

Bestimmung der „anaeroben Schwelle“ beim Flossenschwimmen

Determination of the “anaerobic threshold” in fin swimming

Busse¹ M, Vogel Y, Tegtbur U², Thomas M³

Institut für Sportmedizin/Sportmedizinische Ambulanz und Rehabilitationszentrum der Universität Leipzig¹

(Direktor: Prof. Dr. Dr. med. habil. M.W. Busse)

Sportmedizinisches Zentrum, Medizinische Hochschule Hannover² (Ltd. Arzt Dr. med. U. Tegtbur)

Orthopädische Klinik und Poliklinik, Universität Leipzig³ (Direktor: Prof. Dr. med. v. Salis-Soglio)

Zusammenfassung

Busse MW, Vogel Y, Tegtbur U, Thomas M. Bestimmung der „anaeroben Schwelle“ beim Flossenschwimmen. Klinische Sportmedizin/Clinical Sports Medicine-Germany (KCS) 2004, 5(1): 1-14. Ziel: Entwicklung eines Feldtests zur Bestimmung der „anaeroben Schwelle“ beim Flossenschwimmen.

Material und Methode: Bei 10 trainierten Flossenschwimmern wurde nach belastungsinduzierter Laktatazidose ein Stufen-Schwimmtest durchgeführt (acht 200-m Stufen, Geschwindigkeitssteigerung um 5-10 sec auf 200 m). In einer 45-sec Pause nach jeder Stufe wurde Blut zur Laktatbestimmung abgenommen und die Herzfrequenz gemessen. Der Tiefpunkt dieser Kurve wird als Gleichgewicht zwischen Laktatinvasion und -evasion im Blut gesehen und daher als „anaerobe Schwelle“ postuliert. Zur Überprüfung dieser Theorie wurde in der Folge eine Dauerbelastung mit Senkengeschwindigkeit sowie 5% über und unter der Senkengeschwindigkeit durchgeführt.

Ergebnisse: Der symmetrische Kurvenverlauf im Stufentest zeigt, dass die Geschwindigkeitssteigerung eine Bestimmung der Invasions- und Evasionskinetik erlaubt. Die Laktatkonzentration im Tiefpunkt der Kurve ist ausreichend hoch, um Artefakte auf die Gleichgewichtseinstellung zu verhindern. Die Evaluation in den Dauertests ergibt, dass Flossenschwimmen im Bereich der Senkengeschwindigkeit zur raschen Einstellung eines Laktat-steady-states auf hohem Niveau führt. Eine Geschwindigkeit 5% darüber verzögert die Gleichgewichtseinstellung erheblich und erzeugt sehr hohe Laktatkonzentrationen.

Diskussion: Die Ergebnisse belegen, dass der Stufenschwimmtest nach Laktatazidose die valide Bestimmung der „anaeroben Schwelle“ im Tiefpunkt der Laktatkurve erlaubt. Die „anaerobe Schwelle“ liegt bei Flossenschwimmen bei ca. 90% der Maximalgeschwindigkeit, die entsprechende Herzfrequenz bei ca. 95% der Maximalfrequenz.

Zusammenfassung: Die Ergebnisse belegen die Eignung der Methode einer individuellen Bestimmung der Laktatinvasions- und -evasionskinetik zur Festlegung der „anaeroben Schwelle“. Angesichts der

Schwellenintensität im Verhältnis zur Maximalleistung und des sehr engen Schwellenbereichs ist die Anwendung einer solchen Methode von besonderer Bedeutung.

Schlüsselwörter: Laktat, anaerobe Schwelle, Stufentest, Flossenschwimmen

Abstract

Busse MW, Vogel Y, Tegtbur U, Thomas M. Determination of the „anaerobic threshold“ in fin swimming. Klinische Sportmedizin/Clinical Sports Medicine-Germany (KCS) 2004, 5(1): 1-14. Objective: Development of a field test for the determination of the “anaerobic threshold” in fin swimming.

Objective: Development of a field test for the determination of the “anaerobic threshold” in fin swimming.

Materials and methods: In 10 trained fin swimmers an incremental swimming-test was carried out after load induced lactic acidosis (eight 200 m-increments, speed increase by 5-10 sec for 200 m). In a 45 sec rest after each increment heart rate was recorded and blood of the hyperemized ear lobe was taken for lactate measurement. The lowest point of the lactate curve is seen as balance between lactate invasion and evasion in the blood and postulated as “anaerobic threshold” (AT). To check this theory 3 constant load tests using intensities on and 5 % over and below the AT intensity were carried out.

Results: The symmetrical curvature in the incremental test shows that the used increments allow a determination of the invasion and evasion kinetics. The lactate concentration in the lowest point of the curve is sufficiently high in order to prevent artifacts of the lactate equilibration. The constant load tests demonstrate, that fin swimming with AT intensity induces a rapid lactate steady state on a high level. An intensity 5 % above the AT results in a markedly delayed lactate steady state and produces very high lactate concentrations.

Discussion: The results prove that the incremental swimming-test following exercise induced lactate accumulation facilitates a valid AT-determination, the lowest point of the lactate curve corresponding to the AT. The AT in fin swimming approximates 90 % of the maximum speed, heart rate is approximately 95 % of

the maximum rate. Since the AT is near to maximum swimming speed the use of the method is of particular importance.

Einleitung

Flossenschwimmen ist eine junge, nicht olympische Sportart. Im Wettkampfsport dominiert wegen ihrer höheren Geschwindigkeit die Monoflosse, die mit einem Delfinbeinschlag geschwommen wird. Geschwommen wird sowohl an der Wasseroberfläche mit Schnorchel als auch mit oder ohne Drucklufttauchgerät unter der Wasseroberfläche.

Ein akzeptables Verfahren zur Leistungsdiagnostik im Wasser besteht nicht.

Unter den bei Ausdauersportarten üblichen leistungsdiagnostischen Verfahren hat sich ein Verfahren zur direkten Bestimmung der Laktatinvasion und -evasion am besten bewährt [1,10]. Hierbei wird nach maximaler arbeitsinduzierter Laktatazidose ein Stufentest durchgeführt. Bei leichter Belastung wird zunächst Laktat überwiegend aus dem Blut eliminiert, bei „überschwelliger“ Belastung dann akkumuliert. Der Tiefpunkt der resultierenden Kurve entspricht hiernach dem maximalen dynamischen Gleichgewicht der Laktatproduktion und -elimination. Diese Methode wurde 1989 von TEGTBUR et al. [10] im läuferischen Bereich und im selben Jahr von GRIESS et al. [4,5] im Sportschwimmen vorgestellt.

Das beschriebene Verfahren „Senkentest“ wurde in der aktuellen Studie im Flossenschwimmen auf Validität überprüft.

