

Friedmann-Bette B

Die Spiroergometrie in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik

Application of Spiroergometry in the Diagnosis of Athletic Performance

Abteilung Innere Medizin VII: Sportmedizin, Medizinische Universitätsklinik Heidelberg

ZUSAMMENFASSUNG

In der Sportmedizin erfolgt die Spiroergometrie, ähnlich wie in der Kardiologie und Pneumologie, in erster Linie zur Objektivierung der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit. Zur Messung der VO_2 max kommen unter Laborbedingungen verschiedene Ergometer zum Einsatz und es werden mit Hilfe portabler Spiroergometriesysteme Untersuchungen unter Trainings- und Wettkampfbedingungen als so genannte Feldtests durchgeführt. Darüber hinaus kann bei Problemen mit der Durchführung einer kontinuierlichen Messung der Ventilationsparameter die Nachatmungsmethode angewandt werden, bei der von der mehrfach in der unmittelbaren Nachbelastungszeit gemessenen VO_2 auf die VO_2 max zurückextrapoliert wird. Das vorrangige Interesse leistungsdiagnostischer Untersuchungen gilt häufig der Ermittlung der maximalen Intensität, mit der Ausdauerbelastungen wie z. B. ein Marathonlauf in einem steady-state absolviert werden können. Diese auch als (individuelle) anaerobe Schwelle bezeichnete Belastungsintensität wird meistens in stufenweise ansteigenden Ergometrien mit mindestens 3-minütiger Stufendauer bestimmt, wobei sich in Deutschland in der Sportpraxis Laktatschwellenmodelle gegenüber den verschiedenen ventilatorischen Schwellenmodellen durchgesetzt haben. Zur Beurteilung der anaeroben Kapazität steht mit der Bestimmung des maximalen akkumulierten O_2 -Defizits (MAOD) ein Verfahren zur Verfügung, das in wissenschaftlichen Untersuchungen angewandt wird, sich in der Praxis aber nicht bewährt hat. Die Bewegungs- bzw. Laufökonomie, deren Bedeutung für Leistungen im Mittel- und Langstreckenlauf gut belegt ist, kann durch Messung des Energieverbrauchs bzw. der VO_2 bei Submaximalbelastung ermittelt werden. Die indirekte Kalorimetrie ermöglicht die Bestimmung des Energieverbrauchs bzw. der fraktionellen Nutzung des Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsels während Belastung.

Schlüsselwörter: Aerobe Kapazität, anaerobe Kapazität, Laufökonomie, indirekte Kalorimetrie.

SUMMARY

Spiroergometry is a means for the assessment of aerobic capacity in athletes. VO_2 max can be determined during incremental tests on different ergometers in the laboratory or in field testing procedures with the help of portable devices. Furthermore, VO_2 max can be calculated by backward extrapolation from the O_2 recovery curve in special field conditions where breathing into a respiratory valve and/or carrying a portable device is difficult to perform. Determination of the maximal intensity for steady-state endurance exercise is often regarded as the most important measure for the performance diagnosis and training recommendations in athletes. In Germany, this intensity is most often assessed during stepwise increasing ergometry with step duration of at least 3 minutes using different concepts for the determination of an (individual) anaerobic threshold from lactate curves. The analysis of graphic plots of gas exchange parameter is less frequently performed. Anaerobic capacity can be estimated by measurement of the maximal accumulated O_2 deficit. This procedure is used in scientific investigations but not in routine performance diagnosis. Running economy, as an important factor for the performance in middle- and long-distance running, can be assessed by VO_2 measurement or calculation of caloric unit cost during submaximal steady-state exercise. Substrate metabolism during submaximal exercise can be studied with the help of indirect calorimetry.

Key words: Aerobic capacity, anaerobic capacity, running economy, indirect calorimetry.

EINLEITUNG

In der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik wird die Spiroergometrie in erster Linie zur Objektivierung der aeroben Leistungsfähigkeit eingesetzt. Wichtigste Größen sind die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_2 max) und die Leistungsfähigkeit im Bereich der Ausdauerergrenze (anaeroben Schwelle). Darüber hinaus können mit Hilfe der Spiroergometrie die anaerobe Kapazität, die Bewegungsökonomie und der Energieverbrauch während Belastung abgeschätzt werden. Im Folgenden wird eine Übersicht über die genannten Anwendungsbereiche der Spiroergometrie gegeben.

OBJEKTIVIERUNG DER AEROBEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Die VO_2 max stellt in der Sportmedizin – wie in der Kardiologie und Pneumologie – eine wichtige Kenngröße der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit dar. Bei Belastungsuntersuchungen unter Einsatz eines großen Anteils der Körpermuskulatur werden bei hochausdauerleistungsfähigen Sportlern Werte $> 85 \text{ ml} \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$ gemessen. Ausdauerleistungsfähige Spitzenathleten können somit eine mehr als doppelt so große VO_2 max als untrainierte Normalpersonen aufweisen. Die VO_2 max von Spitzenausdauerportlerinnen liegt aufgrund des höheren Körperfettanteils ca. 10% niedriger.

