

Zur indirekten Bestimmung des Energieumsatzes aus der Sauerstoffaufnahme – ein Beitrag zur Revision von ISO 8996

Bernhard KAMPMANN

*Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Fachgebiet Arbeitswissenschaft
Gaußstraße 20, D-42097 Wuppertal*

Kurzfassung: Der Energieumsatz ist eine wichtige Größe zur Abschätzung der Beanspruchung des Menschen bei körperlicher Arbeit. Insbesondere zur Bewertung der Beanspruchung unter Klimabelastung spielt die Wärmeproduktion im Körper eine große Rolle für die Wärmebilanz. In Labor- und Felduntersuchungen ist die Bestimmung des Energieumsatzes aus der Sauerstoffaufnahme eine oft verwendete indirekte Messmethode für den Energieumsatz. - Bei der Überarbeitung der ISO 8996 stellte sich heraus, dass für die Dynamik der Sauerstoffaufnahme inzwischen Forschungsergebnisse vorliegen, die dazu führen, dass die Auswertungen nach der Partial- und nach der Integralmethode neu diskutiert werden müssen.

Schlüsselwörter: Energieumsatz Sauerstoffaufnahme, Partialmethode, Integralmethode, slow component, EPOC

1. Die Bestimmung des Energieumsatzes aus dem Sauerstoffverbrauch

Unter Annahmen über die Zusammensetzung der Nahrung lässt sich aus dem Sauerstoffverbrauch und dem respiratorischen Quotienten der Energieumsatz bestimmen. Inzwischen lassen sich – durch Forschungsergebnisse, die in ISO 8996 noch nicht berücksichtigt wurden – die dort angegebenen Auswertverfahren nur noch bedingt anwenden.

2. Zur Kinetik der Sauerstoffaufnahme

2.1 „slow component“

Whipp and Wasserman haben 1972 gezeigt, dass sich – bei konstanter Arbeitsbelastung – die Rate der Sauerstoff-Aufnahme ($\dot{V}O_2$) bei geringer Arbeitsschwere innerhalb von 3 Minuten konstant einstellt. Bei höherer (aber ebenfalls konstanter) Arbeitsschwere zeigte sich ein weiterer kontinuierlicher Anstieg von $\dot{V}O_2$, so dass ein Gleichgewicht erst später, wenn überhaupt, zustande kam. Dieser zusätzliche Anstieg wurde „*langsame Komponente*“ (*slow component*) der $\dot{V}O_2$ genannt.

Ein Grund für das Einsetzen dieser langsamen Komponente könnte das Überschreiten der Laktatschwelle (aerob-anaeroben Schwelle) sein (Barstow 1994). Die „*langsame Komponente*“ ist vielfach untersucht worden (Gaesser & Poole 1996, Poole & Richardson 1997, eine Übersicht geben Xu & Rhodes 1999).

