

Sonderdruck aus

Wiener klinische Wochenschrift

88 (16), 527—530 (1976)

Schriftleiter: O. Kraupp und E. Deutsch
Springer-Verlag Wien · New York

Der Verlag behält sich das ausschließliche Copyright für alle in der
„Wiener klinischen Wochenschrift“ veröffentlichten Beiträge vor

Aus der I. Medizinischen Abteilung
(Vorstand: Doz. Dr. H. Czitober)
der Allgemeinen Poliklinik der Stadt Wien

On-line-Analyse von anaerober Energiebereitstellung und Sauerstoffschuld während rektangulär- triangulärer Fahrradergometrie*

Von **W. Reiterer**

Mit 4 Abbildungen

*On-Line Analysis of Anaerobic Power and Oxygen Debt
in Rectangular-Triangular Stress Testing*

Summary. The rectangular-triangular bicycle exercise test with on-line analysis of respiratory function and gas exchange is used in the evaluation of physical performance. A programme has been developed for on-line computation of an index of anaerobic power and of oxygen debt. The index of anaerobic power is calculated by subtracting the oxygen uptake exceeding the resting values from the energy demand to sustain a given work load. The oxygen uptake exceeding the resting level during a period of five minutes after the exercise test is added up and the result is taken to represent the index of the oxygen debt. In this presentation of preliminary results it is concluded that the index of anaerobic power and the parameter of anaerobic power (maximal oxygen uptake in symptom-limited stress testing) provide valuable additional information in regard to the physical performance of untrained people, athletes and patients with impaired cardio-pulmonary function in quantitative terms.

* Mit Unterstützung des Jubiläumsfonds der Oesterreichischen Nationalbank, Forschungsprojekt Nr. 831.

Sonderdruck aus

Wiener klinische Wochenschrift

88 (16), 527—530 (1976)

Schriftleiter: O. Kraupp und E. Deutsch
Springer-Verlag Wien · New York

Der Verlag behält sich das ausschließliche Copyright für alle in der
„Wiener klinischen Wochenschrift“ veröffentlichten Beiträge vor

Aus der I. Medizinischen Abteilung
(Vorstand: Doz. Dr. H. Czitober)
der Allgemeinen Poliklinik der Stadt Wien

On-line-Analyse von anaerober Energiebereitstellung und Sauerstoffschuld während rektangulär- triangulärer Fahrradergometrie*

Von W. Reiterer

Mit 4 Abbildungen

On-Line Analysis of Anaerobic Power and Oxygen Debt in Rectangular-Triangular Stress Testing

Summary. The rectangular-triangular bicycle exercise test with on-line analysis of respiratory function and gas exchange is used in the evaluation of physical performance. A programme has been developed for on-line computation of an index of anaerobic power and of oxygen debt. The index of anaerobic power is calculated by subtracting the oxygen uptake exceeding the resting values from the energy demand to sustain a given work load. The oxygen uptake exceeding the resting level during a period of five minutes after the exercise test is added up and the result is taken to represent the index of the oxygen debt. In this presentation of preliminary results it is concluded that the index of anaerobic power and the parameter of anaerobic power (maximal oxygen uptake in symptom-limited stress testing) provide valuable additional information in regard to the physical performance of untrained people, athletes and patients with impaired cardio-pulmonary function in quantitative terms.

* Mit Unterstützung des Jubiläumsfonds der Oesterreichischen Nationalbank, Forschungsprojekt Nr. 831.

Key words: Rectangular-triangular bicycle ergometry, ergospirometry, anaerobic power, oxygen debt, on-line computation.

Zusammenfassung. Als Ergänzung zur halbminütigen On-line-Analyse von ergospirometrischen Meßwerten wurde ein Rechenverfahren zur Bestimmung der anaeroben Energiebereitstellung und der Sauerstoffschuld unter rektangulär-triangularer Belastung entwickelt.

Aus der Differenz des Energiebedarfes für die durch 2 Min. zu tolerierenden Belastungsstufen und der aktuellen Sauerstoffaufnahme über dem Ruhebedarf wird ein Index für die anaerobe Energiebereitstellung und deren prozentualer Anteil am gesamten Energiebedarf am Ende jeder Belastungsstufe errechnet. Nach Abbruch der körperlichen Belastung wird die über dem Ruhewert gelegene Sauerstoffaufnahme durch 5 Min. aufsummiert und als Index für die Sauerstoffschuld über den Rechner ausgegeben.

