

Die aerobe Schwelle – Schnittstelle zwischen Gesundheit und Ausdauerleistung



Die Wahl der richtigen Trainingsintensität ist der Schlüssel zum erfolgreichen Ausdauertraining. Im gesundheitsorientierten Training spielt die aerobe Schwelle eine wichtige Rolle.

Leistungsdiagnostiken sind in der Regel sehr aufwendig und werden deshalb, obwohl es sehr wichtig wäre, in der Praxis selten genutzt. Das hier vorliegende Testprotokoll soll eine nicht invasive Möglichkeit bieten.



Urs Geiger, PTScFH, CAS CADM, CAS Sportphysiotherapie, Berufsschullehrer HWS Huber Widemann Schule, Basel, langjähriger Berufsbildner, Praktikumslehrperson DZ, ETH Zürich, Buchautor

1. Einleitung

Neben dem häufig zitierten Begriff der *anaeroben Schwelle (AnS)*, findet jener der *aeroben Schwelle (AeS)* ungleich weniger Beachtung, wenn über Ausdauertraining und dessen Steuerung diskutiert wird. Aus leistungsphysiologischer Sicht ist die trainingsbedingte Verschiebung der anaeroben Schwelle sicherlich von zentraler Bedeutung, weil eine solche nach rechts und allenfalls nach unten auf die gewünschte Verbesserung von aerober Kapazität und/oder aerober Leistungsfähigkeit hinweist. Die *aerobe Schwelle* scheint weniger «spektakulär», weil daraus das Dauerleistungsvermögen nicht direkt abgeleitet werden kann. Im Kontext von Aspekten des Energiestoffwechsels und dessen Energiebereitstellungsprozessen hat die AeS eine grosse gesundheitswirksame Bedeutung.

2. Diskussionsgrundlage

Weil viszerales Fett richtigerweise als Risikofaktor für nicht-übertragbare (Zivilisations)Krankheiten angesehen werden muss und ein erhöhter Anteil an subkutanem Speicherfett mit dem heutigen Lifestyle nicht kompatibel scheint, werden Trainingsziele im gesundheitsorientierten Training häufig an eine Reduktion des Fettanteils geknüpft. Das Stichwort «Fettverbrennung» hat dadurch einen hohen Stellenwert erhalten. Um das Ziel *Fettverbrennung* auch wirklich zu erreichen, ist das Wissen um die metabolischen Mechanismen hilfreich. Grundsätzlich ist der Fettstoffwechsel (Lipolyse) für den Organismus ein aufwändiger und aus energetischer Sicht wenig ergiebiger biochemischer Prozess. Die ATP-Bildungsrate ist im Verhältnis zu den andern Energiebereitstellungsprozessen mit 0,4 mmol/min deutlich geringer bzw. langsamer und bedingt eine hohe Sauerstoffutilisation. Diese wiederum ist indirekt von der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max.*), bzw. der prozentualen Nutzung des Sauerstoffs abhängig.

Das Training in definierten Intensitätsbereichen wird allgemein durch entsprechende Pulsobere- bzw. Untergrenzen vorgegeben. Dazu werden häufig Berechnungsformeln genutzt ($220 - \text{Alter}$, $180 - \text{Alter}$, $170 - \frac{1}{2} \text{ Alter}$, $75\% \text{ Hf max.}$, $(\text{Hf max.} - \text{Ruhe-Hf}) \times (\text{Faktor} + \text{Ruhe-Hf})$ u. a. m.). Es muss hier nicht betont werden, dass solche Formeln zur Berechnung von Trainingsintensitäten aufgrund der individuell sehr unterschiedlichen konstitutionellen und konditionellen Voraussetzungen nur als Orientierungshilfen angesehen werden können.

Ohne das Bestimmen der IAeS (individuelle aerobe Schwelle) und IAnS (individuelle anaerobe Schwelle) kann ein *individuelles Training* nicht mit hinreichender Genauigkeit konzipiert werden. Weil die beiden Schwellenwerte als markante Fixpunkte auf der Laktatleistungskurve identifizierbar sind, ist grundsätzlich ein *Laktat-Stufentest* erforderlich. Bekanntermassen stellt die für die Bestimmung der Laktatkonzentrationen erforderliche Blutentnahme eine juristische Grauzone dar, was die Anwendung im nicht medizinischen Bereich bedingt problematisch macht.

