

W. Kindermann

## Anaerobe Schwelle

Institut für Sport- und Präventivmedizin  
Universität des Saarlandes, Saarbrücken

### Zusammenfassung

Laktat- und ventilatorische Schwellen werden zur Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung eingesetzt. Die anaerobe Schwelle, ermittelt über die Laktat-Leistungskurve, repräsentiert das maximale Laktat-Steady-State. Sie ist die obere Grenze des aerob-anaeroben Übergangs und stellt einen physiologischen Breakpoint dar. Bei länger dauernden Belastungen oberhalb der anaeroben Schwelle steigt die Laktatkonzentration im Blut trotz konstanter Intensität an. Der Beginn des aerob-anaeroben Übergangs wird durch die aerobe Schwelle definiert, den Punkt des ersten Laktatanstiegs. Den genannten Laktatschwellen können ventilatorische Schwellen zugeordnet werden. Individuelle anaerobe Schwellen erlauben gegenüber fixen Laktatschwellen eine zuverlässigere Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit und Intensitätssteuerung.

### Einleitung

Das klassische Prinzip der Leistungsüberprüfung im Labor ist die Spiroergometrie mit Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2max}$ ). Es besteht aber eine deutliche Diskrepanz zwischen der sportartspezifischen Leistungsentwicklung, beispielsweise in gut messbaren Ausdauersportarten wie im Langstreckenlauf, und der Zunahme der  $VO_{2max}$ . Schon in den 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts lagen die Werte für die  $VO_{2max}$  um oder über 80 ml/min/kg. Ähnliches gilt auch für die Herzvolumina, deren Maximalwerte vor 3 Jahrzehnten bereits knapp 20 ml/kg betragen.

Die Messung von maximalen Leistungsparametern wurde folgerichtig ergänzt durch Konzepte, die auf submaximalen Werten basieren, wobei insbesondere respiratorische Größen (ventilatorische Schwellen) und Blutlaktatkonzentrationen (Laktatschwellen) benutzt werden. Seit den 70er Jahren ist die anaerobe Schwelle ein etablierter Begriff im internationalen Schrifttum und hat in der Praxis von Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung einen festen Stellenwert.

### Definition

Aus trainingsphysiologischer Sicht hat der aerob-anaerobe Übergang besondere Bedeutung (Abb. 1). Dieser beginnt mit dem ersten Laktatanstieg, auch als Laktatschwelle oder aerobe Schwelle (AeS) bezeichnet, und endet mit der anaeroben bzw. individuellen anaeroben Schwelle (IAS), die das maximale Laktat-Steady-State repräsentiert (3, 6, 9, 10). Die anaerobe Schwelle liegt im Mittel bei 4 mmol/l Laktat (4), bei Ausdauertrainierten aber meist niedriger.

Spiroergometrisch entspricht dem ersten Laktatanstieg die ventilatorische Schwelle VT1 (7) (Abb. 1). Die anfallende Milchsäure wird über Bikarbonat abgepuffert, das vermehrt freigesetzte Kohlendioxid ( $Excess\ CO_2$ ) führt zu einem überproportionalen Anstieg der Ventilation. Hier liegt auch der von Hollmann definierte Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung (5). Wasserman (11) hat die ventilatorische Schwelle ursprünglich als „anaerobic threshold“ bezeichnet, die nicht mit der über die Laktatkonzentration ermittelten anaeroben Schwelle verwechselt werden darf, deren Intensität höher liegt. Der zweite überproportionale Anstieg der Ventilation (VT2; Abb. 1) wird auch als respiratorischer

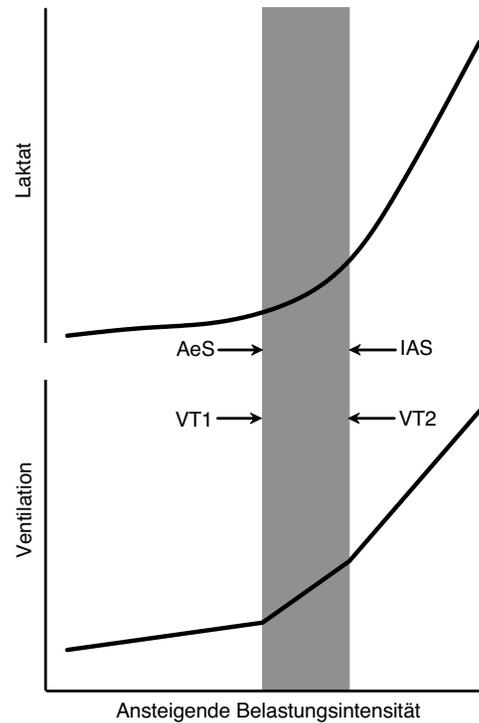


Abbildung 1: Schematische Darstellung des aerob-anaeroben Übergangs (grauer Bereich). Laktat-Leistungskurve (oben) und Ventilation (unten) bei ansteigender Belastungsintensität. AeS: aerobe Schwelle; IAS: individuelle anaerobe Schwelle; VT1: ventilatorische Schwelle 1; VT2: ventilatorische Schwelle 2 (respiratorischer Kompensationspunkt)

Kompensationspunkt (RCP) bezeichnet, der im Bereich der anaeroben Laktatschwelle liegt, aber nicht punktgenau identisch ist. Es wird angenommen, dass in diesem Intensitätsbereich die aus der Milchsäure anfallenden Wasserstoffionen nicht mehr vollständig abgepuffert werden können, so dass der abfallende pH die Atmung zusätzlich stimuliert (7).

