuth, Keul und Stegmann der höchste Belastungsanstieg etwa um den Faktor 2,5 höher als der niedrigste Anstieg. Bei der Wassermann-Schwelle findet man den Faktor 4,5.

Die Vielfalt der angewandten Schwellenbestimmungsmethoden und die weitere Differenzierung legen die Vermutung nahe, dass dies nicht ohne Einfluss auf die Schwellenbestimmung bleibt.

7 Laktatgestützte Leistungsdiagnostik

Es folgt zunächst eine Vorstellung der laktatgestützten Methoden, die gemäß der Umfrage in der Praxis angewendet werden. Danach werden mögliche Probleme diskutiert, die bei der Beurteilung der in den Untersuchungen ermittelten Ergebnisse eine Rolle spielen. Auf dieser Grundlage werden die Verfahren auf ihre Eignung zur Trainingssteuerung beurteilt.

7.1 Laktatschwellenkonzepte

7.1.1 Mader-Schwelle

„Der Bereich des Übergangs zwischen der rein aeroben zur partiell anaeroben, laktazid gedeckten muskulären Energiestoffwechselleistung wird als aerob-anaerobe Schwelle [...] bezeichnet. Dieser Bereich eignet sich zur Charakterisierung der Ausdauerleistungsfähigkeit, wenn man das Maximum der rein aerob abgedeckten energetischen Leistung mit dieser gleichsetzt. Die aerob-anaerobe Schwelle wird dabei nicht abrupt, sondern [...] gleitend überschritten“ (MADER et al. 1976, S. 81). Nach MADER und Mitarbeitern (ebda), wird eine Blutlaktatkonzentration von 4 mmol/l bei stufenförmiger Belastung als Schwellenwert angesehen, bei dem Laktatbildung und Laktatelimination gerade noch im Gleichgewicht stehen (MaxLass). Bei Belastungen kleiner oder gleich dem MaxLass erfolgt die Energiebereitstellung rein aerob (vgl. HECK und ROSSKOPF 1994, S.113).

Die Laktakonzentrationen werden am Ende jeder Stufe vor dem nächsten Belastungsanstieg gemessen. Der Messpunkt unmittelbar kleiner als 4 mmol/l und der nachfolgende Punkt werden interpoliert. Dem 4 mmol/l-Laktatwert lässt sich auf der Abszisse eine entsprechende Leistung oder Geschwindigkeit (bei Laufbandergometrie) zuordnen (Abb. 4).

MADER empfiehlt eine Arbeitsdauer von mindestens 4 Minuten, besser 5 - 10 Minuten pro Stufe, um dem Laktat genügend Zeit zu geben, sich im Blut zu verteilen und ein Laktat-steady-state zu entwickeln (MADER et al. 1976, S. 88). Die Konzentration von 4 mmol/l ergab sich aus der Beobachtung, dass

entsprechende Belastungen in Dauerversuchen bis zu einer Stunde aufrecht erhalten werden konnten. Höhere Belastungen hingegen mussten abgebrochen werden (vgl. HECK und ROSSKOPF 1994, S. 113). Die aerob-anaerobe Schwelle stellt demnach einen statistischen Mittelwert dar (HECK 1990, S. 59). Die ursprünglichen Forschungsuntersuchungen zu dieser Bestimmungsmethode fanden auf Laufbändern statt.

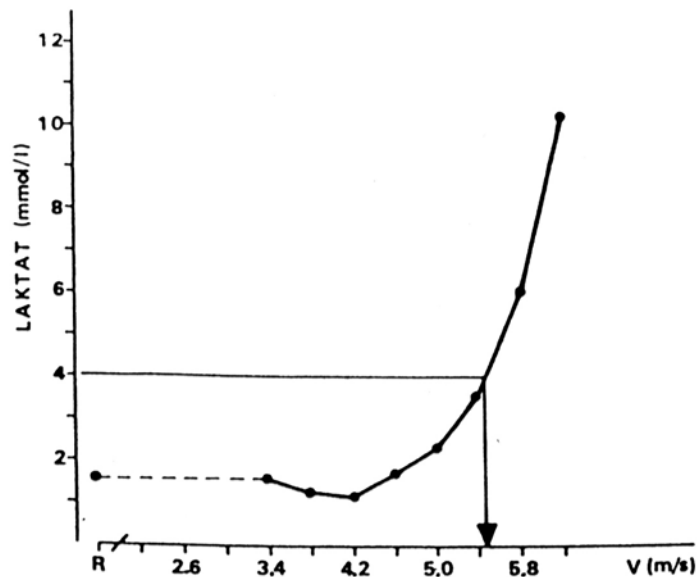


Abb.4: Bestimmungsmethode der „aerob-anaeroben“ Schwelle bei 4 mmol/l Laktat [HECK und ROSSKOPF 1994, S. 113].

7.1.2 Fixe 3 mmol/l-Schwelle

Eine Zuordnung dieser Schwelle zu einem bestimmten Kreis von Wissenschaftlern war trotz umfangreicher Literaturrecherche nicht möglich. STOCKHAUSEN (1996, S.484) rechnet diese Methode dem „Institut für Angewandte Trainingswissenschaft“ (IAT) in Leipzig zu, was jedoch von Frau Dr. BERBALK (2004) als kommissarische Fachgruppenleiterin der Sportmedizin des IAT nicht bestätigt wurde.

Es sind mehrere Aspekte denkbar, die für die Anwendung der 3 mmol/l-Schwelle verantwortlich sein können:

- Es wurde beobachtet, dass Athleten mit hoher Ausdauerleistungsfähigkeit bei Belastungen im Bereich der 4 mmol/l-Schwelle zu intensiv be-

- lastet wurden (HECK und ROSSKOPF 1994, S. 111; vgl. BUNC et al. 1982; vgl. STEGMANN und KINDERMANN 1981, 1981a; vgl. KEUL et al. 1979). Zwar wurden große Leistungssteigerungen beobachtet, diese waren allerdings nicht sehr stabil (NEUMANN 1993a, S. 419). Als Konsequenz wurde daraus abgeleitet, dass bei Ausdauertrainierten, die anaerobe Schwelle bereits bei niedrigeren Laktatwerten erreicht wird (vgl. BUNC et al. 1982; vgl. STEGMANN und KINDERMANN 1981, 1981a; vgl. KEUL et al. 1979).
- Denkbar ist des weiteren, dass die Laktatwerte bei Radfahrern niedriger liegen müssen, da sie meist länger als eine Stunde einer hohen Belastung ausgesetzt sind; der 4 mmol/l-Wert in Maders Studie bezog sich aber nur auf Belastungen, die 20 Minuten bis zu einer Stunde toleriert wurden (vgl. MADER et al. 1976).
 - Eine weitere Überlegung ist die, dass die 3mmol/l-Schwelle gewählt wird, wenn die Stufendauer im Belastungstest verkürzt werden soll. HECK (1990, S. 171) stellte fest, dass bei den Belastungsprotokollen mit verkürzter Stufendauer (25 W/2 min. und 50 W/3 min. entsprechend 12,5 bzw. 16,67 W/min) der Schwellenlaktatwert im Mittel bei ca. 3 mmol/l liegt.
 - Als vierter Aspekt ist die Diskussion um die Abhängigkeit der Laktatkonzentration von der eingesetzten Muskelmasse zu nennen. Da beim Radsport überwiegend die Beine aktiv sind, der Oberkörper aber vorwiegend statische Arbeit verrichtet, müssen nach LINDNER (1994, S. 65) bei Sportarten mit Ganzkörperbewegung, wie z.B. Laufen und Schwimmen, höhere Laktatwerte vorgegeben werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies für den Radsport niedrigere Laktakonzentrationen.
 - Als letzter Punkt sei noch die Faserstruktur, die Zusammensetzung aus langsamen (ST-) und schnellen (FT-) Fasern, erwähnt. Da die langsamen Fasern eine höhere Laktatproduktionsrate aufweisen als die

schnellen, ist für Ausdauersportler mit hohem ST-Faseranteil denkbar, dass ein Laktat-steady-state bereits bei niedrigen Konzentrationen erreicht wird (BERBALK 2004).

Da sich keine Verbindung zu einem bestimmten Arbeitskreis herstellen lässt, kann kein vorgesehene Belastungsprotokoll beschrieben werden. Wie bei der vorherigen Methode ist ein Stufentest üblich, bei dem am Ende jeder Stufe Blut zur Bestimmung der Laktatkonzentration abgenommen wird. Das Verfahren zur Bestimmung der mit dem 3 mmol/l-Wert korrespondierenden Leistung bzw. Herzfrequenz ist dasselbe wie oben beschrieben.

7.1.3 Simon-Schwelle

Simon und Mitarbeiter entwickelten 1981 ein Untersuchungskonzept für den Schwimmsport. Dabei handelt es sich ebenfalls um eine stufenförmig ansteigende Belastung. Im Schwimmen sieht dieser Test eine gleichbleibende Strecke (300 m) vor, die nach und nach 15 Sekunden schneller durchschwommen werden muss. Zwischen zwei Strecken ist eine Pause von 30 s zur Blutentnahme vorgesehen. Je nach Disziplin variieren die Anfangszeiten (4:30 – 5:30 min.). Als aerobe Schwelle wird in diesem Verfahren der erste Laktatanstieg auf niedrigen Belastungsstufen festgesetzt. Die individuell anaerobe Schwelle bestimmt sich durch Summation eines fixen Laktatwerts von 1,5 mmol/l zum Wert der aeroben Schwelle (vgl. SIMON und THIESMANN 1986).

Laut Umfrage wird dieses Verfahren derart auf die Fahrradergometrie übertragen, dass die Pausen zur Blutentnahme entfallen. Darüber hinaus gilt das arithmetische Mittel mehrerer Laktatwerte als aerobe Schwelle. In einem Fall ist dies das Mittel der ersten beiden Werte, bei zwei anderen Instituten werden die ersten vier Werte gemittelt. Bedingung ist, dass sich zwei aufeinander folgende Laktatkonzentrationen um maximal 0,5 mmol/l unterscheiden dürfen.

Nach SIMON und THIESMANN (1986) ist dieses Verfahren durch trainingsbegleitende Untersuchungen abgesichert. Aus Beobachtungen ging hervor, dass Hochausdauertrainierte bei Belastungen im Bereich einer Laktatkonzentration von 4 mmol/l überfordert wurden.

7.1.4 Dickhuth-Schwelle

Nach HECK und ROSKOPF (1994, S. 116) ist dieses Verfahren dem vorgenannten sehr ähnlich. Neu ist bei dieser Methode der Begriff „Laktatäquivalent“. Darunter wird der Quotient aus Laktatkonzentration und relativer O₂-Aufnahme (O₂-Aufnahme pro kg Körpergewicht) verstanden (BERG et al. 1990, S. 7). Da für leistungsdiagnostische Untersuchungen nicht immer spirometrische Geräte zur Verfügung stehen, wird auf den Quotienten aus Laktatkonzentration und Leistung als gleichwertig verwiesen (DICKUHTH et al. 1996, S. 185).

Für dieses Verfahren werden 3-minütige Belastungsstufen empfohlen. Eine Vorgabe für die Stufenhöhe wurde nicht gefunden. BERG und Mitarbeiter (1990) weisen lediglich darauf hin, dass durch eine nicht genügend moderate Anfangsbelastung, die Laktatkonzentration frühzeitig ansteigt und eine aerobe Schwelle nicht bestimmt werden kann.

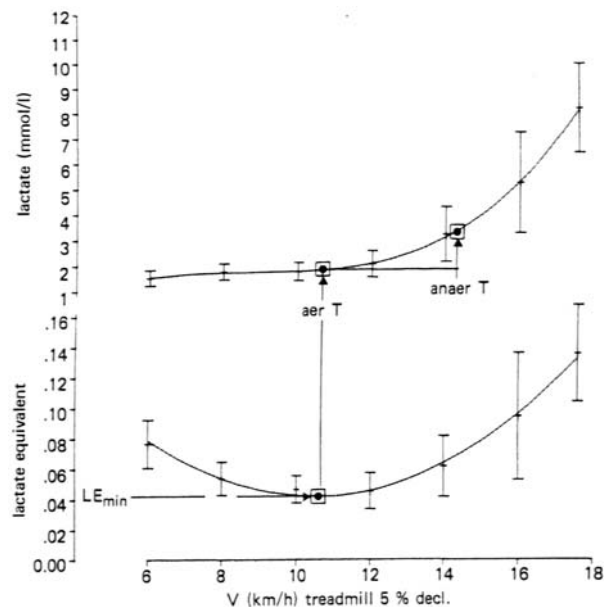


Abb.5: Belastungsabhängiger Verlauf der Blutlaktatkonzentration und des ermittelten Laktatäquivalentwertes (LE) bei 11 Skilangläufern auf dem Laufband bei 5% Steigung. Aerobe Schwelle (AS) und anaerobe (ANS) sind ausgehend vom minimalen Laktatäquivalent ermittelt worden. [BERG et al. 1990, S. 6].

Wie bei den anderen Verfahren auch, werden Laktat und Herzfrequenz am Ende jeder Stufe bestimmt. Die Laktatkonzentration wird mit der ermittelten Sauerstoffaufnahme bzw. Leistung in Beziehung gesetzt. Über den gesamten Belastungszeitraum lässt sich so ein Verlauf der Laktatäquivalente konstruieren (Abb. 5). Das Minimum dieses Laktatäquivalents wird (ähnlich dem Verfahren nach Hollmann (vgl. Kap. 5.1) als Punkt der aeroben Energienutzung festgelegt und als aerobe Schwelle bezeichnet (BERG et al. 1990, S. 7). Die anaerobe Schwelle wird wie zuvor beim Verfahren nach Simon durch Zuschlag einer fixen Laktatkonzentration von 1,5 mmol/l berechnet.

Grundlage dieser Vorgehensweise sind umfangreiche Labor- und Felduntersuchungen. Somit stellt auch diese Schwellenbestimmungsmethode ein statistisches Verfahren dar (ebda). Den ermittelten Schwellen lassen sich über die bekannte Laktatleistungskurve korrespondierende Herzfrequenzen zuordnen. DICKHUTH und Mitarbeiter (1996, S. 185) weisen darauf hin, dass das gewählte Laktatfixum in Höhe von 1,5 mmol/l von der Ergometrieform, Stufenlänge und Stufenhöhe abhängen. Dies macht eine Überprüfung und eventuelle Anpassung nötig.

7.1.5 Keul-Schwelle

KEUL und Mitarbeiter (1979, S. 214) vertreten die Meinung, dass durch die fixe 4 mmol/l-Schwelle nach Mader im Mittel zwar die anaerobe Schwelle richtig bestimmt wird, dass dies jedoch den individuellen physiologischen Gegebenheiten nicht genüge. Deshalb wurde an 60 Laktatkurven der mittlere Tangentensteigungswinkel bei 4 mmol/l errechnet. Der Arbeitskreis hielt damit nicht eine bestimmte Laktatkonzentration für entscheidend, sondern einen bestimmten Anstieg derselben. Es handelte sich um die LLK verschiedener Skilangläufer nach stufenförmiger (3 min.) Laufbandbelastung, die mit demselben Probandenkollektiv in drei Serien ermittelt worden waren. Die Geschwindigkeit wurde nach jeder Stufe um 2 km/h gesteigert. Die Steigung betrug 5%. Zwischen zwei Stufen wurde in einer 30-sekündigen Pause Blut zur Laktatbestimmung abgenommen. Der Durchschnittswert aller 60 LLK beträgt $51^{\circ}34'$ ($\tan \alpha = 1,26 \text{ mmol/l/km/h}$) (Abb. 6).

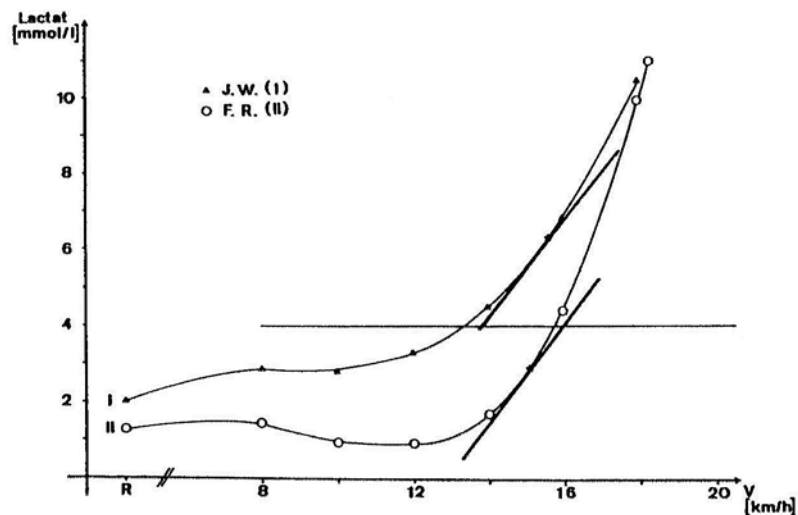


Abb.6: LLK zweier Skilangläufer und individuelle anaerobe Schwelle sowie fixe 4 mmol/l-Schwelle [KEUL 1979, S. 214].

Dieser Winkel gilt nur für die Beziehung Laktatkonzentration-Geschwindigkeit. Daher muss er für die Fahrradergometrie entsprechend der Beziehung Laktatkonzentration-Leistung angepasst werden. HECK (1990, S. 52) berechnet in seinen Untersuchungen einen Tangenswert von $\tan \alpha = 0,0549 \text{ mmol/l/Watt}$. Diesen Berechnungen liegt ein Laktatwert von 4 mmol/l und ein relativer Belastungsanstieg von 12,5 W/min zugrunde. In weiteren Berechnungen bestimmt er den Tangenswert für eine Laktatkonzentration von 3 mmol/l bei einem Belastungsanstieg von 16,67 W/min und erhält $\tan \alpha = 0,039 \text{ mmol/l/Watt}$ (ebda, S. 58). Von den sieben befragten Instituten, die dieses Verfahren anwenden, bildet für zwei der Wert 0,0549 mmol/l/Watt die Grundlage zur Bestimmung der Keul-Schwelle, während sich die anderen auf den niedrigeren $\tan \alpha = 0,039 \text{ mmol/l/Watt}$ stützen.

7.1.6 Stegmann-Schwelle

Das Verfahren nach STEGMANN und KINDERMANN (1981a) ist ebenfalls aus der Kritik heraus entstanden, dass eine fixe Laktatschwelle den individuellen Verhältnissen nicht gerecht wird. Ein weiterer Kritikpunkt an den bisherigen Schwellenbestimmungsmethoden war der, dass die ermittelte Schwelle von der gewählten Stufenlänge abhängig ist.

Es wird angenommen, dass sich die Blutlaktatkonzentration aus den drei Faktoren Laktatproduktion, -diffusion und -elimination ergibt. Daher wird die individuell anaerobe Schwelle als der Zeitpunkt definiert, an dem es zu einem größtmöglichen Gleichgewicht zwischen Diffusionsrate und Eliminationsrate kommt (ebda, S. 215), was einem MaxLass entspricht.

In einem Stufentest wurden 56 Sportler unterschiedlicher Ausdauertrainiertheit auf einem Laufband bis zur subjektiven Ausbelastung untersucht. Die Anfangsgeschwindigkeit betrug 6 bzw. 8 km/h, die Stufenlänge 3 Minuten und das Belastungsinkrement 2 km/h. Das Laufband war um 5% nach oben geneigt. Nach jeder Stufe erfolgte eine 30-sekündige Pause zur Blutabnahme. Weiterhin wurde in der Nachbelastungsphase in der 2., 5. und 10. Minute Blut zur Laktatbestimmung entnommen. In einem weiteren Versuch an Ruderern auf einem Fahrradergometer wurde die Stufenlänge auf 2 Minuten verkürzt. Die Belastung wurde um jeweils 50 Watt gesteigert (Abb. 7), was einem Belastungsanstieg von 25 W/min entspricht. Nachfolgende Versuche an demselben Probandenkollektiv mit 5-minütigen Stufen (10 W/min) führten zu gleichen Schwellenwerten.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine ermittelte Laktatleistungskurve (LLK). Für den Moment des Belastungsabbruchs (Punkt A) wird das höchste Laktatkonzentrationsgefälle zwischen Muskel und Blut angenommen. In der Nachbelastungsphase steigt die Laktatkonzentration im Blut zunächst weiter an, bis der gleiche Wert wie bei Belastungsabbruch wieder erreicht wird (Punkt B). In diesem Moment sind Diffusionsbetrag und Eliminationsbetrag im Gleichgewicht (ebda S. 215).

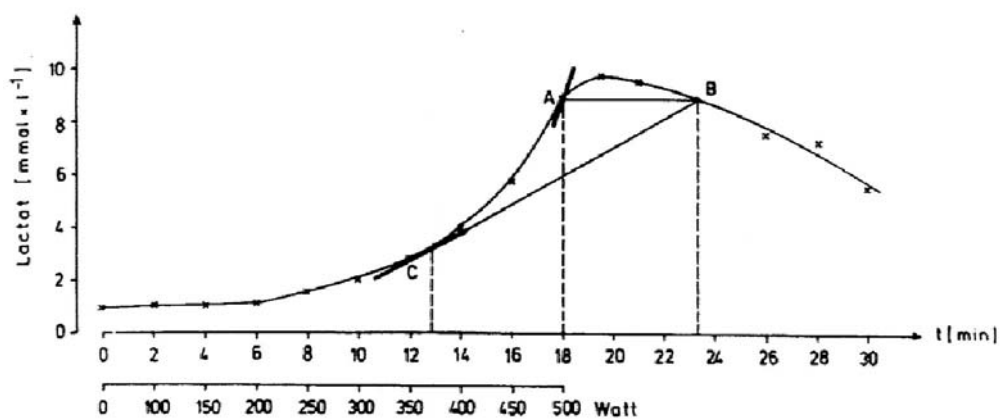


Abb.7: Bestimmungsmethode der individuellen anaeroben Schwelle. [STEGMANN und KINDERMANN 1981a, S. 215].

Durch die Anwendung mathematischer Formeln, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird, erfolgt die Herleitung, dass der Berührungspunkt einer Tangente an die LLK (Punkt C) durch Punkt B die individuell anaerobe Schwelle kennzeichnet (ebda, S. 216). Das Verfahren wird von drei der befragten Institute angewendet, wobei sich die gewählten relativen Belastungsanstiege teilweise deutlich unterscheiden (10 – 25 W/min).

7.1.7 Laktatsenke

Auch die Bestimmung der Laktatsenke nach TEGTBUR und Mitarbeitern (1989) hat zum Ziel, die Dauerleistungsgrenze zu bestimmen. Wegen der Charakteristik des Laktatverlaufs während des Tests, wurde die Bezeichnung „Laktatsenke“ als Synonym für die so ermittelte anaerobe Schwelle geprägt.

Dieses Verfahren wurde aus der Kritik heraus entwickelt, dass der Glykogengehalt der Muskulatur „zu einer Form- und Lageveränderung der LLK führen und dadurch möglicherweise eine Fehlinterpretation der Dauerleistungsfähigkeit bewirken kann“ (ebda, S. 463). Der Test zur Bestimmung der Laktatsenke besteht aus drei Phasen:

In der ersten Phase soll durch Belastung eine Azidose bewirkt werden, die sich in einer hohen Laktatkonzentration widerspiegelt. Im Forschungstest wurde dies an 17 Mittel- und Langstreckenläufern durch Maximalläufe über 2 x 300 m oder 1 x 600 m erreicht. Im Anschluss an die Belastung erfolgte eine 8-minütige Pause, in der sich die Laktatkonzentrationen in den Muskeln und im Blut angleichen sollen. Die dritte Phase bestand aus einem Stufentest mit variabler Anfangsbelastung und mit mindestens fünf Stufen bis zur subjektiven Ausbelastung. Die Stufenlänge betrug 800 m, die Belastungssteigerung sah eine Geschwindigkeitserhöhung um 0,33 m/s je Stufe vor.

Nach der ersten Phase steigt die Laktatkonzentration in der Ruhephase bis zu einem Maximum an (Abb. 8). Es folgt ein Bereich, in dem die Laktatelimination größer ist als die Produktion. Dies ist auf den unteren Stufen der dritten Phase der Fall. Im Verlauf der LLK gibt es einen Punkt, in dem Laktatproduktion und -elimination im Gleichgewicht stehen. Dieser Punkt wird „Laktatsenke“ genannt, da er die geringste Blutlaktatkonzentration während der dritten

Phase widerspiegelt. Abhängig von der Leistungsfähigkeit soll die Anfangsbelastung so gewählt werden, dass die Senke zwischen der zweiten und vierten Stufe erreicht wird. Das anschließende Ansteigen der LLK ist ein Zeichen dafür, dass die Laktatproduktion die -elimination übersteigt (ebda S. 464).