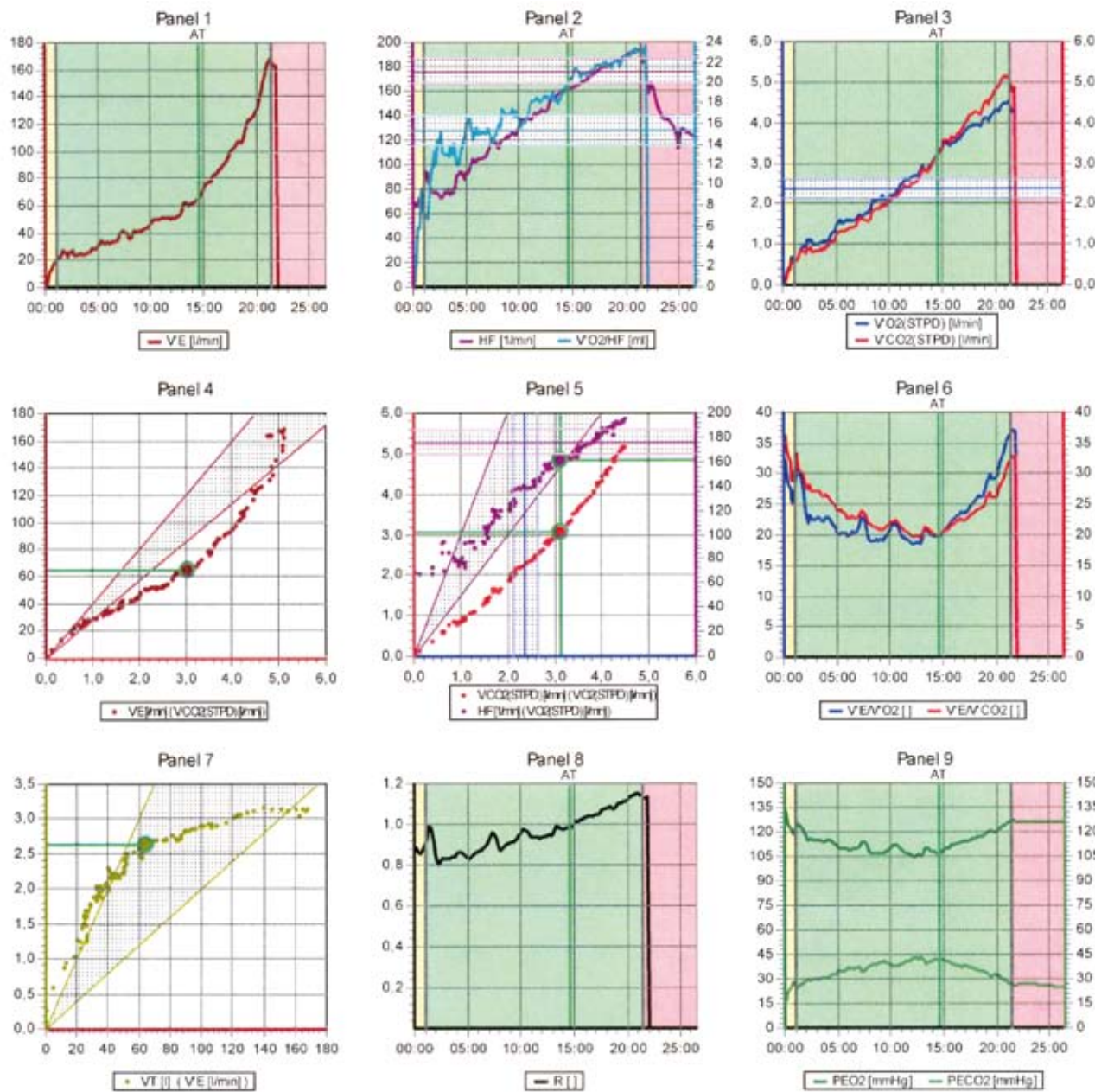


Abbildung 1: 9-Felder-Graphik als Ergebnis einer Fahrradspiroergometrie mit 3-minütigen Belastungsstufen eines ambitionierten Radsportlers (Maximalleistung 350 Watt, VO_{2max} $4.5 l \times min^{-1}$ entsprechend $65 ml \times min^{-1} \times kg^{-1}$). Eingezeichnet ist die mit Hilfe des vorinstallierten Softwareprogramms ermittelte anaerobe Schwelle (AT). Diese wurde als Anstieg des Atemäquivalentes für O_2 (VE/VO_2) (Panel 6) ermittelt. In diesem speziellen Fall ist gleichzeitig auch ein Anstieg des Atemäquivalentes für CO_2 (VE/VCO_2) (Panel 6) erkennbar sowie ein Anstieg des endexpiratorischen O_2 -Partialdrucks von (PEO_2) (Panel 9) und ein Abfall des endexpiratorischen CO_2 -Partialdrucks von CO_2 ($PECO_2$) (Panel 9). Demgegenüber ist mit der V-Slope Methode kein eindeutiger Knickpunkt erkennbar (Panel 5).