Neben den gebräuchlichen Meßwerten für die aerobe Arbeitskapazität (maximale Sauerstoffaufnahme in l, ml/kg Körpergewicht oder in METS) stellen die Indizes für die anaerobe Energiebereitstellung (gewertet in kcal, cal/kg KG und als prozentualer Anteil am Gesamtenergiebedarf) und für die Sauerstoffschuld (angegeben in kcal und cal/kg KG) eine zusätzliche Information dar, die physische Leistungsfähigkeit von Normalpersonen, Trainierten und Patienten mit kardio-pulmonalen Erkrankungen umfassend zu beschreiben.

Schlüsselwörter: Ergospirometrie, rektangulär-triangularer Fahrradergometrie, anaerobe Arbeitskapazität, Sauerstoffschuld, On-line-Analyse.

Einleitung

Durch Rechner unterstützte On-line-Analyse von leistungsphysiologischen Meßwerten können adaptive und regulative Vorgänge und deren Zusammenhänge unter körperlicher Belastung sofort beurteilt werden.

Infolge der langsam ansteigenden O₂-Aufnahme zu Beginn einer körperlichen Belastung kann der nötige Energiebedarf durch aerobe Prozesse nur teilweise gedeckt werden. Dieses Sauerstoffdefizit wird durch die „anaerobe Energiebereitstellung“ — hierzu rechnen wir neben dem Abbau von energiereichen Phosphatverbindungen (ATP, Kreatinphosphat) und der Spaltung von Glukose zu Pyruvat und Laktat auch den Verbrauch von an Myo- und Hämoglobin gespeicherten Sauerstoff — gedeckt [2, 3, 5, 6].

Nach Abbruch der körperlichen Belastung kehrt die Sauerstoffaufnahme verzögert zum Ausgangswert vor Belastung zurück. Der O₂-Mehrverbrauch ist auf die

gesteigerten Stoffwechselforgänge und auf den Wiederaufbau der anaeroben Energiereserven und auf die Auffüllung der Sauerstoffspeicher zurückzuführen und wird als Sauerstoffschuld bezeichnet [2, 6, 7].

Für die rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie wurde ein Rechenverfahren erarbeitet, um die anaerobe Energiebereitstellung und die Sauerstoffschuld neben anderen ergospirometrischen Parametern on-line unter Belastung zu bestimmen.

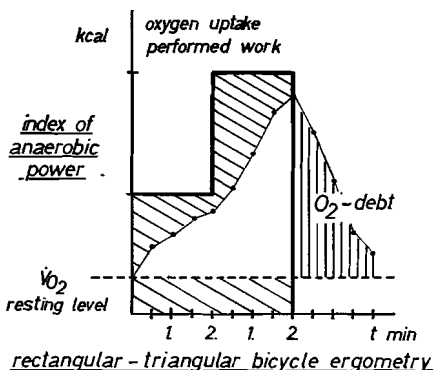


Abb. 1. Modell zu Berechnung der anaeroben Energiebereitstellung (schräg schraffierte Fläche) und der Sauerstoffschuld (vertikal schraffiert) unter rektangulär-triangularärer Belastung.

WL_{1, 2} Belastungsstufen in kcal $\dot{V}O_2$ Sauerstoffaufnahme in kcal unter Belastung und in der nachfolgenden Ruhephase (punktierte Linie) $\dot{V}O_2 R$ Sauerstoffaufnahme in Ruhe

Methodik

Für die Fahrradergometrie wurde die Methodik der rektangulär-triangularären Belastung standardisiert und leistungsphysiologische Normalwerte erarbeitet [9, 12]. Bei diesem Belastungsmodus wird unter körperlicher Belastung kein steady-state angestrebt, sondern die Belastungsintensität wird stufenweise alle 2 Min. erhöht, bis der Proband symptomlimitiert ausbelastet ist [8]. Die Untersuchung erfolgt in sitzender Position auf einem drehzahlunabhängig, elektrisch gebremsten Fahrradergometer (Fa. Jäger, Würzburg, BRD). Die Umdrehungszahl liegt zwischen 50 und 70 Umdrehungen pro Min., wobei letzterer Wert bei höchsten Belastungsstufen gestattet wird.