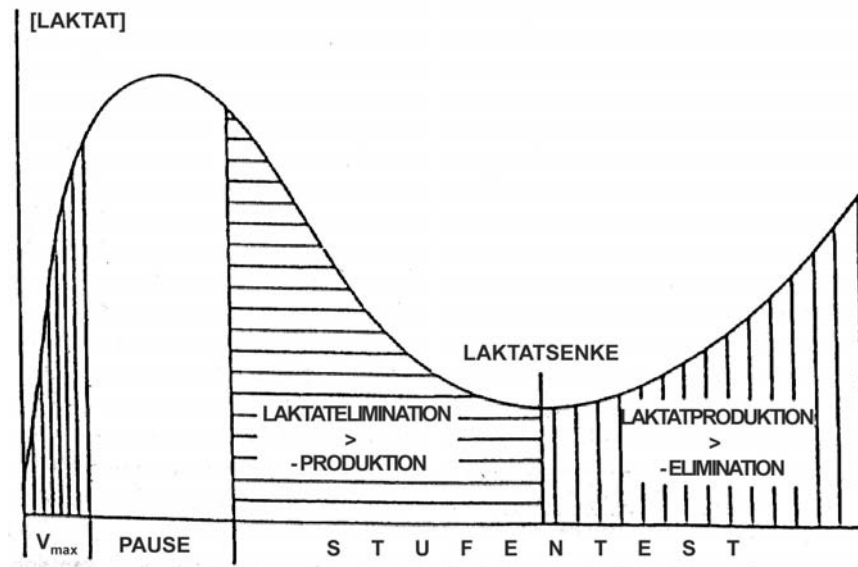


Abb.8: Darstellung des Testprinzips [BRAUMANN et al. 1991, S. 241].

Im Umfragekollektiv (vgl. Tab. 2, S. 26) wird der Test von einem Institut angewendet. Auffällig ist, dass bereits die erste Phase aus einem Stufentest besteht und nicht aus einer kurzen anaeroben Belastung, wie oben beschrieben. Die Pause ist um 1 Minute auf 7 Minuten verkürzt. Der anschließende Stufentest wird entsprechend einer Belastungssteigerung von 16,33 W/min durchgeführt, standardmäßig beginnend bei 100 W.

7.2 Mögliche Probleme der Laktatdiagnostik in der Praxis

Im folgenden werden verschiedene Aspekte beschrieben, die eine korrekte Beurteilung der ermittelten LLK unter Umständen schwierig machen. Dabei werden, sofern möglich, radsportspezifische Studien herangezogen. Da jedoch auch die im Radsport angewandten Diagnostikverfahren zum Teil aus anderen Sportarten stammen, wird gelegentlich, wenn eine Übertragung auf den Radsport als zulässig erscheint, die Argumentation von Studien aus anderen Sportarten angeführt. Die Thematik der laktatgestützten Leistungsdiagnostik ist

noch nicht erschöpfend erforscht, weshalb nicht jedes Verfahren bei jedem Aspekt berücksichtigt werden kann, sondern nur dort, wo es die Informationslage erlaubt.

7.2.1 Streuungsbereich des MaxLass

HECK (1990, S. 46ff) überprüfte an 22 Probanden in unterschiedlichen Ausdauertrainingszuständen die Gültigkeit der 4 mmol/l-Schwelle für Belastungen auf dem Fahrradergometer. Mehrere Dauerbelastungen (30 Minuten) dienten dazu, das maximale Laktat-steady-state zu finden. Entsprechend der Definition eines MaxLass in Kap. 5.3 betrug der mittlere MaxLass-Wert 4,33 mmol/l. Auffällig ist die große Streubreite der Konzentrationen von 2,84 bis 6,77 mmol/l. Die Standardabweichung der Ergebnisse lag bei +/- 1,1 mmol/l.

Bereits früher fanden HECK und Mitarbeiter (1985a) in einer anderen Studie zwischen 3 und 5 mmol/l streuende MaxLass-Werte. BENEKE und Mitarbeiter (1994, S. 17) ermittelten an 32 ausdauertrainierten Probanden (Triathleten) ebenfalls in Dauerbelastungen auf dem Fahrradergometer ein mittleres MaxLass von 5,4 mmol/l +/- 1,0 mmol/l, STOCKHAUSEN und Mitarbeiter (1995, S. 295) fanden bei 19 Freizeitsportlern in einem ähnlichen Versuchsablauf ein mittleres MaxLass von 3,51 +/- 1,0 mmol/l. VOBEDJA und ZIMMERMANN (2003) bestimmten an 21 Freizeitsportlern in gleicher Art und Weise MaxLass-Werte von 2,51 bis 8,55 mmol/l. Der Mittelwert betrug 5,26, die Standardabweichung +/- 1,48 mmol/l. Diese Studien ergaben auch, dass es nur dann zu Abbrüchen kam, wenn kein Laktat-steady-state mehr eintrat. Das bestätigt die Annahme des MaxLass als Dauerleistungsgrenze.

Wie bereits beschrieben, versuchen die befragten Institute diese Dauerleistungsgrenze indirekt durch Anwendung verschiedener Methoden in (gegenüber Dauerbelastungen) verkürzten Stufentests zu bestimmen. Durch die vorgestellten Studien wird aber offensichtlich, dass es nur zufällig möglich ist, die individuelle Dauerleistungsgrenze über einen fixen Wert zu beschreiben, da die Werte in einem großen Bereich streuen. In einigen Fällen wird dadurch die korrespondierende Leistung zu hoch, in anderen Fällen zu niedrig angegeben. Auffällig ist, dass auch die aufgeführten mittleren MaxLass-Konzentrationen

noch in einem Bereich von 3,51 bis 5,26 mmol/l liegen. Gründe dafür können nicht mit Bestimmtheit genannt werden, da mögliche Einflussfaktoren vielfältiger Natur sein können (Unterschiede zwischen den Probanden und technischen Geräten, Ort und Art der Blutabnahme usw.).

Die 4 mmol/l- und 3 mmol/l-Schwelle gehen von fixen Schwellenwerten aus. Es ist möglich, dass in manchen Untersuchungen, die Leistung, die dem MaxLass entspricht, in einem Stufentest bei 3 oder 4 mmol/l Laktat ermittelt wird, allerdings ist die so ermittelte anaerobe Schwelle wegen der weiten Streuung mit großer Unsicherheit behaftet. Eine Trainingssteuerung, die sich nur auf diese Grundlage stützt, scheint daher wenig zweckmäßig zu sein.

Die Keul-Schwelle ergibt sich aus Tangentensteigungen an Laktatleistungskurven bei 4 bzw. 3 mmol/l. Da auch diese Methode nicht von einem fixen Schwellenmodell losgelöst ist, kann bei diesem Modell nur bedingt von einer individuellen Schwelle gesprochen werden. In Abb. 6 (S. 34) ist aber zu sehen, dass dieses Modell bereits einen größeren Bereich abdeckt. Angaben der Autoren zu MaxLass-Werten und wie groß dieser Bereich ist (KEUL et al. 1979), werden allerdings nicht gemacht. Die hinter der Keul-Schwelle stehende Überlegung ist, den Punkt eines überproportionalen Anstieges der Laktatkonzentration durch Bestimmung einer fixen Steigung der Kurve zu ermitteln. Die befragten Institute stützen sich bei dieser Steigung auf Untersuchungen HECKS (1990, S. 52ff), die dieser an einem Probandenkollektiv ermittelte, das im Dauertest auf dem Fahrradergometer ein MaxLass von ca. 4 mmol/l bzw. bei einem anderen Belastungsprotokoll von 3 mmol/l aufwies. Wie aber die unterschiedlichen mittleren MaxLass-Werte der oben aufgeführten Studien zeigen, sind unter anderen Bedingungen auch andere Konzentrationen denkbar, so dass sich unterschiedliche Tangentensteigungen ergeben würden. Infolge dessen ist auch hier eine Über- oder Unterschätzung der Ausdauerleistungsfähigkeit möglich.

Auch die Modelle nach Simon und Dickhuth können nur als bedingt individuell bezeichnet werden. Denn sie sehen zur Bestimmung der anaeroben Schwelle den Zuschlag eines fixen Laktatwertes auf die aerobe Schwelle vor. Lediglich die aerobe Schwelle ist variabel und abhängig von der Laktatkonzentration auf den unteren Belastungsstufen.

Für die Simon-Schwelle kann darüber hinaus leicht gezeigt werden, dass die anaerobe Schwelle in einem wahrscheinlichen Bereich von ca. 3-4 mmol/l

liegt: Nach BERBALK (2004), BERG und Mitarbeitern (1990) sowie HECK (1990) liegen die Ruhelaktatwerte meistens zwischen 1-1,5 mmol/l. Aus dem Verlauf der LLK ist ersichtlich, dass es auf den unteren Stufen zu keinem nennenswerten Anstieg der Laktatkonzentration kommt. In der Praxis (vgl. Anhang) wird die aerobe Schwelle aus dem arithmetischen Mittel der ersten zwei bis vier Messwerten bestimmt, sofern diese maximal jeweils 0,5 mmol/l auseinander liegen. Die anaerobe Schwelle wird durch Addition von 1,5 mmol/l errechnet (vgl. Kap. 7.1.3). Kommt es zu keinem Anstieg auf den unteren Stufen liegt die aerobe Schwelle bei 1,0 - 1,5 mmol/l, die anaerobe folglich bei 2,5 - 3,0 mmol/l. Wird die maximal mögliche Differenz (0,5 mmol/l) bei zwei Werten angenommen, berechnet sich die aerobe Schwelle durch Addition von 0,25 mmol/l: 1,25 - 1,75 mmol/l - die anaerobe Schwelle liegt bei 2,75 - 3,25. Für vier Werte ergibt sich analog für die aerobe Schwelle ein Bereich von 1,25 - 2,25 mmol/l, für die anaerobe Schwelle von 2,75 - 3,75 mmol/l. Damit wird der Gesamtbereich von 2,5 - 3,75 mmol/l eingegrenzt.

Zwar finden sich in den vorgestellten Studien zum MaxLass keine Angaben zur Abhängigkeit des MaxLass von der Laktatkonzentration auf den unteren Stufen, so dass nicht geklärt werden kann, ob bei hohem MaxLass auch ein hohes Ruhelaktat vorlag. In diesen Fall wäre die Argumentation für einen wahrscheinlichen Konzentrationsbereich von 2,5 – 3,75 mmol/l ungültig. Es bliebe dann allerdings auch fraglich, ob ein Zuschlag von 1,5 mmol/l ausreichend ist, um die anaerobe Schwelle zu beschreiben. Die logische Konsequenz aus diesem Gedanken ist die Vermutung, dass bei hohem Ruhelaktat die veränderte Stoffwechsellage zwischen aerober und anaerober Schwelle nur über einen größeren Laktatanstieg erfasst werden kann. Entsprechende Untersuchungen zu diesem Sachverhalt sind allerdings nicht bekannt. Für den Fall, dass der aufgezeigte Bereich als gültig angenommen werden kann, zeigt ein Vergleich mit den in Kap. 7.2.1 genannten MaxLass-Werten, dass auch hier nicht die gesamte Streubreite der Werte abgedeckt wird.

Das Verfahren nach Stegmann scheint einer großen Streuung der MaxLass-Werte gerecht zu werden. Die von STEGMANN und KINDERMANN (1981a) an der individuellen anaeroben Schwelle ermittelten Blutlaktatkonzentrationen, die an 56 unterschiedlich Trainierten bestimmt wurden, streuten zwischen 1,4 und 7,5 mmol/l. Einen ähnlichen Wertebereich (1,5 – 7,5 mmol/l) fanden

BRAUMANN und Mitarbeiter (1991) in Lauf-Dauerbelastungen mit Senkengeschwindigkeiten, die der Laktatsenke entsprachen. Als Probanden dienten 17 Mittel- und Langstreckenläufer sowie 11 Basketballspieler der ersten Bundesliga. Damit liegt die Vermutung nahe, dass es möglich ist, einen großen Streubereich mit diesem Verfahren zu erfassen.

7.2.2 Fehlende Übereinstimmung der MaxLass-Leistung mit der ermittelten Schwellenleistung

Die verschiedenen Konzepte haben zum Ziel, in einem verkürzten Verfahren das maximale Laktat-steady-state zu bestimmen. Deshalb muss die jeweilige Schwellenleistung mit der Leistung übereinstimmen, die mit dem MaxLass im Dauertest korrespondiert. Exemplarisch für verschiedene Belastungsprotokolle zeigen HECK (1990) und HECK mit ROSSKOPF (1994) für die Verfahren nach Mader, Keul, Stegmann und Dickhuth (in Abb.9 „1,5 mmol/l-Methode“ genannt), dass es zu Abweichungen zwischen der Schwellenleistung und der Dauerleistung kommt. Abbildung 9 macht an 16 Probanden für eine Belastung auf dem Laufband entsprechend einer Belastungssteigerung von 6 W/min die Übereinstimmung bzw. Abweichung deutlich. Die gestrichelten Linien (Winkelhalbierende) stellen dabei identische Werte dar. Für ein ideales Verfahren liegen alle Punkte auf der Winkelhalbierenden. Die Regressionsgerade (= Linie, die im Mittel die Lage der Einzelpunkte richtig beschreibt) der Mader-Schwelle weist die geringste Abweichung auf, während die Schwellenleistung nach Dickhuth insgesamt zu niedrig ermittelt wurde. Bei geringer Ausdauerleistungsfähigkeit wird dies deutlicher als bei einer höheren. Der Verlauf der Regressionsgeraden der Stegmann- und Keul-Schwelle ist ein Zeichen dafür, dass das MaxLass bei geringer Ausdauerfähigkeit über- bei höherer Leistungsfähigkeit unterschätzt wird, was nach HECK in den Schwellenkonzepten selbst begründet ist (ebda, S. 118). Dennoch scheinen die Verfahren nach Mader, Keul und Stegmann die Dauerleistungsgrenze, zumindest für die Laufbandergometrie gut zu erfassen und können auf dieser Grundlage als valide bezeichnet werden. Da die Abweichungen für die Methode nach Dickhuth offensichtlich sind, gilt das nur mit Einschränkung für dieses Verfahren.

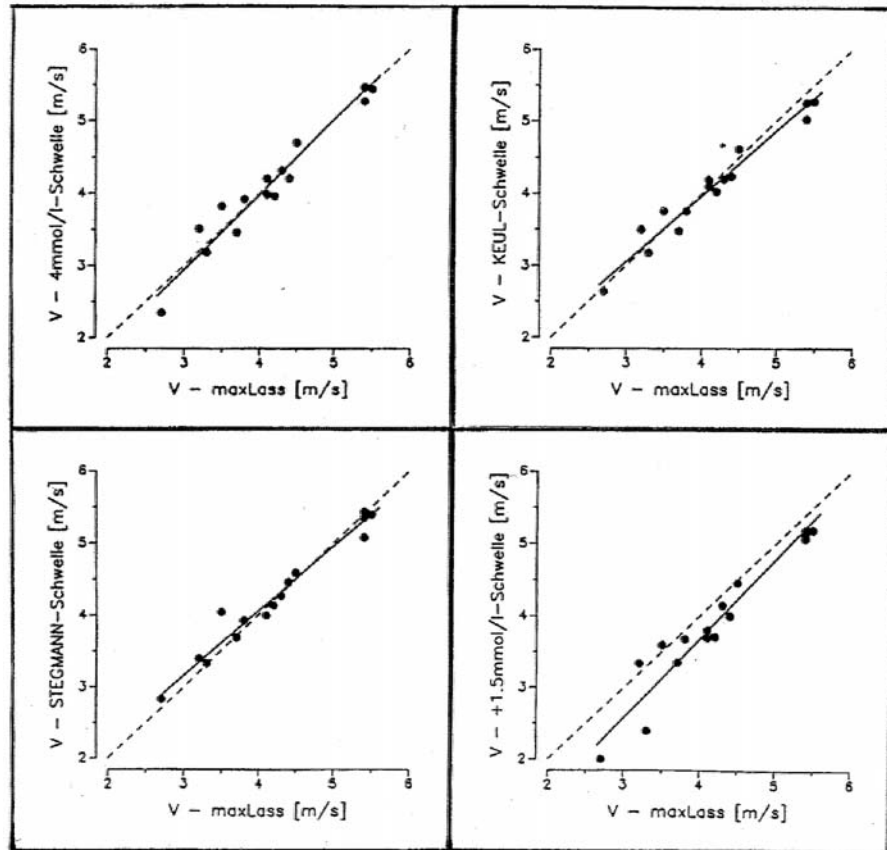


Abb.9: Orthogonale Regression zwischen Max-Lass-Geschwindigkeit und Schwellengeschwindigkeit verschiedener Schwellen bei Laufbandbelastung, Belastungssteigerung: 6 W/min [nach: HECK und ROSSKOPF 1994, S. 118].

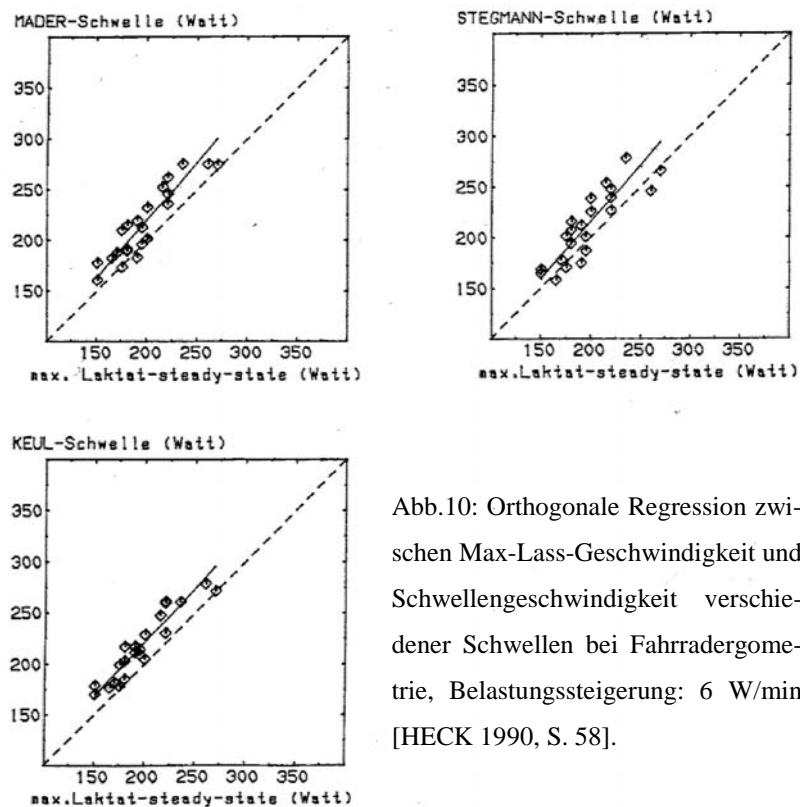


Abb.10: Orthogonale Regression zwischen Max-Lass-Geschwindigkeit und Schwellengeschwindigkeit verschiedener Schwellen bei Fahrradergometrie, Belastungssteigerung: 6 W/min [HECK 1990, S. 58].

Abbildung 10 weist an 22 Probanden für die Fahrradergometrie bei einer Belastungssteigerung von 12,5 W/min nach, dass die Mader-, Stegmann- und Keul-Schwelle die Ausdauerleistungsfähigkeit überschätzen. HECK (1990, S. 59) folgert daraus, dass „bei der Fahrradergometrie [diese] Schwellenkonzepte ungeeignet [sind], bei stufenförmigem Belastungsanstieg mit 25 Watt/2 min das maximale Laktat-steady-state annähernd korrekt abzuschätzen.“ Für das angegebene Belastungsprotokoll können diese Verfahren daher nicht als valide bezeichnet werden. Ob sich der Unterschied zu den Untersuchungen, die Abb. 9 zugrunde liegen, aus dem unterschiedlichen Belastungsprotokoll, dem Wegfall der Pause oder der veränderten Belastungsform ergeben, kann nicht sicher bestimmt werden. Eine Betrachtung der Einflussfaktoren Belastungsprotokoll und Pausendauer findet in den folgenden Kapiteln statt.

Bezüglich des Verfahrens nach Mader untermauern Laufbanduntersuchungen von VASSILIADIS und Mitarbeitern (1998) an 41 Mittel- und Langstreckenläufern verschiedener Kader des Deutschen Leichtathletik Verbandes (DLV) die These, dass das Verfahren nicht valide ist. Die Stufendauer der Tests betrug 5 Minuten, die Geschwindigkeit wurde jeweils um 0,5 m/s gesteigert, zur Blutabnahme wurde eine 30-sekündige Pause eingelegt. Mehrere Dauerbelastungen mit verschiedenen Intensitäten zeigten, dass ein LASS nur im Bereich bis zu 95% der Leistung an der 4 mmol/-Schwelle erreicht wurde. Die entsprechenden Blutlaktatkonzentrationen in den Dauertests lagen im Bereich von 3 mmol/l. In diesem Bereich stieg der parallel gemessene RQ kontinuierlich an, was auf einen abnehmenden Anteil der Fettverbrennung an der Energiebereitstellung hinweist. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu den Überlegungen zu Abb. 9, nach denen die Mader-Schwelle am genauesten war. Ein Grund dafür könnte auch hier ein anderes Belastungsprotokoll (um 0,1 m/s höherer Belastungsanstieg pro Stufe) gewesen sein.

STEGMANN und KINDERMANN (1982) führten eine Studie an 19 Ruderern durch, um die Stegmann-Schwelle zu validisieren. In einem Stufentest mit einem Belastungsincrement von 25 W/min wurde die individuelle anaerobe Schwelle nach dem in Kap. 7.1.6 erklärten Verfahren bestimmt. Die im Anschluss erfolgte Dauerbelastung über 50 min konnte von allen Probanden bewältigt werden und führte zu einem LASS. Unbeantwortet bleibt in dieser Studie allerdings, ob das erreichte steady-state tatsächlich dem maximal möglichen

Lass entspricht. Um die Validität der Stegmann-Schwelle als Maß für das MaxLass bei einem Belastungsanstieg von 16,67 W/min nachzuweisen, bestimmten URHAUSEN und Mitarbeiter (1994) die individuell anaerobe Schwelle an 16 ausdauertrainierten Sportlern auf dem Fahrradergometer. Die Überprüfung fand in Form einer 30-minütigen Dauerbelastung statt. Die Intensität entsprach der Schwellenleistung. Bei einem Probanden wurde kein Lass erreicht, vielmehr stieg die Blutlaktatkonzentration stetig an. Dauerbelastungen mit einer um fünf Prozent über der Schwellenleistung liegenden Intensität mussten von zwei Probanden vorzeitig abgebrochen werden, bei fünf weiteren wurde kein Lass mehr erreicht (ebda, S. 42). Dies bedeutet, dass für neun Probanden (56,25 % des untersuchten Kollektivs) die im Verfahren nach Stegmann ermittelte Schwelle nicht als Maß für das MaxLass gelten kann, da sich bei der höheren Leistung noch ein Lass einstellte. Eine hinreichende Gültigkeit des Verfahrens in diesem Sinne erscheint durch die Studien nicht bewiesen.

BRAUMANN und Mitarbeiter (1991) gingen der Frage nach, ob die mit der Laktatsenke korrespondierende Leistung in der Laktatsenke nach Tegtbur (vgl. Kap. 7.1.7) der des MaxLass entspricht. An 28 Athleten aus dem Test wurde eine Dauerbelastung mit einer Leistung entsprechend der ermittelten Laktatsenke durchgeführt. Bei 90% der Probanden wurde gemäß der Definition nach Heck (vgl. Kap. 5.3) ein MaxLass erreicht, während eine Dauerbelastung bei geringfügig höherer Geschwindigkeit bei 96% zu stetig steigenden Laktatwerten führte (BRAUMANN et al. 1991, S. 244). Von 23 Versuchspersonen dieser Testreihe mussten drei die Belastung vorzeitig abbrechen. Braumann schließt daraus, dass die Laktatsenke als gutes Maß für das MaxLass angesehen werden kann.

Während die Verfahren nach Mader, Stegmann und Keul nach Untersuchungen HECKS und ROSSKOPFS (1994) für die Fahrradergometrie valide zu sein scheinen, trifft dies für die Fahrradergometrie nicht zu. Wie bereits angeführt, sind verschiedene Gründe denkbar. Als Ergebnis aus Abb. 10 lässt sich ableiten, dass für die Fahrradergometrie das Belastungsprotokoll von 12,5 W/min für die Bestimmung der Mader-, Keul, und Stegmann-Schwelle nicht geeignet ist, da eine Trainingssteuerung auf dieser Grundlage zu Überlastungen führt.

Auch die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit von 16,67 W/min scheint für die Bestimmung der Stegmann-Schwelle ungeeignet zu sein, die Schwellenleistung

zu bestimmen. Denn für 56,25 % der Probanden wurde auch bei höherer Leistung noch ein Lass erreicht. Für den Test zur Bestimmung der Laktatsenke fallen die ermittelten Zahlen etwas besser aus, mangels Angaben in der Literatur kann zu dem Belastungsprotokoll von Institut Nr. 45 kein Bezug hergestellt werden. Dennoch hätte in der angeführten Studie von Braumann eine Trainingssteuerung auf der Grundlage der Laktatsenke für drei von 28 Probanden zu einer Überforderung geführt.

7.2.3 Einfluss des Belastungsprotokolls auf die Schwelle

Bei einem Vergleich der verschiedenen Laktatschwellenkonzepte in Kap. 7.1 mit der in der Praxis anzutreffenden Ausgestaltung der Testverfahren (Tab. 2, S. 26) fallen große Unterschiede auf. Die jeweilige Stufendauer und der Belastungsanstieg, zusammengefasst in der relativen Belastungssteigerung bzw. Belastungsanstiegsgeschwindigkeit, streuen in einem großen Bereich. Zudem fallen in der Fahrradergometrie Pausen weg, die in den ursprünglichen Verfahren zur Blutabnahme vorgesehen waren.

7.2.3.1 Laktatkinetik und Zeitkonstante

Um bei der Laktatbestimmung am Ende einer Belastungsstufe dessen Konzentration korrekt zu bestimmen, sollte ein steady-state erreicht werden. Die benötigte Dauer ist abhängig von der Dynamik [Bildungs-, Eliminationsrate und Verteilungsvorgänge] des Laktats und kann über eine vom Parameter abhängige Zeitkonstante beschrieben werden (vgl. HECK 1990, S. 137).