Material und Methode

Probanden: Die Testdurchführung erfolgte mit 5 weiblichen und 5 männlichen Flossenschwimmern im Rahmen ihrer routinemäßigen Leistungsdiagnostik. Zum Zeitpunkt der Untersuchung betrieben alle Teilnehmer diesen Sport leistungsmäßig und absolvierten mindestens sechs Trainingseinheiten in der Woche. Je nach Alter waren die Athleten Mitglieder im A-, B- oder C-Kader des Verbands Deutscher Sporttaucher (VDST).

Die soziodemografischen und anthropometrischen Daten zu Alter, Geschlecht, Körpergewicht und Körpergröße und die Anzahl der Trainingsjahre können der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Sieben Probanden trainierten vor dem Flossenschwimmen einige Jahre im Schwimmen, was in einer weiteren Spalte gekennzeichnet ist.

Die Grundlage für den Test bildeten die aktuellen 200m-Zeiten der Sachsenmeisterschaften. Dieser Wett-

Key words: lactate, anaerobic threshold, incremental exercise test, fin swimming

Der charakteristische Verlauf der Laktatinvasions- und Laktatevasionskinetik ist in der Abb. 3 dargestellt. Der tiefste Punkt der Laktatleistungskurve entspricht der Senke (Abb. 3) und beschreibt die individuelle Dauerleistungsgrenze, den Bereich, in dem das maximale Laktat-steady-state (MLS) zwischen Laktatproduktion am Ort der Entstehung und -elimination aus dem Lumen gerade noch aufrecht erhalten wird und es zu keiner zunehmenden Anhäufung von Laktat im Blut kommt Braumann [1].

Zur Überprüfung der Frage, ob die Senke dem MLS entspricht, werden nach der Ermittlung des Tiefpunktes der Laktat-Leistungskurve (LLK) Dauertests verschiedener Intensitäten ($v = \text{Senke}$, $v < 5\% \text{ Senke}$, $v > 5\% \text{ Senke}$) durchgeführt. Dabei sollte es im Bereich der Laktatsenke zu keinem relevanten Anstieg bzw. Abfall der Laktatkonzentration kommen. Von einer Dauerbelastung geringfügig oberhalb des In- und Evasionsgleichgewichts („Senke“ + 5%) sollte eine deutlich verzögerte Einstellung des Laktats auf hohem Niveau erwartet werden. Eine Dauerbelastung geringfügig unter der Senke (Senke -5%) sollte dagegen nach einer initialen Akkumulationsphase zu stetig abfallender Konzentration oder einer Gleichgewichtseinstellung auf sehr niedrigem Niveau führen.

kampf lag drei Wochen zurück. Die Wettkampfbestzeiten über 200 m konnten für diesen Test nicht verwendet werden, da sich die Athleten zum Zeitpunkt der Untersuchung in der Vorbereitungsphase des Periodenzyklus nach Matwejew befanden [6]. Wettkampfbestzeiten und aktuelle Schwimmzeiten über 200m sind ebenfalls Tabelle 1 zu entnehmen.

Allgemeine Vorkehrungen: Alle Probanden wurden vor dem Test über das Vorgehen der Ohrblutentnahme für die Laktatbestimmung während der Untersuchungen informiert. Jeder Sportler erhielt vor dem Test Auskünfte über Zweck und Ablauf der Untersuchung als auch zu möglichen Nebenwirkungen. Nach diesen Informationen willigten die Probanden mit ihrer Unterschrift zur Durchführung der modifizierten Leistungsdiagnostik ein. Bei minderjährigen Sportlern wurde die Einverständniserklärung der Eltern eingeholt.

Nr. der Probanden	Alter in Jahre	Geschlecht	Körpergewicht in kg	Körpergröße in cm	Anzahl der Trainings-jahre im Schwimmen	Anzahl der Trainings-jahre im Flossenschwimmen	Wettkampfbestzeit über 200 m in min	aktuelle 200-m-Zeiten in min
1	15	W	63	168	7	1,5	01:52,34	01:55
2	16	M	57	170	6	2,5	01:34,05	01:36
3	14	M	68,5	171	3	2,5	01:53,07	01:57
4	18	W	62	176	6	5,5	01:47,08	01:52
5	23	W	55	171	8	8,5	01:47,80	01:50
6	18	W	68	164	2	4	01:56,36	01:58
7	29	M	72	186	7	16	01:33,52	01:36
8	31	M	75	182	0	21,5	01:39,05	01:46
9	23	M	83	186	0	12,5	01:37,02	01:40
10	24	W	62	173	15	3,5	01:37,94	01:43
\bar{x}	21,1	-	66,55	174,7	5,4	7,8	01:43,82	01:47,2
SD	5,859	-	8,539	7,617	4,477	6,763	8,479	8,404

Tabelle 1: Soziodemografische und anthropometrische Daten, Trainingsjahre und Bestzeiten der Probanden.

Die Untersuchungen fanden in einem 50-m-Schwimmbecken der Universitätsschwimmhalle Leipzig statt.

Vorbereitung: Vor dem Senkentest lag mindestens ein trainingsfreier Tag. Zwei Tage davor sollten im Training keine intensiven Belastungen geschwommen werden. Acht Tage nach dem Senkentest fanden an drei aufeinander folgenden Tagen die Dauertests statt. Vor dem ersten Dauertest wurde eine Trainingseinheit mit im extensiven Bereich absolviert. Die Reihenfolge der Tests erfolgte nach einem Losverfahren am Tag des Senkentests. Das Einschwimmen vor den Tests erfolgte individuell mit geringer Belastung.

Festlegung der Schwimmgeschwindigkeit: Die Schwimmgeschwindigkeit wurde bei den Stufen- und Dauertests durch akustische Signale vorgegeben. Die Signale wurden über manuelle Klopfzeichen, durch Hammerschläge auf ein Drucklufttauchgerät (DTG), realisiert. Dabei war das DTG bis zur Hälfte im Wasser eingetaucht, um die Schallübertragung im Wasser zu gewährleisten. Bei Ertönen des Signals mussten sich die Schwimmer in Höhe der 50-m- bzw. 100-m-Markierung befinden.

Der Testablauf ist in Abbildung 1 dargestellt.

Durchführung des Senkentests: Im ersten Teil des „Senkentests“ schwammen die Probanden 2*100 m in Maximalgeschwindigkeit mit einer zweiminütigen Pause. Die 100-m-Strecken konnten wahlweise vom Startblock oder aus dem Wasser gestartet werden. Der Großteil entschied sich für den Wasserstart.

Im unmittelbaren Anschluss an die Maximalbelastung begann eine siebenminütige Pause. Während dieser Pause wurden die Blutproben genommen, um den Gipfel und den Verlauf der Blutlaktatkurve in der Nachbelastungsphase zu beobachten. Während der Pause hatten die Probanden die Möglichkeit, die Fußmuskulatur und -gelenke zu entlasten und eine Flosse mit geringerer Stärke zu wählen.

Folgend fand der Stufentest, bestehend aus 8 Stufen von jeweils 200 m, statt. Die Stufengeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsdifferenz erfolgten entsprechend dem modifizierten Pansoldtest [7,8], wie er auch in Nationalmannschaftslehrgängen durchgeführt wird, wobei die Stufenpausen durchgängig auf 45 Sekunden festgelegt wurden.