Respiratorische Parameter werden mittels Maskenatmung im offenen System über einen Zeitraum von jeweils 30 Sek. von der automatischen Anlage erfaßt und aus-

gedruckt: Atemminutenvolumen (\dot{V}_E) l/Min. (BTPS), Atemzugvolumen (V_T) l, Atemfrequenz (f_T), Volumsprozente O_2 und CO_2 in der Ausatemluft (STPD), Sauerstoffaufnahme (\dot{V}_{O_2}) l und ml/kg KG (STPD), respiratorischer Quotient (RQ), Sauerstoffpuls ml/beat, Atemäquivalent und Herzfrequenz (Ergopneumotest mit EDV, Fa. Jäger).

Das EKG-Signal wird von Brustwandelektroden abgenommen und zur Form- und Rhythmusanalyse sowohl graphisch als auch optisch dargestellt. Sämtliche Analogdaten von respiratorischen Meßwerten können zusätzlich graphisch dokumentiert und optisch über einen Sichtschirm wiedergegeben werden. Durch die Entwicklung eines Software-Programmes für den in Verwendung stehenden Rechner (Olivetti P 652 mit einem Interface, bestehend aus AD-Wandlern, Spitzenwertspeichern und externer Programmsteuereinheit, System Jäger) können wir on-line einen Index für die anaerobe Energiebereitstellung am Ende der 2minütigen Belastungsstufen bestimmen.

Die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in den letzten Minuten der Ruhepause vor Belastung wird als Ruhereferenzwert für die weiteren Berechnungen abgespeichert. Zu Beginn jeder Belastungsstufe wird die Belastungsgröße (Watt) über das Key-Board in den Rechner eingegeben. Der Kalorienwert der gesamten Sauerstoffaufnahme während den einzelnen Belastungsphasen abzüglich des Ruhereferenzwertes stellt die „aerobe Energiebereitstellung“ dar (1 l O_2 wird 5,05 kcal gleichgesetzt, da bei rasch ansteigender Belastung nur der Glukosemetabolismus zum Tragen kommt). Wird vom Sollenergiebedarf pro Belastungsstufe (= Watt \times Min. $\times k_1 \times k_2$; Faktor $k_1 = 0,014328$ entsprechend dem kcal-Wert für 1 Watt; Faktor $k_2 = 4,7619$ entsprechend einem angenommenen Wirkungsgrad von 21%) die aerobe Energiebereitstellung abgezogen, so erhält man einen Index für die „anaerobe Energiebereitstellung“, die in kcal, cal/kg KG und als prozentualer Anteil der anaeroben Energiebereitstellung am gesamten Energiebedarf ausgegeben wird. Während der On-line-Analyse werden die kumulativen Werte für die anaerobe Energiebereitstellung am Ende jeder Belastungsstufe über den Key-Board-Printer ausgedruckt.

Über einen Zeitraum von 5 Min. nach Abbruch der Belastung wird die über dem Ruhebedarf gelegene O_2 -Mehraufnahme als O_2 -Schuld 5 min. in kcal und cal/kg KG errechnet.

Wahlweise können in einer Off-line-Routine nach Eingabe der halbminütig bestimmten Sauerstoffaufnahmewerte und der Belastungsintensität neben dem Index für die kumulative anaerobe Energiebereitstellung auch die Indices pro Belastungsstufe, das Sauerstoffdefizit und der Wirkungsgrad bestimmt werden. Während der On-line-Analyse unter Belastung wird auf letztere Werte verzichtet, da ein zusätzlicher Informationswert für das Feed-back-System zur Wahl der Belastungsintensität und des Abbruchzeitpunktes nicht gegeben scheint[10].

Praktische Anwendung der Untersuchungsmethodik

In einem Kollektiv von untrainierten Normalpersonen, Männern und Frauen im Alter zwischen 30 und 45 Jahren, wurde die Beziehung zwischen tolerierter Belastung und anaerober Energiebereitstellung bzw. Sauerstoffschuld 5 Min. untersucht.

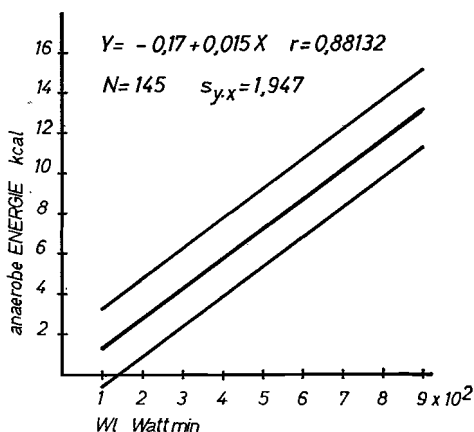


Abb. 2. Beziehung zwischen anaerober Energie (in kcal) und geleisteter Arbeit (in Watt-Min.) bei Normalpersonen

Zwischen der geleisteten Arbeit (ausgedrückt als Summe der Watt-Minuten; die höchste Belastungsstufe wurde nicht gewertet) und dem Index für die anaerobe Energiebereitstellung besteht eine lineare Beziehung, sofern eine Belastungsintensität unter 80% der maximalen Sauerstoffaufnahme berücksichtigt wird (siehe Abb. 2).