3. Merkmale der Laktat-Leistungskurve

Weil der aeroben Schwelle eine sogenannte *Ventilationsschwelle 1 (VS1)* und der anaeroben Schwelle eine *Ventilationsschwelle 2 (VS2)* gleichgesetzt wird, können ausser den stufenabhängigen Laktatkonzentrationen auch ventilatorische Parameter (*Atemfrequenz, Atemtiefe, Atemzugvolumen, Atemminutenvolumen, subjektive Angaben zur Anstrengung und Dyspnoe*) leistungsdiagnostisch genutzt werden (vgl. Spiroergometrie).

Mit der vorliegenden Arbeit schlage ich ein Testprotokoll vor, welches *nicht-invasiv*, also ohne Blutentnahme, als alternative Möglichkeit zum Laktat-Stufentest diskutiert werden soll.

Im Gegensatz zur AeS und AnS, welche metabolische Anpassungen bzw. Änderungen definieren, sind die ventilatorischen Schwellen 1 und 2 die *respiratorische Antwort* auf diese metabolischen Änderungen. Die VS1 zeigt den Übergang vom aeroben zum gemischt aerob-anaeroben Energiestoffwechsel an. Der infolge Leistungssteigerung erhöhte Sauerstoffverbrauch wird bis zur VS1 primär durch eine Erhöhung des Atemzugvolumens und sekundär durch eine moderate Erhöhung von Atem- und Herzfrequenz erreicht. Im nachfolgenden Mischbereich erfolgt infolge kontinuierlichen Anstieges der Laktatkonzentration die simultane Laktatpufferung in Muskulatur, Blut und Leber bis zur VS2 ►

*VO₂ = Volumen O₂

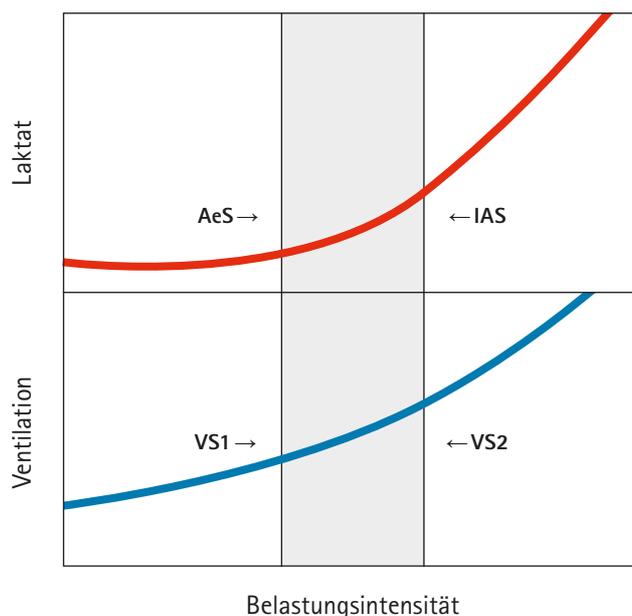


Abb. 1: Vergleichende Darstellung der AeS bzw. AnS in Abhängigkeit von der Laktatkonzentration und die entsprechenden ventilatorischen Schwellen VS1 und VS2 als respiratorische Antwort auf die metabolischen Änderungen. Nach Überschreiten des Laktat-Steady-State an der VS2 erfolgt bekanntlich ein exponentieller Anstieg der Laktatkonzentration als Ausdruck einer metabolischen Azidose, welche zu einer überproportionalen Steigerung der Ventilation führt.

durch weitere lineare Steigerung der Herzfrequenz und der Ventilation als Ausdruck der aktiv verstärkten CO_2 -Abgabe im Verhältnis zur O_2 -Aufnahme (vgl. Abb.1).