riger als die VO_{2max} ihrer männlichen Pendanten. Die für einzelne Sportarten typischen Spitzenwerte sind gut untersucht und stellen Lehrbuchwissen dar (32).

Zur Bestimmung der VO_{2max} ist es von untergeordneter Bedeutung, ob die Belastung als Rampentest oder als stufenweise ansteigende Spiroergometrie durchgeführt wird (5, 16, 25), von Bedeutung ist vielmehr eine sportartspezifische Belastung. Hierfür stehen neben Rennrädern ähnelnden Fahrradergometern hochleistungsfähige Laufbandergometer sowie Ruder-, Handkurbel und Kanuergometer zur Verfügung. Portable Spiroergometriesysteme erlauben darüber hinaus die Messung der Ventilationsparameter und somit eine VO_{2max} -Bestimmung bei so genannten Feldtests,

d. h. bei Untersuchungen unter Trainings- und Wettkampfbedingungen (20). Eine weitere Option für die VO_{2max} -Bestimmungen ist die Nachatmungsmethode, mit Hilfe derer z. B. im Schwimmen, wo eine verlässliche Messung der Ventilationsparameter unter Belastung – wenn überhaupt – nur mit erheblichem Aufwand möglich ist, die VO_{2max} recht genau abgeschätzt werden kann. Hierzu wird von VO_2 -Werten, die während der ersten 60 bis 90 Sekunden der Nachbelastungsphase gemessen werden, unter Anwendung eines exponentiellen oder linearen Algorithmus zurück auf die VO_{2max} extrapoliert (17).

Sportler und Trainer können aus der Kenntnis der VO_{2max} kaum Nutzen für die Trainingsgestaltung ziehen. Deshalb ist bei

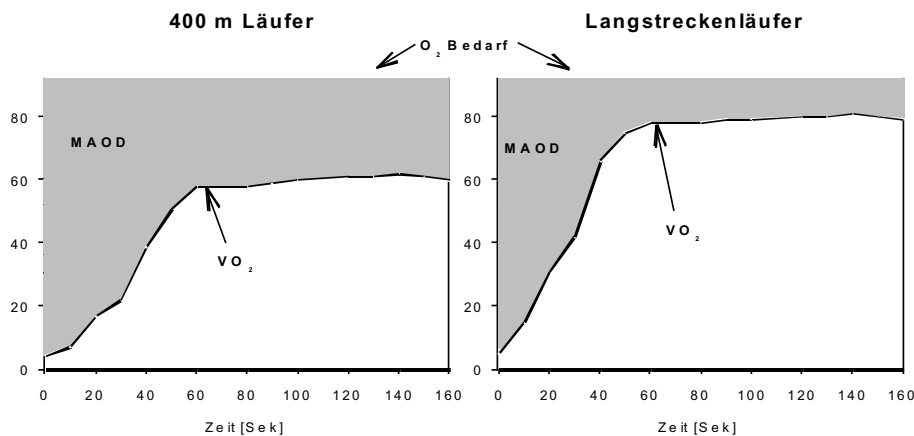


Abbildung 2: Maximales akkumuliertes O_2 -Defizit (MAOD) bei einem 400 m Läufer und einem Langstreckenläufer. Die Linie " O_2 -Bedarf" zeigt die mittels linearer Extrapolation aus den Ergebnissen der Submaximaltests ermittelte theoretische VO_2 bei einer definierten supra- $VO_{2,max}$ -Belastung. In den gezeigten Beispielen liegt der O_2 Bedarf bei $90 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Das MAOD (graue Fläche) wird mittels Flächenkalkulation zwischen dem O_2 Bedarf und der während der supra- $VO_{2,max}$ Belastung gemessenen VO_2 ermittelt. Da der Langstreckler eine höhere VO_2 als der 400 m Läufer erreicht, ist sein MAOD mit $46 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1}$ kleiner als das des 400 m Läufers ($88 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1}$).