Untersuchungsbedingungen: Die Angaben zu den äußeren Bedingungen, wie Raum- und Wassertemperatur, Chlorwert und pH-Wert am Testtag des „Senkentests“ können der Tabelle 2 entnommen werden.

Raumtemperatur in °C	Wassertemperatur in °C	Chlorwert	pH-Wert
28,5	27,5	0,59 – 0,6	7,34

Tabelle 2: Darstellung der Untersuchungsbedingungen am Tag des „Senkentests“. In der Tabelle sind die Raum- und Wassertemperatur, der Chlor- und pH-Wert im Schwimmbecken aufgeführt.

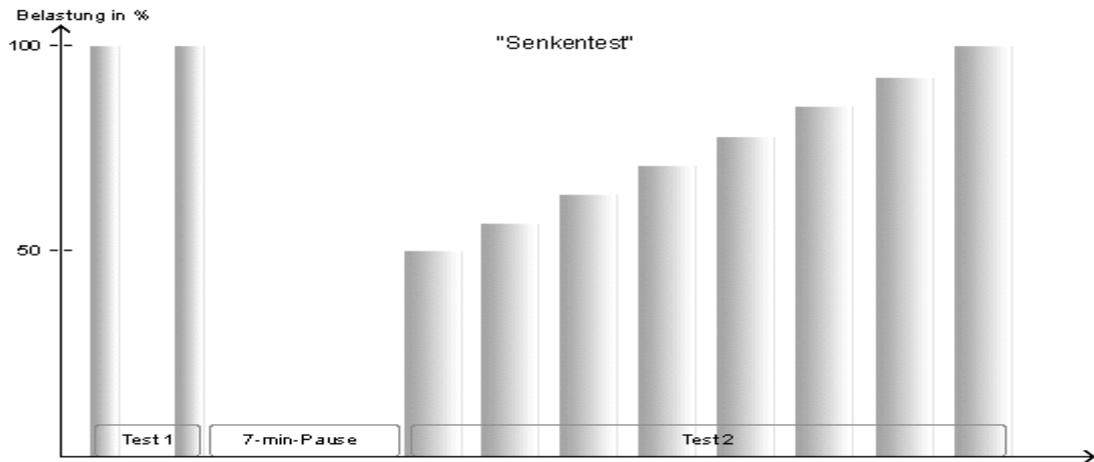


Abb. 1: Testprinzip „Senkentest“. Test 1 besteht aus den 2x100 m in Maximalgeschwindigkeit mit einer zweiminütigen Pause. Test 2 stellt den 8x200 m Stufentest mit Stufenpausen von jeweils 45 Sekunden dar.

Zeitpunkte der Blutabnahme: Die erste Blutabnahme erfolgte direkt vor dem Test, aber frühestens 5 min nach dem Einschwimmen. Weitere Blutabnahmen erfolgten sofort nach der Maximalbelastung, in der dritten und sechsten Minute der folgenden siebenminütigen Pause sowie nach jeder Belastungsstufe in den 45-s-Pausen und in der ersten und dritten Minute der Nachbelastungsphase des Stufentests durchgeführt.

Dauertest: Acht Tage nach dem „Senkentest“ wurde an drei hintereinander folgenden Tagen jeweils eine doppelte Dauerbelastung von 3x400 m in der Schwimmgeschwindigkeit v_{Senke} , sowie 5 % über und unter v_{Senke} geschwommen. Die Pause zwischen den beiden Dauerbelastungen betrug 4 Minuten, die zwischen den Wiederholungen 45 Sekunden. In der Serienpause erhielten die Schwimmer die Möglichkeit die Flosse auszuziehen und ihre Füße zu entspannen.

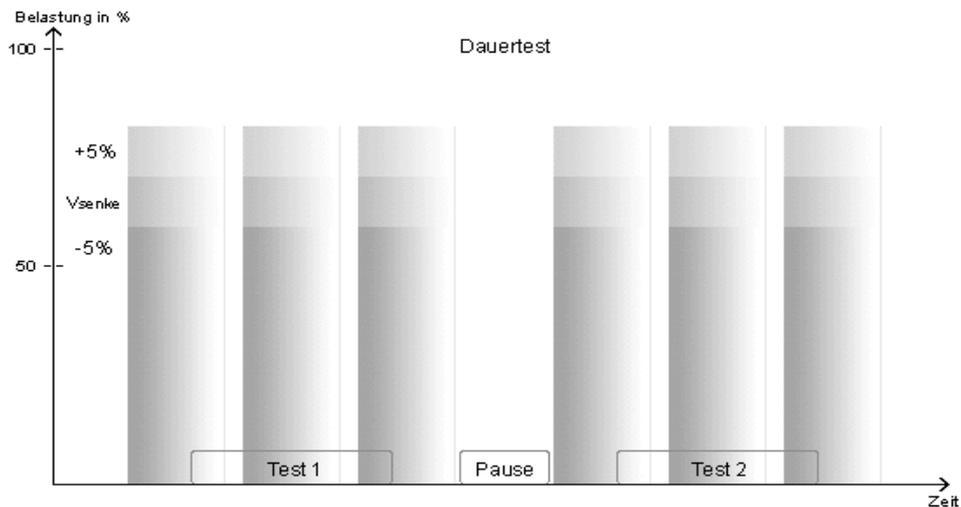


Abb. 2: Testprinzip Dauertest. Test 1 und Test 2 bestehen jeweils aus 3x400 m. Die Pause zwischen beiden Tests beträgt vier Minuten, die Wiederholungspausen 45 Sekunden.

Zeitpunkte der Blutabnahme: Auch hier erfolgte die erste Blutabnahme direkt vor dem Test, aber frühestens fünf Minuten nach dem Einschwimmen. Weitere Blutproben wurden den Schwimmern nach

jeden 400 m, zusätzlich in der 4-Minuten-Pause direkt vor den zweiten 3x400 m und in der ersten und dritten Minute der Nachbelastungsphase der Dauerbelastung entnommen.

Bestimmung der Senkengeschwindigkeit: In einem Koordinatensystem wurden auf der Abszisse die Schwimmgeschwindigkeiten in m/s und auf der Ordinate die Blutlaktatkonzentrationen in mmol/l darge-

stellt. Als Ergebnis ergab sich eine parabelförmige Kurve, an deren Tiefpunkt die Geschwindigkeit abgelesen wurde, die die V_{Senke} darstellt.

