

# Die trainingsphysiologische und klinische Bedeutung der anaeroben Kapazität

---

**Herausgegeben von:**

**N. Bachl, P. Baumgartl, G. Huber und J. Keul**

ANAEROBE ENERGIE UNTER NON-STEADY-STATE  
FAHRRADERGOMETRIE BEI HERZ- UND LUNGENKRANKEN IM  
VERGLEICH ZU LEISTUNGSSPORTLERN

Reiterer, W.

Poliklinik, I. Medizinische Abteilung, Wien  
Vorstand: Univ. Prof. Dr. H. CZITTOBER)

Einleitung

Als Reaktion auf die Muskelarbeit unter ansteigender Belastungsintensität zeigen die kardio-zirkulatorischen und respiratorischen Funktionsgrößen (Volumenleistung, Gastransfer und Transport von Metaboliten) eine individuell unterschiedliche Einstellzeit zur Erreichung eines Fließgleichgewichtes (steady-state-Bedingung) zwischen Energiebedarf und Energiebereitstellung (1). Der verzögerte Anstieg aerob energieliefernder Prozesse verlangt somit eine vorübergehende Abdeckung des Gesamtenergiebedarfes durch anaerob energieliefernde Prozesse (9). Nach Überschreitung einer gewissen Belastungsintensität (Dauerleistungsgrenze, anaerobe Schwelle) kann der Energiebedarf durch aerob energieliefernde Prozesse alleine nicht mehr aufrecht erhalten werden und die Belastungsazidose (Laktatazidose) führt zum Belastungsabbruch. Zur Analyse des aerob/anaeroben Energieflusses unter non-steady-state-Belastung (2-min-Stufen-Test, 3) war ein Rechenprogramm zur on-line Bestimmung eines Index für die anaerobe Energiegewinnung entwickelt worden (5). Zur weiteren Differenzierung des Leistungsverhaltens wurde eine graphische Methode zur Berechnung der individuellen anaeroben Schwelle aus ergospirometrischen Meßwerten (VE/VO<sub>2</sub>-Diagramm, 6,7) eingeführt.

In der vorliegenden Untersuchung soll die Wertigkeit und praktische Bedeutung der Leistungsbeschreibung an Hand eines mehrdimensionalen Systems (Parameter der aeroben/anaeroben Leistungsfähigkeit) bei Patienten und Trainierten gegenübergestellt werden. Als standardisiertes Untersuchungsmodell wurde die Fahrradergometrie in sitzender Position eingesetzt (3,4).

	Herzkranke	Lungenkranke	Ausdauersportler
N	31	30	42
Alter	52 (37-64)	52 (19-67)	20 (18-28)
Gewicht kg	75 (56-96)	70.7 (46-88)	70.5 (61-81)
Watt max.	117 (75-200)	93 (50-175)	318 (225-450)
Watt min.	630 (215-1590)	417 (50-990)	2682 (1490-4790)
VO2 max. l/min	1.6 (0.9-2.3)	1.4 (0.8-2.5)	3.8 (2.9-5.0)
ml/kg/min	21 (13-31)	19 (10-34)	53 (42-67)
an SW l/min VO2	1.2 (0.8-1.6)	1.1 (0.7-2.0)	3.0 (2.2-4.5)
an EN kJ	48 (20-148)	32 (7-75)	211 (107-345)
%	27 (13-42)	27 (7-54)	28.5 (13-40)

Tab.1: Beschreibung der untersuchten Kollektive: Trainierte, Herz- und Lungen-Patienten. Spektrum der Meßwerte (Mittelwert, Minimum, Maximum)

### Methodik

Zur Beschreibung der Leistungsprofile wurden die ergo-spirometrischen Meßwerte von Herz-Lungen-Patienten und Leistungssportlern herangezogen. Die Zuordnung zu einem Patientenkollektiv erfolgte unter dem Aspekt einer signifikanten Leistungsminderung aus kardialer bzw. pulmonaler Ursache, wobei der Schweregrad der Erkrankung (koronare Herzkrankheit; Emphysem, bronchiale Obstruktion, small airway disease) durch klinisch-physiologische Untersuchungen bestimmt wurde. Die Leistungssportler entstammten einem Kollektiv von ausdauertrainierten Skilangläufern (s.Tab.1).