leistungsdiagnostischen Untersuchungen in der Sportpraxis die $VO_{2,max}$ nicht der zentrale Parameter. Vielmehr wird dem höchsten relativen Anteil der $VO_{2,max}$ ($\%VO_{2,max}$), der während einer länger dauernden Ausdauerbelastung ohne Ausbildung einer fortschreitenden Azidose zur Energiebereitstellung genutzt werden kann, größere Bedeutung zugemessen (6). Aus diesem Grund steht die Ermittlung der Leistung im Bereich der so genannten anaeroben Schwelle bzw. des aerob-anaeroben Übergangs im Mittelpunkt, d. h. der Belastungsintensitäten, bei denen die anaerobe Energiebereitstellung eine zunehmende Rolle spielt. Die anaerobe Schwelle wird zur Trainingssteuerung und Leistungsprognose herangezogen (21). Die Bestimmung dieser kritischen submaximalen Belastungsintensität hat ferner den Vorteil, dass hierfür – im Gegensatz zur $VO_{2,max}$ Messung – keine Ausbelastung erforderlich ist, für die Spitzensportler außerhalb von Wettkampfsituationen häufig nicht motiviert werden können.

Bei ansteigenden Belastungen ändern sich mit zunehmender Belastungsintensität zu unterschiedlichen Zeitpunkten die anfangs, d. h. bei überwiegend aerober Energiebereitstellung, bestehenden linearen Verhältnisse zwischen Belastungsintensität und Ventilation sowie VO_2 und VCO_2 . Weiterhin tritt zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein systematischer Anstieg der Atemäquivalente für O_2 (VE/VO_2) und CO_2 (VE/VCO_2) auf sowie ein systematischer Anstieg des endexpiratorischen O_2 -Partialdrucks ($PETO_2$) bzw. ein Abfall des endexpiratorischen CO_2 -Partialdrucks in der Ausatemluft ($PETCO_2$). Bei gleichzeitig zu beobachtendem Anstieg der Laktatkonzentration und Abfall der Bicarbonatpuffers sowie des pH-Wertes im arteriellen Blut bzw. arterialisierten Kapillarblut wurden von Wasserman et al. (29) Phasen der isokapnischen Pufferung und der respiratorischen Kompensation beschrieben. Aufgrund der Ergebnisse verschiedener Studien wurde von dieser Arbeitsgruppe vorgeschlagen, zur Bestimmung der anaeroben Schwelle in Rampentests die Intensität bzw. VO_2 zu ermitteln, bei der ein Anstieg von VE/VO_2 und von $PETO_2$ ohne Anstieg von VE/VCO_2 bzw. Abfall von $PETCO_2$ auftritt (7, 30, 31). Die Wahl der Rampensteigung ist für die Schwellenbestimmung nicht von Bedeutung (8). Als alternative Methode wurde etwas später die V-Slope-Methode vorgestellt, eine Regressionsanalyse von VCO_2 vs. VO_2 mit Ermittlung des Punktes der überschießenden CO_2 -Produktion, bedingt durch die Abpufferung von H^+ -Ionen im Bicarbonatpuffer (3).

Zur Überprüfung der Frage, welches der in einem Rampentest angewandten Schwellenmodelle für die Trainingssteuerung in der Praxis am besten geeignet ist, erfolgten nur einige wenige Untersuchungen, in denen die mittels Spiroergometrie ermittelten Schwel-

lenintensitäten in Ausdauertests überprüft wurden (1, 2, 9). Amann et al. (1, 2) beschrieben bei StraßenradSportlern eine gute Übereinstimmung der Intensität im Bereich des VE/VO_2 -Anstiegs (ohne gleichzeitigen Anstieg von VE/VCO_2) mit der Durchschnittsleistung in einem auf dem Fahrradergometer simulierten 40 km Zeitfahren (1). In einer anderen Studie lag die an dieser Schwelle bestimmte Intensität deutlich unter der in einer 30-minütigen Fahrradbelastung ermittelten Intensität am maximalen Laktat-Steady-State, während die am Respiratory Compensation Point (RCP: Anstieg von VE/CO_2) ermittelte Intensität deutlich über der Intensität am maximalen Laktat-Steady-State lag (9). Die Intensitätsbestimmung an einer solchen ventilatorischen Schwelle ist nicht trivial. Da im Rampentest der VO_2 -Anstieg dem Intensitätsanstieg mit einer gewissen Verzögerung folgt, muss für die Intensitätsbestimmung an einer ventilatorischen Schwelle eine Verzögerungszeit berücksichtigt werden (8), die interindividuell offenbar erheblich variieren kann (11).