Stufe	aktuelle 200-m-Bestzeit von ca.					Pause	Blutabnahme
	01:48-01:55 min (wJ)	01:43-01:48 min (mJ/D)	01:38-01:43 min (mJ/D/M)	01:33-01:38 min (M/D)	01:28- 01:33 min (M)		
1	02:35	02:30	02:25	02:20	02:15	40''	sofort
2	02:25	02:20	02:15	02:10	02:05	40''	sofort
3	02:15	02:10	02:05	02:00	01:55	40''	sofort
4	02:10	02:05	02:00	01:55	01:50	40''	sofort
5	02:05	02:00	01:55	01:50	01:45	90''	1. min
6	02:00	01:55	01:50	01:45	01:40	4 min	2. min
7	01:55	01:50	01:45	01:40	01:35	4 min	3. min
8	01:50	01:45	01:40	01:35	01:30	-	4. + 7. min

Tabelle 3: Modifizierter 8x200 m Stufentest von RIEMANN 1995 [21,23,25]. Die erste Spalte gilt für die weibliche Jugend (wJ), die zweite für die männliche Jugend (mJ) und die Damen (D), die dritte Spalte für die mJ-Spitze, die Damen, die mit dem Drucklufttauchgerät (DTG) schwimmen und die Männer (M). Die vierte Spalte gilt für die Männer und die Damen DTG-Spitze, die fünfte für die Männer DTG-Spitze.

Herzfrequenz: Die Messung der Herzfrequenz (Hf) erfolgte mittels Pulsuhr der Firma POLAR. Der Sender, mit einem Brustgurt auf Höhe des Processus xiphoideus fixiert und der Empfänger in Form einer Armbanduhr waren telemetrisch verbunden. Da das Gerät wasserdicht ist, führte der Sportler es während der Tests mit. Bei den Probanden, welche die Armbanduhr als Behinderung empfanden, wurde der Empfänger sichtbar am Beckenrand positioniert. Konnte auf der Uhr kein Messsignal empfangen werden, ermittelte der Proband seine Herzfrequenz palpatorisch, was aus dem täglichen Training bekannt war.

Zeitnahme: Die Schwimm- und Pausenzeiten wurden von einem Helfer mit digitalen Stoppuhren von Hand gemessen. Außerdem informierte der Helfer die Probanden über ihre geschwommenen Zeiten, die Differenz zur Soll-Zeit und die verbleibende Pause zwischen den Wiederholungen und Serien.

Blutentnahme: Für die Laktatanalyse wurde Vollblut aus den kapillaren Blutgefäßen des Ohrläppchens des Probanden verwendet. Nach dem Einschwimmen erfolgte die Hyperämisierung eines Ohrläppchens mit Finalgon®. Die aufgetragene Salbe wurde dann gründlich entfernt. Bei jeder Blutprobe wurden 20 µl kapilläres Blut mit Einmal-Kapillarpipetten entnommen und anschließend in das mit 1 ml Systemlösung gefüllte Probengefäß (Eppendorf) überführt. Das Probengefäß wurde verschlossen, geschüttelt und bis zur Messung in einem Eppendorfständer kühl aufbewahrt. Während den Tests wurde das Ohr vor jeder Blutabnahme gründlich mit Softtüchern getrocknet.

Laktatanalyse: Im Anschluss an den Test wurden die Probengefäße im Eppendorfständer bis zur Analyse im Kühlschrank aufbewahrt. Die Analyse erfolgte innerhalb von 24 Stunden nach dem Test. Dafür wurde im Labor der Super G der Firma DiaSys – Diagnostic Systems verwendet.

Ergebnisse

Senkentest

Entsprechend der Probandenanzahl standen im Ergebnis 10 „Senkentests“ für die weitere Auswertung zur Verfügung. Keiner der Teilnehmer des Tests schwamm nach der Maximalbelastung den vollständigen Stufentest von 8x200 m. Auf Grund physischer

Erschöpfung brachen zwei der zehn Sportler den Test nach der fünften (Proband 3 und 6), fünf nach der sechsten (Probanden 1,2,4,8 und 10) und drei nach der siebten Stufe ab.

Die Zeitdifferenzen zwischen den Soll- und Ist-Geschwindigkeiten aus dem Stufentest sind der Tabelle 4 zu entnehmen. Dabei ist erkennbar, dass es vor allem in den beiden ersten und den beiden letzten Stufen bei

den Probanden größere Probleme gab, die Sollzeit einzuhalten. Die Zeitdifferenz am Ende des Stufentests erklärt sich durch die physische Erschöpfung der Testpersonen.

Probanden	Δt in sec der einzelnen Stufen							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+ 3,00	- 0,08	- 3,06	- 4,44	- 7,83	- 8,26	-	-
2	+ 1,5	+ 1,8	+ 2,21	+ 4,1	+ 2,8	- 3,64	-	-
3	- 0,85	+ 2,94	- 1,84	- 2,70	- 6,91	-	-	-
4	+ 7,24	+ 2,0	- 1,24	- 1,46	- 3,11	-5,5	-	-
5	+ 16,17	+ 5,2	+ 0,87	+ 0,58	+ 3,07	+ 1,08	- 2,95	-
6	+ 0,61	- 1,61	- 5,45	- 3,77	- 6,36	-	-	-
7	- 2,89	- 1,86	- 1,48	+ 1,08	+ 0,42	+ 1,78	- 1,11	-
8	- 6,04	- 3,92	- 6,09	+ 1,99	- 1,51	- 10,26	-	-
9	+ 14,4	+ 8,99	- 0,54	+ 2,82	+ 2,23	+ 1,91	- 1,32	-
10	+ 2,08	+ 4,08	+ 2,23	+ 1,44	- 0,1	+ 1,39	-	-
\bar{x}	3,52	1,75	- 1,44	- 0,04	- 1,73	- 2,69	- 1,79	-
SD	7,14	3,82	2,86	2,90	4,14	4,92	1,01	-

Tabelle 4: Darstellung der Zeitdifferenzen (Δt) zwischen den Soll- und Ist-Geschwindigkeiten aus dem Stufentest im „Senkentest“.

	Ruhe	Maximalbelastung		Pause in min		Stufen des Stufentests								Nachbelastung in min	
		1. 100 m	2. 100 m	3	6	1	2	3	4	5	6	7	8	1	3
\bar{x}	1,38	-	14,53	14,48	13,52	11,01	8,64	7,45	7,62	8,67	10,29	13,87	-	10,77	10,25
SD	0,69	-	1,86	1,91	2,02	2,18	2,18	1,96	1,98	2,36	3,64	1,55	-	3,16	3,27
N	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	8	3	0	10	10

Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der [Lak] im Senkentest (n = 10).

Die Mittelwerte der [Lak] der einzelnen Abnahmezeitpunkte sind in der Tabelle 5 und Abb. 3 zusammenfassend dargestellt.

Die doppelte Maximalbelastung von 2x100 m führte zu Maximalwerten zwischen 10,6 und 16,9 mmol/l. Die

Laktatwerte lagen im Bereich der Senke deutlich über 4 mmol/l, im Mittel bei ca. 7 mmol/l. In Abb. 3 sind die Mittelwerte der [Lak] dargestellt.

Aus Abb. 4 wird erkennbar, dass die Laktatsenke im Mittel bei ca. 90% der Maximalleistung erreicht wurde.