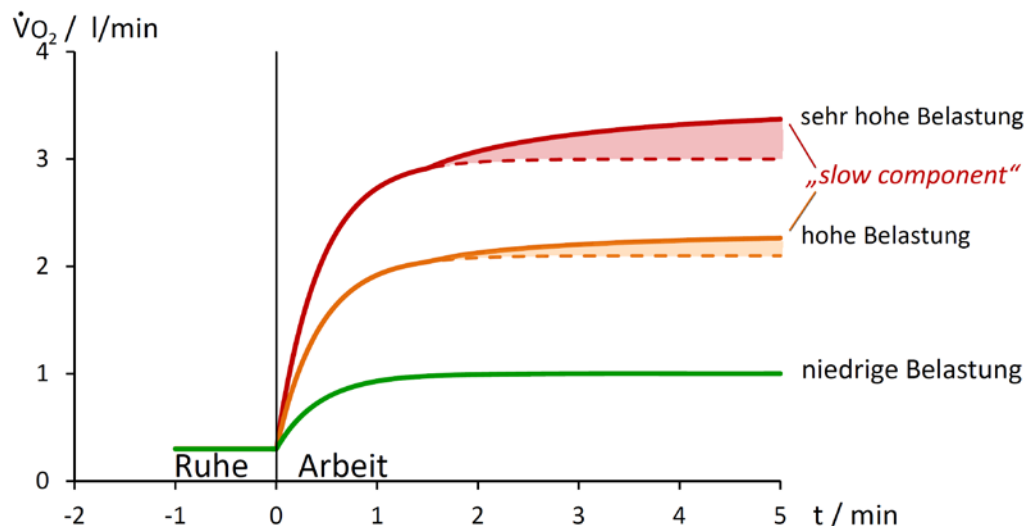


Abbildung 1: Anstieg der Sauerstoffaufnahme über der Zeit bei konstanter Arbeitsbelastung; schematische Darstellung der „slow component“, deren Größe bei höherer Arbeitsschwere zunimmt.

Die Größe dieser *langsamen Komponente* wurde auf eine ganze Reihe von Parametern zurückgeführt, etwa auf den Prozentsatz von Typ-2-Muskelfasern („fast-twitch“), die bei schwerer Arbeit aktiviert werden, Arbeitsschwere und Tretfrequenz beim Radfahren (Barstow et al. 1996), relative Fitness (Whipp & Wasserman 1972 Fig 7), Fitness (Henson et al. 1989, Fig. 3) sowie Ausdauertraining (Womack 1995), Körperhaltung (Rückenlage gegenüber aufrechter Haltung) und Alter (Xu & Rhodes 1999).

Es lassen sich Modelle für die langsame Komponente entwickeln (etwa Barstow & Molé 1991), aber interindividuelle Unterschiede scheinen recht hoch zu sein (z.B. Bearden & Moffat 2000 und 2001; Diskussion durch Morton 2002 und Antwort durch Bearden & Moffat 2002).

Henson et al. (1989) beobachten, dass in ihrer Untersuchung im Mittel 35 % der zusätzlichen energetischen Kosten bei Arbeitsschweren oberhalb der Laktatschwelle (für 30 Minuten extrapoliert) auf den Anstieg von $\dot{V}O_2$ durch die langsame Komponente des Sauerstoff-Verbrauchs – zusätzlich zur im Versuch ansteigenden Arbeitsschwere – bedingt sind (Table 3, p. 25).

Burnley et al. (2001) geben für ihre Untersuchung einen Anstieg von $\dot{V}O_2$ durch die langsame Komponente von 14,2 % zu Beginn schwerer körperlicher Belastung an.

2.2 Q_{10} -Effekt

Wenn die Körper- bzw. Muskeltemperatur während physischer Arbeit ansteigt, wird der Sauerstoff-Verbrauch durch den Q_{10} -Effekt um etwa 7 % pro Grad Körpertemperaturerhöhung ansteigen (z.B. Kampmann & Bröde 2015).

2.3 EPOC-Effekt

Nach einer Arbeitsperiode muss das Sauerstoffdefizit, das zu Beginn der Arbeit auftritt (Abbildung 2), wieder „zurückgezahlt“ werden; diese Sauerstoffschulden heißen nach einem Vorschlag von Gaesser & Brooks (1984) *Excess post-exercise oxygen consumption* (EPOC); früher auch *Sauerstoffschuld* oder *afterburn*).

Man weiß seit langer Zeit, dass das Sauerstoffdefizit von den Sauerstoffschulden oft weit überschritten wird (Dill et al. 1936, Fig 4) und zwar durch verschiedene Mechanismen (metabolische Umstellungen, Q_{10} -Effekt usw.) und dass ein erhöhter Sauerstoffverbrauch für einige Zeit anhält (Hill 1924, p.100 [es sind zwei Mechanismen aktive die beide einen exponentiellen Abfall zeigen; Fig. 2 & 4; auch Gaesser & Brooks 1984, Fig. 1c, Fig. 4]; Dill et al. 1936, Fig 5). Die Größe der langsameren Komponente konnte von Hagberg et al. (1980) in ihren Experimenten zu 60-70 % durch Q_{10} -Effekte erklärt werden.

Diese Erhöhung des Stoffwechsels nach einer Arbeitsphase ist für die Auswertung von Messungen wichtig; sie findet aber auch Interesse von Forschern, die sich mit Fitness beschäftigen und die den zusätzlichen Energieumsatz im Hinblick auf Gewichtsverluste untersuchen.