Die Untersuchungen wurden unter standardisierten Bedingungen auf einem Fahrradergometer in sitzender Position nach der Methode der rektangulär-triangularen Belastungssteigerung (2-min-Stufen-Test) durchgeführt (3,4). Ergospirometrische Meßwerte wurden im offenen System (Ergopneumotest JAEGER, BRD) on-line bestimmt, mit im Labor erstellten Normalwertsbereichen verglichen und graphisch dokumentiert. Während der Untersuchung wird ein Index für die anaerobe Energiebereitstellung errechnet und graphisch im Plotterdiagramm festgehalten. Zu Beginn jeder Belastungsstufe wird die Wattzahl über das Keyboard in den Rechner eingegeben. Der Kalorienwert der gesamten Sauerstoffaufnahme während der einzelnen Belastungsphasen abzüglich des Ruhereferenzwertes stellt die "aerobe Energiebereitstellung" dar. Wird vom Sollenergiebedarf pro Belastungsstufe (Wirkungsgrad der Ergometerarbeit 21 %) die aerobe Energiebereitstellung abgezogen, so erhält man einen "Index für die anaerobe Energiebereitstellung" (kJ, J/kg, % des Gesamtenergiebedarfs, Lit. 5,7). Die individuelle Dauerleistungsgrenze (anaerobe Schwelle) wird aus dem

VE/VO<sub>2</sub>-Diagramm als Beginn der Hyperventilation graphisch ermittelt. Die gespeicherten Daten werden über einen X/Y-Schreiber im Koordinatensystem aufgetragen (oder off-line Darstellung am Sichtschirm eines Personal Computers HP-85). Durch die einsetzende Hyperventilation geht der lineare Zusammenhang zwischen beiden Variablen verloren. Diese Zone ist deutlich markiert, außerordentlich gut reproduzierbar, und wird als anaerobe Schwelle bezeichnet (6, 10). Die ausgewählten Meßwerte der Patienten und Athleten (Alter, Gewicht, Wattmax, Watt.min, VO<sub>2</sub>max l/min STPD und ml/kg/min, anaerobe Schwelle in l/min VO<sub>2</sub>, anaerobe Energie in kJ und % des Energiebedarfes) wurden mit Hilfe eines PC-Computer-Systems (HP-85A) analysiert (Mittelwert, Standardabweichung, range; Korrelationsanalyse, schrittweise Regressionsanalyse) und graphisch dokumentiert.

### Ergebnisse

Zur Beschreibung der untersuchten Kollektive wurden die Einzelwerte in Graphiken eingetragen, und sofern es auf Grund der Datenstruktur sinnvoll erschien, Regressionsgeraden berechnet. Bei der Bewertung ist die jeweilige Altersverteilung und die trainings- bzw. krankheitsbedingte Leistungsbreite des Kollektives zu beachten.

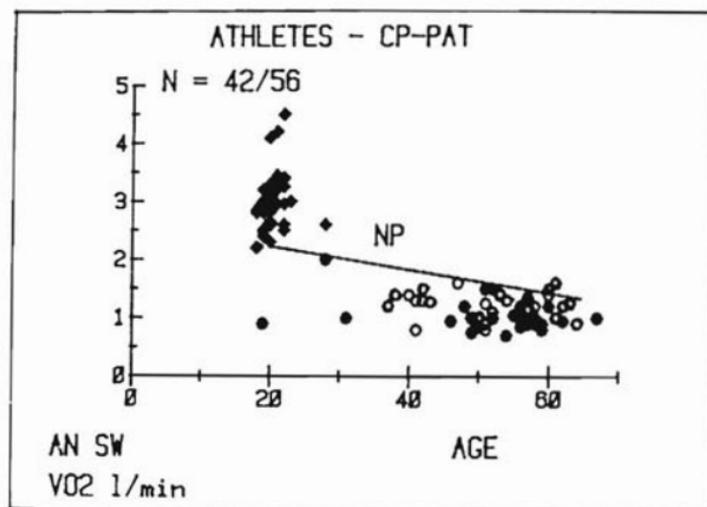


Abb.1: Beschreibung der untersuchten Kollektive (Trainierte, Herzkranke und Lungenkranke) an Hand der individuellen Dauerleistungsgrenze in Relation zum Lebensjahr. Die Regressionsgerade bezieht sich auf eine Untersuchung bei Normalpersonen (Lit.7)