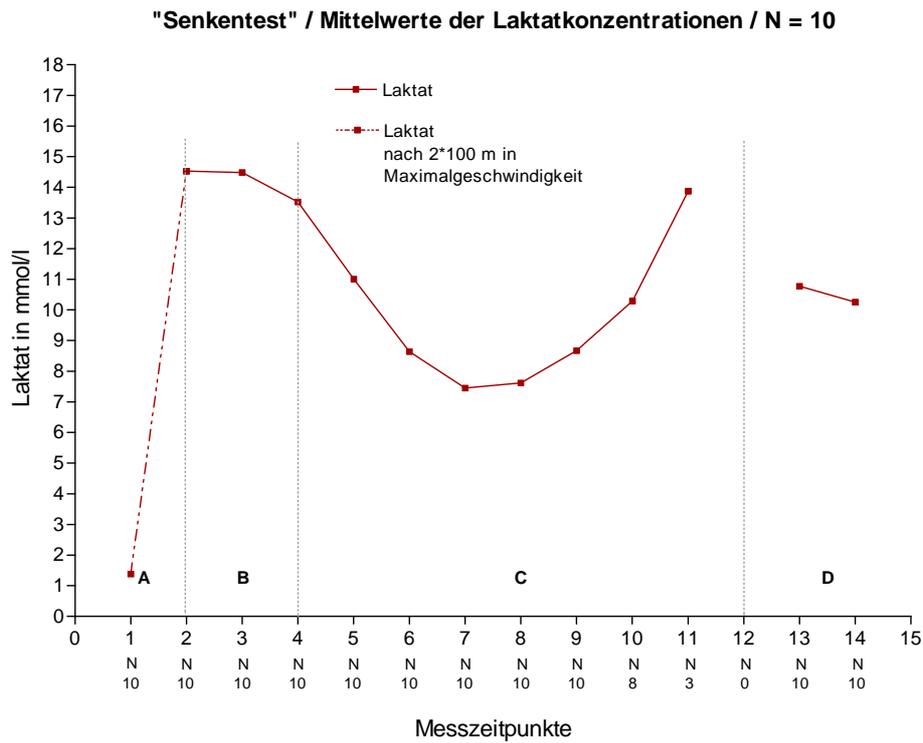


Abb. 3: Darstellung der Mittelwerte der [Lak] im Senkentest (N = 10). Nach den 2x100 m in der Maximalgeschwindigkeit (A) folgen die 7-Minuten-Pause (B) und der Stufentest von 8x200 m (C). Der Bereich D stellt die Nachbelastungsphase dar.

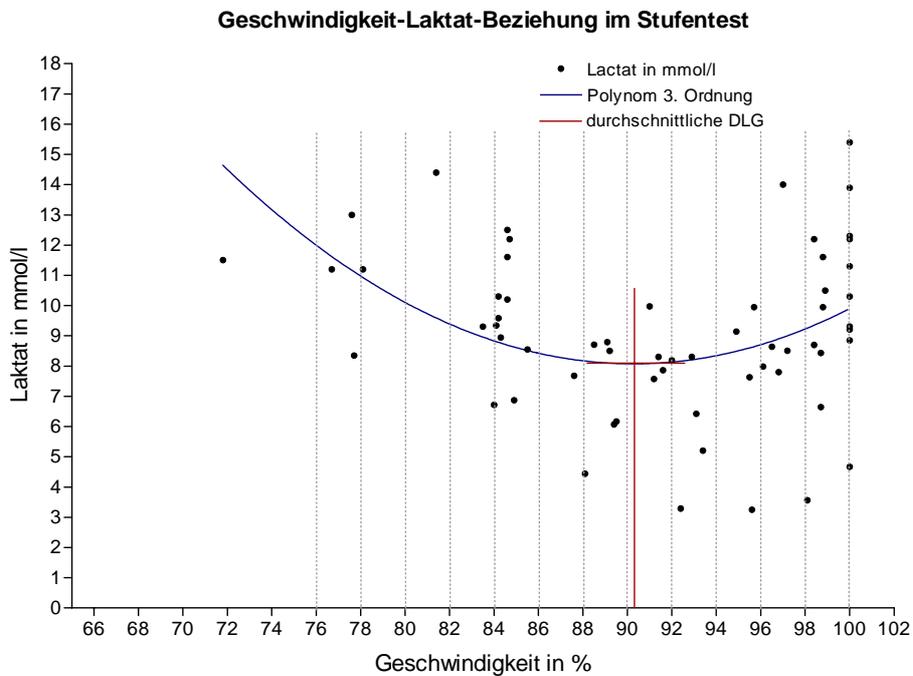


Abb. 4: Geschwindigkeit-Laktat-Beziehung unter Belastung im Stufentest bei bestehender Laktatazidose.

Herzfrequenz: Der Verlauf der Herzfrequenzkurven ist im Allgemeinen sehr ähnlich. Die Herzfrequenz (Hf) steigt während der Maximalbelastung stark an und fällt in der 7-minütigen Pause ab. Während dem nachfolgenden Stufentest steigt die Herzfrequenz bis zum Testabbruch wieder an. Im Mittel lag die Herzfrequenz im Maximaltest nach 1100 m bei 174 ± 13.7 Schlägen und nach 2100 m bei

184 ± 13.2 Schlägen pro min. Die Maximalfrequenz am Ende des Stufentests lag bei 186 ± 7.5 Schlägen.

Bestimmung der Senkengeschwindigkeit: Die manuell zeichnerische Bestimmung der Senkengeschwindigkeit erfolgte nach dem Schema, wie es an anderer Stelle beschrieben wurde. Die ermittelten Tiefpunkte der „Laktatsenke“ aller Probanden können der Tabelle 6 entnommen werden.

Senkenzeitpunkt auf der Stufe	Probanden										\bar{x}	SD
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	4,2	3,5	2,9	4,0	4,0	3,0	4,1	3,7	4,3	3,5	3,72	0,49

Tabelle 6: Zeichnerisch ermittelte Zeitpunkte der Laktatsenke aller Probanden.

Der Tiefpunkt der [Lak] bei den Probanden liegt auf einer zeichnerisch bestimmten Stufe von $3,72 (\pm 0,49)$. Die ermittelte Schwimmgeschwindigkeit im Bereich des Kurventiefpunkts v_{Senke} liegt bei $1,57$ m/s, wobei interindividuelle Unterschiede von $1,42$ bis $1,73$ m/s auftreten. Die exakten Senkengeschwindigkeiten und die jeweilig berechneten Geschwindigkeiten 5% über und unter der Senke, sind den Tabellen 20 bis 29 zu entnehmen. Die entsprechende Herzfrequenz entspricht

$177 (\pm 11.9)$ Schlägen/min bzw. 95% der Maximalfrequenz.

Die durchschnittliche DLG der Probanden liegt bei $90,3\%$ der maximal erreichten Geschwindigkeit im Stufentest (Abb. 4). An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Probanden mit durchschnittlich $80,95\%$ der maximal erreichten Stufengeschwindigkeit die erste Stufe begannen. Die erste Stufe lag im Bereich der Kompensation.