Für den Parameter Laktat fand Heck heraus, dass mit zunehmendem Lass die Einstellzeit zunimmt und außerdem die Stufendauer länger werden muss, wenn die Belastungsstufen größer werden (ebda, S. 146f). Um ein um 2 mmol/l höheres Lass zu erreichen, ist „eine Stufendauer von wenigstens 5 bis 6 Minuten [notwendig], falls am Ende der Belastungsstufe 95% des Endwertes erwartet werden“ (ebda, S. 147), während nach 2 Minuten nur 63 % des steady-state-Wertes erreicht werden (ebda, S. 123).

7.2.3.2 Einfluss der relativen Belastungssteigerung

HECK (1990, S. 156ff) führte an 22 gut bis mittelgut ausdauertrainierten Probanden Stufentests auf dem Fahrradergometer mit unterschiedlichen relativen Belastungssteigerungen durch: A: 6 W/min, B: 12,5 W/min, C: 16,67 W/min, D: 25 W/min.

Untersucht wurde der Einfluss auf die Schwellenwerte der Mader-, Keul- und Stegmann-Schwelle. Die Keul-Schwelle wurde bei einem Tangentenwinkel von $\tan \alpha = 0,0549$ mmol/l/Watt bestimmt, entsprechend einer Laktatkonzentration in Höhe von 4 mmol/l. In Abhängigkeit unterschiedlicher Belastungsanstiege wurden differierende Schwellenleistungen ermittelt (Tab.3).

In der Untersuchung mit dem geringsten Belastungsanstieg (A) konnte nur in 15 Fällen die Stegmann-Schwelle ermittelt werden, da bei den übrigen sieben Probanden der erste Nachbelastungslaktatwert (vgl. Kap. 7.1.6) bereits unter der Laktatkonzentration bei Belastungsabbruch lag. Für die Schwellen nach Mader und Keul stellte Heck fest, dass mit zunehmendem Belastungsanstieg auch die ermittelte Schwellenleistung ansteigt, wohingegen die Schwelle nach Stegmann negativ mit der Belastungssteigerung korreliert. Die Überprüfung der Differenzen mittels statistischer Verfahren, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird, „ergab bei allen Schwellenmethoden einen signifikanten Effekt der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit“ (HECK 1990, S. 158).

Schwelle (Watt)		Belastungsanstieg (W/min)			
		6,0 (A)	12,5 (B)	16,7 (C)	25,0 (D)
Mader n = 22	$x_{L\text{mittel}}$	203,8	216,3	218,8	229,9
	+/- sd	34,5	35,7	36,5	38,2
Keul n = 22	$x_{L\text{mittel}}$	204,9	217,7	220,2	232,1
	+/- sd	30,8	33,6	36,7	35,5
Stegmann n = 15	$x_{L\text{mittel}}$	212,3	203,9	192,5	190,7
	+/- sd	33,2	35,9	43,3	41,8

Tab.3: Mittelwerte ($x_{L\text{mittel}}$) und Standardabweichungen (sd) der Schwellen nach Mader, Keul und Stegmann für verschiedene Belastungsanstiege [nach: HECK 1990, S. 158].

Zur Prüfung der Validität ermittelte Heck in Dauertests auf dem Fahrradergometer die MaxLass-Konzentration. Abbildung 11 zeigt, dass bei den Probanden für Belastungsanstiege von 6 – 25 W/min die gemittelten Schwellenwerte nach Mader und Keul über dem MaxLass lagen. Für einen Belastungsanstieg von ca. 25 W/min stimmte im Mittel die Stegmann-Schwelle mit dem MaxLass überein.

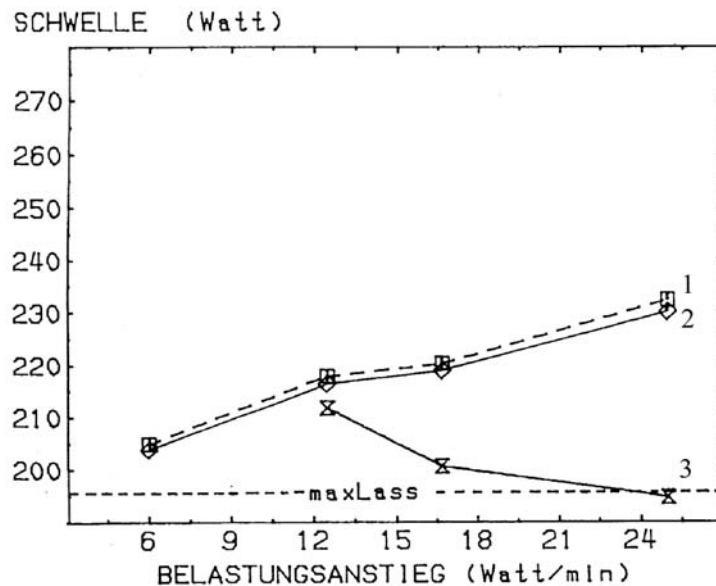


Abb.11: Mittelwerte der Keul- (1), Mader- (2) und der Stegmann-Schwelle (3) in Abhängigkeit vom Belastungsanstieg sowie zum Vergleich die MaxLass-Belastung [nach: HECK 1990, S. 160].

Daraus folgert HECK, dass bei einer Übertragung der Schwellenbestimmungsmethoden (Mader, Keul, Stegmann) auf die Fahrradergometrie, die ursprünglich für die Laufbandergometrie entwickelt wurden, die Schwellenwerte korrigiert werden müssen (ebda, S 163). Tab. 4 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Untersuchung. Demnach liegt der Schwellenlaktatwert in Abhängigkeit vom Belastungsanstieg für die Mader-Schwelle in einem Bereich von 3,62 mmol/l (+/- 0,82) bis 2,79 mmol/l (+/-0,67); der Tangentenwinkel der Keul-Schwelle ist ebenfalls variabel und streut in einem Bereich von $\tan \alpha = 0,0601$ mmol/l/Watt bis $\tan \alpha = 0,0287$ mmol/l/Watt. Wegen der verzögerten Laktatkinetik muss deshalb bei größeren Belastungssprüngen ein niedrigerer Laktatwert angesetzt werden.

Schwelle (Watt)		Belastungsanstieg (W/min)			
		6,0 (A)	12,5 (B)	16,7 (C)	25,0 (D)
Laktat (mmol/l)	\bar{x}_{Lmittel}	3,62	3,11	3,02	2,79
	+/- sd	0,82	0,66	0,62	0,67
tan α (mmol/l/W)	\bar{x}_{Lmittel}	0,0601	0,0403	0,0392	0,0287
	+/- sd	0,0174	0,0077	0,0096	0,0079

Tab.4: Mittelwerte (\bar{x}_{Lmittel}) und Standardabweichungen (sd) der Laktat- und Tangentenanstiegswinkel bei MaxLass-Belastung für verschiedene Belastungsanstiege [nach: HECK 1990, S. 164].

Einen qualitativ gleichartigen Belastungsanstiegseffekte, wie oben beschrieben, wies HECK (1990, S. 149ff) für die Schwellen nach Mader, Keul und Stegmann auch für die Laufbandergometrie nach. Auch WASSERMANN und Mitarbeiter (1973) stellten fest, dass die Leistungen an der Mader-Schwelle mit zunehmender Belastungssteigerung größer wurden. Eine Verschiebung der LLK zu höheren Belastungen hin und damit ein Ansteigen der Schwelle beobachteten auch KINDERMANN und Mitarbeiter (1980) auf dem Laufband und dem Fahrradergometer für die Mader-Schwelle. JESCHKE und Mitarbeiter (1983) stellten für Untersuchungen mit Belastungsanstiegen von 5, 16,5 und 25 W/min fest, dass die Leistung an der 4 mmol/l-Schwelle pro 1 Watt/min zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit im Mittel um 1,45 W zunahm. Dieses Ergebnis liegt damit ungefähr in der Größenordnung, das Heck für die Mader-Schwelle ermittelte (vgl. Tab.3). McLELLAN (1985) bestätigt ebenfalls ein Anwachsen der 4 mmol/l-Schwelle mit zunehmendem Belastungsanstieg und ein Abfallen der Stegmann-Schwelle. GRANTSCHAROW und BACHL (1987) wiesen in ähnlicher Weise für einen Belastungsanstiegsbereich von 10 – 20 W/min nach, dass die Schwellenleistung sich bei einer Steigerung der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit um 1 W/min um 2,9 W zu höheren Leistungen hin verschob. Qualitativ werden damit Hecks Untersuchungen, die an einem relativ kleinen Probandenkollektiv durchgeführt wurden, und Jeschkes Ergebnisse bestätigt. Der Effekt der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit fällt in der Studie von Grantscharow und Bachl jedoch deutlicher aus.

Für die Laktatsenke wiesen HECK und Mitarbeiter (1991) ebenfalls eine Abhängigkeit vom Belastungsanstieg nach. Ausgehend von einer annähernd glei-

chen Laktatkonzentration nach Vorbelastung der Probanden, aus der ersten Phase des Tests resultierend, wurde an acht weiblichen und sechs männlichen Sportstudenten die Laktatsenke in drei Untersuchungen mit unterschiedlichen Belastungsanstiegen im Stufentest (dritte Phase) bestimmt: A: 25 W/min, B: 16,67 W/min, C: 8,33 W/min. Die mittlere Senkenbelastung für Untersuchungsreihe A betrug 172,2 W (+/- 42,8 W), für Reihe B 160,8 W (+/- 38,3 W), und für einen Belastungsanstieg von 8,33 W/min lag die Senkenbelastung bei 138,8 W (+/- 29,0 W). Die Überprüfung mittels statistischer Verfahren ergab eine hochsignifikante Abhängigkeit der Senkenbelastung und des Senkenlaktats vom Belastungsanstieg. Die ermittelte Senkenbelastung nahm im Mittel um 2,01 W pro 1 W/min höherer Belastungsanstiegsgeschwindigkeit zu. Eine Beurteilung des Senkentests erfolgt nach Betrachtung der weiteren Einflussfaktoren Pausendauer und Vorbelastung.

Durch die beschriebenen Untersuchungen wird deutlich, dass die immense Ausdifferenzierung der laktatgestützten Schwellenbestimmungsmethoden kritisch beurteilt werden muss. Zu erkennen ist, dass es unter sonst gleichen Bedingungen mit der gleichen Methode bei unterschiedlicher Belastungssteigerung nicht möglich ist, gleiche Schwellenleistungen zu ermitteln. Dies bedeutet für einen Sportler beispielhaft, dass er voraussichtlich bei den 20 Instituten, welche die Schwelle nach Mader bestimmen, 13 unterschiedliche Schwellenleistungen genannt bekäme. Dies würde zu 13 verschiedenen Trainingsbereichen führen. Gleiches gilt für die Differenzierung der übrigen laktatgestützten Methoden. Legt man die für die Fahrradergometrie korrigierte Tab. 4 zugrunde, würden alle Institute, welche die Mader-Schwelle bestimmen, die Dauerleistungsgrenze überschätzen, was in der Trainingssteuerung zu intensive Belastungen zur Folge hätte (vgl. Abb. 11, S. 47). Am ehesten würde in der Ergometrie mit einem Belastungsanstieg von 5 W/min die Dauerleistungsgrenze korrekt bestimmt. Die Bestimmung der anaeroben Schwelle bei 3 mmol/l, von den Instituten mit einer Belastungssteigerung von 8,00 W/min durchgeführt, dürfte nach Tab. 4 zu einer leichten Unterschätzung führen. Im Mittel wäre ein Belastungsanstieg von 16,67 W/min besser geeignet.

Bezüglich der Keul-Schwelle ergab die Umfrage, dass zwei Institute (relative Belastungssteigerung 6,67 bzw. 8,00 W/min) einen Tangentenwinkel von

$\tan \alpha = 0,0549$ mmol/l/Watt anwenden. Die fünf übrigen (relative Belastungssteigerung: 8,33 W/min ($n = 3$) und 16,67 W/min ($n = 2$)) wählen den niedrigeren Wert $\tan \alpha = 0,039$ mmol/l/Watt. Entsprechend Tab. 4 dürfte die beiden erstgenannten Institute gute Übereinstimmungen der Schwellenleistung mit der MaxLass-Leistung erzielen. Gleiches gilt für die Stufentests mit einem Belastungsanstieg von 16,67 W/min ($n = 2$). Für die drei übrigen Institute (Belastungsanstieg: 8,33 W/min), die den niedrigen $\tan \alpha$ - Wert wählen, wird die Ausdauerleistungsfähigkeit im Mittel unterschätzt und damit die Trainingsbereiche zu niedrig angegeben.

An dieser Stelle muss betont werden, dass diese Aussagen nur vorsichtig getroffen werden können, da die zugrunde liegenden Untersuchungen an relativ wenigen Probanden durchgeführt wurden. Eine Vielzahl von weiteren Studien wurde zwar zur Bestätigung angeführt, allerdings gilt dies nur in qualitativer Hinsicht. Dennoch können Grundaussagen und die Tendenz der Argumentation für die Mader- und Keul-Schwelle als richtig angesehen werden. Es muss außerdem darauf verwiesen werden, dass die Angaben in Tab. 4 wiederum Mittelwerte darstellen, so dass im Einzelfall die Abweichungen ermittelter Werte groß sein können. Dies macht eine Beurteilung der Verfahren für den einzelnen Sportler, der sich einer Leistungsdiagnostik unterzieht generell schwierig.

Für die Stegmann-Schwelle ermittelte Heck im Mittel eine Übereinstimmung der Schwellenleistung mit dem MaxLass für einen Belastungsanstieg von 25 W/min (Abb. 11, S. 47). Eine geringere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit führte hingegen zu einer Überschätzung. Dies widerspricht den in Kap. 7.2.2 beschriebenen Ergebnissen zum Verfahren nach Stegmann, wonach für 56,25 % der Probanden bei einem Belastungsanstieg von 16,67 W/min die Schwellenleistung noch kein MaxLass darstellte (vgl. S. 44). Eine Beurteilung der verschiedenen Verfahren nach Stegmann ist wegen der widersprüchlichen Ergebnisse schwierig. Als Grundaussage kann dennoch festgehalten werden, dass die von den Instituten angewendeten Protokolle unter sonst gleichen Bedingungen nicht zu gleichen Ergebnissen führen und dass die ermittelten Schwellenleistungen mit zunehmendem Belastungsanstieg abnehmen.

Für die Simon- und Dickhuth-Schwelle liegen keine Studien mit Dauerbelastungsversuchen zur Validisierung der Verfahren vor. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass auch hier wegen verschiedener Belastungsprotokolle

unterschiedliche Schwellen bestimmt werden. Zwischen den Instituten, die nach Dickhuth testen herrscht diesbezüglich weniger „Einigkeit“ (relative Belastungssteigerungen 6,67 bzw. 16,67 W/min) als zwischen den Instituten, die nach Simon testen (13,33 bzw. 16,67 W/min). Einschränkend muss zu den letzteren gesagt werden, dass die aerobe Schwelle aus dem arithmetischen Mittel unterschiedlich vieler Werte (zwei bis vier) bestimmt wird. Für die Simon-Schwelle, die ursprünglich für den Schwimmsport entwickelt wurde, geben die Autoren für die Fahrradergometrie keine Empfehlungen. Eine Übertragung des evtl. für den Schwimmsport gültigen Belastungsprotokolls müsste in Studien abgesichert werden. DICKHUTH und Mitarbeiter (1996, S. 185) verzichten ebenfalls auf eine Empfehlung bzgl. des Belastungsprotokolls mit dem Hinweis, dass je nach Ergometrieform, Stufenlänge und Belastungssinkrement das Laktatfixum variabel sein kann. Da sich aber, wie in Tabelle 2 zu sehen ist, die angewendeten Verfahren bzgl. der Stufenhöhe um 10 W/min unterscheiden, liegt nahe, dass beide Verfahren bei sonst gleichen Bedingungen nicht zum gleichen Ergebnis führen werden. Aus den Erkenntnissen zur Laktatkinetik kann auf die Bestimmung der Simon- und Dickhuth-Schwelle übertragen werden, dass bei einem höheren Belastungsanstieg das Laktatfixum niedriger ausfallen muss als bei einem geringeren Belastungsanstieg.

7.2.3.3 Einfluss der Pausendauer

Da bei der Fahrradergometrie der Oberkörper des Untersuchten in der Regel während der Belastung wenig bewegt wird, sind Pausen, um Blut aus dem Ohrläppchen zu entnehmen, nicht notwendig. Die in Kap. 7.1 beschriebenen Verfahren wurden aber für Untersuchungen entwickelt, die eine Pause zur Blutabnahme unumgänglich machten. Daher soll an dieser Stelle betrachtet werden, wie die Länge der Pause zwischen zwei Stufen das Laktatverhalten und damit die Bestimmung der Schwellen beeinflussen kann. Somit lässt sich für den Fall, dass die Pausenlänge gegen Null geht, eine Tendenz erkennen, in welche Richtung Laktatkonzentration und Schwellen wahrscheinlich beeinflusst werden. Des Weiteren ist im Verfahren zur Bestimmung der Laktatsenke (Kap. 7.1.7) die Pause wichtiger Bestandteil des Diagnostiktests. Nach HECK und

Mitarbeitern (1991, S. 250) ist auch hier ein Einfluss auf die Laktatkinetik denkbar.

HECK (1990, S. 172ff) untersuchte an neun Sportstudenten bei Laufbandergometrie mit einer Stufenlänge von 3,5 Minuten und einer Belastungssteigerung von 0,4 m/s den Einfluss unterschiedlich langer Pausen: A: 0,5 min, B: 1,0 min, C: 1,5 min. Wie in Tab. 5 zu sehen ist, nimmt die Schwellengeschwindigkeit an der 4 mmol/-Schwelle ab, wenn die Pausendauer kürzer wird.

Proband Nr.	Pausendauer (min)		
	0,5	1,0	1,5
1	3,47 (m/s)	3,68 (m/s)	3,83 (m/s)
2	3,00 (m/s)	3,00 (m/s)	3,23 (m/s)
3	3,47 (m/s)	3,56 (m/s)	3,56 (m/s)
4	3,40 (m/s)	3,43 (m/s)	3,47 (m/s)
5	3,33 (m/s)	3,44 (m/s)	3,56 (m/s)
6	3,16 (m/s)	3,26 (m/s)	3,40 (m/s)
7	3,56 (m/s)	3,72 (m/s)	3,88 (m/s)
8	3,30 (m/s)	3,46 (m/s)	3,58 (m/s)
9	3,21 (m/s)	3,27 (m/s)	3,32 (m/s)
v_{mittel}	3,32 (m/s)	3,42 (m/s)	3,53 (m/s)
+/- sd	0,18 (m/s)	0,22 (m/s)	0,22 (m/s)
minimal	3,00 (m/s)	3,00 (m/s)	3,23 (m/s)
maximal	3,56 (m/s)	3,76 (m/s)	3,88 (m/s)

Tab.5: 4 mmol/l-Schwellengeschwindigkeiten [m/s] verschiedener Probanden bei unterschiedlicher Pausendauer [min], sowie mittlere Schwellengeschwindigkeit (v_{mittel}), Standardabweichung (sd) sowie Extremwerte[nach: HECK 1990, S. 174].

Nach statistischer Überprüfung zeigt sich laut HECK ein hochsignifikanter Pausendauereffekt, der auf die von der Pausenlänge abhängige Laktatelimination zurückzuführen ist (ebda, S. 174). Qualitativ gleichgerichtete Ergebnisse erhielten EBBERT (1981), LEHMANN und Mitarbeiter (1985) und YEAGER und Mitarbeiter (1986).

Eine Pause stellt eine Unterbrechung der Belastung dar, in der die Laktatproduktionsrate erniedrigt ist, während die Elimination auf hohem Niveau weiterläuft, so dass die Blutlaktatkonzentration sinkt. Da diese Zusammenhänge grundsätzlicher Natur sind, kann angenommen werden, dass die Ergebnisse der erstgenannten Studien auf die Fahrradergometrie übertragen werden können. Weiterhin kann angenommen werden, dass eine weitere Verkürzung bis zum Wegfall der Pause niedrigere Schwellenleistungen zur Folge hat. Dieser Zusammenhang gilt wegen der Grundsätzlichkeit der Erklärung für alle laktatgestützten Stufentests der Umfrage. Eine Anwendung von Verfahren, die für andere Sportarten als den Radsport entwickelt wurden, erscheint daher ohne Anpassung nicht möglich. Für die Verfahren nach Mader und Keul zeigt Heck mit Tab. 4 mögliche Werte. Bezüglich anderer Verfahren der Umfrage, für die im vorangegangenen Kapitel des Belastungsprotokolls wegen einer Überschätzung der Ausdauerleistungsfähigkeit prognostiziert wurde, ist denkbar, dass ein Wegfall der Pause zu einer verbesserten Übereinstimmung führt. Wenn zur Blutabnahme auf Pausen verzichtet wird, ist darüber hinaus bei ansteigender Belastung mit zunehmenden Fehlern bei der Abnahme zu rechnen. Bei stärkerer Belastung der Beine werden der Oberkörper und die Arme als Widerlager der Bewegung benutzt. Daraus resultieren auch Kopfbewegungen, die eine zügige Blutabnahme ohne Störungen aus dem Ohrläppchen unter Umständen unmöglich machen. Die Folge können sog. „Ausreißer“ in der LLK sein, die bei ungünstiger Lage im Schwellenbereich eine genaue Bestimmung dieser erschweren. Diese Fehleranfälligkeit dürfte mit zunehmender Routine der Untersucher geringer werden.

Den Einfluss der Pausendauer auf die Laktatsenke untersuchten HECK und Mitarbeiter (1991) an den in Kap. 7.2.3.2 bereits erwähnten 14 Probanden. Ausgehend von einem Vorbelastungslaktat in Höhe von ca. 10 mmol/l nach der ersten Phase, schloss sich nach unterschiedlich langen Pausen (A: 4 min, B: 8 min, C: 12 min) ein Stufentest mit einem Belastungsanstieg von 25 W pro 1,5 min an. Für diesen Pausenbereich stellte sich als Ergebnis heraus, dass die „Laktatsenke im Mittel um 3,06 Watt pro 1 min längere Pausendauer“ abnahm“ (ebda, S. 252). Statistische Prüfverfahren der Differenzen ergaben einen hochsignifikanten Effekt der Pausendauer auf die Laktatsenke. Als Grund führt

HECK an, dass mit Zunahme der Pausendauer der Anfangslaktatwert für den Stufentest (dritte Phase) abnimmt. Die Eliminationsrate des Laktats hängt aber positiv mit der Höhe der Laktatkonzentration zusammen. Bei hohem Laktatwert bedeutet dies somit, dass die Eliminationsrate größer ist als bei einer niedrigen Konzentration (vgl. FREUND et al. 1981, 1986; HECK et al. 1990). Aus diesem Zusammenhang ergibt sich der Effekt, dass bei gleicher Belastung im Stufentest das Laktat bei hohem Ausgangswert noch sinken kann, während es bei einem niedrigen Ausgangswert zu Beginn der dritten Phase schon wieder ansteigt, die Produktion also schon früher die Elimination überwiegt.

Eine längere Pause hat einen niedrigeren Ausgangswert zur Folge. Das bedeutet im Vergleich zu einer kürzeren Pausendauer: bereits bei geringeren Belastungen kommt es zu einem Übergewicht der Produktion gegenüber der Elimination und die Laktatsenke wird zu niedrigeren Werten hin verschoben (HECK et al. 1991, S. 255; vgl. Abb.8).

7.2.3.4 Einfluss der Vorbelastung

Das „International Council of Sports and Physical Education“ (ICSPE) empfiehlt, am Vortag und am Untersuchungstag der leistungsdiagnostischen Untersuchung auf physische und psychische Belastungen zu verzichten, um einen Einfluss auf die Ergometrie zu vermeiden (vgl. SMODLAKA et al. 1983). Aus diesem Grund soll an dieser Stelle auf eine Darstellung der Wirkung einer Vorbelastung auf die Schwelle verzichtet werden, zumal zu diesem Aspekt nur wenige Forschungsstudien vorliegen. Stattdessen wird davon ausgegangen, auch wenn dies unter Umständen nicht immer der Praxis entspricht, dass die Verantwortlichen der Institute ihre Kunden auf die Notwendigkeit eines regenerierten Zustands hinweisen und die Sportler sich an diese Vorgaben halten. Da jedoch im Senkentest die Vorbelastung (erste Phase) notwendiger Bestandteil ist und hierbei unterschiedliche Ausgestaltungen denkbar sind, ist ein Einfluss der ersten Phase des Tests auf die nachfolgenden Phasen (Pause und Stufentest) anzunehmen.