In der Abb 1 ist die Verteilung der gemessenen individuellen Dauerleistungsgrenze (an SW in l/min  $\dot{V}O_2$ ) von Trainierten (n = 42) und Herz-Lungen-Patienten (n = 56; bei 5 Lungenpatienten Abbruch der Belastung unter der Dauerleistungsgrenze) in Relation zum Lebensalter dargestellt,

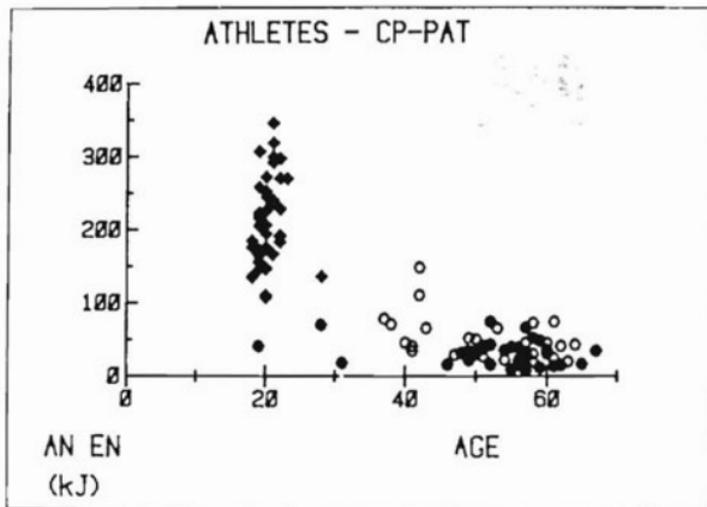


Abb.2. Beziehung zwischen dem errechneten Index der anaeroben Energiebereitstellung (an EN, kJ) und dem Lebensalter (Symbolerklärung s. Abb.1).

in Abb. 2 die Beziehung zwischen dem Index für die anaerobe Energiebereitstellung und dem Lebensalter. Bei den symptom-limitierten Patienten besteht keine signifikante Beziehung zwischen dem Lebensalter und der Dauerleistungsgrenze bzw. der anaeroben Energie (kJ).