Dauertest

Zur Überprüfung der Frage, ob der tiefste Punkt der Laktatkurve der „anaeroben Schwelle“ entspricht, wurden insgesamt 29 Dauertests von je $2 \times 3 \times 400$ m durchgeführt. Die Testteilnehmer schwammen den

Dauertest in den Geschwindigkeiten v_{Senke} und $v_{\text{Senke}} \pm 5\%$. Proband 2 konnte auf Grund einer plötzlichen Erkrankung nicht an dem Dauertest $v_{\text{Senke}} + 5\%$ teilnehmen.

Dauertest in v_{Senke}

Es wurde von allen 10 Probanden je ein Dauertest in der Senkengeschwindigkeit geschwommen. Die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen

der [Lak] sind der Tabelle 7 zu entnehmen. Die Mittelwerte wurden zusätzlich in der Abb. 5 dargestellt.

	Ruhe	1. 400 m	2. 400 m	3. 400 m	Pause in min 3	4. 400 m	5. 400 m	6. 400 m	Nachbelastung in min	
									1	3
\bar{x}	1,68	5,68	5,63	5,63	4,66	5,24	5,23	5,23	5,03	4,67
SD	0,82	1,28	1,68	1,98	1,89	2,06	2,09	2,30	2,40	2,30
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabelle 7: Mittelwerte und SD der Laktatwerte des Dauertests auf Senkengeschwindigkeit.

Grundsätzlich kam es bei der Einhaltung der Soll-Geschwindigkeiten auf den einzelnen 400-m-Strecken zu nur unerheblichen Abweichungen, da die Sportler mit Ausnahme der Probanden 3, 4 und 5 die Vorgaben mit einer Toleranz von +/- 2 Sekunden erfüllen

Dauertest $v_{Senke} + 5\%$

Aufgrund einer plötzlichen Erkrankung des 2. Probanden, liegen die Ergebnisse von nur 9 Dauertests vor. Proband 9 brach wegen physischer Erschöpfung den Dauertest nach der fünften Wiederholung ab. Die Mittelwerte und Standardabweichungen können der Tabelle 8 entnommen werden. In Abb. 5 sind die Mittelwerte grafisch dargestellt.

Das Einhalten der schnelleren Soll-Geschwindigkeiten bereitete mehreren Probanden größere Schwierigkeiten, generell waren vor allem gegen Ende der 2. Dauerphase die Geschwindigkeiten oft zu niedrig. So

konnten. Die Herzfrequenz lag am Ende der ersten Dauerphase (3400 m) bei 168 ± 14.4 , am Ende der zweiten Dauerphase (6400 m) bei 170 ± 15.4 Schlägen/min.

schwammen die Sportler 1 und 6 durchschnittlich fünf bis zehn Sekunden, Proband 8 acht bis zu dreizehn Sekunden, Proband 9 und 10 fünf bis zu acht Sekunden langsamer. Die Testperson 4 war auf den ersten 400 m neun Sekunden und auf den zweiten 400 m sieben Sekunden langsamer, dagegen war Proband 3 auf den ersten 400 m vier Sekunden und auf den zweiten 400 m sechs Sekunden schneller. Die Herzfrequenz lag nach 3400 m bei 179 ± 13.5 , nach 6400 m bei 180 ± 15.6 Schlägen/min.

	Ruhe	1. 400 m	2. 400 m	3. 400 m	Pause in min 3	4. 400 m	5. 400 m	6. 400 m	Nachbelastung in min	
									1	3
\bar{x}	1,59	7,81	9,12	9,42	8,17	8,90	9,10	8,54	8,87	8,42
SD	0,69	2,08	2,60	2,73	2,65	2,73	3,03	2,65	3,01	3,17
N	9	9	9	9	9	9	9	8	9	9

Tabelle 8: Mittelwerte und SD der Laktatwerte des Dauertests $v_{Senke} + 5\%$.

Dauertest $v_{Senke} - 5\%$

Auch hier standen im Ergebnis entsprechend der Probandenzahl 10 Dauertests in einer Geschwindigkeit von $v_{Senke} - 5\%$ für die weitere Auswertung zu Verfügung. Die Mittelwerte und \pm die Standardabweichung

der einzelnen Abnahmezeitpunkte sind aus der Tabelle 9 ersichtlich. Die Mittelwerte der [Lak] sind in der Abb. 5 dargestellt.

	Ruhe	1. 400 m	2. 400 m	3. 400 m	Pause in min 3	4. 400 m	5. 400 m	6. 400 m	Nachbelastung in min	
									1	3
\bar{x}	1,21	4,00	3,30	3,08	2,47	2,94	2,83	2,76	2,63	2,42
SD	0,44	1,13	1,13	1,08	0,95	1,22	1,02	1,02	0,99	0,88
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabelle 9: Darstellung der Mittelwerte und \pm die Standardabweichungen der [Lak] des Dauertests $v_{Senke} - 5\%$.

Insgesamt wurden die Soll-Geschwindigkeiten der einzelnen 400-m-Strecken gut eingehalten. Lediglich die Probanden 1 und 3 schwammen die ersten 400 m 3 Sekunden schneller. Sportler 5 war im gesamten

Test durchschnittlich 2 bis 4 Sekunden schneller. Die Herzfrequenz lag nach 3400 m bei 156 ± 15.5 , nach 6400 m bei 155 ± 16 Schlägen/min.

Vergleich der Dauertests

Bei jedem der getesteten Sportler ist in allen 3 Dauertests nach der ersten 400-m-Strecke ein steiler Anstieg der [Lak] aus der Ruhe heraus zu verzeichnen. Im weiteren Verlauf, den 3x400 m (Test 1), der 4-min-Pause und den nochmaligen 3x400 m (Test 2) sind Unterschiede im Verhalten der [Lak] je nach Belastungsintensität festzustellen. Die Abb. 5 stellt zusammenfassend die Mittelwerte der [Lak] aus allen drei Dauertests dar. Es wird deutlich, dass die Senkengeschwindigkeit innerhalb von ca. 6.24 ± 3.5 min zur Einstellung eines Laktat-steady-state auf hohem Niveau führt (ca. 5.5 mmol/l). Bei Senkengeschwindigkeit

+ 5% dauert es bis zur Einstellung eines „Gleichgewichts“ im Mittel 10.08 ± 3.06 min, der Laktatwert beträgt ca. 9.5 mmol/l. Bei Senkengeschwindigkeit -5% wird der höchste Laktatwert (4mmol/l) nach ca. 4.27 ± 0.16 min erreicht, das Laktat fällt dann aber stetig auf 3 mmol/l ab. In der jeweils 2. Phase des Dauertests sind die Verhältnisse ähnlich. Die Herzfrequenzen unterschieden sich in den Dauertests insgesamt hochsignifikant. Die Unterschiede nach 3400 m lagen jeweils bei ca. 11 Schlägen über (Vsenke + 5%) oder unter (Vsenke -5%) der Senkenfrequenz.