HECK und Mitarbeiter (1991) überprüften an 14 Probanden, inwieweit unterschiedliche Vorbelastungslaktatwerte (A: ca. 7 mmol/l, B: ca. 10 mmol/l,

C: maximal) am Ende der ersten Phase einen Einfluss auf die Ermittlung der Laktatsenke haben. In den einzelnen Untersuchungsreihen betrug die Pausendauer nach der Vorbelastung jeweils 8 Minuten und der Belastungsanstieg im Stufentest 25 W/ 1,5 min. Bei Test A ergab sich für ein mittleres Vorbelastungslaktat von 7,39 (+/-0,58) mmol/l eine Senkenbelastung von 136,6 (+/- 42,3) W bei einem Senkenlaktat von 2,76 (+/- 0,98) mmol/l. In Test B, ausgehend von einem durchschnittlichen Laktatwert nach der Vorbelastung von 10,58 (+/- 1,00) mmol/l, wurde eine Senkenbelastung in Höhe von 160,8 (+/- 38,3) W bei einer Laktatkonzentration von 5,01 (+/- 1,78) mmol/l ermittelt. Für maximale Vorbelastungslaktatwerte, im Durchschnitt 14,28 (+/- 1,19) mmol/l, ergab sich die Laktatsenke bei einer Belastung von 181,0 (+/- 49,3) W und einem Senkenlaktat in Höhe von 7,74 (+/- 2,13) mmol/l. Im Mittel kam es zu einem Anstieg der Laktatsenke um 6,4 W pro 1 mmol/l höherem Vorbelastungslaktat (ebda, S. 251f). Statistische Mittelwertvergleiche der 3 Testreihen untereinander ergaben für die Parameter Vorbelastungslaktat, Senkenbelastung und Senkenlaktat hochsignifikante Unterschiede. Die Gründe für den hochsignifikanten Effekt des Vorbelastungslaktats auf die beiden anderen Größen sind dieselben wie beim Einfluss der Pausendauer auf die Laktatsenke. Dort wurde gezeigt, dass, ausgehend von einer höheren Laktatkonzentration bei gleicher Belastung, der Laktatwert noch sinken kann, während bei darunter liegender Laktatkonzentration schon ein Ansteigen zu verzeichnen sein kann. Dadurch kommt es zu einer Rechtsverschiebung der Laktatsenke (vgl. Abb.8, S. 37) und einer höheren Senkenbelastung bei höherem Vorbelastungslaktat (ebda, S. 255). Aus den Untersuchungen leitet HECK für die Fahrradergometrie die Empfehlung ab, mit der ersten Phase des Tests ein hohes Vorbelastungslaktat zu erreichen, die zweite Phase als 8-minütige Pause zu gestalten und im anschließenden Stufentest einen Belastungsanstieg in Höhe von 16,67 W/min zu wählen (ebda, S. 258). Bei dieser Testgestaltung stimmte im Mittel die Senkenleistung mit der MaxLass-Leistung überein. Der Test wies die Tendenz auf, die Dauerleistungsgrenze mit zunehmender Leistungsfähigkeit zu unterschätzen. Die zusammengetragenen Ergebnisse verschiedener Studien in den Kap. 7.2.3.1 bis 7.2.3.4 machen deutlich, dass auch bei der Bestimmung der Laktatsenke diverse Faktoren Einfluss auf die Schwellenbestimmung nehmen.

Das in der Umfrage von einem Institut angewendete Verfahren sieht bereits in der ersten Phase einen Stufentest mit einem Belastungsanstieg von 16,67 W/min bis zur annähernden Ausbelastung vor und unterscheidet sich damit von dem ursprünglichen Test, bei dem am Anfang eine kurze anaerobe Belastung stand. Damit wird zwar einerseits ein hohes Vorbelastungslaktat erreicht, jedoch handelt es sich bereits um eine sehr intensive Belastung. Es stellt sich die Frage, ob die lange Belastung in einem Stufentest dem Sinn der ursprünglichen Überlegungen zu dem Verfahren entspricht. Gerade Sportlern mit geringerer Ausdauerleistungsfähigkeit dürfte es schwer fallen, zwei Stufentests (durch eine 7-minütige Pause getrennt) bis zur Ausbelastung durchzuführen. Für trainierte Sportler mit entsprechender Erholungsfähigkeit stellt das Verfahren nach den Erkenntnissen Hecks eine gute Möglichkeit dar, die Dauerleistungsgrenze in der richtigen Größenordnung zu bestimmen, da die gewählte Belastungsanstiegsgeschwindigkeit der Empfehlung Hecks entspricht. Gleichmaßen wird die Bedingung eines hohen Vorbelastungslaktats erreicht. Gemäß den Ausführungen zum Einfluss der Pausendauer wird die Senkenleistung im Mittel wegen der verkürzten Pause (7 statt 8 Minuten) um 3 W höher bestimmt. Wegen der individuellen Variabilität bei Testverfahren wiegt dieser Unterschied wahrscheinlich nicht schwer. Es ist außerdem denkbar, dass eine eventuelle Unterschätzung der Senke bei zunehmender Leistungsfähigkeit damit ausgeglichen wird. Dennoch muss bei dieser Beurteilung beachtet werden, dass interindividuell abweichende Bestimmungen möglich sind, da sich die Untersuchungen Hecks auf nur 14 Probanden beziehen und die Empfehlungen sich auf Mittelwerte stützen. Grundsätzlich kann aber als Tendenz die Bedingung eines hohen Vorbelastungslaktats festgehalten werden. Gerade für unerfahrene Untersucher und Sportler stellt dies unter Umständen eine Schwierigkeit dar: für Sportler insofern, dass ihnen die Motivation fehlen könnte, sich intensiv zu belasten, während Untersucher vor dem Problem stehen, ein der Ausdauerleistungsfähigkeit individuell angepasstes Belastungsprotokoll für die erste Phase zu wählen. Zur Kontrolle, ob die Vorbedingung erfüllt ist, ist es von Vorteil, wenn die Laktatkonzentration direkt nach der ersten Phase bestimmt werden kann, um evtl. Fehler, die einen zweiten Test notwendig machen zu vermeiden. Darüber hinaus fordern TEGTBUR und Mitarbeiter (1989), dass die Anfangsbelastung des Stufentest so zu wählen ist, dass die Senke zwischen der zweiten und vier-

ten Stufe erreicht wird. HECK und Mitarbeiter (1991, S. 262) vermuten, dass eine weitere niedrigere Belastungsstufe das Senkenlaktat und damit die Senkenbelastung verringern könnte. Somit bietet das Verfahren an dieser Stelle eine weitere Fehlerquelle, die besonderes Augenmerk der Untersucher verlangt. Insgesamt stellt die Bestimmung der Laktatsenke damit ein sehr aufwändiges Verfahren dar. Grundsätzlich scheint es mit dem Test aber möglich zu sein, die Dauerleistungsgrenze als Grundlage für die Trainingssteuerung gut bestimmen zu können. Allerdings legen die Untersuchungen Hecks nahe, dass eine Reihe von Bedingungen beachtet werden muss, deren Notwendigkeit in weiteren Studien abgesichert werden sollte. Eine grundsätzliche Überprüfung, ob eine anfängliche Vorbelastung mittels Stufentest von weniger leistungsfähigen Personen gut verkraftet wird, ist ebenfalls angezeigt.

7.2.4 Einfluss des Ernährungszustandes auf die Schwelle

Wie in Kap. 3 dargestellt, ist Laktat ein Stoffwechselprodukt der anaeroben Glykolyse. Damit ist ein Einfluss der Versorgung der Muskeln mit Glukose und Glykogen auf die Laktatkonzentration denkbar. Verschiedene Studien geben Hinweise darauf, dass der Verlauf der LLK vom Ernährungszustand abhängt. Als Folge können aus den Ergebnissen eines Stufentests falsche Aussagen bzgl. der Ausdauerleistungsfähigkeit eines Probanden resultieren.

BUSSE und Mitarbeiter (1987) untersuchten an acht Gelegenheitssportlern den Einfluss einer Glykogenverarmung auf die Laktatkinetik und auf verschiedene Schwellenkonzepte. Dazu wurden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen Stufentests mit einer Belastungsanstiegsgeschwindigkeit von 16,67 W/min durchgeführt. Eine Dauerbelastung und eine intensive Intervallbelastung nach dem ersten Test sorgten für einen glykogenarmen Zustand. Dieser wurde durch kohlenhydratarme Ernährung bis zum nächsten Tag gewährleistet. Die Laktatkonzentration in Ruhe, direkt vor den Stufentests gemessen, war in glykogenarmem Zustand nur geringfügig niedriger als einen Tag zuvor. Die mittlere Leistung bei einer Laktatkonzentration von 2 mmol/l erhöhte sich von 205,6 (+/- 44,7) W auf 252,9 (+/- 37,9) W. Der mittleren Leistung an der 4 mmol/l-

Schwelle in Höhe von 277,5 (+/-37,1) W stand unter glykogenarmen Verhältnissen eine höhere Leistung von 295,1 (+/- 37,0) W gegenüber. Die Leistung an der Stegmann-Schwelle fiel geringfügig niedriger aus (Test 1: 249,2 +/- 40,0 W; Test 2: 235,2 +/- 37,9 W). Das mittlere Maximallaktat betrug am ersten Tag 10,72 (+/- 2,1) mmol/l, am zweiten Tag nur noch 5,8 (+/- 1,8) mmol/l. Aus den ermittelten Werten folgern BUSSE und Mitarbeiter, dass die „konzentrationsabhängigen 2- und 4 mmol/l-Schwellen bei Glykogenverarmung [...] eine hochsignifikant verbesserte Ausdauerleistungsfähigkeit andeuten, [während] die individuelle Schwelle [nach Stegmann] auf eine scheinbar schlechtere Ausdauerfähigkeit [hinweist]“ (1987, S. 456).

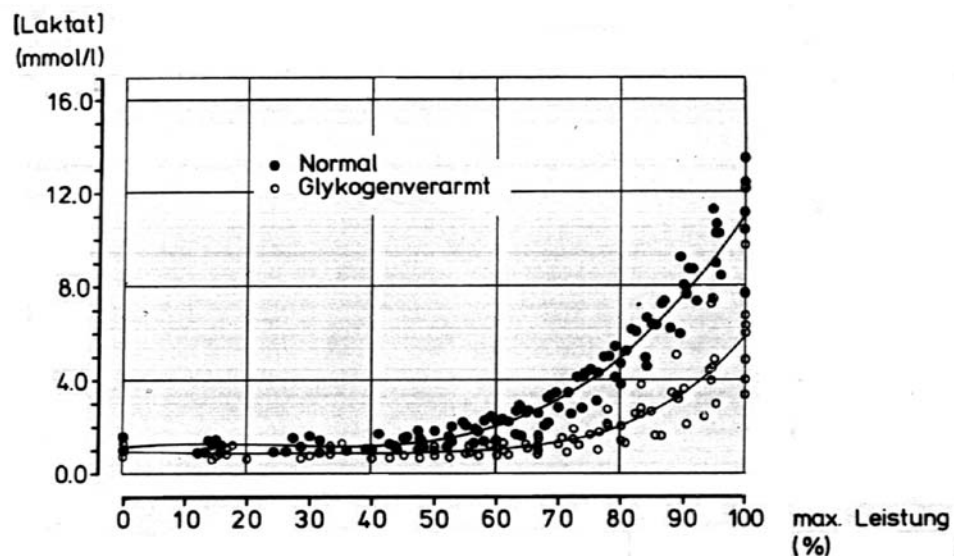


Abb.12: Laktatleistungskurve von acht Gelegenheitsportlern unter normalen Glykoverhältnissen und nach Glykogenverarmung, Leistung relativ zur Maximalleistung (max. Leistung (%)) angegeben [BUSSE et al. 1987, S. 465].

Abbildung 12 zeigt den Einfluss des Ernährungszustandes auf die Laktatkinetik der Probanden. Zu sehen ist eine Abflachung der Laktatkurve und ein niedriges Maximallaktat durch Glykogenverarmung. Beide Kriterien des Kurvenverlaufs werden von HOLLMANN und HETTINGER (1980, S. 426), SCHMIDT (1994, S. 134; vgl. Abb. 2) und LINDNER (1994, S. 67ff) als Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit interpretiert.

An fünf ausdauertrainierten Sportlern auf dem Fahrradergometer (Belastungssteigerung: 16,67 W/min) untersuchten BUSSE und Mitarbeiter (1989) zum einen den Laktatverlauf im glykogenarmen Zustand, zum anderen nach einer

Superkompensation der Glykogenspeicher. Um die Glykogenverarmung zu erreichen, trainierten die Probanden vor dem ersten Stufentest drei Tage intensiv und ernährten sich kohlenhydratarm. Nach dem Test wurde die Ernährung auf kohlenhydratreiche Kost umgestellt. Außerdem wurde zwei Tage, bis zum zweiten Test, nicht trainiert. Aus den Ergebnissen leitet der Arbeitskreis eine signifikante Abhängigkeit der LLK vom Ernährungszustand und Füllungsgrad der Glykogenspeicher ab (ebda, S. 325): Die durchschnittliche maximale Laktatkonzentration in Test 1 betrug 7,1 (+/- 2,9) mmol/l gegenüber 14,2 (+/- 4,0) mmol/l in dem Test nach Kohlenhydratmast. Im Schnitt lag im ersten Test die mit der 4 mmol/l-Schwelle korrespondierende Leistung bei ca. 320 W, während im zweiten Test die 4 mmol/l-Schwelle bereits bei ca. 280 W erreicht wurde. Als Konsequenz aus dieser Studie sind nach BUSSE und Mitarbeiter daher mit dem Anwenden der 4 mmol/l-Schwelle zur Trainingsberatung und Trainingssteuerung schwere Fehler verbunden. Auch die Anwendung von mittleren Laktatwerten sehen sie als nicht geeignet an, um den individuellen Erfordernissen in der Trainingssteuerung gerecht zu werden (vgl. ebda, S. 326).

In einem früheren Test untersuchten BUSSE und Mitarbeiter (1987) die Abhängigkeit der Laktatsenke vom Ernährungszustand an acht Gelegenheitssportlern mittels Fahrradergometrie. Der Test sah zwei durch eine 7-minütige Pause getrennte Stufentests vor (Angaben zum Belastungsprotokoll liegen nicht vor). An zwei aufeinanderfolgenden Tagen wurden die Tests einmal in „normalem“ Ernährungszustand, danach unter Glykogenverarmung durchgeführt. Die Unterschiede der Senkenleistung relativ zur Maximalleistung waren hochsignifikant (Senkenleistung in Test eins: 67,3 (+/-3,0) % der Maximalleistung; in Test zwei: 74,0 (+/- 4,1) % der Maximalleistung). Dahingegen lagen die absoluten Leistungen in der Senke bei beiden Tests aber dicht zusammen: Test 1: 235,3 (+/- 18,9) W; Test 2: 227,6 (+/- 18,8) W. Aus dem Ergebnis, dass die Absolutwerte nur wenig streuen, leiten die Autoren eine weitgehende Unabhängigkeit des Verfahrens vom Glykogengehalt der Muskulatur ab (ebda, S. 466).

FRÖHLICH und Mitarbeiter (1989) untersuchten an 16 nicht spezifisch trainierten Probanden ebenfalls den Einfluss veränderter Glykogenvorräte auf die Laktatkinetik mittels dreier Stufentests innerhalb von sieben Tagen. Dem ersten Test ging eine normale Ernährung voraus. Zwei Tage später, nach Sicherstellung einer Glykogenverarmung, erfolgte der zweite Test, dem eine 2-tägige

kohlenhydratreiche Ernährung und ein weiterer Stufentest folgten. Die maximale Leistung lag unter glykogenarmen Bedingungen (zweiter Test) um 9 % niedriger als nach kohlenhydratreicher Diät (dritter Test). An der 4 mmol/l-Schwelle lag die Leistung in Test 2 um 11 % höher, während die Bestimmung der Stegmann-Schwelle eine um 2 % niedrigere Leistung ergab als nach kohlenhydratreicher Diät. Die Laktatwerte bei Belastungsabbruch betrugen im zweiten Test 6,81 (+/- 1,42) im dritten Test 10,27 (+/- 1,57) mmol/l. Als Folge ergibt sich eine „nahezu parallele Rechtsverschiebung der Laktat-Leistungskurve [...] [Damit wird bei der 4 mmol/l-Schwelle] eine zu hohe Ausdauerleistungsfähigkeit angenommen“ (ebda, S. 312). Den Einfluss auf die Stegmann-Schwelle halten die Autoren für gering.

Diese Ergebnisse bestätigen damit qualitativ die Studien von BUSSE und Mitarbeitern (1987, 1989). Auch die Studien von YOSHIDA (1984) sowie von REILLY und WOODBRIDGE (1996) belegen eine Rechts-Verschiebung der LLK, und die Autorengruppen warnen bei Verwendung fixer Laktatschwellen vor der Interpretation einer scheinbar erhöhten Ausdauerleistungsfähigkeit.

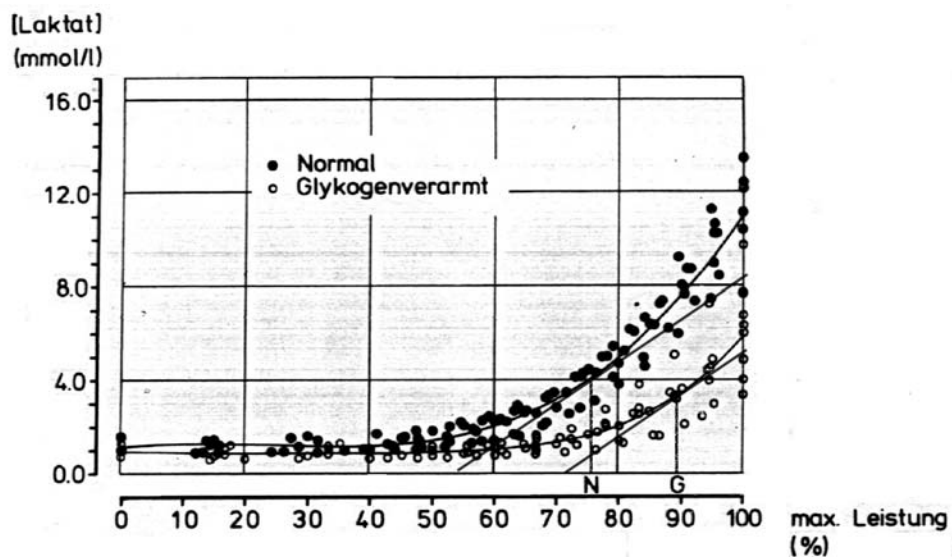


Abb.13: Laktatleistungskurve von acht Gelegenheitssportlern unter normalen Glykogenverhältnissen und nach Glykogenverarmung, Leistung relativ zur Maximalleistung angegeben; Prinzip der Ermittlung der Keul-Schwelle (Tangentenwinkel beliebig gewählt); N: Schwelle in normalem Ernährungszustand, G: unter glykogenverarmten Bedingungen [nach: BUSSE et al. 1987, S. 465].

Auch wenn für die Keul-Schwelle keine Untersuchungen vorliegen, ob die Schwellenbestimmung durch Glykogenverarmung beeinflusst wird, lässt sich

dies in Abb. 13 leicht nachvollziehen. Die vorgenannten Studien belegen durch Glykogenverarmung geringere Laktatkonzentrationen, niedrigere Abbruchlaktatwerte und damit eine Rechtsverschiebung der LLK. Durch Anlegen zweier Tangenten gleicher Steigung an die Kurven in Abb. 12 und Fällen des Lots im Berührungspunkt kann die Keul-Schwelle der LLK ermittelt werden. Es wird deutlich, dass auch bei diesem Verfahren unter glykogenarmen Bedingungen die anaerobe Schwelle fälschlich zu hoch bestimmt werden kann.

Die Untersuchungen bzgl. der Laktatsenke, lassen eine weitgehende Unabhängigkeit des Verfahrens vom Füllzustand der Glykogenspeicher vermuten. Einschränkend muss auch hier wieder auf die kleine Probandenzahl hingewiesen werden. Zur weiteren Absicherung der These müssten daher weitere gleichgerichtete Studien durchgeführt werden. Untersuchungen der Stegmann-Schwelle zeigten leicht sinkende Schwellenleistungen unter Glykogenverarmung. Jedoch ist der Einfluss geringer als bei den übrigen laktatgestützten Verfahren. Eine gesicherte Beurteilung ist wegen der geringen Probandenzahl auch hier nicht möglich.

Bei der 4 mmol/l-, 3 mol/l-, Simon-, Dickhuth- und Keul-Schwelle wird die Schwellenleistung durch Glykogenverarmung zu höheren Leistungen hin verschoben. Die Unterschiede betragen in den vorgestellten Studien an der 4 mmol/l-Schwelle zwischen 7 und 14 %. Auch wenn die Studien nur einen Einfluss auf die Schwelle nach Mader untersuchten, lassen sich die Zusammenhänge, wie dies für die Keul-Schwelle geschehen ist, analog auf die anderen Verfahren übertragen. Sowohl bei der 3 mmol/l-, Simon- als auch Dickhuth-Methode ergeben sich aus niedrigerem Maximallaktat und einer insgesamt flacheren Kurve erhöhte Schwellenleistungen. Dadurch, dass die Laktatproduktionsrate unter glykogenarmen Bedingungen herabgesetzt wird, ist eine höhere Leistung notwendig, um die 3 mmol/l-Schwelle oder einen um 1,5 mmol/l höheren Laktatwert zu erreichen. Die Verringerung der Maximalleistung nach Glykogenverarmung, die in der Studie von FRÖHLICH und Mitarbeitern (1989) an 16 Probanden festgestellt wurde, ist möglicherweise auf körperliche Erschöpfung durch die Maßnahmen zur Entleerung der Glykogenspeicher zurückzuführen. Diese bestanden aus einem intensiven 2-tägigem Training, wohingegen sich die Probanden während der Kohlenhydratmast keiner Belastung unterzogen. Dass für die 4 mmol/l-Schwelle dennoch eine höhe-

re Leistung bestimmt wurde, untermauert aber den Einfluss des Ernährungsstatus auf den Verlauf der LLK.

Die in Abb. 13 (S. 60) zu sehende Rechts-Verschiebung der Kurve wird, wie bereits beschrieben, vielfach als ein Zeichen verbesserter Ausdauerleistungsfähigkeit gesehen. Dies impliziert eine Abhängigkeit des MaxLass von der Ausdauerleistungsfähigkeit. Mehrere Autoren (KEUL et al. 1979; STEGMANN und KINDERMANN 1981, 1981a; BUNC et al. 1982) vertreten daher die Auffassung, dass bei höherer Ausdauer nur niedrigere MaxLass-Werte erreicht werden. Unterstützt wird diese These durch Untersuchungen von HARTMANN und Mitarbeitern (1989) an Ruderern des A- und B-Kaders, die zeigen, dass 90 % des Zeitumfangs des Ausdauertrainings mit Belastungsintensitäten bis 2 mmol/l durchgeführt wurden. FÖHRENBACH (1986) stellte fest, dass die Laktatwerte von Marathonläuferinnen im Training in einem Bereich von 0,8 bis 1,5 mmol/l lagen. In der bereits erwähnten Studie von VASSILIADIS und Mitarbeitern (1998) konnten trainierte Läufer ein Lass nur bis 3 mmol/l aufrecht erhalten. Diesen Ergebnissen stehen jedoch Studien von BENEKE und Mitarbeitern (1999, S. 36) gegenüber, die 33 Probanden auf dem Fahrradergometer untersuchten und die keine Abhängigkeit des MaxLass von der Maximalleistung und der MaxLass-Belastung erkannten. BUSSE und Mitarbeiter (1987, S. 460) analysierten die Beziehung zwischen Laktatkonzentration und relativer Leistung und stellten keine spezifischen Unterschiede fest (Abb. 14).

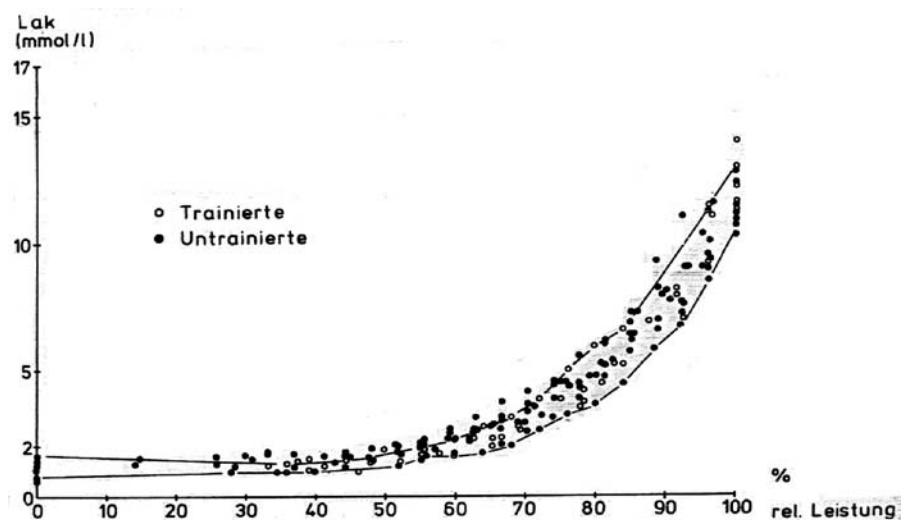


Abb.14: Beziehung zwischen relativer Leistung und der Laktatkonzentration von Gelegenheitssportlern (n = 9) und Radrennfahrern (n = 8), eingezeichnete Kurven sind die LLK zweier Sportler [BUSSE et al. 1987, S. 462].

Auch die in Kap. 7.2.1 und Kap. 7.2.2 aufgeführten Studien HECKS (1990, S. 36, 51, 66) auf dem Laufband und dem Fahrradergometer konnten nicht zeigen, dass Ausdauertrainierte zwangsläufig niedrigere MaxLass-Werte aufweisen als weniger gut Trainierte (Abb. 15).