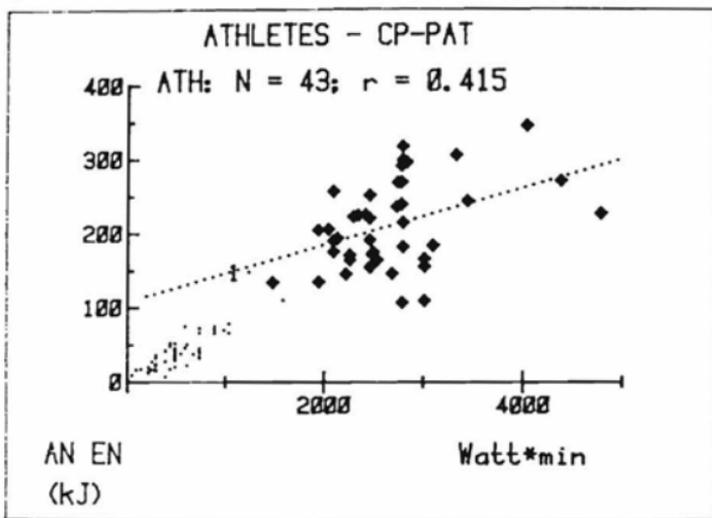
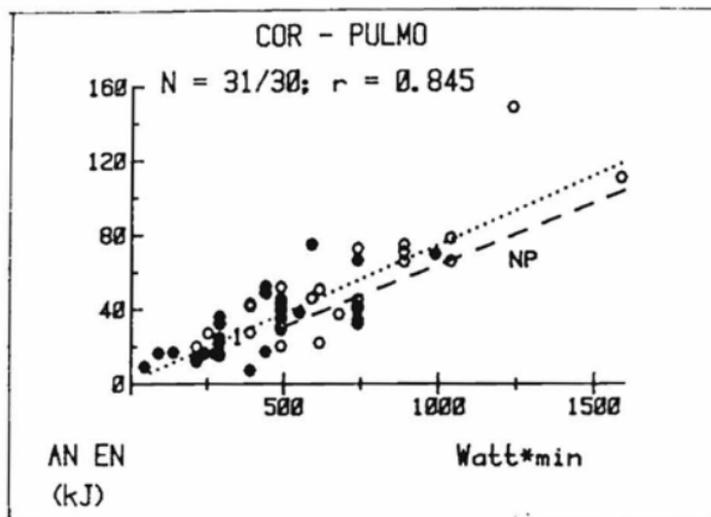
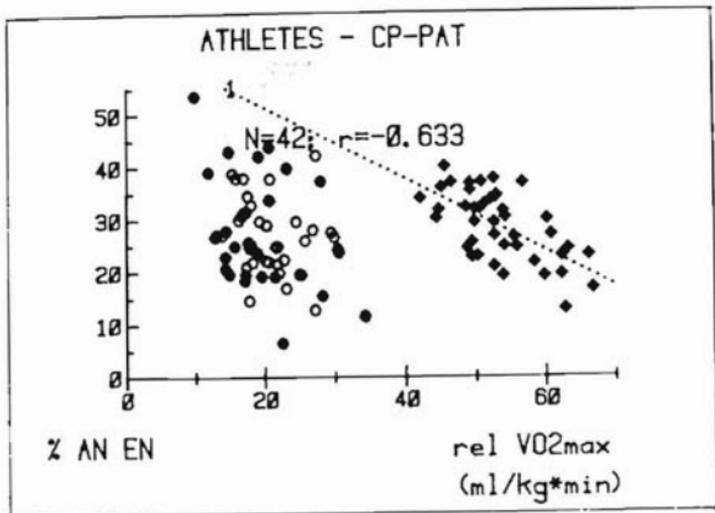


Abb. 3a und 3b: Beziehung zwischen der geleisteten Arbeit (Watt min.) unter maximaler bzw. symptom-limitierter Ausbelastung und der errechneten anaeroben Energie. Die Meßwerte der Patienten (auf Abb. 3a als Punkte dargestellt) sind auf Abb. 3b in die beiden Kollektive aufgetrennt (Symbolerklärung s. Abb. 1; an EN (kJ) =  $1.2669 + 0.0735 * \text{Watt.min}$ , n = 61, r = 0.8445; Regressionsgerade der Normalpersonen aus Lit. 4).

Die Abb. 3a und 3b beschreiben die Beziehung zwischen der geleisteten Arbeit in Watt/min und dem Index für die anaerobe Energie. Im untersuchten Leistungsbereich liegt dieser Meßwert bei den Patienten im Mittel geringfügig (n.sig.) über dem Sollbereich bei Normalpersonen.



**Abb.4:** Beziehung zwischen dem Index der anaeroben Energiebereitstellung (an EN, % des Gesamtenergiebedarfes) und der Sauerstoffaufnahme (ml/kg\*min). Bei den Trainierten: an EN (% =  $64.9 - 0.68 \text{ VO}_2 \text{ max (ml/kg*min)}$ ),  $n = 42$ ,  $r = -0.6329$ . Symbolerklärung s. Abb.1).