4. Die Atmung (Ventilation) in Kürze

Die Atmung ist ein durch das vegetative Nervensystem reflektorisch gesteuerter Mechanismus, der nur in relativ engen Grenzen willkürlich beeinflusst werden kann. Die Neuronen für die Atemregulation liegen in der Medulla oblongata und im Halsmark, in engster Nachbarschaft zum Herz-Kreislauf-Zentrum. Der Atemrhythmus wird durch mechanisch und chemisch vermittelte Reflexe modifiziert:

1. Die Mechanorezeptoren des Bronchialbaumes lösen den Lungendehnungsreflex aus; die mit der Inspiration verbundene Dehnung begrenzt die Inspiration und leitet die Expiration ein.
2. Zentrale und periphere Chemorezeptoren messen die Partialdrücke pO_2 und pCO_2 und den mit dem pCO_2 in Wechselbeziehung stehenden pH-Wert; steigt der pCO_2 von 40 mmHg auf ca. 60–70 mmHg an, dann erhöht sich das AMV (Atemminutenvolumen) reflektorisch um das 10- bis 15-fache.

Unter ansteigender Belastung erhöht sich mit zunehmender Sauerstoffaufnahme auch die Abgabe von Kohlendioxid. Das Volumenverhältnis dieser beiden Atemgase wird durch den respiratorischen Quotienten (RQ) ausgedrückt: $\text{RQ} = \text{VCO}_2^* / \text{VO}_2$

Weil bis zur VS1 der zunehmende Energiebedarf durch die Mehraufnahme von Sauerstoff der aeroben Energiebereitstellung abgesichert werden kann, kommt es noch zu keinem nennenswerten Anstieg des RQ [→ grösser werdender Nenner (VO_2) bei weitgehend konstantem Zähler (VCO_2)].

Ein Anstieg des RQ ($> 0,7$) ist als respiratorische Antwort auf einen erstmals erfolgenden Anstieg des Laktats bzw. eine Zunahme des VCO_2 zu verstehen und kann der Leistung an der aeroben Schwelle gleichgesetzt werden. Weil sich die metabolischen Änderungen an der aeroben und anaeroben Schwelle während eines Belastungstests mit zeitgleichen respiratorischen Anpassungen an der entsprechenden VS1 und VS2 decken, können Parameter der Ventilation alternativ zu den Laktatschwellen identifiziert werden (vgl. Tab.1). ▶