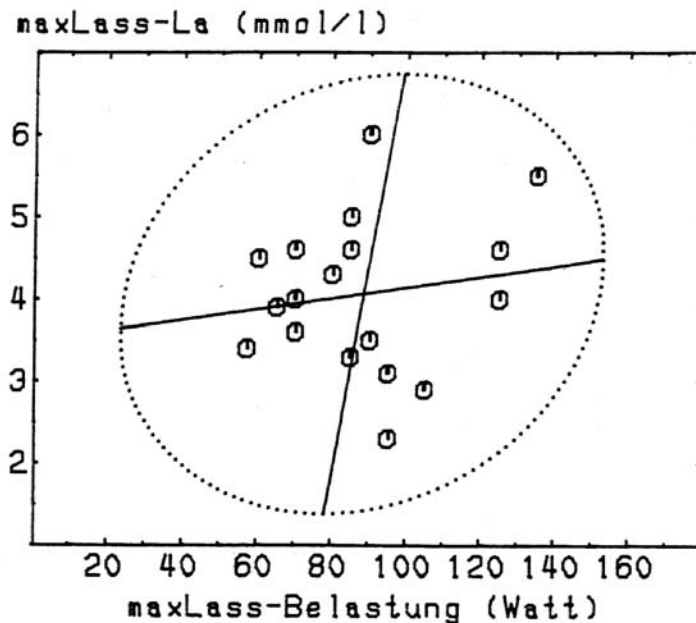


Abb.15: Beziehung zwischen MaxLass-Belastung und MaxLass-Konzentration für 22 Probanden auf dem Fahrradergometer [HECK, 1990 S. 66].

Eine mögliche Erklärung der widersprüchlichen Studien ist der Einfluss des Ernährungszustandes auf den Verlauf der LLK. Für Sportler mit hohem Trainingsumfang ist ein dauerhafter Zustand nicht „vollständig gefüllter Glykogenspeicher“ denkbar. Eine Trainingssteuerung auf der Grundlage der 4 mmol/l-, 3 mol/l-, Simon-, Dickhuth- oder Keul-Schwelle wird in diesen Fällen daher zu intensive Trainingsbereiche zur Folge haben. Eine Standardisierung hinsichtlich des Ernährungszustandes ist aufgrund unterschiedlicher Ernährungsgewohnheiten nicht möglich. Um eine Glykogenverarmung zu erkennen, empfehlen SCHULZ und HECK (2003, S. 133) daher neben der Bestimmung der Laktatkonzentration die Erhebung der Ammoniakkonzentrationen während des Stufentests. Grundlage ist der in Kap. 3.3 dargestellte Purin-nukleotidzyklus. In Tests stellten Heck und Schulz bei Ammoniak ein ähnliches Anstiegsverhalten wie bei Laktat fest. Bei Glykogenverarmung allerdings zeigt sich bei gleicher Leistung eine höhere Ammoniakkonzentration

während, wie oben dargestellt, die Laktatwerte niedriger liegen (vgl. BROHBERG und SAHLIN (1988)). Wegen der Komplexität des Verfahrens erfolgt an dieser Stelle keine Vertiefung zur Methodik und möglicher Probleme. Stattdessen wird auf entsprechende Literatur von SCHULZ und HECK (2001, 2003) verwiesen.

7.2.5 Laktatleistungskurve – Spiegelbild des Metabolismus?

Bezogen auf die Interpretation von LLK sollten Untersuchungen der Arbeitsgruppe um BLEICHER (1998, 1999) nicht unerwähnt bleiben. Die Autoren beschreiben die Laktatdiagnostik als eine empirische und erfahrungsgestützte Methode, mit Hilfe derer Rückschlüsse auf mögliche Stoffwechsellmuster gezogen werden (vgl. COSTILL 1970; RUSKO et al. 1986). BLEICHER und Mitarbeiter kritisieren jedoch (1998, S. 92), dass wesentliche Zusammenhänge des Metabolismus außer Acht gelassen werden. Die Arbeitsgruppe untersuchte 18 unterschiedlich trainierte jugendliche Probanden und bestimmte in spiroergometrischen Stufentests auf einem Laufband deren LLK, VO_2 , VCO_2 , AMV und RQ. In einem weiteren Test wurde bei einer konstanten Leistung, die 2 - 3 Minuten durchgehalten werden konnte, die VO_{2max} bestimmt. Mittels eines 60 m-Sprints erfolgte eine approximative Bestimmung der maximalen Laktatbildungsrate als Zeichen der glykolytischen Leistungsfähigkeit (Sprintfähigkeit). Im Anschluss erfolgte eine Auswahl von zwei Athleten (A und B), deren LLK denselben Verlauf aufwiesen, und ein Vergleich der übrigen zugehörigen Parameter. Bei beiden Athleten waren die VO_2 -Werte identisch. Im Zusammenhang mit dem gleichen Verlauf der LLK wurde daraus die gleiche Ausdauerleistungsfähigkeit diagnostiziert. Allerdings wurden bei Athlet A sowohl eine höhere VO_{2max} als auch eine höhere maximale Laktatbildungsrate und damit eine bessere Sprintfähigkeit festgestellt. Als weitere Ergebnisse aus den Untersuchungen des Probandenkollektivs leiten die Wissenschaftler ab, dass aus einer Erhöhung der VO_{2max} eine Rechtsverschiebung der LLK erfolgt, ohne dass es zu einem flacheren Verlauf kommt. Weiterhin ergab sich eine Linksverschiebung der LLK bei gleicher VO_{2max} und VO_2 aber höherer maximaler Laktatbildungsrate. Neben einer höheren VO_{2max} als mögliche Ursache einer

Rechtsverschiebung fanden die Autoren aber auch eine reduzierte maximale Laktatbildungsrate.

Die Untersuchungen zeigen einerseits, dass gleiche LLK unter unterschiedlichen Stoffwechselverhältnissen erreicht werden können (BLEICHER et al. 1998, S. 102). Andererseits machen sie deutlich, dass allein aus veränderten Kurvenverläufen (Links-/ Rechtsverschiebung der LLK) nicht auf zugrunde liegende Ursachen geschlossen werden kann (ebda 1999, S. 83). Vor dem Hintergrund unbekannter Stoffwechselzusammenhänge erscheint eine zielgerichtete Trainingssteuerung, die den individuellen Metabolismus berücksichtigt, damit nicht möglich. BLEICHER und Kollegen (1999, S. 83) empfehlen zum Zwecke einer widerspruchsfreien Analyse die Bestimmung mehrerer Parameter in unterschiedlichen Tests: einerseits sollen durch einen spiroergometrischen Stufentests die LLK und der VO_2 -Verlauf ermittelt werden. Andererseits soll in einem Maximaltest die VO_{2max} bestimmt werden. Zur Bestimmung der maximalen Laktatbildungsrate legen sie einen Sprinttest mit kurzen Belastungszeiten (7 - 10 s) nahe.

Auch RÖCKER und DICKHUTH (1996, S. 48) kritisieren die reine Laktatdiagnostik und nennen als Problempunkt die fehlende physiologische Begründbarkeit der angewendeten Verfahren. Weiterhin sind sie der Meinung, dass im Bereich der Dauerleistungsgrenze keine messbare Schwelle existiert (ebda 1994, S. 32). Verschiedene Autoren bekräftigen die Vielfalt der Faktoren, von denen die messbare Blutlaktatkonzentration abhängt (vgl. BROOKS 1985, 1987; vgl. DAVIS 1985). SHEPARD (1993, S. 215) nennt Unterschiede in der lokalen Muskelperfusion und -kapillarversorgung sowie in der intramuskulären Enzymkonzentration einerseits und die Diffusionsgeschwindigkeit des Laktats aus der Muskulatur in das Blut andererseits. BERGH und EKBLÖM (1979) sowie BLOMSTRAND und Mitarbeiter (1984) beschreiben eine verlangsamte Diffusion unter Kältebedingungen. Des Weiteren nennt SHEPARD (1983) die individuelle Abbaugeschwindigkeit in wenig belasteten Muskeln und der Leber als Einflussfaktor. An anderer Stelle führen SHEPARD und Kollegen (1989) die Abhängigkeit der Blutlaktatkonzentration von der Masse der arbeitenden Muskulatur sowie vom Blutvolumen als Verteilungsraum an. Schließlich misst LAMMONT (1987) der Ausscheidung von Milchsäure über Schweiß und Nieren eine nicht zu unterschätzende Bedeutung zu.

8 Spiroergometrische Leistungsdiagnostik

8.1 Hintergrund

Wie in Kap. 5.4 beschrieben, hat auch die Spiroergometrische Leistungsdiagnostik die Bestimmung von „Schwellenwerten“ zum Ziel. Während einer stufenförmig oder stetig (rampenförmig) ansteigenden Belastung werden kontinuierlich die Atemgase des Probanden auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Es werden neben der Atemfrequenz das Atemminutenvolumen (AMV), der Sauerstoffpartialdruck (P_{etO_2}) und der Kohlendioxidpartialdruck (P_{etCO_2}) der Ausatemluft gemessen. In Verbindung mit der Gaszusammensetzung der Inspirationsluft lassen sich aus diesen Werten weitere ventilatorische Parameter berechnen (vgl. Kap. 5.2): Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), Kohlendioxidabgabe ($\dot{V}CO_2$), respiratorischer Quotient (RQ), Atemäquivalent für Sauerstoff ($A\ddot{A}O_2$) und Atemäquivalent für Kohlendioxid ($A\ddot{A}CO_2$). Diese Werte werden in Koordinatensystemen gegeneinander aufgetragen (vgl. Abb.3, S. 21). Anhand der konstruierten Kurven lassen sich sog. „Schwellen“ bestimmen, mit Hilfe derer auf die Art der Energiebereitstellung und die metabolischen Verhältnisse im Körper geschlossen wird. Diese Schwellen zeichnen sich als Knickpunkte in den Kurvenverläufen ab und stellen insofern eine Steigungsänderung dar. Eine gängige und zuverlässige Methode zur Bestimmung dieser „Knickpunkte“ ist laut WASSERMANN (1987) und dem Arbeitskreis um MEYER (1999) die V-Slope-Methode nach BEAVER und Mitarbeitern (1986), wie sie in Abb. 3 (S. 21) dargestellt ist. Gemäß dieser Vorgehensweise werden zwei zu untersuchende Parameter gegeneinander aufgetragen und im unteren linearen Bereich der Kurve die gemessenen Werte durch eine Regressionsgerade beschrieben. Gleiches gilt für den oberen Teil der Kurve. Der Schnittpunkt der beiden Geraden stellt die ventilatorische Schwelle (VT) dar (Abb. 3 A). Im oberen Teil der Kurve lässt sich ein zweiter „Knickpunkt“, der respiratorische Kompensationspunkt (RCP) ermitteln. Die Bestimmung der Schwellen kann rechnergestützt durch statistische Programme oder optisch und grafisch durch den Untersucher geschehen. Im Anschluss können die ermittelten Schwellen in ein Diagramm übertragen werden, das wie in Abb. 16 (S. 68) die Parameter im Zeitverlauf zeigt. Anhand der parallel zur Untersuchung do-

kumentierten Herzfrequenzen und Belastungen erfolgt eine Zuordnung zur VT bzw. zum RCP.

8.1.1 Ventilatorische Schwelle

WASSERMANN und McILROY prägten bereits 1964 den Begriff der „anaerobic threshold“, auch „ventilatorische Schwelle“ (VT) genannt. Nach WASSERMANN und Mitarbeitern (1973) ist diese Schwelle eine Folge des ersten Anstiegs der Laktatkonzentration bei zunehmender Belastung. Auch andere Autoren vertreten die Meinung, dass eine Pufferung der anfallenden Milchsäure über Bicarbonat erfolgt, wodurch vermehrt Kohlendioxid anfällt und abgeatmet werden muss (vgl. SIEGENTHALER 1986; vgl. WHIPP 1987; vgl. SCHMIDT und THEWS 1990). Dieses durch Pufferungsvorgänge entstehende Kohlendioxid wird „nichtmetabolisches“ Kohlendioxid genannt (RÖCKER und DICKHUTH 1996, S. 46) und führt zu einem Anstieg der VCO_2 . WASSERMANN und Mitarbeiter (1987) nennen vier Kriterien zur Festlegung der ventilatorischen Schwelle, die Folge des vermehrt anfallenden Kohlendioxids sind:

- Beim Auftragen der VCO_2 gegen die VO_2 , wie in Abb. 3A dargestellt, verliert die Beziehung zwischen den Parametern ihre Linearität und der Verlauf der VCO_2 wird steiler.
- Das vermehrt anfallende Kohlendioxid führt zu einer Hyperventilation. Dadurch wächst das AMV proportional zur VCO_2 , während die Zunahme gegenüber VO_2 überproportional ist (Abb. 17). Das $A\ddot{A}O_2$ nimmt folglich zu (vgl. SIEGENTHALER 1986; vgl. WHIPP 1987; vgl. SCHMIDT und THEWS 1990).
- Gleichzeitig geht mit der erhöhten Ventilation eine Zunahme des $P_{et}O_2$ einher, während der $P_{et}CO_2$ konstant bleibt (vgl. WASSERMANN und McILROY 1964).

- Der RQ als Quotient aus VCO_2 und VO_2 wird größer. Anhand des Kurvenverlaufs der RQ-Werte gegenüber der Zeit kann die ventilatorische Schwelle durch eine veränderte Steigung bestimmt werden. Neben dem Arbeitskreis um WASSERMANN (1987) betonen mehrere Autoren, dass der RQ an der Schwelle kleiner als 1 (ca. 0.90 – 0.96) ist (vgl. SIEGENTHALER 1986; vgl. WHIPP 1987; vgl. SCHMIDT und THEWS 1990).

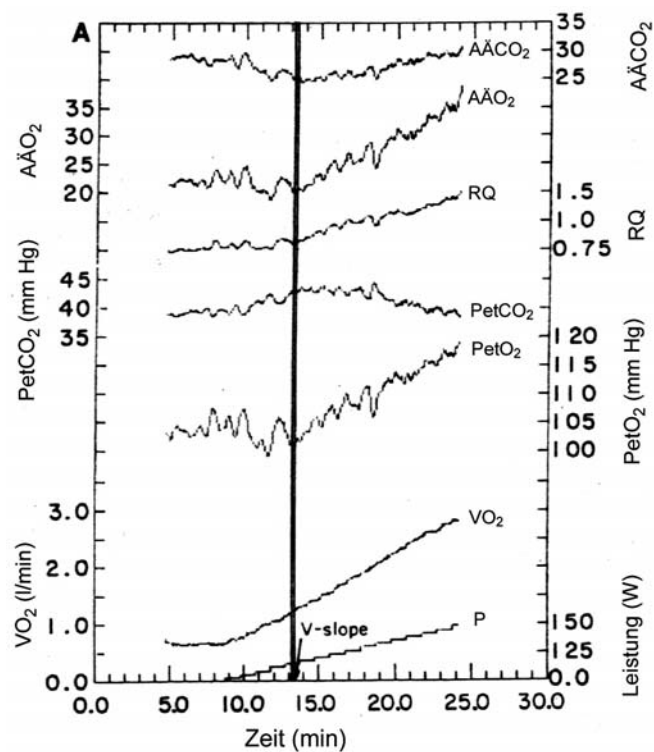


Abb.16: Atemparameter eines Probanden während ansteigender Belastung (P), Sauerstoffaufnahme (VO_2), endexpiratorischer Sauerstoffpartialdruck ($PetO_2$), endexpiratorischer Kohlendioxidpartialdruck ($PetCO_2$), respiratorischer Quotient (RQ), Atemäquivalente für Sauerstoff ($A\ddot{A}O_2$) und Kohlendioxid ($A\ddot{A}CO_2$), die senkrechte Linie kennzeichnet die mittels V-Slope-Methode anhand verschiedener Parameter gefundene ventilatorische Schwelle [nach BEAVER et al. 1986, S. 2025].

Wie oben dargestellt, fällt die VT mit dem ersten Laktatanstieg im Blut zusammen. Daher bekräftigen MEYER und Mitarbeiter (1999, S. 87), dass die VT gleichbedeutend ist mit der „aeroben Schwelle“ nach KINDERMANN und

Mitarbeitern (1978; vgl. Kap. 5.1). Demnach liegt eine mit der VT korrespondierende Belastung im oberen Bereich des kompensatorischen bzw. im unteren Bereich des Trainings der Grundlagenausdauer (vgl. Kap. 4).

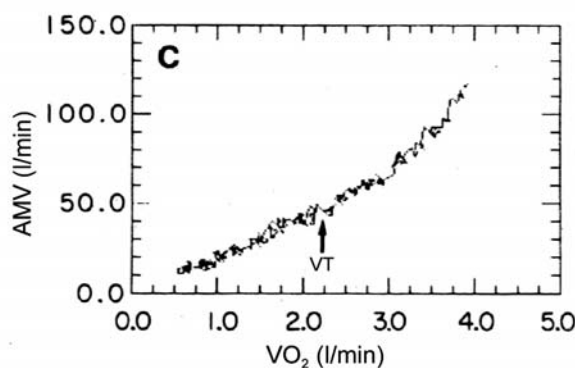


Abb.17: AMV aufgetragen gegen VO₂: Kurve verläuft im ersten Teil linear, danach steigt das AMV überproportional an, dieser „Knick“ markiert die VT [nach BEAVER et al. 1986, S. 2022].

8.1.2 Respiratorischer Kompensationspunkt

Als weitere Schwelle wird der sog. „respiratorischen Kompensationspunkt“ (RCP) angesehen. Nach WASSERMANN und WHIPP (1975), REINHARD und Mitarbeitern (1979, S. 38) sowie SIMON und Mitarbeiter (1983, S. 13) stellt der RCP den überproportionalen Anstieg des AMV gegenüber der VCO₂ dar, was gleichbedeutend ist mit einem Anstieg des A \ddot{A} CO₂. Die Ursache für die zunehmende Ventilation wird darin gesehen, dass die Pufferkapazität des Blutes erschöpft ist und es zu einem Abfall des Blut-pH-Wertes kommt. Die Ermittlung dieses Punktes kann, wie in Abb. 3 B zu sehen ist, mittels V-Slope-Methode rechnergestützt oder optisch und grafisch erfolgen. Belastungen im Bereich des RCP sehen MEYER und Mitarbeiter im Bereich des Max-Lass bzw. leicht darüber und bezeichnen ihn als geeigneten Richtwert für ein Zeitfahren über 60 Minuten (1999, S. 88).

8.2 Spiroergometrie in der Praxis

8.2.1 Untersuchungspraxis

Die Institute, die dieses Verfahren laut Umfrage anwenden ($N = 13$), wählen unterschiedliche Belastungsprotokolle. Am verbreitetsten ist, wie in der laktatgestützten Leistungsdiagnostik, ein stufenförmiger Anstieg mit 3 bis 5 Minuten pro Stufe. Die Werte der relative Belastungssteigerung streuen in einem Bereich zwischen 6,67 und 26,67 W/min. Nur ein Institut wählt einen rampenförmigen Belastungsanstieg, der umgerechnet pro Minute eine Leistungssteigerung von 30 W/min vorsieht. Die Umfrage ergab weiterhin, wie dem Anhang zu entnehmen ist, dass alle 13 Institute eine aerobe Schwelle und eine anaerobe Schwelle bestimmen. Die Kriterien, die zur Bestimmung der beiden Schwellen angewendet werden, sind unterschiedlich: neun Institute nannten explizit die ventilatorische Schwelle nach Wassermann mit den vier Kriterien als Maßstab zur Festlegung der aeroben Schwelle. Ein weiteres Institut gab als Merkmal den ersten Anstieg der Laktatkonzentration über den Ruhewert an und sprach damit indirekt die VT an. Institut Nr. 9 nannte als Kennzeichen der aeroben Schwelle das Minimum des Quotienten aus Ventilation und Leistung. Dies entspricht, wie in Kap. 5.1 gezeigt, dem PoW und der Definition der „anaerobic threshold“ nach Wassermann und ist somit ebenfalls identisch mit der ventilatorischen Schwelle. Für Institut Nr. 49 ist ein RQ gleich 0,75 das Kriterium zur Festlegung der aeroben Schwelle.

Bezogen auf die Bestimmung der anaeroben Schwelle nannten acht Institute den überproportionalen Anstieg der Ventilation gegenüber der VCO_2 als Merkmal. Dies entspricht der obigen Definition des RCP. Zwei weitere sehen die anaerobe Schwelle bei einem RQ gleich 1, drei andere bei einem RQ unmittelbar größer als 1 erreicht.

Neben den genannten Schwellen ist im Rahmen der Spiroergometrie als weiterer interessanter und laut Umfrage von einigen Instituten gemessener Parameter die maximal mögliche Sauerstoffaufnahme der Sportler zu nennen. Wie in Kap. 5.1 erwähnt, wird die VO_{2max} als Bruttokriterium der Ausdauerleistungsfähigkeit bezeichnet (vgl. auch Kap. 2.3 zur Bedeutung der VO_{2max} für Lang-

zeitausdauersportarten). MEYER und Mitarbeiter bezeichnen diese Größe darüber hinaus als „eine gute Orientierung über das individuelle Leistungsvermögen“ (1999, S. 82). Um die tatsächlich mögliche Sauerstoffaufnahmefähigkeit eines Probanden zu messen, ist dessen Ausbelastung notwendig. Als Kriterium dieser Ausbelastung nennen SHEPARD (1993, S. 191) sowie MEYER und Mitarbeiter (1999, S. 83) ein sog. „levelling off“ in der Sauerstoffaufnahme. Darunter wird ein fehlender Anstieg der VO_2 trotz ansteigender Belastung verstanden. Alternativ werden von MEYER (ebda) für den Ausdauerbereich RQ-Werte größer 1,08 - 1,1 und $\dot{A}\ddot{A}O_2$ größer 32 l/min genannt, da laut SHEPARD (1993, S. 192) das „levelling off“ in der Praxis nicht immer beobachtet wird. Insgesamt elf der befragten Institute bestimmen während der Untersuchungen gleichzeitig die maximale Sauerstoffaufnahmefähigkeit der Sportler. Interessanterweise bestimmen nur vier von diesen elf aerobe und anaerobe Schwellen mittels Spiroergometrie. Die übrigen sieben Institute ermitteln die Schwelle in laktatgestützten Verfahren und bedienen sich der Spiroergometrie ausschließlich zur Bestimmung der VO_{2max} . Da die VO_{2max} in der Trainingssteuerung nur eine untergeordnete Rolle spielt und submaximale Parameter zuverlässiger einsetzbar sind (vgl. WASSERMANN et al. 1973; STEGMANN et al. 1981; KUMAGAI et al. 1982; TANAKA und MATSUURA 1984; RÖCKER et al. 1998), soll nur eine kurze Betrachtung der Bestimmung der VO_{2max} erfolgen.

8.2.2 Mögliche Probleme der Spiroergometrie in der Praxis

Den spiroergometrischen Verfahren wird im Rahmen der Leistungsdiagnostik erst seit einigen Jahren wieder zunehmendes Interesse zuteil (vgl. Kap. 5.2; 5.3). Demgegenüber stehen Forschungen aus mehreren Jahrzehnten in der Laktatdiagnostik. Es ist daher leicht nachvollziehbar, dass die Informationslage bzgl. spiroergometrischer Verfahren ungleich ungünstiger ist als bzgl. der Laktatdiagnostik. Vorhandene Studien beziehen sich zum größten Teil auf Fragestellungen im Zusammenhang mit pathologischen Erscheinungen der Angiologie und Pneumologie. Bei der Recherche für diese Arbeit konnten nur wenige Studien gefunden werden, die Aspekte der spiroergometrischen Schwellenbestimmung (VT, RCP) zum Gegenstand haben. Dies legt die Vermutung nahe,

dass die sportmedizinische Leistungsdiagnostik mittels spiroergometrischer Verfahren nicht in dem Maße etabliert ist wie die Laktatdiagnostik. Die Umfrage, die dieser Arbeit zugrunde liegt, bekräftigt diese These.

8.2.2.1 Zuverlässigkeit der Schwellenkriterien

WASSERMANN und Mitarbeiter (1987) weisen auf verschiedene Schwierigkeiten bei der Schwellenermittlung hin: Zum einen nennt der Arbeitskreis unregelmäßige Atemmuster der Probanden, die es schwierig machen, aus den Kurvenverläufen von $\dot{A}\dot{A}O_2$ und $P_{et}O_2$ die ventilatorische Schwelle zu bestimmen. Zum anderen wird nach Angaben der Autoren die Identifikation der Schwellenwerte durch pulmonale Erkrankungen erschwert, da unter Umständen normale Anpassungsreaktionen der Ventilation an die Belastungsazidose ausbleiben. Diese stellen jedoch die Grundlage der Schwellenbestimmung dar. Als weiteren problematischen Aspekt verweist der Arbeitskreis darauf, dass es durch die Wahl zu milder Belastungsprotokolle nur langsam zu einer metabolischen Azidose kommen kann, wodurch „Knickpunkte“ abgeflacht und verdeckt werden können.

Die Schwierigkeiten beim Auffinden der Schwellen werden auch in einer Untersuchung von BEAVER und Mitarbeitern (1986) deutlich. Zehn Probanden führten nach anfänglichem Aufwärmen im Leerlauf eine minütlich um 15 W bis zur Erschöpfung ansteigende Belastung auf dem Fahrradergometer durch. Die ermittelten VO_2 -Kurven wurden sechs verschiedenen Untersuchern zur Bestimmung der VT vorgelegt. Nur ein Untersucher identifizierte bei allen zehn Probanden die ventilatorische Schwelle. Zwei Untersucher stellten bei 7/10 Probanden die VT fest. Bei nur 5/10 konnten alle sechs Untersucher die VT ermitteln (ebda S. 2025).