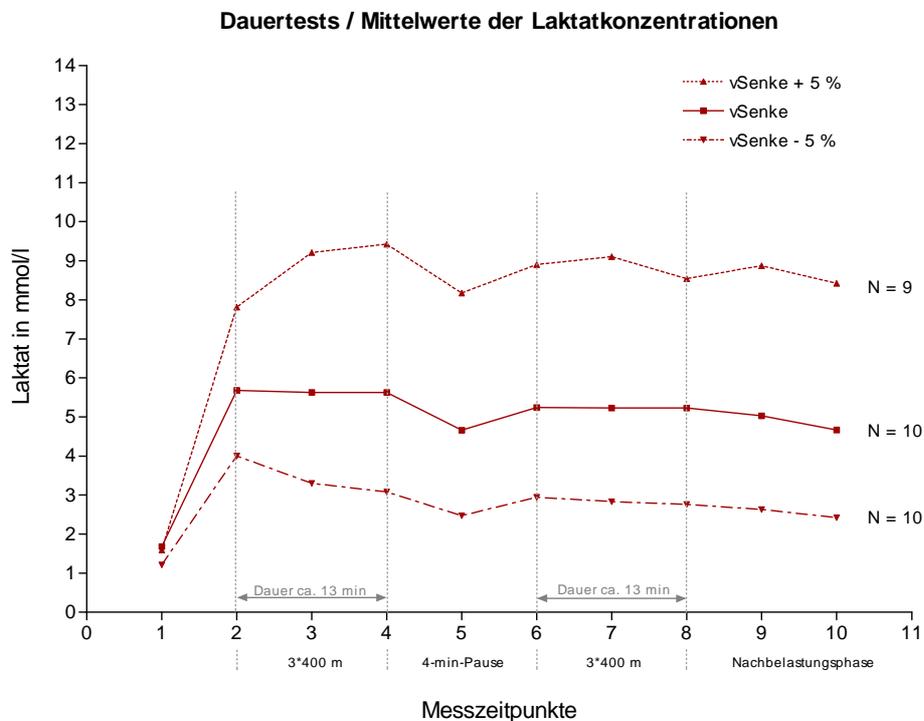


Abb. 5: Darstellung der Laktatmittelwerte in allen drei Dauertests.

Diskussion

Die Laktatkonzentration im Blut ist abhängig von der Laktatproduktion, dem muskulärem Lactat-Release und dem vaskulärem Lactat-Uptake (Laktattransport) sowie der oxidativen und gluconeogenetischen Laktatelimination.

Die Höhe der resultierenden [Lak] in der Zelle und im Blut und somit auch der Verlauf der LLK sind von verschiedenen Faktoren abhängig. So haben die Glykolyse und Glukoneogenese einen wesentlichen Einfluss auf die [Lak]. Außerdem ist Laktat ein wertvolles

Kohlenhydratmetabolit, welches in vielen Körperzellen der oxidativen Energiegewinnung dient. Bereits eine erhöhte alimentäre Kohlenhydratzufuhr kann den Blutlaktatspiegel um 2-4 mmol/l steigern [2,3].

Die Aktivierungszeit für die Glykolyse bis zum Pyruvat ist durch körperliche Belastung viel kürzer, als die für die oxidative Phosphorylierung [9]. Folglich kommt es zu einem Stau von Pyruvat, NADH + H⁺-Ionen und aufgrund des Massenwirkungsgesetzes zur Bildung von Laktat.

Laktattransport: Das Laktat wird über die Glykolyse bzw. die Glykogenolyse im Zytoplasma der Zelle produziert. Bei der Laktatbestimmung wird aber nicht die [Lak] in der Zelle, sondern im Blut gemessen.

Durch körperliche Belastung entsteht ein Laktatkonzentrationsgradient zwischen Muskel und Blut, der umso höher ist, je intensiver die Belastung erfolgt. Während einer Maximalbelastung erreicht die [Lak] in der Muskelzelle ihren Höhepunkt, dagegen wird der Gipfel im Blut erst nach der Maximalbelastung erreicht. Die Differenz bleibt einige Minuten bestehen [11,12] und nimmt nach Erreichen eines Gleichgewichts in beiden Kompartimenten gleichmäßig ab.

Der muskuläre Lactat-Release ist abhängig von der intra- und extrazellulären [Lak], dem Dissoziationsgrad der Milchsäure und der pH-Differenz. In der Zellmembran findet ein unterstützter Laktattransport statt.

Laktatelimination: Die [Lak] wird nicht nur von der Laktatproduktion und dem Release beeinflusst, sondern auch durch die Laktatelimination. Da diese besonders vom Trainingszustand abhängig ist, muss sie bei der Schwellenermittlung berücksichtigt werden. Die oxidative Elimination findet nach [2] vorwiegend in den roten Muskelfasern und im Herzmuskel statt. Laktat wird nicht nur in Ruhe, sondern auch unter Belastung eliminiert. Die Remetabolisierung von Laktat zu Pyruvat erfolgt durch die LDH-Isoenzyme I und II. Die LDH-Isoenzym-Aktivität ist von dem intrazellulären pH und dem cytosolischen und mitochondrialen NAD⁺/NADH Quotienten abhängig. Das Herz besitzt eine hohe LDH-Isoenzym I- und II-Aktivität, wodurch

Testbeurteilung

In dieser Untersuchung schwammen zehn Athleten den Dauertest in v_{Senke} . Bei 70 % der Fälle konnte die [Lak] von Beginn an bzw. nach einem geringen Abfall nach der initialen Akkumulationsphase konstant gehalten werden. Die [Lak] aller Testpersonen liegen in diesem Dauertest in einem Bereich zwischen 2,0 und 9,4 mmol/l. Die erhebliche Streuung zeigt wie viele frühere Untersuchungen, dass ein für alle Probanden gültiger Wert einer absoluten „Laktatschwelle“ von z.B. 4 mmol/l nicht existiert.

Neun Sportler absolvierten den Dauertest in $v_{\text{Senke}} + 5\%$, wobei Proband 9 den Test aufgrund physischer Erschöpfung vorzeitig abbrach. Deutlich war vor allem die erhebliche Verzögerung in der Einstellung eines Laktatgleichgewichts sowie die hohe mittlere Laktatkonzentration.

Den Dauertest $v_{\text{Senke}} - 5\%$ schwammen alle zehn Testpersonen. In 80 % der Fälle kam es zu einem Abfall der [Lak] bzw. konnte die Konzentration nach einem

die Laktatoxidation zu Pyruvat begünstigt wird. Somit kann der Herzmuskel gegenüber der roten Skelettmuskel das peripher gebildete Laktat zu 100 % metabolisieren.

Es ist bekannt, dass die Muskulatur während der Belastung Laktat aus dem Blut wieder aufnimmt, um den Energiebedarf zu decken, obwohl gleichzeitig große Mengen an Laktat von dem arbeitenden Muskel abgegeben werden. Der Ausdauerzustand wird vor allem durch die Laktataufnahme repräsentiert.