In Deutschland wird die Bestimmung der (individuellen) anaeroben Schwelle überwiegend mit Hilfe von Laktatschwellen durchgeführt, wofür unterschiedliche Modelle angewandt werden. Unter der Vorstellung, dass am Ende einer mindestens 3-minütigen Belastungsstufe eine Laktatbestimmung im steady-state möglich ist, erfolgen die Belastungsuntersuchungen in der Regel als Stufen- und nicht als Rampentests. Während der letzten Jahrzehnte wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen unterschiedliche Laktatschwellenmodelle entwickelt, die an anderer Stelle ausführlich diskutiert werden (10, 14). Unter der Voraussetzung, dass die stufenweise ansteigende Spiroergometrie kontinuierlich ohne Pausen für die Laktatabnahme erfolgt, kann auch in einem solchen Stufentest eine ventilatorische Schwelle bestimmt werden (Abb. 1). In einigen wenigen Studien wurden unterschiedliche Ergebnisse zu der Frage erzielt, inwiefern Laktatschwellenbestimmungen und die Bestimmung einer ventilatorischen Schwelle übereinstimmende Befunde ergeben (21, 23, 24, 28).

BESTIMMUNG DER ANAEROBEN KAPAZITÄT

Zur Bestimmung der anaeroben Kapazität stellten Medbo et al. 1988 ein Verfahren vor, bei dem während hochintensiver, erschöpfender 2- bis 5-minütiger Belastung das maximale akkumulierte O_2 -Defizit (MAOD) ermittelt wird (19). Die Methode basiert auf folgenden Annahmen: für Belastungsintensitäten, die höher liegen als die Intensität bei maximaler Sauerstoffaufnahme (= supra- $VO_{2,max}$

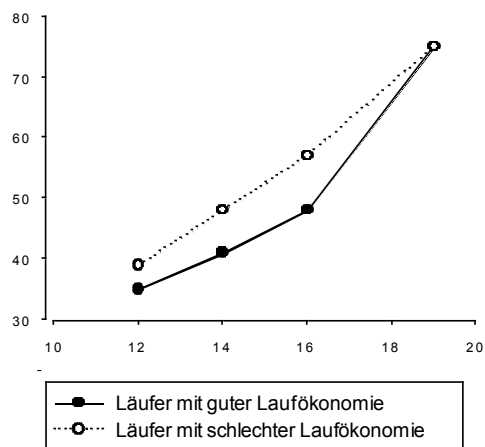


Abbildung 3: Beispiel für eine unterschiedliche Laufökonomie bei 2 gut trainierten Langstreckenläufern mit gleicher VO₂max.

Belastung), lässt sich ein theoretischer O₂-Bedarf errechnen unter der Voraussetzung, dass die VO₂ über den VO₂max-Bereich hinaus linear mit steigender Belastung zunimmt. Zur Ermittlung der linearen Abhängigkeit zwischen Laufbandgeschwindigkeit und VO₂ erfolgt eine VO₂-Messung auf mehreren Submaximalstufen. Der theoretische O₂-Bedarf bei einer bestimmten supra-VO₂max Intensität (z.B. konstante Intensität entsprechend 120-140% VO₂max in unserem Ergometrielabor) wird durch lineare Extrapolation bestimmt. Das MAOD wird als Differenz zwischen diesem theoretischen O₂-Bedarf und der während Belastung gemessenen VO₂ mittels Flächenkalkulation bestimmt und in ml x kg⁻¹ O₂ angegeben (Abb. 2). Bei Sportlern mit hohem Anteil anaerober Trainings- und Wettkampfbelastungen, z.B. bei 400 m-Läufern, kann ein signifikant höheres MAOD gemessen werden als bei ausdauertrainierten Sportlern (Langstrecklern) (13).

Derzeit ist die Bestimmung des MAOD die im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen am häufigsten genutzte Methode zur Erfassung der anaeroben Kapazität (22). Die Methode wird als valide angesehen, aber bezüglich der Reliabilität gibt es einige Zweifel. Ein großer Nachteil ist das Fehlen einer anerkannten standardisierten Vorgehensweise für 1) die Bestimmung der Intensität für die supra-VO₂max-Belastung, 2) die Festlegung der Laufbandsteigung bzw. der Trittfrequenz bei Fahrradbelastungen, 3) die Anzahl und 4) die Dauer der submaximalen Belastungsstufen zur Ermittlung der linearen Abhängigkeit zwischen Intensität und VO₂ (22). Aufgrund eines hohen zeitlichen Untersuchungsaufwands und der fehlenden Möglichkeit zur Ableitung konkreter Trainingshinweise wird das beschriebene spiroergometrische Verfahren zur Erfassung der anaeroben Kapazität immer wieder in wissenschaftlichen Studien durchgeführt, ist aber für die Praxis wenig geeignet.