Verschiedene Autoren (BEAVER et al. 1986, S. 2022; MEYER et al. 1999, S. 88) geben zu bedenken, dass die VT ungleich schwieriger zu identifizieren ist als der RCP. In den Kurven des $\dot{A}\dot{A}O_2$ und $\dot{A}\dot{A}CO_2$ ist der „Knick“ im Bereich des RCP „oft viel deutlicher als jener an der VT“, so dass bei oberflächlicher Betrachtung der RCP fälschlicherweise als VT interpretiert werden kann

(MEYER et al. 1999, S. 88). Eine Trainingssteuerung auf dieser Basis führt zur Überlastung des Sportlers.

Für die zur Ermittlung der VT relevanten vier Kriterien nach Wassermann untersuchten GITT und Mitarbeiter (1994) anhand von 128 Spiroergometrieverfahren an Gesunden und an Patienten die manuelle Bestimmbarkeit der VT. Die zuverlässigste Bestimmungsmöglichkeit waren in dieser Studie das Auftragen der VCO_2 gegen die VO_2 (V-Slope-Methode) und die Zunahme der $PetO_2$ -Werte. In 119 von 128 Fällen (92,9 %) konnte die VT mittels V-Slope, in 124 Fällen (96,9 %) durch die Änderung der $PetO_2$ bestimmt werden. Die Zunahme des RQ wurde bei 107 Probanden (83,6 %), eine Zunahme des $A\ddot{A}O_2$ bei 100 Untersuchten (78,1 %) festgestellt. 86 Fälle (67,2 %) zeigten alle vier, 24 Probanden (19,8 %) drei Kriterien gleichzeitig. Die übrigen Fälle wiesen ein (2,3 %) bzw. zwei (11,7 %) der charakteristischen Kriterien auf. In der Summe konnte somit in 110 von 128 Fällen mittels drei Kriterien die VT bestimmt werden. Unter Berücksichtigung aller Kriterien war eine Bestimmung zu 100 % möglich. Andere Untersuchungsgruppen ermittelten ebenfalls hohe Bestimmungsraten. Mittels V-Slope-Methode konnten WERNERMEYER und Mitarbeiter (1991) die VT in 97 % ermitteln, der Arbeitskreis um COUTHINO (1990) sogar in 100 % der Fälle. Die Bestimmung der VT mittels Verlauf des $A\ddot{A}O_2$ führte bei beiden Gruppen in 86 % der Fälle zum Erfolg.

Die Studien belegen, dass eine Identifikation der VT anhand nur eines Parameters schwierig ist. Dies gilt insbesondere für den Parameter $A\ddot{A}O_2$. Dennoch zeigt die letztgenannte Studie, dass trotz möglicher intraindividuelle Probleme (pulmonale Erkrankungen) der Probanden, eine Bestimmung der VT sehr zuverlässig möglich ist, wenn alle vier Kriterien in die Auswertung einbezogen werden. Dadurch wird auch die Gefahr einer fälschlichen Interpretation des RCP als ventilatorischer Schwelle eingeschränkt.

8.2.2.2 Einfluss des Belastungsprotokolls auf die Schwellenbestimmung

Für die spiromergoetrischen Untersuchungsverfahren liegen kaum Studien vor, und somit bleibt ungewiss, welchen Einfluss das Belastungsprotokoll auf die für eine Schwellenbestimmung notwendigen Ventilationsparameter hat. Daher

erfolgt eine Darstellung der Empfehlungen zur Durchführung der Spiroergometrie verschiedener Autoren.

MEYER und Mitarbeiter (1999, S. 86) plädieren für ein rampenförmiges Protokoll mit gleitendem Anstieg oder alternativ für Stufen mit sehr kurzer Dauer, ohne nähere Angaben zu machen. Minütliche Steigerungen empfehlen WASSERMANN und Mitarbeiter (1987) sowie die Arbeitsgruppe um WINTER (1994). Um eine Sättigung des Gewebes mit CO₂ sicherzustellen, betonen WASSERMANN und Mitarbeiter (1999) für den Beginn des Tests die Notwendigkeit einer sehr leichten konstanten Belastung für etwa 3 Minuten. Wird auf diese Vorsättigung verzichtet, besteht die Gefahr, dass der auf die Sättigung folgende überproportionale Anstieg („Knickpunkt“) der VCO₂ als VT interpretiert wird (vgl. ebda). MEYER und Mitarbeiter (1999, S. 86) weisen darauf hin, dass im folgenden die relative Belastungssteigerung nicht zu niedrig ausfallen darf, um zu verhindern, dass VT und RCP „verwischt“ werden. Empfohlen wird eine Dauer des Belastungstests von 10-12 Minuten bis zur Erschöpfung mit entsprechender personenabhängiger Leistungssteigerung. Die Arbeitsgruppe um WINTER (1994, S. 23) gibt für trainierte Gesunde eine Leistungssteigerung von 50 W/min, für weniger Trainierte von 35 W/min vor. Die Wissenschaftler um MEYER vertreten die Meinung, dass die in der Laktatdiagnostik üblichen Belastungsprotokolle in Stufenform für spiroergometrische Verfahren wenig geeignet sind, da es durch die Stufensprünge häufig zu Artefakten kommt (1999, S. 86). Die Gefahr dabei liegt in einer falschen Interpretation der Artefakte als VT, da diese als Knickpunkte im Kurvenverlauf auffallen und für „Schwellen“ gehalten werden können.

Für die Übertragung der VT und des RCP auf korrespondierende Leistungen zur Trainingssteuerung weisen WASSERMANN und Mitarbeiter (1999) auf die Zeitkonstante der VO₂ hin. Ähnlich wie bei der Laktatkinetik muss daher beachtet werden, dass eine Anpassung der Ventilation an die Belastung nicht unmittelbar, sondern zeitlich versetzt erfolgt. Im Fall der VO₂ nennt WASSERMANN (ebda) 40 s als Zeitkonstante, während HECK (1990a, S. 113) eine Größenordnung von ca. 30 s angibt. Dementsprechend müssen bei rampenförmigen Belastungsprotokollen den Schwellen Leistungen zugeordnet werden, die zeitlich vorher liegen. Bei der Zuordnung von Schwellen zur Herzfrequenz muss ebenfalls die Zeitkonstante der Herzfrequenz mitberücksichtigt werden,

die HECK (ebda) mit 10 s und JESCHKE (1998) mit ca. 30 s angeben. Die fehlende Einigkeit in den Literaturangaben dürfte in der Praxis bereits zu unterschiedlichen Zuordnungen führen, über deren Größenordnung mit Gewissheit keine Angabe gemacht werden kann.

Aufgrund fehlender Forschungen in diesem Bereich lassen sich auch nur vorsichtige Vermutungen bzgl. der in der Praxis angewandten Belastungsprotokolle anstellen (vgl. Tab. 2, S. 26). So folgt nur eines der befragten Institute der Empfehlung, die Schwellen mittels eines rampenförmigen Belastungsprotokolls zu bestimmen. Die übrigen wählen stufenförmige Belastungen, wodurch nach MEYER und Mitarbeiter (1999) Artefakte wahrscheinlich sind und eine Fehlinterpretation möglich wird. Darüber hinaus ist mit den Protokollen, die einer relativen Belastungssteigerung von 6,67 bis 16,67 W/min entsprechen eine Ausbelastung eines trainierten Freizeitsportlers in 10 bis 12 Minuten unwahrscheinlich, d.h. das Protokoll ist zu „mild“ gewählt. Die beiden darüber liegenden Belastungsanstiege mit 26,67 und 30,00 W/min liegen ebenfalls noch unter den Empfehlungen der Arbeitsgruppe um WINTER (1994, S. 23: 50 bzw. 35 W/min).

Der Grund für die stufenförmige Belastungssteigerung dürfte in der parallel durchgeführten Laktatdiagnostik liegen, die bis auf ein Institut zur Absicherung der Ventilationskurve erhoben wird. Es stellt sich die grundsätzliche Frage, ob die Vorgehensweise der Institute erfolgsversprechend sein kann, die ermittelten und berechneten Atemgaskurven mit der LLK auf Schlüssigkeit zu überprüfen. Denn in Kap. 7.2.3 wurde dargestellt, dass wegen der langsamen Laktatkinetik eine lange Stufendauer anzustreben ist, während für die Spiroergometrie möglichst kurze Stufen empfohlen werden. Ob die von den Instituten gewählten Stufenlängen einen bewussten Kompromiss darstellen, und wie mit der aufgezeigten Problematik umgegangen wird, geht aus der Umfrage nicht hervor. Zudem kann nicht sicher behauptet werden, welchen Einfluss diese von den Empfehlungen abweichenden Vorgehensweisen auf die spiroergometrische Schwellenbestimmung haben. Einen möglichen Hinweis gibt eine Untersuchung, die von SIMON und Mitarbeitern (1983) durchgeführt wurde. Fünf gesunde Probanden wurden einer ansteigenden stufenförmigen (30 W/min) Fahrradergometerbelastung unterzogen. Aus den gemessenen Atemgaskonzent-

rationen wurden VT und RCP bestimmt. Danach fanden Dauerbelastungen (30 Minuten) mit unterschiedlichen Intensitäten statt: Belastung knapp unterhalb der VT (A), über der VT (B), unter RCP (C), über RCP (D). Parallel wurden die Laktatkonzentrationen zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Alle fünf Probanden konnten die Dauertests A und B mit Belastungen im Bereich der VT beenden. Auch stellte sich bei allen ein Lass ein. Die Dauerbelastungen im Bereich des RCP, C und D, führten in keinem Fall zu einem Lass. Nur drei Testpersonen konnten Test C zu Ende fahren, wohingegen von allen Test D vorzeitig abgebrochen werden musste.

Wegen der Laktatkinetik und des Zusammenhanges des RCP mit zunehmender Laktatkonzentration im Blut vermutet der Arbeitskreis um Simon eine Abhängigkeit des RCP vom Belastungsprotokoll. Dahingegen schließen sie sich bzgl. der Aussagen über die VT den Wissenschaftlern WASSERMANN und WHIPP (1975) an, welche diese für unabhängig vom Belastungsprotokoll halten. Die Probandenzahl der genannten Studie war mit fünf Testpersonen allerdings sehr gering, so dass die Erkenntnisse nicht als gesichert angesehen werden können und weitere Studien zur Bekräftigung ähnliche Ergebnisse hervorbringen müssten.

Die Untersuchung zeigt allerdings noch ein weiteres mögliches Problem im Zusammenhang mit der Bestimmung des RCP: aus der Umfrage geht hervor, dass acht Institute die anaerobe Schwelle und den RCP als identisch ansehen. Weiterhin entspricht die anaerobe Schwelle der Dauerleistungsgrenze. Allerdings gilt dies, wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, nicht für die fünf Testpersonen. Wegen der widersprechenden Ergebnisse dieser Untersuchung von SIMON und Mitarbeitern (1983) und aufgrund der wenigen Studien, die in diesem Zusammenhang vorgenommen wurden, erscheint eine Trainingssteuerung ausgehend vom RCP (= anaerobe Schwelle) als zweifelhaft. Die gleiche Meinung vertreten auch MEYER und Mitarbeiter (1999, S. 88, 90), die darauf hinweisen, dass sich eine Trainingssteuerung auf der Grundlage des RCP bislang nicht etabliert hat und die Interpretation des Punktes spekulativ bleibt, da die empirische Basis für gesicherte Trainingsempfehlungen fehlt.

8.2.2.3 Einfluss des Belastungsprotokolls auf die VO_{2max}

In Kap. 8.2.1 wird dargestellt, dass elf Institute, laut eigener Angaben, während des Belastungstests parallel die maximal mögliche Sauerstoffaufnahme-fähigkeit VO_{2max} bestimmen. Tabelle 6 zeigt eine Aufstellung, mittels welcher unterschiedlichen Belastungssteigerungen dies geschieht. Die relativen Belastungssteigerungen streuen in einem Bereich von 6,67 bis 30,00 W/min.

Institut-Nr. (vgl. Anhang)	Belastungsprotokoll [W – W – min]	Relative Belastungssteigerung [W/min]
21	100 – 20 – 3	6,67
26	100 – 20 – 3	6,67
41	100 – 20 – 3	6,67
28	75 – 25 – 3	8,33
32	100 – 25 – 3	8,33
44	100 – 50 – 5	10,00
18	75 – 25 – 2	12,50
15	80 – 40 – 3	13,33
43	50 – 50 – 3	16,67
40	150 – 80 – 3	26,67
9	Rampe	30,00

Tab.6: Übersicht über Belastungsprotokolle [W – W – min] und relative Belastungssteigerungen [W/min] und Zuordnung zum entsprechenden Institut gemäß Anhang [eigene Darstellung].

Verschiedene Autoren beschreiben einen Einfluss des Belastungsprotokolls auf die VO_{2max} . So fanden POLLOCK und Mitarbeiter (1976) in Untersuchungen heraus, dass mit zunehmender Belastungsdauer die VO_{2max} abnimmt. Als optimale Stufenlänge werden 2 Minuten empfohlen. Gleichermaßen beschreiben JESCHKE und Mitarbeiter (1983) eine abnehmende VO_{2max} mit zunehmender Belastungsdauer. BUCHFÜHRER und Mitarbeiter (1983) fanden ebenfalls niedrigere VO_{2max} -Werte bei sehr kurzer (unter 8 Minuten) und sehr langer Untersuchungsdauer (über 17 Minuten). GRANTSCHAROV und BACHL (1987) ermittelten in kürzeren Belastungstests ebenfalls eine höhere VO_{2max} als in längeren Tests. Vor dem Hintergrund dieser Studien, empfehlen MEYER und Mitarbeiter (1999, S. 83) eine Gesamtbelastungsdauer von 7-15 Minuten.

Damit folgen sie im wesentlichen den Erkenntnissen Grantscharovs und Bachls.

Die Argumentationen der verschiedenen Studien lässt die Vermutung zu, dass es in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit der Probanden höchstens mit den beiden steilsten Belastungsprotokollen der Institute Nr. 9 und 39 (30,00 und 26,67 W/min) möglich ist, die maximal mögliche Sauerstoffaufnahme-fähigkeit zu bestimmen. Bei den übrigen Tests wird eine protokollspezifische maximale VO_2 bestimmt, die aber Grundlage für Aussagen über eine langfristige Leistungsentwicklung sein kann. Bedingung hierfür ist, dass in folgenden Leistungstest dasselbe Belastungsprotokoll gewählt wird. Gerade vor dem Hintergrund der Ergebnisse BLEICHERS und Mitarbeiter (1998, 1998; vgl. Kap. 7.2.5), die zeigen, dass der Verlauf der LLK alleine keinen zweifelsfreien Aufschluss über die metabolischen Verhältnisse bei Belastung gibt, kommt der Ermittlung der $\text{VO}_{2\text{max}}$ eine wichtige Rolle zu. Unklar bleibt jedoch, inwieweit die Institute die protokollspezifische maximale VO_2 in die Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit miteinbeziehen und als Grundlage für die Empfehlung von Trainingsintensitäten ansehen. Welche Bedeutung der Differenz zwischen $\text{VO}_{2\text{max}}$ und protokollspezifischer maximaler VO_2 dabei zukommt, kann nicht beurteilt werden.

8.2.2.4 Einfluss des Ernährungszustandes auf respiratorische Schwellen

Nach Angaben von fünf Instituten entspricht die anaerobe Schwelle einem RQ größer oder gleich 1. Der RQ gibt Information darüber, welche energieliefernden Substanzen oxidiert werden. Bei reinem Fettumsatz hat der RQ einen Wert von 0,7 während er bei reinem Kohlenhydratumsatz 1,0 beträgt (KLINKE und SILBERNAGL 2003, S. 368). Da die Energiegewinnung vom Substratangebot im Körper abhängt, ist denkbar, dass unter Glykogenverarmung, ähnlich wie in der Laktatdiagnostik, andere Schwellenwerte bestimmt werden als mit gefüllten Glykogenspeichern. Indirekt gingen MAASSEN und Mitarbeiter (1989) dieser Frage an zwölf gesunden Testpersonen unterschiedlichen Trainingszustandes nach. Nach Glykogenbeladung und unter glykogenarmen Bedingungen wurden jeweils Tests bei 50 % der $\text{VO}_{2\text{max}}$ und 90 % der Maximalleistung

bis zur Erschöpfung durchgeführt und parallel die VO_2 ermittelt. Als Ergebnis stellte der Arbeitskreis fest, dass die Sauerstoffaufnahme unter glykogenarmen Bedingungen während der Belastung schneller anstieg als in glykogenbeladenem Zustand und die Sauerstoffaufnahme zu jedem Zeitpunkt größer war.

LEHNERTZ und Mitarbeiter (1989) untersuchten zehn Personen in ansteigenden Fahrradergometertests (10 W/ 30 s) zweimal innerhalb von sieben Tagen. Der erste Test fand nach kohlenhydratreicher Ernährung (A) der zweite Test nach Glykogenverarmung (B) durch intensives Training statt. Parallel wurden spirometrische Messungen durchgeführt. In Test B ergaben sich gegenüber Test A folgende Ergebnisse: das AMV stieg steiler und die Beziehung zwischen AMV und VO_2 verlor bereits bei niedrigeren VO_2 -Werten die Linearität; bei vergleichbarer VCO_2 erfolgte eine größere Zunahme des AMV, was gleichbedeutend ist mit einem höheren $\dot{A}\ddot{\text{A}}\text{CO}_2$. Der PetCO_2 war nach der Glykogenverarmung erniedrigt. Darüber hinaus wurden eine leicht erhöhte VO_2 sowie deutlich erniedrigte O_2 -Ein-/Ausatmungsdifferenzen beobachtet, welche sich in einem erhöhten PetO_2 widerspiegeln. Weiterhin wurde festgestellt, dass der RQ bei Test B niedriger als in Test A war. Einen abgesenkten RQ bei Maximalleistung stellten PHINNEY und Mitarbeiter (1983) auch nach fettreicher Diät fest. In Einzelfällen lag der Wert für den RQ unter 0,9. Auch der Arbeitskreis um FRÖHLICH (1989, S. 312) leitete aus der bereits beschriebenen Untersuchung (vgl. Kap. 7.2.4) ab, dass der RQ unter glykogenarmen Bedingungen hochsignifikant erniedrigt ist, was auf den verringerten Umsatz von Kohlenhydraten und eine erhöhte Utilisation von Fettsäuren zurückzuführen ist. Eine parallele Bestimmung respiratorischer Schwellen fand während der Tests nicht statt, da die ursprünglichen Fragestellungen in eine andere Richtung gingen.

Allerdings zeigen die Studien, dass respiratorische Schwellen, die mittels RQ identifiziert werden, vom Ernährungszustand abhängig sind und, ähnlich wie fixe Laktatschwellenwerte, die Dauerleistungsgrenze nur unter Umständen richtig angeben. Es ist ebenso denkbar, dass die anaerobe Schwelle auf dieser Grundlage über- oder unterschätzt wird. Zwar vermuten BLEICHER und Mitarbeiter (1998, S. 99), dass sich der RQ im Bereich der anaeroben Schwelle einem Wert von 1 nähert, da die Fettsäureoxidation zu Gunsten der Kohlenhydratverbrennung zurückgedrängt wird. Allerdings wurden in der Literatur keine

Hinweise darauf gefunden, dass eine korrespondierende Leistung tatsächlich die Dauerleistungsgrenze darstellt. Insofern müsste durch weitere Studien, vorzugsweise mittels Dauerversuche, die empirische Basis zur Beurteilung dieser These geschaffen werden.

Aus einer genaueren Betrachtung der dargestellten Ergebnisse LEHNERTZ' und seiner Mitarbeiter (1989) lässt sich unter Beachtung der respiratorischen Schwellenkriterien (vgl. Kap. 8.1.1 und 8.1.2) ein Einfluss auf die respiratorischen Schwellen ableiten: demnach würde ein (früherer) Verlust der linearen Beziehung zwischen AMV und VO_2 bei niedrigeren VO_2 -Werten zu einer erniedrigten VT führen (vgl. Abb. 17, S. 69). Bezogen auf die Trainingssteuerung ist eine Unterforderung die Folge. Die größere Zunahme des AMV bei vergleichbarer VCO_2 führt außerdem zu einem Anstieg des $\text{A}\ddot{\text{A}}\text{CO}_2$. Dieser Anstieg ist, wie in Kap. 8.1.2 dargestellt, Kriterium für den RCP. Damit wird ersichtlich, dass unter dem Einfluss der Ernährung die richtige Interpretation der Atemgaskurven und die Ermittlung von VT und RCP erschwert sein können. Schließlich ist auch der Hintergrund, der Institut Nr. 49 die VT bei einem RQ von 0,75 festlegen lässt, aus der Umfrage nicht ersichtlich. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Wertebereich von 0,90 – 0,96, den mehrere Autoren nennen (vgl. SIEGENTHALER 1986; WASSERMANN et al. 1987; vgl. WHIPP 1987; vgl. SCHMIDT und THEWS 1990).

9 Fazit

Abschließend werden die zu Beginn der Arbeit aufgeworfenen Fragestellungen nochmals aufgegriffen und resümierend beantwortet.

Bezüglich der Frage, *welche leistungsdiagnostischen Verfahren aktuell durchgeführt werden*, ermöglicht die durchgeführte Umfrage einen guten Einblick in die Praxis der Leistungsdiagnostik. Es konnte gezeigt werden, dass bzgl. der leistungsdiagnostischen Verfahren im Straßenradspport unter den befragten Diagnostikinstiuten große Uneinigkeit herrscht. Dies spiegelt sich in der Vielfalt der Schwellenbestimmungsmethoden wider, welche durch die große Anzahl an unterschiedlichen Belastungsprotokollen noch gesteigert wird. In der Praxis führt dieser Sachverhalt dazu, dass ein Sportler, der von verschiedenen Instiuten mittels derselben Schwellenbestimmungsmethode getestet wird, unterschiedliche Vorgaben zur Trainingssteuerung erhält. Die Umfrage belegt weiterhin, dass in der Praxis die laktatgestützte Leistungsdiagnostik eine größere Bedeutung hat als die respiratorische Schwellenbestimmung. Im Vergleich der aktuell angewandten Verfahren mit den ursprünglich beschriebenen Methoden (Pausendauer, Belastungsprotokoll) fallen einerseits große Abweichungen hinsichtlich der Testdurchführung auf, andererseits die teils nicht auf Validität geprüfte Übertragung von Schwellenwerten (Laktatkonzentrationen) aus anderen Sportarten.

Die Frage danach, *welche der angewandten Verfahren sich zur Trainingssteuerung eignen*, kann abschließend nicht sicher beantwortet werden. Aus der Argumentation der Arbeit kann jedoch abgeleitet werden, dass eine Vielzahl der angewandten Verfahren die Leistungsfähigkeit der Sportler falsch einschätzt. An zahlreichen Studien wurde gezeigt, dass die Ermittlung der Schwellen von vielen Faktoren abhängig ist, die einerseits mit der Testdurchführung zusammenhängen, andererseits in der Testperson selbst begründet sind. Direkte Empfehlungen, welche Verfahren in Verbindung mit welchem Testprotokoll zur Trainingssteuerung geeignet oder ungeeignet sind, sind daher zum einen wegen der Vielfalt der Einflussfaktoren nicht möglich. Zum anderen waren die Probandengruppen, mit denen Studien durchgeführt wurden teils sehr klein oder

bestimmte Sachverhalte wurden nicht untersucht. Anregungen zu weiteren wünschenswerten Untersuchungen wurden im Text gegeben. Dennoch können grundsätzliche Aussagen zu den Verfahren getroffen werden:

Bezüglich der Laktatdiagnostik lässt sich feststellen, dass sie zwar Einblicke in die Stoffwechselforgänge ermöglicht, aber keine genaue Betrachtung von Verteilungs- und Abbauvorgängen erlaubt. Dies stellt eine mögliche Erklärung der großen Streubreite der MaxLass-Werte dar, welche die fixen oder anteilig fixen Schwellenmodelle (Mader-, 3 mmol/l-, Simon- und Dickhuth-Schwelle) für die Trainingssteuerung nur bedingt geeignet erscheinen lässt, da Schwellen nur zufällig richtig identifiziert werden. Zudem sollte bei diesen Methoden auf langsame Belastungsanstiege geachtet werden, wenn ein Laktat-steady-state erreicht werden soll. Unter dem Aspekt der Streuung der Laktatkonzentrationen sind die Methoden nach Keul und Stegmann sowie die Bestimmung der Laktatsenke zweckmäßiger, da sie einen größeren Laktatbereich abdecken. Allerdings müssen auch hier protokoll- und personenspezifische Einflüsse beachtet werden, die in der Arbeit thematisiert wurden. Bezüglich der Abhängigkeit der Schwellen vom Ernährungszustand konnte eine deutliche Beeinflussung für die meisten Verfahren belegt werden. Die Stegmann-Schwelle hingegen scheint nur geringfügig beeinflusst zu werden, während Untersuchungen bzgl. der Laktatsenke deren Unabhängigkeit vom Ernährungszustand belegen. Einschränkend muss jedoch auf die geringe Probandenzahl hingewiesen werden. Weitere Untersuchungen würden hier sicherlich aufschlussreiche Ergebnisse liefern.