Die Sauerstoffschuld aus einem 5minütigen Beobachtungszeitraum nach Belastung korreliert eng mit der erbrachten Gesamtarbeit bei einem subjektiven Ermüdungsgrad von 17 bis 18 nach G. B o r g (sehr schwer) (siehe Abb. 3).

Bei Normalpersonen erreicht die anaerobe Energiebereitstellung bei Ausbelastung bis zu 28% des Sollenergiebedarfes; in cal/kg KG gewertet, wurden Werte mit 200 bis 300 cal/kg beobachtet (siehe Abb. 4).

Schlußfolgerung

Die physische Leistungsfähigkeit eines Probanden läßt sich durch die Beurteilung der aeroben und anaeroben Arbeitskapazität genau charakterisieren. Die maximale Sauerstoffaufnahme, beschrieben in l, ml/kg

KG oder in METS (als ein Vielfaches des O_2 -Ruhebedarfes von 3,5 ml O_2 /kg . Min.) kennzeichnet die *aerobe Kapazität*. Für die symptomlimitierte rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie kann mittels eines entwickelten Rechenprogrammes ein Index für die anaerobe Energiebereitstellung (*anaerobe Arbeitskapazität*) und für die Sauerstoffschuld on-line errechnet werden. Der prozentuale Anteil der anaeroben Energiebereitstellung am gesamten Energiebedarf kennzeichnet zusätzlich die Bereitschaft des Probanden, eine erschöpfende Belastung

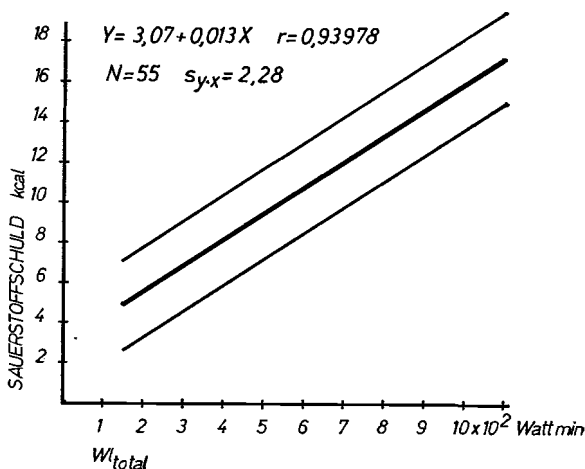


Abb. 3. Beziehung zwischen Sauerstoffschuld (in kcal) aus einer 5minütigen Ruhephase nach Belastung und der geleisteten Gesamtarbeit (in Watt-Min.) bis zu einem Ermüdungsgrad von 16 bis 18 nach G. Borg

zu tolerieren. Hiermit kann die physische Leistungsfähigkeit von Normalpersonen, trainierten und dekonditionierten Probanden und Patienten mit Leistungsminderung infolge kardio-pulmonaler Erkrankungen mit quantitativen Kriterien beschrieben werden [12].

Weiterführende Untersuchungen beschäftigen sich mit der Analyse etwaiger Zusammenhänge zwischen Trainingszustand, Schweregrad der Leistungseinbuße bei beeinträchtigter Herzfunktion und hämodynamischen Meßwerten und dem Ausmaß der anaeroben Energiebereitstellung unter rektangulär-triangularärer Belastung.

Appendix

Anaerobe Energiebereitstellung (anaerobic power) =

$$\sum_{i=1}^n [Wl_j \cdot t \cdot k_1 \cdot k_2 - \sum_{m=1}^{n-1} (\dot{V}O_{2,mj} - \dot{V}O_{2,R}) \cdot k_3]$$

- i Anzahl der Belastungsstufen;
 Wlj Belastungsstufe (Watt; Eingabe über Key-board);
 t Zeitdauer pro Belastungsstufe (0,5 bis 2 Min.);
 k₁ 0,014328 (Umrechnungsfaktor von Watt in kcal/Min.);
 k₂ 4,7619 (Umrechnungsfaktor für einen Wirkungsgrad von 21%; bestimmbar durch indirekte Kalorimetrie auf Belastungsstufen im steady-state unterhalb der anaeroben Schwelle; der O₂-Bedarf für die Fahrrbewegung bei Null-Last wurde nicht eleminiert);
 k₃ 5,05 (Umrechnungsfaktor für 1 l O₂ in kcal/Min.);
 $\dot{V}O_{2,mj}$ Sauerstoffaufnahme während einer halbminütigen Meßperiode der Belastungsstufe j;
 $\dot{V}O_{2,R}$ Sauerstoffaufnahme unter Ruhebedingungen.