### Methodische Aspekte und Gütekriterien

Für die Bestimmung der ventilatorischen Schwellen haben sich rampenförmige Belastungsprotokolle bewährt, weil stufenförmige Intensitätsanstiege zu Artefakten führen können, die fälschlich als Schwellen interpretiert werden. Hingegen werden Laktatschwellen überwiegend auf der Basis von stufenförmigen Belastungsprotokollen ermittelt. Es existiert eine Vielzahl von Methoden, wobei die jeweils berechneten anaeroben Schwellen in der Regel nicht vergleichbar sind. Die meisten Schwellenmodelle sind unzureichend validiert. Fixe, d. h. auf definierte Laktatkonzentrationen bezogene Schwellen, sind zwar am einfachsten zu bestimmen, berücksichtigen aber nicht, dass gleiche Blutlaktatkonzentrationen interindividuell unterschiedliche metabolische Situationen reflektieren können. Deshalb sind so genannte individuelle anaerobe Schwellen anzustreben, bei denen die Schwellen-Laktatkonzentrationen in Abhängigkeit von der Sportart und vom Trainingszustand teilweise deutlich von 4 mmol/l abweichen können.

Ein in den 80er Jahren entwickeltes Konzept zur Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle berücksichtigt zusätzlich die Laktatkinetik der unmittelbaren Erholungsphase (9). Es konnte nachgewiesen werden, dass die auf diese Weise bestimmte anaerobe Schwelle das maximale Laktat-Steady-State widerspiegelt (10). Diese Schwelle bleibt durch eine Glykogenverarmung der Arbeitsmuskulatur unbeeinflusst. Die Reliabilität ist hoch, im Test-Retest-Vergleich besteht kein Unterschied für die Schwellenleistungsfähigkeit. Veränderungen der Stufendauer und -

höhe wirken sich unterschiedlich aus. Eine Verlängerung der Stufendauer hat keinen signifikanten Einfluss, dem gegenüber führt eine Reduzierung der Stufenhöhe zu einem Anstieg der Schwelle (2).

## Physiologischer Breakpoint

Da Änderungen der Energiebereitstellung nicht abrupt, sondern allmählich erfolgen, wird der Schwellenbegriff auch kritisch diskutiert. Aber zweifellos signalisieren markante Änderungen der Laktat- und Ventilationskurven, die optisch als „Knickpunkte“ zu erkennen sind, nicht nur metabolische, sondern auch Änderungen anderer Teilbereiche. So steigen die Plasmakatecholamine Adrenalin und Noradrenalin bei Überschreiten der anaeroben Schwelle überproportional an. Auch immunologische Parameter wie die natürlichen Killerzellen oder der oxidative Burst zeigen oberhalb der anaeroben Schwelle signifikante quantitative Veränderungen.

## Trainingspraxis

Die anaerobe Schwelle ist ein zuverlässiger Parameter zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit und im Gegensatz zur  $\text{VO}_2\text{max}$  unabhängig von der Motivation bzw. Ausbelastung (8). Veränderungen der Ausdauer werden mit hoher Sensitivität erfasst. Die Leistungsfähigkeit an der anaeroben Schwelle beträgt in Abhängigkeit von der Sportart und dem Trainingszustand ca. 60 bis 85 %  $\text{VO}_2\text{max}$  (aerobe Schwelle ca. 40 bis 65 %  $\text{VO}_2\text{max}$ ).

Intensitätsvorgaben für eine Trainingssteuerung sind anhand des Zwei-Schwellen-Konzepts (6, 7), das den aerob-anaeroben Übergang definiert, möglich (Abb. 2). Die aerobe Schwelle markiert die obere Grenze des regenerativen Trainingsbereichs. Extensives Ausdauertraining (Grundlagenausdauer I - GA I) findet je nach Sportart und Belastungsdauer bei 70 bis knapp 90 % der anaeroben Schwelle statt, intensives Ausdauertraining (Grundlagenausdauer II - GA II) und Tempodauerläufe (TDL) zwischen 90 bis 100 % der anaeroben Schwelle. Im Leistungssport erfolgt die Energiebereitstellung bei intensivem Dauerlauftraining bereits mit merklich anaeroben Anteilen (Laktat im Mittel zwischen 3 bis 5 mmol/l). Intervallprogramme (IVT) erfolgen mit Intensitäten oberhalb der anaeroben Schwelle, wobei in Abhängigkeit von Intensität und Pausendauer unterschiedliche Laktatkonzentrationen angesteuert werden können.