Resümierend kann zur Spiroergometrie festgehalten werden, dass dieses Verfahren einen physiologisch besser begründeten Einblick in den Stoffwechsel als die Laktatdiagnostik bietet. Bezogen auf die Praxis wurde jedoch einschränkend herausgefunden, dass die angewandten Belastungsprotokolle stark von allgemeinen Empfehlungen für dieses Verfahren abweichen. Um Fehler in der Analyse der Atemgaskurven, genauer bei der Bestimmung von Steigungsänderungen, zu vermeiden, sollten daher steile rampenförmige oder sehr kurze stufenförmige Belastungsprotokolle gewählt werden. Da auch die Atemgaswerte personenbedingten Einflüssen (Ernährungszustand) unterworfen sind, kann

letztlich mit diesem Verfahren keine zweifelsfreie Bestimmung besonders der anaeroben Schwelle erfolgen. Abschließend muss angemerkt werden, dass im Bereich der Spiroergometrie nur sehr wenige Studien vorliegen, was sich in einer gegenüber der Laktatdiagnostik deutlich ungünstigeren Informationslage zeigt. Deutlich wird dies vor allem in Hinsicht auf die Bedeutung des respiratorischen Kompensationspunktes (RCP) zur Trainingssteuerung. Daher erscheint auch diese Form der Leistungsdiagnostik zur Trainingssteuerung nur eingeschränkt geeignet zu sein. Weitere Untersuchungen besonders bzgl. der anaeroben Schwelle sind wünschenswert und könnten für die Spiroergometrie eine bessere empirische Basis schaffen sowie eine bessere Verwertbarkeit der Daten in der Trainingssteuerung bewirken.

Bei allen Einschränkungen kann zur Beantwortung der dritten Frage (*Für welche Sportlergruppen sind die Verfahren geeignet?*) festgehalten werden, dass die verschiedenen Verfahren dennoch verwertbare Informationen über den Stoffwechsel liefern können:

Es wurde gezeigt, dass Belastungen mit Intensitäten, die knapp über der aeroben Schwelle liegen, wegen der großen Bedeutung des Fettstoffwechsels und wegen großer Trainingsumfänge im Straßenradsport eine besondere Rolle spielen. In diesem Sinne stellt die spiroergometrisch bestimmte ventilatorische Schwelle (VT) einen sinnvollen Parameter dar, weil die Übereinstimmung der aeroben Schwelle und der VT als gesichert gilt. Zur Vermeidung von Überlastungen wird aus diesen Zusammenhängen abgeleitet, dass eine Trainingssteuerung auf der Grundlage dieses Wertes besonders für Gesundheitssportler zweckmäßiger ist als die Steuerung ausgehend von der anaeroben Schwelle. Grundvoraussetzung ist allerdings die zweifelsfreie Identifizierung der VT. Aufgrund der angewandten Belastungsprotokolle kann das wiederum nicht bei jedem Institut als gesichert angenommen werden.

Für leistungsorientierte Sportler eignen sich die angewandten Schwellenmodelle nur bedingt zur Trainingssteuerung, da zur Festlegung von Trainingsbereichen genaue Kenntnisse über individuelle metabolische Zusammenhänge vorliegen müssen. Wegen der vielfältigen, beschriebenen Einflüsse auf den Laktatverlauf, der ungewissen Rolle des RCP in der Trainingssteuerung und der teilweise fragwürdigen Anwendung von Belastungsprotokollen, ist die Ab-

leitung von Trainingsbereichen schwierig. Doch auch hier erhält der Sportler Informationen über metabolische Reaktionen. Für Leistungssportler, deren Körpergefühl durch langjähriges Training für entsprechende Vorgänge sensibilisiert ist, können die Vorgaben der Institute somit Richtwerte darstellen, die individuell im Training überprüft und gegebenenfalls angepasst werden sollten. In Übereinstimmung mit Bleicher wird jedoch ein dreiteiliges Verfahren für zuverlässiger gehalten, durch das in einem Stufentest die LLK sowie der VO_2 -Verlauf, in einem Maximaltest die VO_{2max} und schließlich in einem Sprinttest die maximale Laktatbildungsrate ermittelt werden. Auf diese Weise können im Längsschnitt die Ursachen für veränderte Laktatkurvenverläufe besser beurteilt und die entsprechenden Schlüsse für die Trainingsteuerung gezogen werden.

Für die Zukunft wäre es wünschenswert, wenn allgemein gültige Richtlinien hinsichtlich der Durchführung und Interpretation der Tests vereinbart würden und so die Vielfalt der verschiedenen Verfahren auf einige wenige medizinisch und trainingsphysiologisch sinnvolle Methoden beschränkt würde. Eine Standardisierung könnte eine Vielzahl von Einflüssen ausschalten und würde dazu führen, dass Daten im Längs- und Querschnitt besser verglichen werden können. Um jedoch zweifelsfreie Informationen über den Metabolismus unter Belastung zu erhalten und individuell gesichert Trainingsbereiche ableiten zu können, müssen leistungsdiagnostische Verfahren allerdings aus wesentlich umfangreicheren Belastungsuntersuchungen bestehen als dies aktuell der Fall ist.

10 Zusammenfassung

Leistungsdiagnostische Verfahren sind unter Straßenradsportlern unterschiedlicher Leistungsstärke (Breitensportler bis Leistungssportler) weit verbreitet. Mittels der Leistungsdiagnostik sollen Ausdauerleistungsfähigkeit bestimmt und aus den Ergebnissen Trainingsbereiche für die individuelle Trainingssteuerung abgeleitet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden 49 Leistungsdiagnostikinstitute befragt, auf welche Art und Weise diese leistungsdiagnostische Verfahren durchführen und auswerten. Anhand von vorliegenden Studien erfolgte eine Betrachtung der angewandten Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Trainingssteuerung.

Alle 49 Institute ermitteln in der Leistungsdiagnostik die anaerobe Schwelle als Ausgangspunkt um Trainingsbereiche festzulegen. Zur Anwendung kommen 8 Verfahren: 1. Laktatschwellenmodelle: nach Mader (N = 20), Keul (N = 7), Simon (N = 3), Dickhuth (N = 3), Stegmann (N = 13), 3 mmol/l-Schwelle (N = 2), Laktatsenke (N = 1), 2. respiratorische Schwellenbestimmungsmethode (N = 13). Die Methodenvielfalt erhöht sich durch die Anwendung verschiedener Belastungsprotokolle, so dass sich insgesamt 34 verschiedene Verfahren ergeben.

Studien belegen in einem Bereich von 1,4 – 7,5 mmol/l streuende MaxLass-Werte, so dass fixe oder anteilig fixe Laktatschwellenmodelle nur zufällig die Schwelle richtig angeben. Die Verfahren nach Keul, Stegmann und die Laktatsenke umfassen größere Bereiche als die übrigen Methoden.

Für die Laktatschwellenmethoden zeigen Untersuchungen, dass es von der Kombination des Verfahrens mit dem relativen Belastungsanstieg abhängt, ob im Mittel eine Übereinstimmung der Schwelle mit der Dauerleistungsgrenze erreicht wird. Folgende Kombinationen lassen sich als Empfehlung ableiten: Mader-Schwelle - 5 W/min; 3 mmol/l-Schwelle - 16,67 W/min; Keul-Schwelle bei $\tan \alpha = 0,0549$ mmol/l/Watt - 6,67 bis 8 W/min, bei $\tan \alpha = 0,039$ mmol/l/Watt - 16,67 W/min; Stegmann-Schwelle 25 W/min; Laktatsenke - 16,67 W/min (3. Phase) nach hohem Vorbelastungslaktat und 8-minütiger Pause. Für die Laktatschwellenmodelle können die Schwellenwerte an veränderte Belastungsprotokolle angepasst werden, was jedoch in der Praxis nicht ge-

schiebt. Von 33 beurteilbaren Verfahren stimmen nur 9 mit den Empfehlungen überein.

Unter glykogenarmen Bedingungen wird die Ausdauerleistungsfähigkeit bei fixen und anteilig fixen Modellen überschätzt. Die Stegmann-Schwelle und die Laktatsenke werden durch den Ernährungszustand kaum beeinflusst.

Durch Spiroergometrie werden VT als aerobe Schwelle und RCP als anaerobe Schwelle bestimmt. Gelegentlich wird ein RQ von 1 als anaerobe Schwelle angenommen. Die Anwendung stufenförmiger Protokolle erschwert das Auffinden der Schwellenwerte, da die relevanten Punkte „verwischt“ werden können. Rampenförmige Belastungsanstiege sind besser geeignet. Bei den meisten Instituten fällt die Belastungssteigerung zu mild aus. Die parallel durchgeführte Bestimmung der VO_{2max} stellt daher nicht die maximal mögliche VO_2 dar, sondern die höchstmögliche protokollspezifische VO_2 .

Die Bedeutung des RCP für die Trainingssteuerung bleibt spekulativ, Studien lassen vermuten, dass der Punkt über der Dauerleistungsgrenze liegt und daher als Grundlage für die Trainingssteuerung ungeeignet ist.

Glykogenverarmung beeinflusst die Bestimmung respiratorischer Schwellen: der RQ kann erniedrigt sein, so dass die anaerobe Schwelle, wenn der RQ als Kriterium angenommen wird, überschätzt werden kann; die Proportionalität der Atemgaskurven kann bereits bei geringeren Leistungen verloren gehen, so dass VT und RCP unterschätzt würden.

Eine zweifelsfreie Diagnose von Schwellen ist mittels der angewandten Verfahren nicht möglich, was die korrekte Festlegung von Trainingsbereichen fraglich erscheinen lässt. Dennoch können für den Sportler wichtige Erkenntnisse aus der Leistungsdiagnostik gezogen werden, die individuell überprüft werden müssen.

Für die Zukunft ist eine Vereinheitlichung der Verfahren wünschenswert. Um genauere Erkenntnisse über individuelle Stoffwechselforgänge zu erhalten, sollten Institute wesentlich weitergehende Belastungsuntersuchungen anbieten und die Bestimmung zusätzlicher Parameter (VO_{2max} , maximale Laktatbildungsrate) vornehmen.

11 Quellenverzeichnis

11.1 Literaturverzeichnis

Bachl, N.; Baron, R.; Smekal, G.; Tschan, H.: Validität sportspezifischer Leistungsdiagnostik. In: Clasing, D.; Weicker, H.; Böning, D. (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 165-173, Stuttgart, Jena, New York 1994

Beneke, R.; Hofmann, Ch.; Kowalewasky J.; Kowalewsky, K.; Behn, C.: Blutlaktatkonzentration, Herzfrequenz und Beanspruchungsempfinden bei Ruder- und Fahrradergometrie. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 45 (Sonderheft), 16-17 (1994)

Beneke, R.; Hütler, M.; Leithäuser, R.M.: Das maximale Laktat Steady State ist unabhängig von der Ausdauerleistungsfähigkeit. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 50 (Sonderheft), 36 (1999)

Berg, A.: Laktat als fundierter Parameter in der Trainingssteuerung. In: TW Sport und Medizin 5 (4), 280-283 (1993)

Berg, A.; Jakob, E.; Lehmann, M.; Dickhuth, H.H.; Huber, G.; Keul J.: Aktuelle Aspekte der modernen Ergometrie. In: Pneumologie 44 (1), 2-13 (1990)

Berg, A.; Stippig, J.; Keul, J.; Huber, G.: Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Patienten mit koronarer Herzkrankheit. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 31 (7), 199-204 (1980)

Bergh, U.; Ekblom, B.: Physical performance and peak aerobic power at different body temperatures. In: Journal of Applied Physiology 46, 885-889 (1979)

Bleicher, A.; Mader, A.; Mester J.: Zur Interpretation von Laktatleistungskurven – experimentelle Ergebnisse mit computergestützten Nachberechnungen. In: *Spectrum der Sportwissenschaften* 10 (1), 92-104 (1998)

Bleicher, A.; Mader, A.; Mester J.: Zur Interpretation von Laktatleistungskurven – experimentelle Ergebnisse mit computergestützten Nachberechnungen. In: *Spectrum der Sportwissenschaften* 11 (1), 71-83 (1999)

Blomstrand, E.; Bergh, U.; Essén-Gustavsson, B.; Ekblom, B.: Influence of low muscle temperature on muscle metabolism during intense dynamic exercise. In: *Acta Physiologica Scandinavica* 120, 229-336 (1984)

Braumann, K.-M.; Tegtbur, U.; Busse, M.W.; Maassen, N.: Die „Laktatsenke“ – Eine Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze. In: *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 42 (6), 240-246 (1991)

Brohberg, S.; Sahlin, K.: Hyperammonemia during prolonged exercise: an effect of glycogen depletion? In: *Journal of Applied Physiology* 65, 2475-2477 (1988)

Brooks, G.A.: Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 17, 22-31 (1985)

Brooks, G.A.: Lactate production during exercise: oxidizable substrate versus fatigue agent. In: Macleod, D.; Maughan, R.; Nimmo, M.; Reilly, T.; Williams, C. (Hrsg.): *Exercise – Benefits, Limits and Adaptations*. London 1987

Buchführer, M.J.; Hansen, J.E.; Robinson, T.E.; Sue, D.Y.; Wassermann, K.; Whipp, B.J.: Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. In: *Journal of Applied Physiology* 54, 1558-1564 (1983)

Bunc, V.; Heller, J.; Nowak, J.; Leso, J.: Determination of the individual anaerobic threshold. "Proceeding of XXIIInd World Congress on Sports Medicine. Wien 1982

Burke, E.R.: Science of cycling. Champaign, 1986

Busse, M.W., Maassen, N.; Böning, D.: Die Leistungslaktatkurve – Kriterium der aeroben Kapazität oder Indiz für das Muskelglykogen? In: Rieckert, H. (Hrsg.): Sportmedizin – Kursbestimmung: Deutscher Sportärztekongreß Kiel, 16 – 19 Oktober 1986. 455 – 467, Berlin, Heidelberg 1987

Busse, M.W., Maassen, N.; Konrad, H.; Böning, D.: Laktat, Glukose, Triglyceride, Glycerin und freie Fettsäuren bei Belastung unter glykogenreichen und glykogenarmen Bedingungen. In: Bönning, D.; Braumann, K.M.; Busse, M.W.; Maassen, N.; Schmidt, W. (Hrsg.): Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit. 323-327, Köln 1989

Carl, K.; Grosser, M.: Trainingssteuerung. In: Röthig, P. et al (Hrsg.): Sportwissenschaftliches Lexikon. 527-529, Schorndorf 1992

Costill, D.L.: Metabolic responses during distance running. In: Journal of Applied Physiology 28, 251-255 (1970)

Couthino et al.: AT Detection in Congestive Heart Failure. Symposium on Exercise in Congestive Heart Failure. Brüssel (27. - 28. April) 1990

Davis, J.A.: Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. In: Medicine and Science in Sports and Exercise 17, 6-18 (1985)

De Marées, H.: Sportphysiologie, Köln 2002

Dickhuth, H.H.; Röcker, K.; Mayer, F.; Nieß, A.; Horstmann, T.; Heitkamp, H.C.; Dolezel, P.: Bedeutung der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung

bei Ausdauer- und Spielsportarten. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 47 (S1), 183-189 (1996)

Dickhuth, H.H.; Huonker, M.; Münzel, T.; Drexler, H.; Berg, A.; Keul, J.: Individual anaerobic threshold for evaluation of competitive athletes and patients with left ventricular dysfunctions. In: Bachl, N.; Graham, T.E.; Löllgen, H. (Hrsg.): Advances in Ergometry, 173-179, Berlin 1991

Ebbert, K.: Laktatelimination der Erholungsphase nach Laufbandergometer-Belastung (Diplomarbeit). Deutsche Sporthochschule Köln 1981

Elsenbach, O.: Leistungsdiagnostik: Eine empirische Untersuchung bei Rad- und anderen Ausdauersportlern (Diplomarbeit). Deutsche Sporthochschule Köln 2001

Föhrenbach, R.: Leistungsdiagnostik, Trainingsanalyse und -steuerung bei Läuferinnen und Läufern verschiedener Laufdisziplinen, Konstanz 1986

Fröhlich, J.; Urhausen, A.; Seul, U.; Kindermann, W.: Einfluß von kohlenhydratreicher und -armer Diät auf die Laktatkinetik. In: Bönning, D.; Braumann, K.M.; Busse, M.W.; Maassen, N.; Schmidt, W. (Hrsg.): Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit. 309-312, Köln 1989

Gitt, A.K.; Winter, U.J.; Fritsch, J.; Pothoff, G.; Sedlak, M., Ehmanns, S.; Ostmann, H.; Hilger, H.H.: Vergleich der vier verschiedenen Methoden zur respiratorischen Bestimmung der anaeroben Schwelle bei Normalpersonen, Herz- und Lungenkranken. In: Zeitschrift für Kardiologie 83 (Supplement 3), 37-42 (1994)

Grantscharow, N.; Bachl, N.: Vergleich des anaeroben Teils der Laktat-Leistungskurve bei unterschiedlichen Belastungen am Fahrradergometer. In: Bachl, N.; Baumgartl, P.; Huber, G.; Keul, J. (Hrsg.): Die trainingsphysiologische und klinische Bedeutung der anaeroben Kapazität. 120-129, Wien 1987

Hartmann, U.; Mader, A.; Petersmann, G.; Grabow, V, Hollmann, W.: Verhalten von Herzfrequenz und Laktat während ruderspezifischer Trainingsmethoden: Untersuchungen bei A- und B-Kaderruderern und deren Interpretation für die Trainingssteuerung. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 40, 200-212 (1989)

Heck, H.: Laktat in der Leistungsdiagnostik. Wissenschaftliche Schriftenreihe des deutschen Sportbundes. Schorndorf 1990

Heck, H.: Energiestoffwechsel und medizinische Leistungsdiagnostik. Studienbrief der Trainierakademie Köln des Deutschen Sportbundes; 8. Schorndorf 1990a

Heck, H., Hess, G., Mader, A.: Vergleichende Untersuchung zu verschiedenen Laktat-Schwellenkonzepten. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 36 (1+2), 19-25, 40-52 (1985)

Heck, H.; Mader, A.; Hess, G.; Mücke, S.; Müller, R.; Hollmann, W.: Justification of the 4-mmol/l Lactate Threshold. In: International Journal of Sports Medicine 6, 117-130 (1985a)

Heck, H.; Rosskopf, P.: Die Laktat-Leistungsdiagnostik – valider ohne Schwellenkonzepte. In: TW Sport und Medizin 5 (5), 344-352 (1993)

Heck, H.; Rosskopf, P.: Grundlagen verschiedener Laktatschwellenkonzepte und ihre Bedeutung für die Trainingssteuerung. In: Clasing, D.; Weicker, H.; Böning, D. (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 111-131, Stuttgart, Jena, New York 1994

Heck, H.; Rosskopf, P.; Hirsch, A.; Hoberg, T. Hoppe, W.; Reichwein, R.: Einfluss des Vorbelastungslaktats, der Pausendauer und des Belastungsanstiegs auf die Laktat-Senke. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 42 (6), 248-263 (1991)

Henke, T.; De Marees, H.: Radsportspezifische Balance im Feldtest bei Fahren unterschiedlicher Leistungsfähigkeit. In: Bönning, D.; Braumann, K.M.; Busse, M.W.; Maassen, N.; Schmidt, W. (Hrsg.): Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit. 482-486, Köln 1989

Hill, A.V.: Muscular activity. Baltimore 1925

Hille, C.T.; Geiger, L.V.: Mathematische Beschreibung der Laktatkinetik beim Stufentest und Umsetzung in eine datenbankorientierte Analysen-Software. In: Leistungssport 23 (5), 46-51 (1993)

Hollmann, W.: Laktat und Schwellenkonzepte. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 46 (6), 290 (1995)

Hollmann, W.: Vor 40 Jahren: ventilatorische und Laktatschwelle – Wie es dazu kam. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 50 (10), 323-325 (1999)

Hottenrott, K.; Zülch, M.: Ausdauertrainer Radsport. Hamburg 2000

Jannsen, P.G.J.M.: Ausdauertraining: Trainingssteuerung über die Herzfrequenz- und Milchsäurebestimmung. Balingen 1996

Jeschke, D.: Probleme der Belastbarkeits- und Leistungsdiagnostik. In: Sportorthopädie – Sporttraumatologie 14 (4), 172-175 (1998)

Jeschke, D.; Heitkamp, H.C.; Locher, R.; Schneider, D.; Simon, M.; Zintl, W.: Aerobe Kapazität und anaerobe Schwelle bei unterschiedlichen Belastungsmethoden auf dem Fahrradergometer. In: Melleowicz, H.; Franz, I.W. (Hrsg.): Standardisierung, Kalibrierung und Methodik in der Ergometrie. 184-192, Erlangen 1983

Keul, J.; Simon, G.; Berg, A.; Dickhuth, H.H.; Goertler, I.; Kübel, R.: Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 30 (7), 212-218 (1979)

Kindermann, W.; Schramm, M.; Keul, J.: Aerobic performance diagnostics with different experimental settings. In: *International Journal of Sports Medicine* 1, 110-114 (1980)

Kindermann, W.; Simon, G.; Keul, J.: Dauertraining – Ermittlung der optimalen Trainingsherzfrequenz und Leistungsfähigkeit. In: *Leistungssport* 8 (1), 34-39 (1978)

Klinke, R.; Silbernagl, S.: *Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart 2003

Knipping, H.W.: Die Untersuchung der Ökonomie von Muskelarbeit von Gesunden und Kranken. In: *Zeitschrift für Experimentelle Medizin* 66, 517 (1929)

Knechtle, B.: *Aktuelle Sportphysiologie: Leistung und Ernährung im Sport*. Basel 2002

Kumagai, S.; Tanaka, K.; Matsuura, Y.; Matsuzaka, A.; Hirakoba, K.; Asano, K.: Relationships of the Anaerobic Threshold with the 5 km, 10 km and 10 Mile Races. In: *European Journal of Applied Physiology* 49 (1), 13-23 (1982)

Lamont, L.S.: Sweat lactate secretion during exercise in relation to women's aerobic capacity. In: *Journal of Applied Physiology* 62, 194-198 (1987)

Lehmann, M.; Schmid, P.; Keul, J.: Plasma catecholamine and blood lactate cumulation during incremental exhaustive exercise. In: *International Journal of Sports Medicine* 6 (2), 78-81 (1985)

Lehnertz, K.; Lübs, E.D.; Martin, D.: Zur Veränderung spirometrischer Messwerte als Folge von Ermüdung und Kohlenhydratabstinenz. In: Bönning, D.; Braumann, K.M.; Busse, M.W.; Maassen, N.; Schmidt, W. (Hrsg.): *Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit*. 313-318, Köln 1989

Lindner, W.: *Erfolgreiches Radsporttraining*. München, Wien, Zürich 1994

Lindner, W.: Straßenradspport. In: Weiss, C. (Red.): Handbuch Radsport. 117-220, München, Wien, Zürich 1996

Lowenstein, J.M.: The purine nucleotide cycle revised. *International Journal of Sports Medicine* 11, 37-46 (1990)

Maassen, N.; Mathews, J.; Busse, M.W.: Die Geschwindigkeit, mit der die O₂-Aufnahme bei submaximaler Belastung ansteigt, ist abhängig vom Ernährungszustand. In: Bönning, D.; Braumann, K.M.; Busse, M.W.; Maassen, N.; Schmidt, W. (Hrsg.): Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit. 319-322, Köln 1989

Mader, A.; Liesen, H.; Heck, H.; Philippi, H.; Rost, R.; Schürch, P; Hollmann, W.: Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. In: *Sportarzt und Sportmedizin* 24 (4+5), 80-88, 109-112 (1976)

Martin, D.; Carl, K.; Lehnertz, K.: Handbuch Trainingslehre. Schorndorf 1993²

McLellan, T.M.: Ventilatory and plasma lactate response with different exercise protocols: a comparison of methods. In: *International Journal of Sports Medicine* 6 (1), 30-35 (1985)

Meyer, T.; Kindermann, W.: Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}). In: *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 50 (9), 285-286 (1999)

Meyer, T.; Urhausen, A.; Kindermann, W.: Rationaler Einsatz der Spiroergometrie in der Leistungsdiagnostik. In: Engelhardt, M.; Franz, B.; Neumann, G.; Pfützner, A. (Red.): 14. Internationales Triathlon-Syposium. Xanten 1999. 81-94, Hamburg 2000

Neumann, G.: Stoffwechselprobleme beim Ausdauerlauf. In: *Medizin und Sport* 24, 49-56 (1984),

Neumann, G.: Radsport. In: Shepard, R.J.; Astrand, P.-O. (Hrsg.): Ausdauer im Sport. 560-571, Köln 1993

Neumann, G.: Laktatorientiertes Ausdauertraining – Grenzen kennen, valide Möglichkeiten nutzen. In: TW Sport und Medizin 5 (6), 417-424 (1993)

Neumann, G.: Sportmedizinische Standpunkte zur Wettkampfvorbereitung in Ausdauersportarten. In: Leistungssport 24 (1), 49-52 (1994)

Neumann, G.; Schüler, K.-P.: Sportmedizinische Funktionsdiagnostik. Sportmedizinische Schriftenreihe. Leipzig, Berlin, Heidelberg 1994

Pansold, B.; Zinner, J.: Zur Methodik von Stufentest und zur Zuverlässigkeit von Ergebnissen aus Laktat-Leistungskurven. In: Österreichisches Journal für Sportmedizin 23 (4), 102-116 (1993)

Phinney, S.D.; Bistrian, B.R.; Evans, W.J.; Gervino, E. Blackburn, G.L.: The human metabolic Response to Chronic Ketosis Without Caloric Restriction: Preservation of Submaximal Exercise Capability with Reduced Carbohydrate Oxidation. In: Metabolism 32, 769-776 (1983)