ANALYSE DER BEWEGUNGSÖKONOMIE

Die Bewegungsökonomie wird als Energieverbrauch bei submaximaler Belastungsintensität definiert. In Studien mit Langstreckenläufern wurde die Abhängigkeit der Wettkampfleistung von der Laufökonomie gut belegt, wobei die Laufökonomie meist durch Messung der VO₂ unter steady-state Bedingungen während submaximaler Belastung ($\leq 85\%$ VO₂max) auf dem Laufband bestimmt wurde (26). Die Bestimmung der Laufökonomie mittels

VO₂-Messung bei 3 submaximalen Geschwindigkeiten hat eine hohe Reliabilität (27), die Sensitivität ist offenbar jedoch besser, wenn nicht nur die VO₂, sondern auch der Energieverbrauch während submaximaler Belastungsintensität ermittelt wird (12). Für den interindividuellen Vergleich muss die während submaximaler Geschwindigkeit gemessene VO₂ auf das Körpergewicht bezogen werden. Da die VO₂ nicht proportional zum Körpergewicht zunimmt (4), wurde aufgrund von Studienergebnissen und theoretischer Überlegungen zum Einfluss elastischer Kräfte von Muskeln und Sehnen vorgeschlagen, zum Vergleich interindividuell unterschiedlicher Laufökonomien die körpergewichtsbezogene VO₂ als VO₂ x min⁻¹ x kg^{-0.75} bzw. VO₂ x min⁻¹ x kg^{-0.66} anstelle von VO₂ x min⁻¹ x kg⁻¹ zu bestimmen (26). Die Bewegungsökonomie wird multifaktoriell determiniert. Neben verschiedenen anthropometrischen Eigenschaften, physiologischen und biomechanischen Faktoren sowie Umweltbedingungen können verschiedene Trainingsformen die Lauf- bzw. Bewegungsökonomie beeinflussen. In einigen Studien wurde die Laufökonomie bei Untrainierten, aber auch bei bereits ausdauertrainierten Sportlern durch ein Maximalkrafttraining, durch Schnellkrafttraining oder plyometrisches Training verbessert; Verbesserungen der Laufökonomie wurden aber auch nach Höhentraining oder Training in warmen (heißen) Umgebungsbedingungen beobachtet. Bezüglich der Identifikation geeigneter Trainingsmittel zur Optimierung der Laufökonomie von Mittel- und Langstreckenläufern der Spitzenklasse besteht weiterer Forschungsbedarf (26). Generell muss für die Interpretation der Ergebnisse einzelner Sportler bedacht werden, dass gewisse Ergebnisschwankungen durch Messfehler in der Atemgasanalyse erklärt sind (Abb. 3).

BESTIMMUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS WÄHREND BELASTUNG

Der Energieverbrauch in Ruhe und unter Belastung kann mit Hilfe der indirekten Kalorimetrie bestimmt werden. Dabei wird unter Anwendung der stöchiometrischen Gleichungen für die Glukoseoxidation bzw. die β -Oxidation der freien Fettsäuren von der VO₂ und dem respiratorischen Quotienten (RQ) auf den Energieverbrauch und die anteilmäßige Energiebereitstellung aus dem Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel rückgeschlossen. Bereits 1901 wurden Tabellen veröffentlicht, aus denen für bestimmte RQ-Werte der Kilokalorienverbrauch pro Liter O₂ sowie die absolute und relative Energiebereitstellung aus dem Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel abgelesen werden können (18). In den RQ geht neben dem Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel auch der Proteinstoffwechsel ein, wobei der durchschnittliche aus dem Abbau verschiedener Aminosäuren resultierende RQ ca. 0.81 beträgt. Da der Anteil der Energiebereitstellung aus dem Proteinmetabolismus während Belastung – abgesehen von Zuständen der Glykogenverarmung bei mehrstündigen Belastungen ohne Kohlenhydratzufuhr – mit < 1% sehr gering ist, kann er vernachlässigt werden (18). Ferner wird der Einfluss weiterer Stoffwechselforgänge wie Glukoneogenese und Lipogenese auf VO₂ und VCO₂ während Belastung als vernachlässigbar angesehen (15). Von größerer Bedeutung ist, ob zur Kalkulation der Energiebereitstellung aus dem Kohlenhydratstoffwechsel eine Glukose- oder Glykogenoxidation angenommen wird. Bei gleichem RQ (1.0) und gleichem Energieäquivalent (5.02 kcal pro Liter O₂) liefert der Abbau von 1 Gramm Glukose 3.74 kcal bei