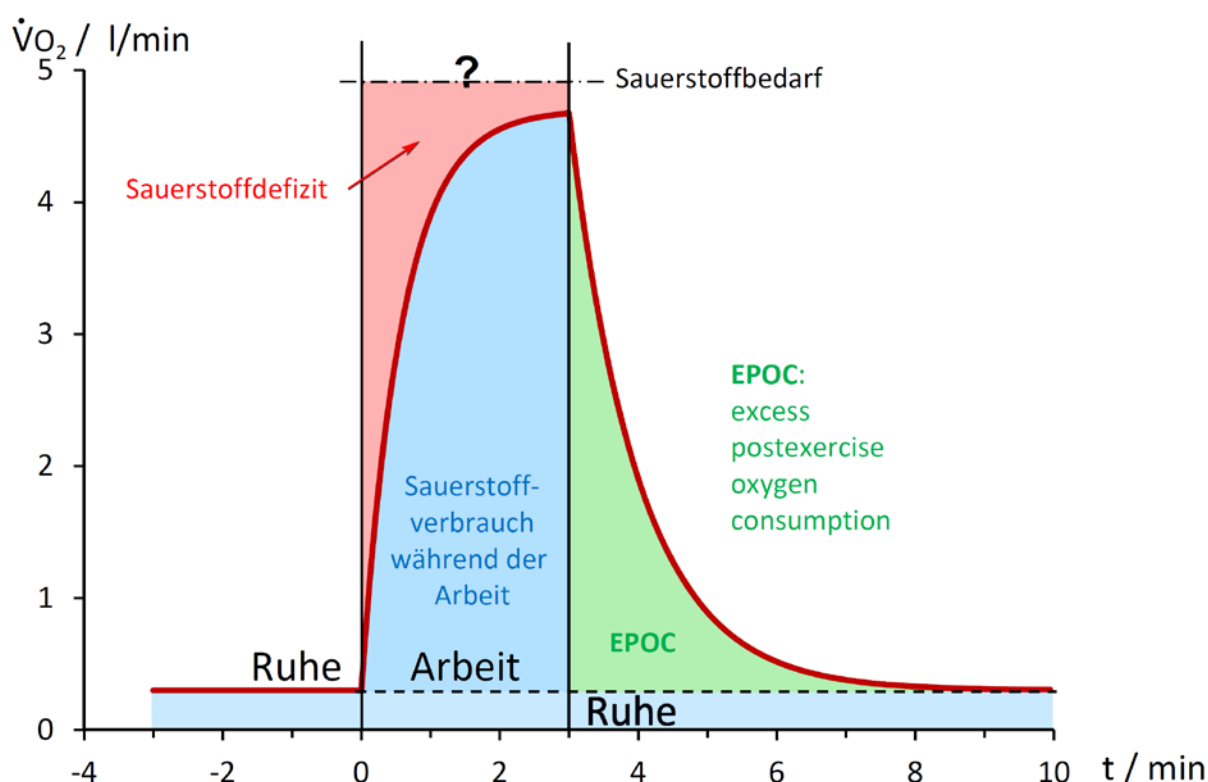


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Sauerstoffdefizit und EPOC – im Hinblick auf die Auswertung mit der integralen Methode (ISO 8996 Kapitel 9.1.4.2)

EPOC kann bis zu 10...20 l O_2 betragen (Smith & Mc Naughton 1993); einen Überblick über die Größenordnungen bei verschiedenen Autoren geben Vella & Kravitz (2004). Das Verhältnis von EPOC zum Sauerstoffdefizit kann bei schwerer Arbeit einen Wert von 4 erreichen (Gore & Withers 1990, Table 1, Fig 1).

Die Sauerstoffaufnahme während der Erholungsphase nach der Arbeit wird sich mit der schnelleren Komponente nach einigen Minuten stark verringern; die langsamere Komponente kann z.B. 40 ± 14 min (für trainierte) bzw. 50 ± 14 min (für untrainierte Probanden) betragen, bis der Ruhe-Sauerstoffverbrauch wieder erreicht ist (Short & Sedlock 1997 nach Körperarbeit von 70 % der maximalen Sauerstoffaufnahme bei

einem Fahrrad-Ergometer-Test über 30 Minuten). Børsheim & Bahr (2003) geben einen Überblick über Größe und Dauer von EPOC bis hin zu einigen Stunden.