* VCO_2 = Volumen CO_2

Ventilatorische Schwelle 1 (aerobe Schwelle)	Ventilatorische Schwelle 2 (anaerobe Schwelle)
Energetischer Zustand optimaler aerober Energienutzung	Energetischer Zustand gesteigerter Glykolyse mit Anstieg der Laktatproduktion
Stabile aerobe Stoffwechsellage	Gemischt aerob-anaerobe Stoffwechsellage
Sauerstoffäquivalent (AMV/O ₂ -Aufnahme) beginnt anzusteigen	Kohlendioxidäquivalent (AMV/CO ₂ -Abgabe) beginnt anzusteigen
70–80 % der maximalen Herzfrequenz	85–95 % der maximalen Herzfrequenz
Subjektives Belastungsempfinden (n. Borg) 11–13	Subjektives Belastungsempfinden (n. Borg) 15–17
Blutlaktatkonzentration steigt erstmalig an	Maxlass ist erreicht
VO ₂ rel. beträgt ca. 45–55 ml/kg/min	VO ₂ rel. beträgt ca. 55–65 ml/kg/min
Sauerstoff-Steady-State (→ geringe Sauerstoffschuld)	Kein Sauerstoff-Steady-State (hohe Sauerstoffschuld)
Mittlere Beanspruchung der aeroben Kapazität (→ 60–75 % der VO ₂ max.)	Submaximale Beanspruchung der aeroben Kapazität (→ 75–80 % der VO ₂ max.)
Respiratorische Parameter (semiobjektiv)	
Atemzugvolumen moderat erhöht (von 1.0 l auf 2,5 l)	Bereich des linearen Bezugs zwischen Herzfrequenz (Hf) und Sauerstoffaufnahme (VO ₂)
Atemfrequenz moderat erhöht (von 16 auf ± 26) (noch keine inspiratorische Erhöhung der AML)	
Inspiration und Expiration vertieft	
AMV deutlich erhöht (von 16 l auf 65 l)	
Noch kein subjektives Empfinden von Apnoe	
Flacher, nicht linearer Anstieg der Herzfrequenz	Relativ steiler, linearer Anstieg der Herzfrequenz
Erhöhung des Schlagvolumen (SV) bis Verdoppelung	Keine Erhöhung des SV mehr möglich
Gesundheitsrelevante Faktoren	
Katabole Wirkung von Cortisol wird durch «Abbau» eliminiert	Ausschüttung von Cortisol, abhängig von Intensität und Belastungsdauer(!)
Protektive Wirkung (Ruhepuls ↓, Herzratenvariabilität ↑ u. a.)	Sympathikotonie (Ausschüttung von Corticosteroide → Immunsuppression)
Erhöhung des Anteils der Fettoxidation an der Energieproduktion (trainingsbedingt bis 60 %)	Geringe Erhöhung des fettoxidierenden Anteils an der Gesamtenergieproduktion
Stärkung des Immunsystems (primär unspezifische Abwehr ↑) effiziente Phagozytose von Zelldetritus und Elimination von Stoffwechsellendprodukten	Starke Beanspruchung des Immunsystems (Open-Window-Phänomen) Freisetzung von freien Radikalen (→ Oxidativer Burst)
Effizienzsteigerung der Enzyme der aeroben Energiebereitstellung (u. a. Citratsynthase)	Effizienzsteigerung der Enzyme der anaeroben Energiebereitstellung (u. a. Phosphofruktokinase)
Die Steuerung der involvierten Organsysteme wie HKL-System, VNS, humorales System) geschieht noch weitgehend mit isolierter Autoregulation	Die Steuerung der involvierten Organsysteme erfordert eine übergeordnete Steuerung durch das autonome Nervensystem (→ Hypothalamus u. a. m.)
Sportrelevante Faktoren	
Quantitative Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO ₂ max)	Gemäss Fragestellung nicht Gegenstand der Untersuchung
Allgemeine körperliche Leistungsfähigkeit erhalten oder wieder herstellen	
In Nichtausdauersportarten eine stabile Grundlage für das Training anderer konditioneller und koordinativer Fähigkeiten schaffen	
Die Belastungsverträglichkeit in Training und Wettkampf erhöhen	
Die Regeneration nach kurzen maximalen und submaximalen Belastungen sowie nach umfangreichen Gesamtbelastungen beschleunigen	
Die psychische Belastung besser verträglich machen	
Grosse Übertragbarkeit (→ positiver Transfer) auf andere Sportdisziplinen	

Tab. 1: übersichtsmässige Aufzählung respiratorischer Parameter, gesundheits- und sportrelevanter Faktoren, welche der Zone des aeroben Bereichs (bis zur ventilatorischen Schwelle 1) und der Zone des aerob-anaeroben Übergangsbereichs (bis zur ventilatorischen Schwelle 2) zugeordnet werden. (AMV: Atem-Minuten-Volumen; AML: Atemmittellage; Apnoe: Atemnot; HMV: Herz-Minuten-Volumen; Maxlass: maximaler Laktat-Steady-State; oxidativer Burst: Freisetzung von reaktiven Sauerstoffspezies durch neutrophile Granulozyten und Makrophagen bei der Phagozytose → Auflösung und Unschädlichmachung von Fremdstoffen)

Stufen	Stufendauer / Gesamtzeit	Belastung (Watt) <i>Trainierte</i>		Belastung (Watt) <i>Untrainierte</i>		Herzfrequenz (bpm)	Borg (8-20)	Atemfrequenz Atemzüge pro Minute	Subjektive respiratorische Parameter (vgl. Tab.3)		U/min (65-85+)	eigene Zusatzbemerkungen
		□ m	□ f	□ m	□ f							
0	2 min <i>ruhig sitzend</i>	0	0	0	0		-		<i>Atmung allgemein I-VII</i>	<i>Atmung spezifisch A-K</i>	-	
1	10 min	60	50	50	40							
2	10 min / 20 min	75	70	70	60							
3	10 min / 30 min	100	95	90	80							
4	10 min / 40 min	125	120	110	100							
5	10 min / 50 min	150	145	130	120							
6	10 min / 60 min	175	170	150	140							