In Abb. 4 ist der prozentuelle Anteil der anaeroben Energie (Anteil am Gesamtenergiebedarf für die geleistete Arbeit) in Relation zur relativen maximalen Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_2 \text{ ml/kg/min}$ ) angegeben. Bei Trainierten ist die Höhe dieses Prozentsatzes von der Bereitschaft abhängig, sich maximal zu belasten. Bei den Patienten hängt die Höhe des Prozentsatzes an anaerober Energie von der Anpassungsfähigkeit (Adaptation) der Sauerstofftransportkapazität an die Belastungsimpulse ab: je geringer die  $\text{O}_2$ -Transfer-Transport-Leistung, desto höher der fiktive Anteil der anaeroben Energiebereitstellung zur Bewältigung der Muskelarbeit

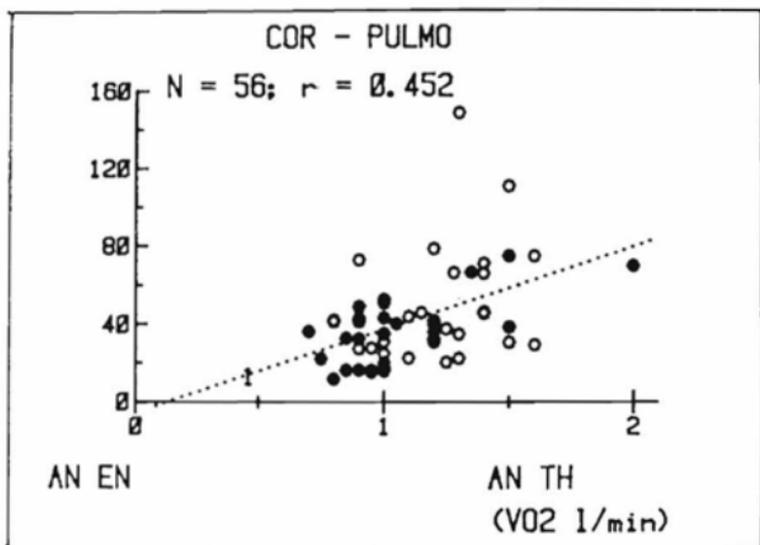
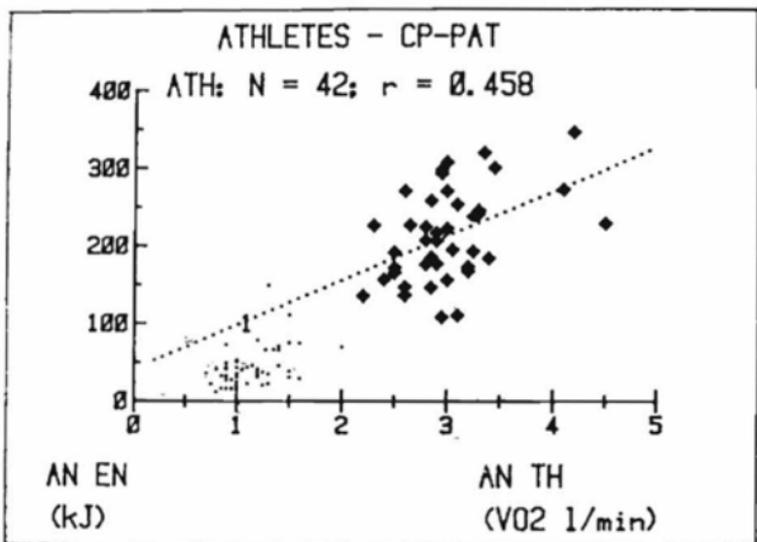


Abb.5a und 5b: Beziehung zwischen dem Index der anaeroben Energie (kJ) und der individuellen Dauerleistungsgrenze (l/min VO<sub>2</sub>) unter maxi-

maler bzw. symptom-limitierter Belastung. Die Meßwerte der Patienten sind auf der Abb. 5b im Detail vergrößert dargestellt. Für Trainierte gilt:  $\text{an EN (kJ)} = 41.2 + 56.72 \text{ an SW}$  (anaerobic threshold),  $n = 42$ ,  $r = 0.4581$ . Für die Herz-Lungen-Patienten gilt:  $\text{an EN (kJ)} = -5.43 + 42.56 \text{ an SW}$ ,  $n = 56$ ,  $r = 0.4520$ .