einem O_2 -Verbrauch von 0.75 Litern, der Abbau von 1 Gramm Glykogen hingegen 4.15 kcal bei einem O_2 -Verbrauch von 0.83 Litern. Für die Energiebereitstellung aus dem Fettstoffwechsel ist die Länge der oxidierten freien Fettsäure von Bedeutung. Von verschiedenen Wissenschaftlern wurden deshalb unterschiedliche Algorithmen entwickelt. Die hiermit durchgeführten Kalkulationen können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, was beim Vergleich von Daten aus verschiedenen Studien berücksichtigt werden muss (15). Mit zunehmendem Anteil der Energiebereitstellung aus der anaeroben Glykolyse verfälscht die verstärkte CO_2 -Freisetzung aus dem Bicarbonatpuffer die Kalkulation der Energiebereitstellung mittels indirekter Kalorimetrie. Da die nichtmetabolische CO_2 -Produktion mit Beginn des ersten Laktatanstiegs ebenfalls ansteigt und den RQ (anfangs geringfügig) erhöht, sind Ergebnisverfälschungen bei Einsatz der indirekten Kalorimetrie bereits bei niedrigerer Intensität als der vielfach angegebenen 75–85% VO_{2max} (15) zu erwarten. Aus diesem Grund sollten auch einige Aussagen zur Fettoxidation, für die je nach Studiendesign und untersuchtem Kollektiv ein Maximum bei einer Belastungsintensität entsprechend 30–65% VO_{2max} mit erheblicher interindividueller Variabilität gesehen wurde (15), kritisch beleuchtet werden. Kommerziell erhältliche Spiroergometriesysteme bieten häufig als zusätzliche Option die Berechnung des Energiestoffwechsels mittels indirekter Kalorimetrie an. Vor einem unkritischen Einsatz, z.B. zur Bestimmung der Fettverbrennung während Belastung, muss jedoch gewarnt werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mittels spiroergometrischer Untersuchungen können zur Objektivierung der aeroben Leistungsfähigkeit die VO_{2max} und – mit vielen verschiedenen Modellen – anaerobe Schwellen bestimmt werden. Die von Spitzenathleten erreichbaren VO_{2max} -Werte sind für die meisten Sportarten gut untersucht, allerdings können in der Sportpraxis die Spitzenathleten nur mit Mühe dazu motiviert werden, in einem Rampen- oder Stufentest im Ergometrielabor oder in Feldtests bis an ihre Leistungsgrenze zu gehen, was zur Messung einer VO_{2max} erforderlich ist. Bisher ist nicht ausreichend untersucht, welches Modell zur Bestimmung einer anaeroben Schwelle aufgrund von Änderungen ventilatorischer Messgrößen in Rampen- oder Stufentests für die Leistungsprognose und Trainingssteuerung am besten geeignet ist. Mit der Bestimmung des MAOD steht eine valide Methode zur Kalkulation der anaeroben Kapazität zur Verfügung, die aber fast ausschließlich in wissenschaftlichen Studien Anwendung findet. Für die Trainingspraxis von größerer Bedeutung ist die Ermittlung der Bewegungs- bzw. Laufökonomie, zu deren Einflussfaktoren weitere Untersuchungen erforderlich sind. Die indirekte Kalorimetrie erlaubt die Erfassung des Energiestoffwechsels während Belastung. Hier gibt es weiteren Forschungsbedarf, beispielsweise zur interindividuellen Variabilität, aber auch zum Einfluss verschiedener Trainingsmaßnahmen.

Angaben zu finanziellen Interessen und Beziehungen, wie Patente, Honorare oder Unterstützung durch Firmen: Keine.