Tab.2: Protokoll für Ausdauertrainierte zur Bestimmung der aeroben Schwelle (AeS) mittels submaximalem Stufentest auf dem Fahrradergometer
Hinweis: Dass die vorgeschlagene Dauer der jeweiligen Belastungsstufen unüblich lang ist, leitet sich daraus ab, dass die gewünschte Utilisation der FFS sehr stark vom Genotyp einerseits und andererseits vom epigenetisch beeinflussten Phänotyp und dem (aeroben) Trainingszustand abhängt. Bei kürzerer Stufendauer dürfte daher die Wahrscheinlichkeit deutlich geringer werden, dass der gewünschte Energiestoffwechsel ausschliesslich aerob erfolgt.

5. Test zur Bestimmung der aeroben Schwelle

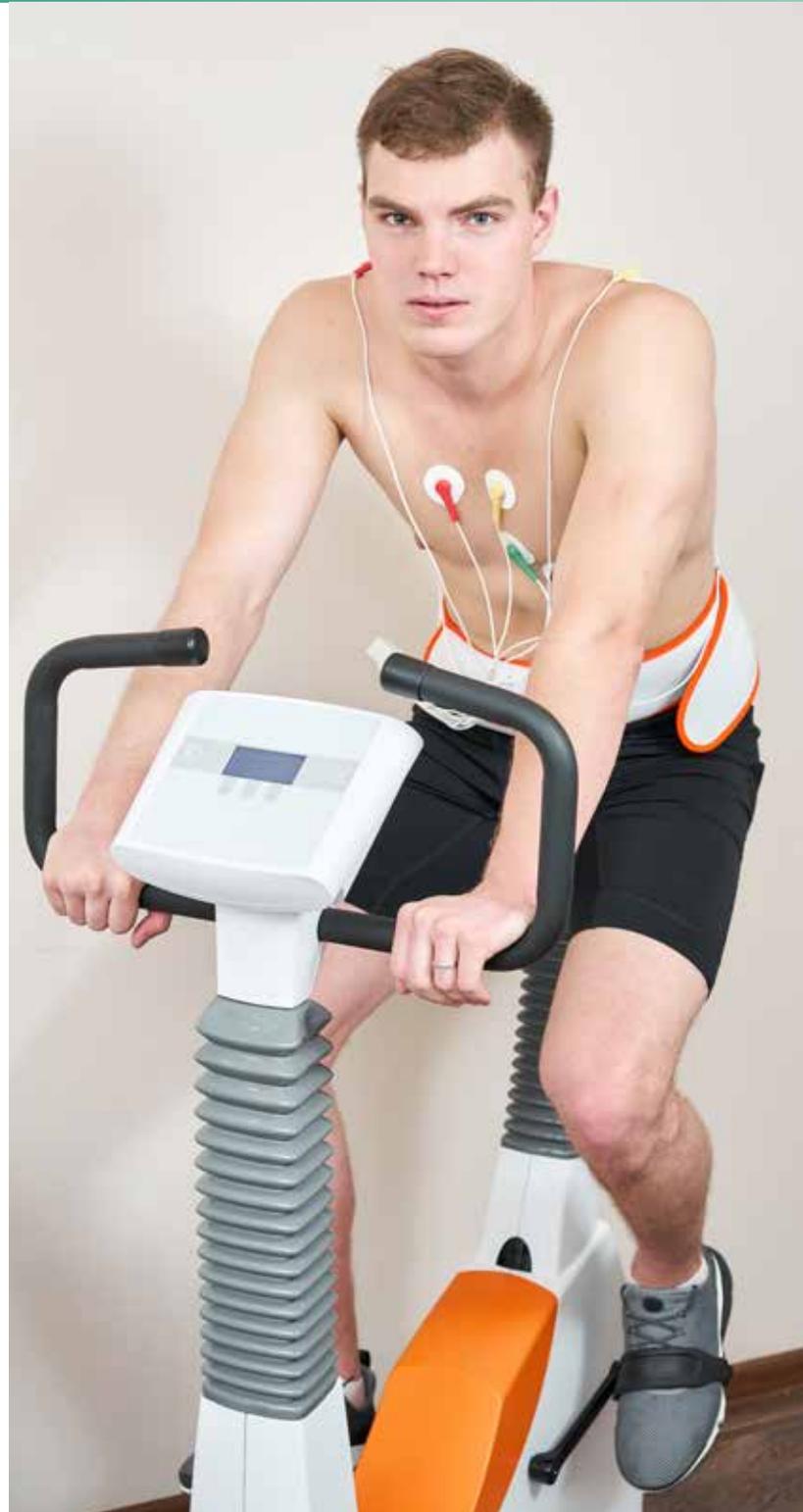
Der Test zur Bestimmung der aeroben Schwelle ist als Stufentest konzipiert und wird auf einem vorzugsweise drehzahlunabhängigen Fahrradergometer durchgeführt.