In den Abb. 5a und 5b ist die Beziehung zwischen dem Index der anaeroben Energiegewinnung (kJ) und der Kenngröße der aeroben Leistungsfähigkeit (anaerobe Schwelle - Dauerleistungsgrenze) angeführt. Aus den Daten lassen sich Hinweise gewinnen, daß bei höherer aerober Leistungsfähigkeit eine wesentliche Zunahme der anaeroben Energiebereitstellung zu erwarten ist. Bei den Trainierten und bei den Herz-Lungen-Patienten wurde mittels einer schrittweisen Regressionsanalyse untersucht, inwiefern die geleistete Arbeit (Watt/min) durch die Meßwerte Dauerleistungsgrenze, anaerobe Energie in kJ und anaerobe Energie in Prozenten des Gesamtenergiebedarfes bestimmt wird. Für die Trainierten gilt:  $\text{Watt.min} = 1830.4 + 438.2 * \text{an SW} + 8.0 * \text{an EN (kJ)} - 75.5 * \text{an EN (\%)} \text{ bei } N = 43$ ,  $r = 0.9123$ ,  $s = \pm 242.7$ . Bei den symptom-limitierten Patienten hat der Meßwert der Dauerleistungsgrenze keine prädiktive Bedeutung, es gilt somit:  $\text{Watt/min} = 494.9 + 12.1 * \text{an EN (kJ)} - 16.7 * \text{an EN (\%)} \text{ bei } N = 55$ ,  $r = 0.9613$ ,  $s = \pm 83.7$ .

#### Diskussion:

Die Auswahl von Meßwerten zur Beschreibung der körperlichen Leistungsfähigkeit und allfälliger limitierender Faktoren wird primär von der klinisch-physiologischen Fragestellung bestimmt. Die funktionalen Dimensionen der involvierten Organsysteme und die möglichen abnormen Reaktionen, sowie deren pharmakologische Beeinflussbarkeit werden somit einer Quantifizierung zugeführt. Hieraus ergibt sich ein entscheidender Fortschritt in der mehrdimensionalen Beschreibung und somit besseren Charakterisierung eines Krankheitsbegriffes. Es entsteht eine rationale Basis zu einer differenzierten pharmakologischen Intervention beim Erkrankten, die zumutbare physische Belastbarkeit im Alltag und im Rahmen der Rehabilitation wird aufgezeigt und die Leistungsdiagnostik und Trainingsberatung beim Trainierten sollte hieraus Vorteile ziehen. Der breiteren Anwendung von aufwendigen Methoden sind jedoch Grenzen gesetzt (Verfügbarkeit, Zeitbedarf, Unkosten). Die ergospirometrische Untersuchungstechnik wurde von mir anfänglich zur Erarbeitung von Normalwertsbereichen verschiedener leistungsphysiologischer Parameter unter 2-min-Belastungsstufen (rektangulär-triangularer Fahrradergometrie) eingesetzt, um die klinische Brauchbarkeit

der non-steady-state-Belastungstechnik zu verifizieren. Der errechnete Index für die anaerobe Energiebereitstellung (anaerobe Energie) sollte erkennen lassen, ob im Unterschied zu einer steady-state-Belastung unter 2-min-Stufen eine entsprechende Adaptation der Sauerstoffaufnahme auf die Belastungsimpulse hin erfolgt. Die Untersuchungen (Lit.4) ergaben eine lineare Beziehung zwischen dem Index für die anaerobe Energiebereitstellung in Relation zur maximal geleisteten Arbeit bei guter Reproduzierbarkeit der Meßwerte. Im Vergleich zwischen Normalpersonen und Trainierten konnte gezeigt werden, daß unter höheren Belastungsstufen (s.Abb.6) für die gleiche geleistete Arbeit die Normalpersonen eine höhere (n.sig.) anaerobe Energie einsetzen.