Hinsichtlich der Beurteilung der Laktateinstellung im Dauertest gilt aus pharmakokinetischer Sicht:

- Eine verstärkte Laktatproduktion („Invasion“) führt zur höheren Laktatwerten bei unveränderter Geschwindigkeit der steady-state Einstellung
- Eine verstärkte Laktataufnahme in die Muskulatur („Evasionskonstante“) führt zu beschleunigter steady-state Einstellung

Entscheidendes Beurteilungskriterium für das Erreichen bzw. Überschreiten der „anaeroben Schwelle“ ist damit die Zeit zur Einstellung des steady-states. Eine deutliche Verzögerung weist dabei auf einen „überschwelligen“ Zustand hin. Im Allgemeinen entspricht dies einer Zeit > 7-10 min.

Ein „maximales Laktat-steady-state“ („maxLass“) ist somit aus pharmakokinetischer Sicht nicht möglich. Fehlende steady-state Einstellung kann sich allerdings durch die Tatsache ergeben, dass die Belastung nicht bis zur Einstellung durchgehalten werden kann.

geringen Abfall konstant gehalten werden. Auffällig ist auch hier die große Streuung der Laktatkonzentration.

Es ist erkennbar, dass es sich bei dem Dauertest $v_{\text{Senke}} - 5\%$ nicht um ein steady-state handelt, da die [Lak] abfällt bzw. sich auf einen Wert einstellt, der annähernd dem Ruhewert vor dem Test entspricht.

Weiterhin ist den Ergebnissen zu entnehmen, dass bei einem Teil der Sportler die [Lak] sowohl in v_{Senke} als auch in $v_{\text{Senke}} + 5\%$ konstant gehalten wird. Verteilungskinetisch ist in jedem Fall ein steady-state zu erwarten, entscheidend für die Einstellungsgeschwindigkeit auf ein steady-state ist die Laktatevasion. Die aktuelle Untersuchung zeigt, dass, unabhängig von der absoluten Laktatkonzentration, die Einstellung auf ein steady-state im Mittel deutlich verzögert war (>7 min). Im Gegensatz dazu war die Einstellung bei $v_{\text{Senke}} - 5\%$ sehr schnell bzw. es kam nach initialer Verteilungsphase zu einem Laktatabfall.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Die im „Senkentest“ bestimmte Schwimmgeschwindigkeit legt im engen Bereich das schnell erreichbare Laktat-steady-state auf hohem Niveau fest
- Eine nur 5%, d.h. fast im Bereich der Einstellbarkeit erhöhte Schwimmgeschwindigkeit führt zu einer erheblich verzögerten Gleichgewichtseinstellung auf einem Niveau (> 9 mmol/l), das intensive Ausdauerleistungen nicht mehr zulässt
- Eine um 5% gegenüber der Senkengeschwindigkeit erniedrigte Schwimmgeschwindigkeit bewirkt nach einer kurzen verteilungsbedingten Anstiegskurve im Mittel einen Laktatabfall als Hinweis auf eine allenfalls extensive Dauerleistung unterhalb der „anaeroben Schwelle“.
- Die „anaerobe Schwelle“ für Flossenschwimmer liegt im Mittel bei ca. 90% der individuellen Maximalgeschwindigkeit.
- Die der „anaeroben Schwelle“ entsprechende Herzfrequenz liegt bei ca. 95% der individuellen Maximalfrequenz.

Mit dem vorgestellten Verfahren konnte für Flossenschwimmer erstmalig ein individuelles Verfahren für die verteilungskinetische Bestimmung der „anaeroben Schwelle“ belegt werden. Das Verfahren beruht auf bekannten pharmakokinetischen Gegebenheiten. Im Ergebnis ist es damit möglich, innerhalb eines sehr engen Geschwindigkeitsbereichs für Flossenschwimmer die „anaerobe Schwelle“ anzugeben. Dies ermöglicht erstmals exakte Aussagen über den individuellen Belastungsstoffwechsel und zugleich präzise Festlegungen relevanter Trainingsbereiche.

Die besondere Bedeutung einer derart exakten Bestimmungsmethode ergibt sich daraus, dass „anaerobe Schwelle“ und die entsprechende Herzfrequenz nahe bei den jeweiligen Maximalwerten liegen. Eine nur geringe Überschreitung der „Schwellenwerte“ muss damit rasch zu einer belastungsbedingten Erschöpfung führen.

Literatur

1. Braumann KM, Tegtbur U, Busse MW, Maassen N: Die „Laktatsenke“ (1991): Eine Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze. *Deutsch Z Sportmed* 42: 240-246
2. Brooks GA (1986): The lactate shuttle during exercise and recovery. *Med Sci Sports Ex* 18 (3): 360-368
3. Brooks GA (1991): Current concepts in lactate exchange. *Med Sci Sports Ex* 23 (8): 895-906
4. Griess M (1992): Der Senkentest eine neue Methode zur Bestimmung der Dauerleistungsfähigkeit im Schwimmen. Dissertation, Medizinische Hochschule Hannover
5. Griess M, Tegtbur U, Braumann KM, Busse MW, Maassen N (1989): Eine neue Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze im Schwimmsport. In: Böning D, Braumann KM, Busse MW, Maassen N, Schmidt W (Hrsg) *Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit?* Deutscher Ärzte-Verlag, Köln, 418-422
6. Matwejew LP (1981): Grundlagen des sportlichen Trainings. Sportverlag, Berlin
7. Pansold B (1985): Untersuchungen zur komplexen Leistungsbewertung unter Berücksichtigung der Spezifität des Testverfahrens an ausgewählten Gruppen und Probanden von Leistungssportlern. Dissertation B, Greifswald
8. Pansold B, Roth W, Zinner J, Hasart E, Gabriel B (1982): Die Laktat-Leistungs-Kurve – ein Grundprinzip sportmedizinischer Leistungsdiagnostik. *Med u Sport* 22 (4): 107-112
9. Stainsby WN (1986): Biochemical and physiological bases for lactate production. *Med Sci Sports Exerc* 18 (3): 341-343
10. Tegtbur U, Griess M, Braumann KM, Busse MW, Maassen N (1989): Eine neue Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze bei Mittel- und Langstrecklern. In: Böning D, Braumann KM, Busse MW, Maassen N, Schmidt W (Hrsg): *Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit?* Deutscher Ärzte-Verlag, Köln, 463-466
11. Zouloumian P, Freund H (1981): Lactate after exercise in man, II: Mathematic model. *Eur J Appl Physiol* 46: 135-147
12. Zouloumian P, Freund H (1981): Lactate after exercise in man, III: Properties of the compartment model. *Eur J Appl Physiol* 46: 149-160

Korrespondenzadresse: Prof. Dr. Dr. med. habil. M.W. Busse
 Institut für Sportmedizin der Universität Leipzig
 Marschnerstrasse 29
 D-04109 Leipzig
 E-mail: busse@rz.uni-leipzig.de