Damit die heterochronen Verzögerungen der kardiopulmonalen, vegetativen und metabolischen Anpassungen in diesem sensiblen aeroben Belastungsbereich erfasst werden können, ist die Dauer der Belastungsstufen bewusst auf 10 Minuten ausge-

dehnt; damit bleibt auch genügend Zeit, alle Daten ohne Zeitdruck ruhig zu erfassen und die feinen respiratorischen Veränderungen ausreichend differenziert wahrnehmen zu können. Für den Test ist deshalb ein Zeitbedarf von einer Stunde einzuplanen. Wenn aus organisatorischen oder anderen Gründen das vorgeschlagene Zeitprotokoll nicht eingehalten werden kann, dann lassen sich die Stufen um maximal vier Minuten kürzen, was im Protokoll einzutragen ist.

Vorbereitungen

1. Sitzhöhe richtig einstellen und Fusschlaufen optimal vorbereiten
2. Pulsgurt befeuchten und korrekt anlegen
3. Trinkflasche mit Wasser in Halterung stellen
4. Testprotokoll auf stabiler (mobiler) Schreibunterlage fixieren und Schreibstift beilegen
5. Auswertungstabelle und Borg-Skala in Sichtweite anbringen
6. **Sorge dafür, dass keine Ablenkung durch andere Trainierende oder Musik besteht (deine Konzentration auf die Vorgänge im Körper und das Erspüren der kleinen Veränderungen von Atmung und Belastungsempfinden sind entscheidend).**
7. Test mit Stoppuhr starten und nach jeder Stufe alle Messdaten im Protokoll eintragen
8. Werte deinen Test nach den subjektiven respiratorischen Daten (I-VI bzw. A-K) und dem subjektiven Belastungsempfinden (8-12/13) aus und bestimme dementsprechend deinen Pulswert bzw. deine Leistung (Watt) für die IAES (individuelle aerobe Schwelle). ▶



Wer nur «nach Gefühl» trainiert, wird häufig in den lockeren Einheiten zu intensiv und in den intensiven Einheiten zu locker trainieren.

Subjektive respiratorische Parameter			Subjektives Belastungsempfinden	
Atmung allgemein	Atmung spezifisch	Atemfrequenz	nach Borg	Physiologische Zonen
I «oberflächlich»		keine wesentliche Erhöhung 17 → 20 (± 3) ... gegen Ende leichtes Schwitzen	8 extrem leicht	Zone 1(a) Aerober Bereich Aktive Regeneration Gesundheit/Ausgleich
II sehr ruhig			8	
III ruhig	A kaum vertieft		8	
	B wenig vertieft		8-9	
	C etwas vertieft		9 sehr leicht	
IV unbewusst	D relativ tief	kontinuierliche Erhöhung mit progressivem Charakter (~ 20 → 30) ... gegen Ende starkes Schwitzen	9-10 ziemlich leicht	Zone 1(b) Aerober Bereich
V kontrollierbar	E tief		11 noch leicht	
VI bewusst noch kontrollierbar	F volle Atemtiefe		11	Grundlagenausdauer Bereich 1
	G Ausatmung etwas aktiv		11-12	
	H Ein- und Ausatmung aktiv		12 nicht mehr so leicht	
VII Nasenatmung noch knapp möglich	K Ein- und Ausatmung deutlich aktiv		12 (<13!) etwas anstrengend	Aerobe Schwelle Ventilationsschwelle 1 Sauerstoff-Steady-State