Pollock, M.L.; Bohannon, R.L., Cooper, K.H.; Ayres, J.J.; Ward, A.; White, S.R.; Linnerud, A.C.: A comparative analysis of four protocols for maximal treadmill stress testing. In: American Heart Journal 92, 39-46 (1976)

Reilly, T.; Woodbridge, V.: Effect of glycogen-reduction regimen in lactate-velocity curves in swimmers. In: Marconnet, P.; Gaulard, J.; Margaritis, I.; Tessiers, F. (Hrsg.): First Annual Congress ECSS – Frontiers in Sport Science, 704-705, Nizza 1996

Röcker, K.; Dickhuth H.H.: Einige Aspekte zur Festlegung der Dauerleistungsgrenze. In: Clasing, D.; Weicker, H.; Böning, D. (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 27-36, Stuttgart, Jena, New York 1994

Röcker, K.; Dickhuth H.H.: Spiroergometrische Messgrößen in der sportart-spezifischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. In: Leistungssport 26 (6), 44-48 (1996)

Röcker, K.; Schotte, O.; Niess, A.M.; Horstmann, T.; Dickhuth, H.H.: Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. In: Medicine and Science in Sports and Exercise 30, 1552-1557 (1998)

Rusko, H.; Luhtanen, P.; Rahkila, P.; Viitasalo, J.; Rehumen, S.; Härkönen, M.: Muscle metabolism, blood lactate and oxygen uptake in steady state exercise at aerobic and anaerobic thresholds. In: European Journal of Applied Physiology 55, 181-186 (1986)

Schmidt, A.: Handbuch für Radsport. Aachen 2001

Schmidt, R.F.; Thews, G.: Human Physiology. Berlin, Heidelberg, New York 1987

Schmidt, R.F.; Thews, G.: Lehrbuch der Physiologie des Menschen. Berlin, Heidelberg, New York 1990

Schulz, H.; Heck, H.: Ammoniak in der Leistungsdiagnostik. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 52 (3), 107-108 (2001)

Schulz, H.; Heck, H.: Bedeutung der Ammoniakbestimmung bei leistungsdiagnostischen Untersuchungen. In: Jeschke, D.; Lorenz, L. (Hrsg.): Sportmedizinische Trainingssteuerung: Sport – Prävention – Therapie. 133-139, Köln 2003

Shepard, R.J.: Biochemistry of Physical Activity. Springfield 1983

Shepard, R.J.: Die maximale Sauerstoffaufnahme. In: Shepard, R.J.; Astrand, P.-O. (Hrsg.): Ausdauer im Sport. 191-198, Köln 1993

Shepard, R.J.; Bouhrel, E.; Vandewalle, H.; Monod, H.: Anaerobic threshold, muscle volume and hypoxia. In: *European Journal of Applied Physiology* 58, 826-832 (1989)

Siegenthaler, W.: *Klinische Pathophysiologie*. Stuttgart, New York 1986

Simon, J.; Young, J.L.; Gutin, B.; Blood, D.K.; Case, R.B.: Lactate accumulation relative to the anaerobic and respiratory compensation thresholds. In: *Journal of Applied Physiology* 54 (1), 13-17 (1983)

Simon, G.; Thiesmann, M.: Ermittlung der aeroben Leistungsfähigkeit im Schwimmsport. In: *Leistungssport* 19 (3), 29-31 (1986)

Smodlaka, V.N.; Mellerowicz, H.; Horak, J.: Evidierte Standardisierungsvorschläge für Ergometrie. In: Mellerowicz, H.; Franz, I.-W.: *Standardisierung, Kalibrierung und Methodik in der Ergometrie*. Erlangen 1983

Stegmann, H.; Kindermann, W.: Modell zur Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle. In: Kindermann, W.; Hort, W. (Hrsg.): *Sportmedizin für Leistungs- und Breitensport*. Gräfeling 1981

Stegmann, H.; Kindermann, W.: Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle bei unterschiedlich Ausdauertrainierten aufgrund des Verhaltens der Laktatkinetik während der Arbeits- und Erholungsphase. In: *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 32 (8), 213-221 (1981a)

Stegmann, H.; Kindermann, W.: Comparison of Prolonged Exercise Test at the Individual Anaerobic Threshold and the Fixed Anaerobic Threshold of 4 mmol/l Lactate. In: *International Journal of Sports Medicine* 3, 105-110 (1982)

Stegmann, H.; Kindermann, W.; Schnabel, A.: Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. In: *International Journal of Sports Medicine* 2, 160-165 (1981)

Stockhausen, W.: Medizin. In: Weiss, C. (Red.): Handbuch Radsport. 421-500, München, Wien, Zürich 1996

Stockhausen, W.; Huber, G.; Maier, J.B.; Tinsel, J.; Keul, J.: Ein einzeitiges Verfahren zur Bestimmung des maximalen Laktat-Steady-State auf dem Fahrradergometer. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 46 (6), 291-302 (1995)

Tanaka, K.; Matsuura, Y.: Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. In: Journal of Applied Physiology 55, 640-643 (1984)

Tegtbur, U.; Griess, M.; Braumann, K.-M.; Busse, M, Maassen, N.: Eine neue Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze. In: In: Böning, D.; Braumann, K.-M.; Busse, M.; Maassen, N.; Schmidt, W. (Hrsg.): Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit. 463-466, Köln 1989

Urhausen,A.; Coen, B.; Weiler, B.; Kindermann, W.: Individuelle anaerobe Schwelle und Laktat steady state bei Ausdauerbelastungen. In: Clasing, D.; Weicker, H.; Böning, D. (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 37-46, Stuttgart, Jena, New York 1994

Vassiliadis, A.; Mader, A.; Niessen M. Verhalten von Laktat, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme und Fettverbrennung bei Dauerbelastungen auf dem Laufband. In: Jeschke, D.; Lorenz, R. (Hrsg.): Sportartspezifische Leistungsdiagnostik. Energetische Aspekte : Bericht über das Symposium am 13.-14. Juni 1997 in München. 157-162, Köln 1998

Verstappen, F.T.J.; Huppertz, R.M.; Snoeckx, L.H.E.H.: Effect of training specificity on maximal treadmill and bicycle ergometer exercise. In: International journal of Sports Medicine 3, 43-46 (1982)

Vobedja, Ch.; Zimmermann, E.: Die Maximale Konstante Herzfrequenz – ein neues herzfrequenzabhängiges Verfahren zur Abschätzung der Ausdauerleistungsgrenze beim Radfahren. In: Leistungssport 26 (2), 4-9 (2003)

Wasserman, K.; Hansen, J.E.; Sue, D.E.; Whipp, B.J.: Principles of exercise testing and interpretation. Philadelphia 1987

Wasserman, K.; Hansen, J.E.; Sue, D.E.; Whipp, B.J.: Principles of exercise testing and interpretation. Baltimore 1987

Wassermann, K.; McIlroy, M.B.: Detecting the threshold of anaerobic metabolism. In: American Journal of Cardiology 14, 844-852 (1964)

Wassermann, K.; Whipp, B.J.: Exercise physiology in health and disease. In: American Review of Respiratory Diseases 17 (112), 219-249 (1975)

Wassermann, K.; Whipp, B.J.; Koyal, S.N.; Beaver, W.L.: Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. In: Journal of Applied Physiology 35 (2), 236-243 (1973)

Wassermann, K.; Whipp, B.J.; McIlroy, M.B.: Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. In: American Journal of Cardiology 14, 844 (1964)

Weineck, J.: Optimales Training: leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder und Jugendtrainings. Balingen 1994

Whipp B.J.: Dynamics of pulmonary gas exchange. In: Circulation 76 (Supplement VI), 18-28 (1987)

Wernerer et al.: Methodes for Determination of Anaerobic Threshold Detection in Congestive Heart Failure. 2nd Cologne CPX Workshop. Köln (5. – 6. Juli) 1991

Winter, U.J.; Gitt, A.K.; Fritsch, J.; Berge, P.G.; Pothoff, G.; Hilger, H.H.: Methodische Aspekte der modernen computerisierten Ergospirometrie (CPX): Rampenprogramm, konstanter Belastungstest und CO₂-Rückatmungsmethode. In: Zeitschrift für Kardiologie 83 (3), 13-26 (1994)

Yeager, J.E.; Sucec, A.A.: The effect of rest interval length on blood lactate concentration during and following intermitted work. In: International Journal of Sports Medicine 6, Abstract (1986)

Yoshida, T.: Effect of dietary modifications on lactate threshold and onset of blood lactate accumulation during incremental exercise. In: European Journal of Applied Physiology 53, 200-205 (1984)

11.2 Internetquellen

Adressen-Liste Leistungsdiagnostik institute:

http://www.tour-magazin.de/to/tour_artikel/show.php3?id=42&nodeid=56&subnav=41
aufgerufen am 15.06.2004

ZIV 2004: http://www.ziv-zweirad.de/index_aktuelles.htm

Link: „Gutes Wetter und starker Export prägen den Fahrradmarkt 2003“
aufgerufen am 15.06.2004

ZIV 2004a: http://www.ziv-zweirad.de/index_fahrrad.htm

aufgerufen am 15.06.2004

ZIV 2004b: http://www.ziv-zweirad.de/index_aktuelles.htm

Link: „Fitness-Biking weiterhin voll im Trend“
Aufgerufen am 15.06.2004

11.3 Telefonische Auskünfte

Berbalk, A.; Kommissarische Leiterin der Sportmedizin im IAT in Leipzig:
Telefonische Auskunft vom 17.06.04

Rubin, G.; Referat Breitensport beim BDR: Telefonische Auskunft vom 17.06.04

Müller, A.; Presse-Referentin „Rund um den Henninger Turm“: Telefonische Auskunft vom 17.06.04

Wiegand, A.; Presse-Referentin des HEW-Cyclassic-Cups (Hamburg): Telefonische Auskunft vom 18.06.04

11.4 Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Schürch, P.: Leistungsdiagnostik: Theorie und Praxis - Beiträge zur Sportmedizin, 1987, S. 34

Abb.2: Schmidt, A.: Schmidt, A.: Handbuch für Radsport. Aachen 1994; S. 134

Abb.3: Beaver, W.L.; Wassermann, K.; Whipp, B.J.: A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, S. 2022. In: Journal of Applied Physiology, 60 (6), 2020-2027 (1986)

Abb.4: Heck, H.; Roskopf, P.: Grundlagen verschiedener Laktatschwellenkonzepte und ihre Bedeutung für die Trainingssteuerung, S. 113. In: Clasing, D.; Weicker, H.; Böning, D. (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 111-131, Stuttgart, Jena, New York 1994

Abb.5: Berg, A.; Jakob, E.; Lehmann, M.; Dickhuth, H.H.; Huber, G.; Keul J.: Aktuelle Aspekte der modernen Ergometrie, S. 6. In: Pneumologie 44 (1), 2-13 (1990)

Abb.6: Keul, J.; Simon, G.; Berg, A.; Dickhuth, H.H.; Goerttler, I.; Kübel, R.: Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung

und Trainingsgestaltung, S. 214. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 30 (7), 212-218 (1979)

Abb.7: Stegmann, H.; Kindermann, W.: Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle bei unterschiedlich Ausdauertrainierten aufgrund des Verhaltens der Laktatkinetik während der Arbeits- und Erholungsphase, S. 215. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 32 (8), 213-221 (1981a)

Abb.8: Braumann, K.-M.; Tegtbur, U.; Busse, M.W.; Maassen, N.: Die „Laktatsenke“ – Eine Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze, S. 241. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 42 (6), 240-246 (1991)

Abb.9: Heck, H.; Rosskopf, P.: Grundlagen verschiedener Laktatschwellenkonzepte und ihre Bedeutung für die Trainingssteuerung, S. 118. In: Clasing, D.; Weicker, H.; Böning, D. (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 111-131, Stuttgart, Jena, New York 1994

Abb.10: Heck, H.: Laktat in der Leistungsdiagnostik, Schorndorf 1990; S. 58

Abb.11: Heck, H.: Laktat in der Leistungsdiagnostik, Schorndorf 1990; S. 160

Abb.12: Busse, M.W., Maassen, N.; Böning, D.: Die Leistungslaktatkurve – Kriterium der aeroben Kapazität oder Indiz für das Muskelglykogen? S. 465. In: Rieckert, H. (Hrsg.): Sportmedizin – Kursbestimmung: Deutscher Sportärztekongress Kiel, 16 – 19 Oktober 1986. 455 – 467, Berlin, Heidelberg 1987

Abb.13: Busse, M.W., Maassen, N.; Böning, D.: Die Leistungslaktatkurve – Kriterium der aeroben Kapazität oder Indiz für das Muskelglykogen? S. 465. In: Rieckert, H. (Hrsg.): Sportmedizin – Kursbestimmung: Deutscher Sportärztekongress Kiel, 16 – 19 Oktober 1986. 455 – 467, Berlin, Heidelberg 1987

Abb.14: Busse, M.W., Maassen, N.; Böning, D.: Die Leistungslaktatkurve – Kriterium der aeroben Kapazität oder Indiz für das Muskelglykogen? S. 462.

In: Rieckert, H. (Hrsg.): Sportmedizin – Kursbestimmung: Deutscher Sportärztekongreß Kiel, 16 – 19 Oktober 1986. 455 – 467, Berlin, Heidelberg 1987

Abb.15: Heck, H.: Laktat in der Leistungsdiagnostik. Wissenschaftliche Schriftenreihe des deutschen Sportbundes. Schorndorf 1990, S. 66

Abb.16: Beaver, W.L.; Wassermann, K.; Whipp, B.J.: A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, S. 2025. In: Journal of Applied Physiology, 60 (6), 2020-2027 (1986)

Abb.17: Beaver, W.L.; Wassermann, K.; Whipp, B.J.: A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, S. 2022. In: Journal of Applied Physiology, 60 (6), 2020-2027 (1986)

11.5 Tabellenverzeichnis

Tab.1: Neumann, G.: Radsport. In: Shepard, R.J.; Astrand, P.-O. (Hrsg.): Ausdauer im Sport, Köln 1993; S. 565

Tab.2: eigene Darstellung, Auswertung der Umfrage unter ausgewählten Leistungsdiagnostikinstitutionen

Tab.3: Heck, H.: Laktat in der Leistungsdiagnostik, Schorndorf 1990; S. 158

Tab.4: Heck, H.: Laktat in der Leistungsdiagnostik, Schorndorf 1990; S. 164

Tab.5: Heck, H.: Laktat in der Leistungsdiagnostik, Schorndorf 1990; S. 174

Tab.6: eigene Darstellung, Auswertung der Umfrage unter ausgewählten Leistungsdiagnostikinstitutionen

12 Anhang

Ergebnis der strukturierten Telefoninterviews mit verantwortlichen Untersuchern aus 49 Leistungsdiagnostikinstituten

Aus Datenschutzgründen sind die Datensätze der Institute anonymisiert und mit Nummern versehen (Spalte 1). Alle befragten Institute wenden fahrradergometrische Verfahren (Ergom.) zur Leistungsdiagnostik an (Spalte 2). Spalte 3 zeigt, durch ein "X" gekennzeichnet, welche Institute darüber hinaus begleitend eine Spiroergometrie (Spirom.) anbieten. In der 4. Spalte ist zu sehen, welches Belastungsprotokoll zur Anwendung kommt. Die erste Zahl steht für die Anfangsbelastung in Watt, die zweite für die Stufenhöhe in Watt. Die dritte Zahl gibt die Stufenlänge in Minuten an. Von einigen Untersuchern wurden alternativ mehrere Belastungsprotokolle genannt. Die Spalten 5 und 6 geben Auskunft darüber, welche Schwellen bestimmt werden: AS steht für die aerobe Schwelle, ANS für die anaerobe Schwelle. Spalte 7 gibt die Bestimmungsmethode der Schwellen und im Fall der respiratorischen Schwellenbestimmung die Kriterien wider, die zur Festlegung der AS und ANS führen. Die Preise für die jeweilige Leistungsdiagnostik inklusive Ableitung von Trainingsbereichen und -intensitäten ist Spalte 8 zu entnehmen. Spalte 9 enthält weitere Angaben darüber, ob die Diagnostik auf dem eigenen Fahrrad erfolgen oder ob das eigene Pedalsystem an dem Ergometer angebracht werden kann. Auch die Information, ob die VO_{2max} mittels des Belastungsverfahrens ermittelt werden soll, ist in der letzten Spalte zu finden.

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
1	X	X	100 - 20 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RQ > 1; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	150,-	Test auf eigenem Rad möglich
2	X	X	100 - 20 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS = erster Anstieg des Laktats über Ruhewert; ANS: RQ > 1; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	129,-	eigene Pedale können benutzt werden
3	X		100 - 50 - 5		X	Mader-Schwelle	69,-	eigene Pedale können benutzt werden

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
4	X	X	100 - 40 - 5		X	Mader-Schwelle	180,-	Test nur im Paket mit Trainingsplan über mehrere Wochen möglich; Spiroergometrie wird in die Auswertung der LLK nicht mit einbezogen; verschiedene Pedal-systeme zur Auswahl; Ergometer individuell einstellbar
5	X		100 - 50 - 5 oder 100 - 40 - 3		X	Mader-Schwelle	100,-	eigene Pedale können benutzt werden
6	X		50 - 50 - 2 oder 80 - 40 - 3		X	Stegmann-Schwelle	105,-	eigenes Rad kann benutzt werden; sonst SPD-System
7	X		100 - 25 - 3		X	Keul-Schwelle	109,27	eigene Pedale können benutzt werden
8	X		50 - 50 - 3		X	Keul-Schwelle	110,-	eigene Pedale können benutzt werden
9	X	X	80 - 30 - 1	X	X	respiratorische Schwellen: AS: Ventilationsminimum; ANS: $RQ > 1$ bzw. überproportionaler Anstieg der Ventilation; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	200,-	Bestimmung der VO_{2max} ; Ergometer individuell einstellbar

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
10	X	X	80 - 40 - 5		X	fixe Schwelle bei Laktatkonzentration von 3 mmol/l	144,-	eigenes Rad oder eigene Pedale können benutzt werden
11	X	X	100 - 50 - 3		X	Mader-Schwelle	135,-	eigene Pedale können benutzt werden
12	X		100 - 50 - 3	X	X	AS: 2 mmol/l; ANS: Mader-Schwelle	90,-	Blutabnahme aus Fingerkuppe
13	X		100 - 25 - 3	X	X	k.A.	300,-	nur im Paket mit komplettem Gesundheits-Check-up möglich (Lungenfunktionstest, Bioimpedanzanalyse usw.); Auswertung der LLK mittels Computerprogramm; Untersucher konnte keine Angaben machen, welche Kriterien die Software für AS bzw. ANS zu Grunde legt
14	X	X	100 - 50 - 3	X	X	Dickhuth-Schwelle	189,-	eigenes Rad oder eigene Pedale können benutzt werden

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
15	X	X	80 - 40 - 3	X	X	AS: 2 mmol/l; ANS: Mader-Schwelle	100,-	gleichzeitige Bestimmung von O ₂ -Puls, VO _{2max} und Atemäquivalent, aber ohne Einfluss auf Laktatstufentest, dieser dient nur dem Längsschnittvergleich; einfaches Ergometer mit Schlaufenpedalen
16	X		50 - 50 - 3		X	Keul-Schwelle	150,-	Ergometer mit Schlaufenpedalen; eigene Pedale können nicht benutzt werden
17	X	X	75 - 25 - 2	X	X	AS: 2 mmol/l; ANS: Mader-Schwelle	100,-	Institut bietet nach Absprache weitere Belastungsprotokolle an, beim genannten wird gleichzeitig die VO _{2max} bestimmt, außerdem wurde die Zusammenarbeit mit einem Trainingswissenschaftler angeboten

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
18	X		100 - 50 - 2		X	Mader-Schwelle	80,-	eigene Pedale können benutzt werden; LLK wird aus 4 Blutproben bestimmt
19	X		100 - 50 - 3		X	Simon-Schwelle (AS: arithmetisches Mittel der ersten 4 Laktatwerte; ANS: AS + 1,5 mmol/l)	87,-	Institut bietet nach Absprache weitere Belastungsprotokolle an; eigene Pedale können benutzt werden
20	X	X	100 - 20 - 3	X	X	Dickhuth-Schwelle	140,-	im selben Test wird gleichzeitig die VO_{2max} bestimmt; verschiedene Pedalsysteme vorhanden
21	X		100 - 25 - 3		X	Keul-Schwelle	89,-	eigene Pedale können benutzt werden
22	X		120 - 20 - 3	X	X	Keul-Schwelle	85,-	Ergometer ist mit SPD-Pedalsystem ausgestattet
23	X	X	80 - 40 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RQ > 1; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	150,-	eigene Pedale können benutzt werden

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
24	X	X	100 - 30 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RCP; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	130,-	verschiedene Pedalsysteme vorhanden; Ergometer erlaubt genaue Sitzpositionseinstellung
25	X	X	100 - 20 - 3	X	X	AS: 2 mmol/l; ANS: Mader-Schwelle	115,-	Spiroergometrie dient nur der VO_{2max} -Bestimmung; eigene Pedale können benutzt werden
26	X	X	100 - 30 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RCP; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	125,-	eigene Pedale können benutzt werden
27	X	X	75 - 25 - 3	X	X	AS: 2 mmol/l; ANS: Mader-Schwelle	80,-	Ergometer mit einfachen Pedalen ohne Schlaufen, andere Pedalsysteme nicht möglich; Spiroergometrie dient nur der VO_{2max} -Bestimmung
28	X	X	80 - 40 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RCP; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	150,-	eigene Pedale können benutzt werden

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
29	X	X	100 - 40 - 3	X	X	AS: 2 mmol/l; ANS: Mader-Schwelle	197,-	Spiroergometrie dient nur der VO _{2max} -Bestimmung; eigene Pedale können benutzt werden
30	X		100 - 50 - 3			Dickhuth-Schwelle	110,-	eigene Pedale können benutzt werden
31	X	X	100 - 25 - 3		X	Keul-Schwelle	116,-	Spiroergometrie dient nur der VO _{2max} -Bestimmung; eigene Pedale können benutzt werden
32	X	X	80 - 40 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RCP; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	125,-	eigene Pedale können benutzt werden
33	X		90 - 40 - 3	X	X	Simon-Schwelle (AS: arithmetisches Mittel der ersten 2 Laktatwerte; ANS: AS + 1,5 mmol/l)	60,-	eigene Pedale können benutzt werden
34	X	X	90 - 30 - 4		X	Mader-Schwelle	127,-	Ergometer mit einfachen Pedalen ohne Schlaufen, andere Pedalsysteme nicht möglich

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
35	X		100 - 30 - 3		X	Mader-Schwelle	90,-	verschiedene Pedalsysteme vorhanden
36	X		100 - 20 - 5		X	Mader-Schwelle	95,-	verschiedene Pedalsysteme vorhanden, Ergometer individuell einstellbar
37	X		100 - 20 - 3		X	Mader-Schwelle	85,-	Institut bietet nach Absprache weitere Belastungsprotokolle an; eigene Pedale können benutzt werden
38	X	X	100 - 30 - 4	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RCP; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	109,-	eigenes Rad kann benutzt werden
39	X	X	150 - 80 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RCP; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	290,-	eigene Pedale können benutzt werden; Leistungsdiagnostik nur im Komplettpaket angeboten mit Elektrolyt-, Körperfettbestimmung, Lungenfunktionstest, Echokardiogramm; Bestimmung der VO_{2max} in demselben Test

Nr.	Ergom. Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
40	X	100 - 20 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RQ = 1; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	249,-	eigenes Rad kann benutzt werden; Leistungsdiagnostik nur im Komplettpaket mit Lungenfunktions-test, Anthropometrie, indirekter Kalorimetrie; Bestimmung der VO_{2max} in dem selben Test
41	X	50 - 50 - 3		X	Mader-Schwelle	89,-	eigene Pedale können benutzt werden
42	X	50 - 50 - 3	X	X	respiratorische Schwellen: AS: VT; ANS: RCP; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	149,-	eigene Pedale können benutzt werden; Bestimmung der VO_{2max} in dem selben Test
43	X	100 - 50 - 5	X	X	Prüfung der Stegmann-Schwelle und Mader-Schwelle auf Übereinstimmung	50,- + 50,- für Spirom.	eigene Pedale können benutzt werden; Spiroergometrie dient nur der VO_{2max} -Bestimmung
44	X	100 - 50 - 3	X	X	Simon-Schwelle (AS: arithmetisches Mittel der ersten 2 Laktatwerte; ANS: AS + 1,5 mmol/l)	95,-	eigenes Rad kann benutzt werden

Nr.	Ergom.	Spirom.	Belastungsprotokoll	AS	ANS	Bestimmungsmethode	Preis (in €)	Anmerkungen
45	X		100 - 50 - 3 7 Min. Pause 100 - 50 - 3		X	Laktatsenke	82,50	eigenes Rad kann benutzt werden
46	X		100 - 40 - 5		X	Prüfung der Mader-Schwelle und Keul-Schwelle auf Übereinstimmung	80,-	eigenes Rad kann benutzt werden
47	X		80 - 40 - 5		X	Mader-Schwelle	95,-	eigenes Rad kann benutzt werden
48	X		100 - 40 - 5		X	Mader-Schwelle	80,-	Stufentest mit dem eigenen Rad auf einer Trainingsrolle
49	X	X	80 - 40 - 5	X	X	respiratorische Schwellen: AS: RQ = 0,75; ANS: RQ = 1; optische Prüfung der LLK und Ventilationskurven auf Schlüssigkeit	165,-	eigenes Rad kann benutzt werden