2.4 Auswirkungen auf die Messung des Energieumsatzes

Sowohl das Auftreten der *langsamen Komponente* (*slow component*) bei konstanter Arbeitsbelastung als auch EPOC nach dem Ende einer Arbeitsphase können erhebliche Auswirkungen auf die Bestimmung des Energieumsatzes aus Messungen des Sauerstoffverbrauchs haben.

3. Kommentar zu ISO 8996 – „9.1.1 Partial and integral methods“

Für die Bestimmung des Energieumsatzes aus Messungen des Sauerstoffverbrauchs ergeben sich einige Folgerungen:

Wenn sich – bei niedrigen Arbeitsschweren – keine *langsame Komponente* ergibt, ist eine Auswertung nach der Partialmethode unproblematisch, solange Muskel- bzw. Körpertemperatur sich nicht ändern; ansonsten wird der Q_{10} -Effekt den Sauerstoffverbrauch erhöhen. Man kann also das übliche energetische Äquivalent für die Auswertung verwenden.

- 1) Da die Partialmethode auf Werte der $\dot{V}O_2$ unterhalb von 1 l/min beschränkt wird, werden vermutlich keine *langsamen Komponenten* auftreten.
- 2) Die Beschränkung der Partialmethode auf Werte von $\dot{V}O_2$ unterhalb von 1 l/min ist überraschend, da dieser Wert deutlich unterhalb der Dauerleistungsgrenze (bzw. unterhalb der anaeroben Schwelle) liegt. Wie man etwa bei Whipp & Wasserman (1972, Fig. 3 & 7) findet, ähnelt die Sauerstoffaufnahme ISO 8996, Fig. 2 auch für Werte oberhalb von 1 l/min. Sollte also bei Werten im steady-state-Bereich oberhalb von 1 l/min bereits das Integralverfahren (mit Ruhephase nach 3 oder 4 Minuten) eingesetzt werden?
- 3) Wenn bei konstanter Arbeitsleistung *langsame Komponenten* auftreten, müsste möglicherweise ein verändertes energetisches Äquivalent für die Auswertung benutzt werden, da bei der Inanspruchnahme anderer Muskelfasern (Typ-2) und bei anderen metabolischen Prozessen oberhalb der Laktatschwelle Änderungen auftreten könnten.
- 4) Für die Integralmethode treten zwei Probleme auf:
 - da EPOC nicht dem Sauerstoffdefizit entspricht, kann Gleichung 7 in ISO 8996 nicht angewendet werden – dort wird dies vorausgesetzt.
 - In Fig. 3 in ISO 8996 fällt die Rate der Sauerstoffaufnahme unter den Ruhewert: da dies nicht möglich ist, müssen andere Kriterien für die Dauer der Messung während der Ruhephase angegeben werden (s.o. 2.3).

4. Diskussion / Schlussfolgerung

Partialmethode: Der Sauerstoffverbrauch wird korrekt gemessen. Bei ansteigender Körpertemperatur muss der Q_{10} -Effekt berücksichtigt werden. Wenn *slow components* auftreten (vermutlich nicht unterhalb von Raten der Sauerstoffaufnahme von 1...1,5 l/min, nach 3...5 Minuten), muss möglicherweise das energetische Äquivalent modifiziert werden. Das Auftreten von *slow components* führt bei konstanter Arbeitsleistung zu einem Absinken des externen Wirkungsgrades.

Integralmethode: Der Sauerstoffverbrauch wird durch das Auftreten von EPOC überschätzt, folglich auch der Energieumsatz.

Doppelt markiertes Wasser (ISO 8996 Kapitel 9.2): Diese Methode bestimmt die Produktion von Kohlendioxid im Körper; es treten – mit Bezug auf die *langsame Komponente* und *EPOC* die gleichen Probleme auf, wie bei der Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs.

Ohne weitere Untersuchungen im Hinblick auf die Möglichkeit von Auswertungen der Partial- und der Integralmethode lassen sich die Genauigkeitsangaben in ISO 8996 Table 1 von $\pm 5\%$ für Stufe 4 „Expertise“ sicherlich nicht halten.