Tab. 3: Auswertungstabelle für das Testprotokoll zur Bestimmung der IAeS (blau: Bereich der aktiven Regeneration; orange: Bereich der Grundlagenausdauer 1; rot: Bereich der Ventilationsschwelle 1) (Alle Angaben sind Orientierungshilfen und können individuell leicht von den genannten Zahlen abweichen.)

6. Gesundheitsrelevantes Trainingswissen der Grundlagenausdauer Bereich 1

- Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf beträgt im regenerativen Bereich der lipolytische Anteil ~ 84% und der aerob glykolytische Anteil ~ 16%; im Bereich der Grundlagenausdauer beträgt der lipolytische Anteil noch ~ 75%, während der aerob glykolytische Anteil leicht steigt auf 25%.
- Mit zunehmender Beanspruchung des aeroben Stoffwechsels (vgl. GLA1) wird der Speicher an intramuskulären Fettsäuren geleert; als Folge davon steigt die Konzentration der Plasmafettsäuren, dies als die erwünschte Folge der Mobilisation aus dem Fettgewebe, namentlich am Stamm.
- Mit zunehmender Belastungsdauer nimmt der intramuskuläre FS-Speicher ab und derjenige im Blut zu als erwünschte Folge der Mobilisation aus dem Fettgewebe.



Der bewusste Einsatz verschiedener Intensitäten bringt Abwechslung ins Ausdauertraining.

- Im Intensitätsbereich von weniger als 50% der VO_2 max. kommt es zu einer optimalen Utilisation der intramuskulären Fettsäuren.
- Mit einer Verbesserung der aeroben Kapazität kann die VO_2 max. besser genutzt werden (von 60% bis 90%); die höchste Verbrennungsrate von FS wird bei 85% der VO_2 max. erreicht.
- Weil der Anfall von [ADP] und [Pi] gering bleibt, wird die Phosphofruktokinase (PFK) gehemmt und damit die Glykolyse blockiert, die mitochondriale Atmung (Oxidation) aber stimuliert.
- Das energetische System befindet sich im Sauerstoff-Steady-State, das anfänglich geringe Sauerstoffdefizit erhöht sich während der Belastung nicht weiter, sodass die ebenfalls geringe Sauerstoffschuld nach Abbruch leicht abgetragen werden kann.
- An der aeroben Schwelle wird bei Untrainierten ein Laktat von 2,5-3,5 mmol/l und bei Trainierten von ~ 1 mmol/l gemessen.
- In der Trainingszone 1 (aerober Bereich) werden ~ 60-70% (Zone 1a) bzw. 70-80% (Zone 1b) der HF max. erreicht. ◀

Literatur

- Knechtle, B. **Limitierende Faktoren der Fettverbrennung (2006)**. Schw. Zeitschrift für Sportmedizin 54 (2), 51-56
- Laube, W. **Sensomotorisches System (2009)**. Thieme
- Petersen, O. (2000). **Burn Fett statt Burnout (2000)**. smart books, Kilchberg (Schweiz)
- Rossetto, M. **Einfach Laufen (2003)**. A & O des Wissens
- Van Duijn, E. **Hören Sie auf Ihr Herz (1995)**. Druckerei Frey AG, Andelfingen (Schweiz)
- Villiger, B. **Ausdauer Theorie und Praxis (1991)**. Thieme
- Vogt, M. **Physiologische Trainingsintensitätszonen (2005)**. Fachdokumentation Fachgruppe Ausdauer Swiss Olympic
- Zintl, F. **Ausdauertraining Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung (1988)**. biv Sportwissen