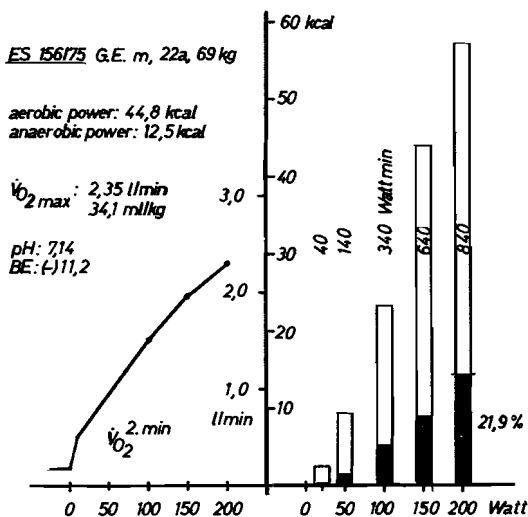


Abb. 4. Anstieg der O₂-Aufnahme unter rektangulär-triangularer Fahrradergometrie (2-Min.-Stufen à 20, 50, 100, 150 und 200 Watt) und Veränderung von Anteilen der aeroben (weiße Säule) und anaeroben (schwarze Säule) Energiebereitstellung bei einem 22jährigen untrainierten, gesunden Probanden

(Maximale Sauerstoffaufnahme 2,35 l/Min. STPD; unmittelbar nach Belastung pH-Abfall im arterialisierten Kapillarblut des Ohrläppchens auf 7,14; Base-Excess-Differenzwert [—] 11,2)

Literatur

1. Auchincloss, J. H., Gilbert, R., Bowman, J. L.: Response of oxygen uptake to exercise in coronary artery disease. *CHEST* 65, 500 (1974).
2. Astrand, P. O., Rodahl, K.: Textbook of work physiology. New York: McGraw-Hill. 1970.
3. Cerretelli, P., Ambrosoli, G.: Limiting factors of anaerobic performance in man. In: Limiting factors of physical performance (Keul, J., Hrsg.). Stuttgart: G. Thieme. 1973.
4. Kaijser, L.: Oxygen supply as a limiting factor in physical performance. In: Limiting factors of physical performance (Keul, J., Hrsg.). Stuttgart: G. Thieme. 1973.
5. Keul, J.: The relationship between circulation and metabolism during exercise. *Medicine and Science in Sports* 5, 209 (1973).
6. Keul, J., Doll, E., Keppler, D.: Energy metabolism of human muscle. *Medicine and Sport*, Vol. 7. Basel: S. Karger. 1972.
7. Martin, T. P.: Oxygen deficit, oxygen debt relationship at submaximal exercise. *J. Sports Medicine and Physical Fitness* 14, 252 (1974).
8. Niederberger, M., Kubicek, F., Reiterer, W.: Leitlinien für die Ergometrie. *Acta Medica Austriaca* 2, 33 (1975).
9. Reiterer, W.: Methodik eines rektangulär-triangulären Belastungstestes. *Herz/Kreislauf* 7, 457 (1975).
10. Reiterer, W.: Computer assisted data processing at a cardio-pulmonary function laboratory. *Computers in Cardiology*, Rotterdam, Okt. 1975, Vortrag.
11. Reiterer, W., Czitober, H.: Ergometrische und ergospirometrische Beurteilung der Leistungsfähigkeit im höheren Alter. Untersuchungsmodell. *Österr. Journal für Sportmedizin* 5, 19—24 (1975).
12. Reiterer, W.: Evaluation of physical performance by rectangular-triangular bicycle ergometry and ergospirometry. *Basic Res. Cardiol.* (Im Druck.)

Korrespondenz: OA. Dr. W. Reiterer, I. Medizinische Abteilung, Kardio-pulmonales Funktionslabor, Allgemeine Poliklinik der Stadt Wien, Mariahilfgasse 10, A-1090 Wien.