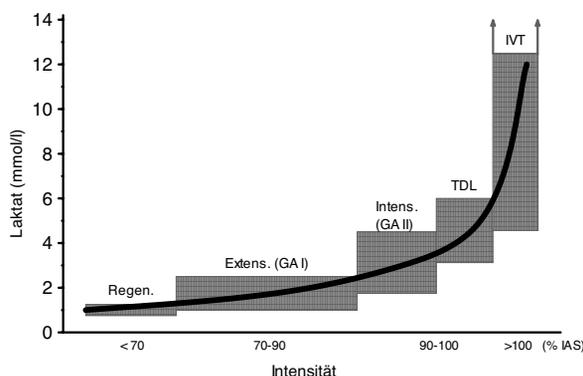


Abbildung 2: Verschiedene Trainingsprogramme, durchgeführt mit unterschiedlichen Prozentanteilen der individuellen anaeroben Schwelle. Abkürzungen siehe Text

Gute Marathonläufer absolvieren ihre Rennen im Bereich der anaeroben Schwelle. Deren Laufzeiten können deshalb über die Schwellenleistungsfähigkeit prognostiziert werden. Marathonläufer regionaler Klasse (ca. 3:00 h) laufen mit ca. 95 % der Geschwindigkeit der anaeroben Schwelle.

Trainingsempfehlungen für den präventiven und rehabilitativen Sport orientieren sich ebenfalls am aerob-anaeroben Übergangsbereich. Kür-

zere Trainingseinheiten können zwischen 90 bis 100 % der anaeroben Schwelle, längere nahe der aeroben Schwelle durchgeführt werden. Die Empfehlungen sollten als Herzfrequenzvorgaben erfolgen. Da Beta-blocker die Laktat-Leistungskurve nicht beeinflussen, können auch für diesen Personenkreis exakte Trainingsvorgaben erfolgen. Überschwelliges Training, d. h. oberhalb der anaeroben Schwelle, ist für den Gesundheitssport nicht relevant und kann bei Patienten riskant sein.

## Anaerobe Schwelle und Fettverbrennung

Das Maximum der Fettverbrennung - absolut betrachtet - liegt bei 55 bis 72 %  $\text{VO}_2\text{max}$  entsprechend 68 bis 79 % der maximalen Herzfrequenz (1). Dies entspricht dem Bereich des aerob-anaeroben Übergangs. Erst oberhalb der anaeroben Schwelle nimmt der Anteil der Fettverbrennung an der Gesamtenergiebereitstellung deutlich ab. Mithin führt ein Training von ca. 90 % der anaeroben Schwelle auch zu einer maximalen Fettverbrennung.

## Fazit

Die anaerobe Schwelle ist ein zuverlässiger und praktikabler Parameter in der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. Die jeweiligen Testmethoden müssen aber hinsichtlich ihres Anwendungsbereiches validiert und kritisch hinterfragt werden, um eine sinnvolle Nutzung in der Sportpraxis zu gewährleisten. Wegen der möglichen interindividuellen Unterschiede im Laktatverhalten sollten laktatorientierte Trainingsempfehlungen zumindest in Einzelfällen unter spezifischen Feldbedingungen überprüft werden. Außerdem können biomechanische und koordinative Unterschiede zwischen Labor- und Feldbelastung bestehen.

## Literatur

1. Achten J, Gleeson M, Jeukendrup AE: Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. *Med Sci Sports Exerc* 34 (2002) 92-97.
2. Coen B, Urhausen A, Kindermann W: Individual anaerobic threshold: methodological aspects of its assessment in running. *Int J Sports Med* 22 (2001) 8-16.
3. Dickhuth HH, Yin L, Niess A, Röcker K, Mayer F, Heitkamp HC, Horstmann T: Ventilatory, lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: relationship and reproducibility. *Int J Sports Med* 20 (1999) 122-127.
4. Heck H, Mader A, Hess G, Mücke S, Müller R, Hollmann W: Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med* 6 (1985) 117-130.
5. Hollmann W: Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit des Sportlers. Barth, München, 1963.
6. Kindermann W, Simon G, Keul J: The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol* 42 (1979) 25-34.
7. McLellan TM: The anaerobic threshold: concept and controversy. *Austral J Sci Med Sport* 19 (1987) 3-8.
8. Meyer T, Gabriel HHW, Kindermann W: Is determination of exercise intensities as percentages of  $\text{VO}_2\text{max}$  or  $\text{HRmax}$  adequate? *Med Sci Sports Exerc* 31 (1999) 1342-1345.
9. Stegmann H, Kindermann W, Schnabel A: Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 2 (1981) 160-165.
10. Urhausen A, Coen B, Weiler B, Kindermann W: Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. *Int J Sports Med* 14 (1993) 134-139.
11. Wasserman K, Whipp BJ, Koil SN, Beaver WL: Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35 (1973) 236-243.

**Korrespondenzadresse:**  
**Univ.-Prof. Dr. med. Wilfried Kindermann**  
**Institut für Sport- und Präventivmedizin**  
**Campus, Gebäude 39.1**  
**66123 Saarbrücken**  
**E-mail: sportmed@rz.uni-sb.de**