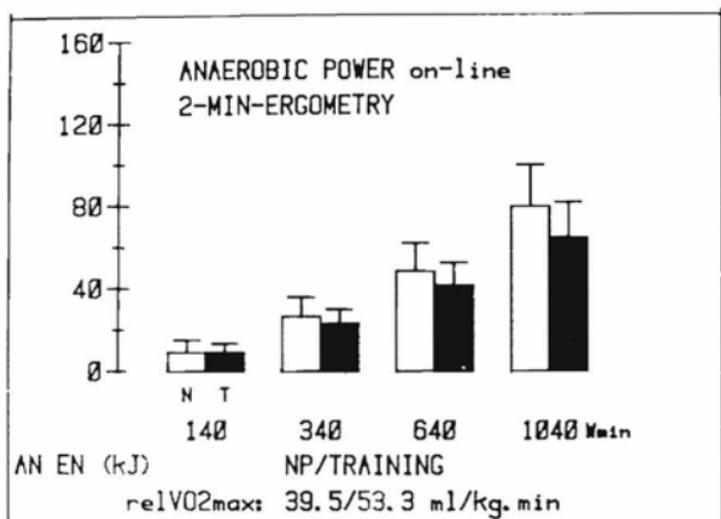


Abb.6: Verhalten des Index der anaeroben Energiebereitstellung an EN, kJ) in Relation zur geleisteten Arbeit unter ansteigender Belastung (2-min-Stufen-Test). Die kumulativen Werte weisen zwischen Trainierten und Normalpersonen (aus Lit.4, Kollektive charakterisiert durch die maximale Sauerstoffaufnahme) einen tendenziellen, aber keinen signifikanten Unterschied auf.

Im Vergleich zum Kontrollwert führt die Akutwirkung eines Beta-Rezeptorenblockers (10 mg Pindolol, Lit.8) zu einer signifikanten Zunahme der anaeroben Energiegewinnung (+ 82.6 %). Unter der Langzeittherapie (2/12 Monate) war ein geringerer Anstieg der anaeroben

Energiegewinnung (70.2 %, 21.1 %) zu verzeichnen. Die Dauerleistungsgrenze veränderte sich bei den untersuchten Hypertonikern nicht.

In den vorgelegten Meßdaten erreicht die anaerobe Energiegewinnung bei den Trainierten mit 211 kJ im Mittel das 4.4- bis 6.6-fache des Rechenwertes der Herz- bzw. Lungenpatienten, wobei der Prozentsatz der anaeroben Energie am Gesamtenergiebedarf mit 27 - 28.5 % im Mittel bei Leistungssportlern und Patienten nicht unterschiedlich war. Prozentsätze der anaeroben Energie von über 45 % waren nur bei Patienten mit hämodynamisch verifizierter Hypozirkulation höheren Grades festzustellen. Höhere Prozentsätze des Index für die anaerobe Energiebereitstellung (>30 %) kennzeichnen bei den Athleten die Bereitschaft zu maximaler Ausbelastung, entsprechend einer hohen Azidosetoleranz. Die Komponenten des on-line errechneten Index für die anaerobe Energiebereitstellung umfassen

- a) den an Myo- und Hämoglobin gebundenen Sauerstoff mit ca. 21 kJ,
- b) den Abbau von ATP und CP mit ca 21 - 32 kJ und
- c) den Glycogen- und Glucoseabbau zu Milchsäure mit ca 167 - 209 kJ bei Trainierten (Lit.5).

Die errechneten Werte bei den Leistungssportlern (211 kJ im Mittel) liegen somit recht genau im Bereich der theoretischen Vorhersage.

Die praktische Bedeutung der Bestimmung der anaeroben Energie bei Patienten tritt aus meiner Sicht zurück hinter den Meßwert der individuell bestimmten Dauerleistungsgrenze. Der Schweregrad einer Leistungslimitierung lößt sich durch die Bestimmung der anaeroben Schwelle besser definieren, wobei zusätzlich der Beginn und das Ausmaß der abnormen Reaktionen bei Herz-Lungenpatienten zur Bewertung herangezogen werden sollen. Die Bestimmung der Dauerleistungsgrenze aus ergospirometrischen Meßwerten (VE/V<sub>O2</sub>-Diagramm, lit.6) ist ein entscheidender methodischer Vorteil gegenüber dem Konzept der starren Laktatgrenzen (2). Die Bestimmung der Dauerleistungsgrenze ist nicht möglich, wenn der Belastungsabbruch vorzeitig infolge limitierender Symptome erfolgen muß. Hierbei kann die Bewertung der anaeroben Energie (kJ, %) zusätzliche Informationen liefern, wie den Hinweis auf eine bedeutsame Hypozirkulation (verzögerter Anstieg der O<sub>2</sub>-Transportleistung) bei hohen Prozentsätzen der anaeroben Energiegewinnung.