5. Literatur

- Barstow TJ, Molé PA (1991) Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *J. Appl. Physiol.* 71.6: 2099-2106.
- Barstow TJ (1994) Characterization of VO_2 kinetics during heavy exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26.11: 1327-1334.
- Bearden SE, Moffatt RJ (2000) VO_2 kinetics and the O_2 deficit in heavy exercise. *J. Appl. Physiol.* 88.4, 1407-1412.
- Bearden SE, Moffatt RJ (2001) VO_2 slow component: to model or not to model?. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33.4, 677-680.
- Bearden SE, Moffatt RJ (2002) VO_2 slow component amplitude - Letter to the Editor. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34.3, 382.
- Børsheim E, Bahr R (2003) Effect of Exercise Intensity, Duration and Mode on Post-Exercise Oxygen Consumption. *Sports Med.* 33.14:1037-1060.
- Burnley M, Doust JH, Carter H, Jones AM (2001) Effects of prior exercise and recovery duration on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans. *Exp. Physiol.* 86.3: 417-425.
- Dill DB, Edwards HT, Newman EV, Margaria R (1936) Analysis of recovery from anaerobic work. *Arbeitsphysiologie* 9.3, 299-307.
- Gaesser GA, Brooks GA (1984) Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16.1, 29-43.
- Gaesser GA, Poole DC (1996) The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 24, 35-71.
- Gore CJ, Withers RT (1990) The effect of exercise intensity and duration on the oxygen deficit and excess post-exercise oxygen consumption. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 60.3:169-174.
- Hagberg JM, Mullin JP, Nagl FJ (1980) Effect of work intensity and duration on recovery O_2 . *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 48.3: 540-544.
- Henson LC, Poole DC, Whipp BJ (1989) Fitness as a determinant of oxygen uptake response to constant-load exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 59.1-2: 21-28.
- Hill AV, Long CNH, Lupton H (1924) Muscular Exercise, Lactic Acid, and the Supply and Utilisation of Oxygen. Parts IV-VI. *Proc. R. Soc. Lond. B* 96.681, 84-138.
- ISO 8996 (2004) Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. Geneva: International Organisation for Standardisation.
- Kampmann B, Bröde P (2015) Metabolic costs of physiological heat stress responses - Q10 coefficients relating oxygen consumption to body temperature. *Extreme Physiol & Med*, 4.Suppl 1, A103.
- Morton RH (2002) VO_2 slow component amplitude - Letter to the Editor. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34.3:381-382.
- Poole DC, Richardson RS (1997) Determinants of oxygen uptake. Implications for exercise testing. *Sports Med.* 24.5:308-320.
- Short KR, Sedlock DA (1997) Excess postexercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *J. Appl. Physiol.* 83.1:153-159.
- Smith J, Mc Naughton L (1993) The effects of intensity of exercise on excess postexercise oxygen consumption and energy expenditure in moderately trained men and women. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 67.5: 420-425.
- Vella CA, Kravitz L (2004) Exercise After-Burn: A Research Update. *IDEA Fitness Journal* 1.5, 42-47. <http://www.ideafit.com/fitness-library/exercise-after-burn-0> accessed 27. Aug. 2017.

Whipp BJ, Wasserman K (1972) Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. J. Appl. Physiol. 33.3:351-356.

Womack CJ, Davis SE, Blumer JL, Barrett E, Weltman AL, Gaesser GA (1995) Slow component of O₂ uptake during heavy exercise: adaptation to endurance training. J. Appl. Physiol. 79.3:838-845.

Xu F, Rhodes EC (1999) Oxygen uptake kinetics during exercise. Sports Med. 27.5:313-327.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(F)T
Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung

64. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FOM Hochschule für
Oekonomie & Management gGmbH

21. – 23. Februar 2018

GfA Press

Bericht zum 64. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 21. – 23. Februar 2018

FOM Hochschule für Oekonomie & Management

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2018

ISBN 978-3-936804-24-9

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet, den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

USB-Print:

Prof. Dr. Thomas Heupel, FOM Prorektor Forschung, thomas.heupel@fom.de

Screen design und Umsetzung

© 2018 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de