LITERATUR

1. AMANN M, SUBUDHI A, FOSTER C: Influence of testing protocol on ventilatory thresholds and cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 36 (2004) 613-622.
2. AMANN M, SUBUDHI AW, WALKER J, EISENMAN P, SHULTZ B, FOSTER C: An evaluation of the predictive validity and reliability of ventilatory threshold. *Med Sci Sports Exerc* 36 (2004) 1716-1722.
3. BEAVER WL, WASSERMAN K, WHIPP BJ: A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 60 (1986) 2020-2027.
4. BERGH U, SJODIN B, FORSBERG A, SVEDENHAG J: The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Med Sci Sports Exerc* 23 (1991) 205-211.
5. BISHOP D, JENKINS DG, MACKINNON LT: The effect of stage duration on the calculation of peak VO_2 during cycle ergometry. *J Sci Med Sport* 1 (1998) 171-178.
6. COSTILL DL, THOMASON H, ROBERTS E: Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports* 5 (1973) 248-252.
7. DAVIS JA, FRANK MH, WHIPP BJ, WASSERMAN K: Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in middle-aged men. *J Appl Physiol* 46 (1979) 1039-1046.
8. DAVIS JA, WHIPP BJ, LAMARRA N, HUNTSMAN DJ, FRANK MH, WASSERMAN K: Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med Sci Sports Exerc* 14 (1982) 339-343.
9. DEKERLE J, BARON B, DUPONT L, VANVELCENAHER J, PELAYO P: Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *Eur J Appl Physiol* 89 (2003) 281-288.
10. FAUDE O, KINDERMANN W, MEYER T: Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med* 39 (2009) 469-490.
11. FAUDE O, MEYER T, KINDERMANN W: The work rate corresponding to ventilatory threshold during steady-state and ramp exercise. *Int J Sports Physiol Perform* 1 (2006) 222-232.
12. FLETCHER JR, ESAU SP, MACINTOSH BR: Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol* 107 (2009) 1918-1922.
13. FRIEDMANN B, SIEBOLD R, BÄRTSCH P: Vergleich der anaeroben Leistungsfähigkeit von 400 m- und Langstreckenläufern unter Anwendung unterschiedlicher Messmethoden. *Dtsch Z Sportmed* 47 (1996) 379-390.
14. HECK H, BENEKE R: 30 Jahre Laktatschwellen - was bleibt zu tun? *Dtsch Z Sportmed* 59 (2008) 297-302.
15. JEUKENDRUP AE, WALLIS GA: Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *Int J Sports Med* 26 (2005) S28-S37.
16. KUIPERS H, RIETJENS G, VERSTAPPEN F, SCHOENMAKERS H, HOFMAN G: Effects of stage duration in incremental running tests on physiological variables. *Int J Sports Med* 24 (2003) 486-491.
17. LEGER LA, SELIGER V, BRASSARD L: Backward extrapolation of VO_{2max} values from the O_2 recovery curve. *Med Sci Sports Exerc* 12 (1979) 24-27.
18. MCARDLE WD, KATCH FI, KATCH VL: Measurement of Human Energy Expenditure. In: McArdle WD, Katch FI, Katch VL (Hrsg): *Exercise Physiology. Energy, Nutrition, and Human Performance*. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore 2001, 174-186.
19. MEDBO JI, MOHN AC, TABATA I, BAHR R, VAAGE O, SEJERSTED OM: Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O_2 deficit. *J Appl Physiol* 64 (1988) 50-60.
20. MEYER T, DAVISON RC, KINDERMANN W: Ambulatory gas exchange measurements – current status and future options. *Int J Sports Med* 26(2005) S19-S27.
21. MEYER T, LUCIA A, EARNEST CP, KINDERMANN W: A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters – theory and application. *Int J Sports Med* 26 (2005) S38-S48.

22. **NOORDHOF DA, DE KONING JJ, FOSTER C:** The maximal accumulated oxygen deficit method: a valid and reliable measure of anaerobic capacity? *Sports Med* 40 (2010) 285-302.
23. **PLATO PA, McNULTY M, CRUNK SM, TUG EA:** Predicting lactate threshold using ventilatory threshold. *Int J Sports Med* 29 (2008) 732-737.
24. **ROECKER K, MAYER F, STRIEGEL H, DICKHUTH HH:** Increase characteristics of the cumulated excess- CO_2 and the lactate concentration during exercise. *Int J Sports Med* 21 (2000) 419-423.
25. **ROFFEY DM, BYRNE NM, HILLS AP:** Effect of stage duration on physiological variables commonly used to determine maximum aerobic performance during cycle ergometry. *J Sports Sci* 25 (2007) 1325-1335.
26. **SAUNDERS PU, PYNE DB, TELFORD RD, HAWLEY JA:** Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 34 (2004) 465-485.
27. **SAUNDERS PU, PYNE DB, TELFORD RD, HAWLEY JA:** Reliability and variability of running economy in elite distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 36 (2004) 1972-1976.
28. **SOLBERG G, ROBSTAD B, SKJONSBERG OH, BORCHSENIUS F:** Respiratory gas exchange indices for estimating the anaerobic threshold. *J Sports Sci Med* 4 (2005) 29-36.
29. **WASSERMAN K, HANSEN JE, DARRYL YS, STRINGER WS, WHIPP BJ:** Physiology of Exercise. In Wasserman K, Hansen JE, Darryl YS, Stringer WS, Whipp BJ (Hrsg) *Principles of Exercise Testing and Interpretation*. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2005, 10-65.
30. **WASSERMAN K, WHIPP BJ:** Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Respir Dis* 112 (1975) 219-249.
31. **WHIPP BJ, DAVIS JA, TORRES F, WASSERMAN K:** A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J Appl Physiol* 50 (1981) 217-221.
32. **WILMORE JH, COSTILL DL:** Cardiovascular and Respiratory Adaptation to Training. In Wilmore JH, Costill DL (Hrsg) *Physiology of Sport and Exercise*. Human Kinetics, Champaign, 2004, 270-304.

Korrespondenzadresse:

PD Dr. med. Birgit Friedmann-Bette
Abteilung Innere Medizin VII: Sportmedizin
Medizinische Universitätsklinik
Im Neuenheimer Feld 710
69120 Heidelberg
E-Mail: Birgit.FriedmannBette@med.uni-heidelberg.de