## ANAEROBIC POWER DURING NON-STEADY-STATE BICYCLE ERGOMETRY IN HEART AND LUNG PATIENTS

### Summary:

For a non-steady-state exercise test model (2-min increment test, 1975) an algorithm based on ergospirometric data was set up to assess the anaerobic power (kJ, %) and endurance performance (anaerobic threshold). The on-line calculated index of anaerobic power is rating the energy demand, which is not provided for by oxygen uptake (1976). The individual level of endurance performance (1/min  $\dot{V}O_2$ ) is identified by the graphical analysis of paired  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ -data (onset of hyperventilation due to metabolic acidosis, 1977). Referring to a symptom-limited exercise test (bicycle ergometry) we found in patients (coronary heart disease  $n = 31$ ; chronic obstructive lung disease  $n = 30$ ) and young athletes ( $n = 42$ ) a percentage rate of 27 to 28.8 % of anaerobic power on the mean. The measured values of anaerobic power in athletes (211 kJ on the mean) meet the predicted data, which are 4.4 to 6.6 times higher than found in patients. To rate the exercise performance and the severity of limiting factors of physical performance the individually calculated anaerobic threshold (level of endurance performance) is of greater clinical importance than the parameter of anaerobic power.

### Literatur

1. AUCHINCLOSS, J.H., ASHUTOSH, K., RANA, S., PEPPI, D., JOHNSON, L.W. et.al.  
Effect of cardiac, pulmonary and vascular disease on one-minute oxygen uptake. Chest 70 (1976), 486.

2. MADER, A., LIESEN, H., HECK, H., PHILIPPI, H., ROST, A. et al. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. Sportarzt Sportmed. 27 (1976), 80, 112.
3. REITERER, W.: Methodik eines rektangulär-triangularen Belastungstestes. Herz/Kreislauf, 7 (1975), 457-462.
4. REITERER, W.: Evaluation of physical performance by rectangular-triangular bicycle ergometry and computer assisted ergospirometry. Basic Res. Cardiol., 71 (1976), 482-503.
5. REITERER, W.: On-line Analyse von anaerober Energiebereitstellung und Sauerstoffschuld während rektangulär-triangularer Fahrradergometrie. Wien.klin.Wschr., 88 (1976) 527-530.
6. REITERER, W., CZITOBER, H.: Neue Aspekte zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit. Verhandl. Dtsch. Gesellschaft Innere Med. 83, Band J.F. BERGMANN, München 1977, 1764-1766.
7. REITERER, W.: Kriterien der körperlichen Leistungsfähigkeit. Limitierende Faktoren und diagnostische Kriterien des Ausdauerleistungsvermögen. Wien.med.Wschr. 127 (1977), Suppl.42
8. REITERER, W.: Effects of long-term treatment with a beta-receptor blocker, pindolol, combined with a diuretic agent, clopamid, on exercise performance in hypertension. Curr. Med. Res. and Opin., 6 (1980), 552- 558.
9. SCHMID, P., BERG, A., LEHMANN, M., SCHWABERGER, G., KEUL, J.: Zur Energiebereitstellung bei Körperarbeit. Wien.med.Wschr. 135 (1985) 228-234.
10. WASSERMANN, K., WHIPP, B. J., KOYAL, S. N., BEAVER, W. L.: Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. J. Appl. Physiol. 35 (1973) 236.

Anschrift des Verfassers

Univ. Doz. Dr. W. REITERER  
Poliklinik  
I. Med. Abteilung  
Mariannengasse 10  
A-1090 Wien