

Scharhag-Rosenberger F^{1,2}, Schommer K³

Die Spiroergometrie in der Sportmedizin

¹Nationales Centrum für Tumorerkrankungen (NCT) Heidelberg, AG „Bewegung und Krebs“

²Deutsche Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement (DHfPG), Saarbrücken

³Universitätsklinikum Heidelberg, Innere Medizin VII/Sportmedizin, Heidelberg

ZUSAMMENFASSUNG

Die Spiroergometrie wird in der Sportmedizin in verschiedenen Bereichen eingesetzt: Zur Ausdauerleistungsdiagnostik, zur Bestimmung des Energieumsatzes und in der Untersuchung von Leistungslimitationen. Die Ausdauerleistungsdiagnostik ist das größte Einsatzgebiet, wobei die maximale Sauerstoffaufnahme und zum Teil ventilatorische Schwellen als Indikatoren für die Ausdauerleistungsfähigkeit dienen. Daneben lassen sich die anaerobe Kapazität und die Bewegungsökonomie bzw. Effizienz spiroergometrisch erfassen. Der Kalorienverbrauch während körperlicher Aktivität und das Verhältnis von Fett- zu Kohlenhydratverstoffwechslung können spiroergometrisch mittels indirekter Kalorimetrie abgeschätzt werden. Bei Patienten mit reduzierter Leistungsfähigkeit kann die Spiroergometrie Hinweise auf kardiale und pulmonale Limitationen sowie Gas-austauschstörungen liefern. Diagnostisch ist sie bei der Detektion einer dynamischen pulmonalen Überblähung und einer belastungsinduzierten Stimmbandstörung („vocal cord dysfunction“). Damit ist die Spiroergometrie eine etablierte, breit eingesetzte und komplexe Methode in der internistisch-leistungsphysiologischen Sportmedizin.

Schlüsselwörter: Leistungsdiagnostik, VO_{2max} , Schwelle, indirekte Kalorimetrie, 9-Felder-Graphik

SUMMARY

In sports medicine, gas exchange measurements are applied for different purposes: to evaluate endurance capacity, to determine energy expenditure and to investigate limitations in performance. Endurance testing is the largest area of application. Indicators of endurance capacity are maximal oxygen uptake and also ventilatory thresholds. Furthermore, anaerobic capacity, economy of movement and mechanical efficiency can be determined by means of gas exchange measurements. Energy expenditure during physical activity and the proportion of fat to carbohydrate metabolism can be assessed through indirect calorimetry. In patients with reduced performance, cardiopulmonary exercise testing can provide indications for cardiac and pulmonary limitations as well as impairments of gas exchange. Dynamic hyperinflation and vocal cord dysfunction can be diagnosed by means of cardiopulmonary exercise testing. Therewith, gas exchange measurements are a well-established, broadly applied and complex method in sports medicine.

Key Words: Performance testing, VO_{2max} threshold, energy metabolism, 9-panel-plot

EINLEITUNG

Die Spiroergometrie wird in der sportmedizinischen Routine und in wissenschaftlichen Studien in drei Bereichen eingesetzt: Zur Ausdauerleistungsdiagnostik, zur Bestimmung des Energieumsatzes und in der Untersuchung von Leistungslimitationen. Im vorliegenden Artikel ist der Standard der Sportmedizin „Spiroergometrie zur Ausdauerleistungsdiagnostik“ (9) aktualisiert und um einen Überblick über die Themen Energieumsatzbestimmung und klinische Diagnostik in der Sportmedizin erweitert. Auf methodische Aspekte, die besonders zu beachten sind, um korrekte Messergebnisse zu erhalten, geht dieser Standard der Sportmedizin nicht ein – sie sind in (9) beschrieben.

AUSDAUERLEISTUNGSDIAGNOSTIK

Die Ausdauerleistungsdiagnostik ist das größte Einsatzgebiet der Spiroergometrie in der Sportmedizin. Der bekannteste spiroergometrische Kennwert für die Ausdauerleistungsfähigkeit ist die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}). Sie repräsentiert die höchste verstoffwechselte Sauerstoffmenge und damit die gemeinsame Funktion aller Sauerstoff austauschenden, transportierenden und utilisierenden Systeme. Die VO_{2max} beträgt bei hochtrainierten Ausdauerathleten bis zu $90 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, bei Fußballprofis je nach Spielposition im

Mittel etwa 55 bis $67 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ und bei nicht ausdauertrainierten gesunden 30-jährigen Frauen und Männern etwa zwischen 35 und $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Herzinsuffiziente Patienten (NYHA I-III) und Brustkrebspatientinnen während bzw. unmittelbar nach Chemotherapie liegen etwa zwischen 15 und $20 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Die VO_{2max} ist bei Frauen im Vergleich zu Männern wegen ihrer geringeren Muskelmasse etwa 10 bis 15% niedriger. Ab dem 30. Lebensjahr sinkt die VO_{2max} um 8 bis 10% pro Dekade.

Einer Übersicht zufolge kann die VO_{2max} mittels Rampen- oder Stufenprotokollen erhoben werden, die innerhalb von 5 (Laufbandergometrie) bzw. 7 (Fahrradergometrie) bis 26 min zur Ausbelastung führen (6). Leistungssportler erreichen in sportartspezifischen Tests die höchsten Werte; Freizeit- oder Gesundheitssportler liegen bei Laufbandtests meist höher als bei der Fahrradergometrie. Von VO_{2max} kann nur gesprochen werden, wenn Ausbelastung vorliegt (siehe Tab.1) (7). In Studien sollten vorab mehrere zu erfüllende Ausbelastungskriterien definiert werden,

accepted: November 2013

published online: December 2013

DOI: 10.5960/dzsm.2013.105

Scharhag-Rosenberger F, Schommer K: Die Spiroergometrie in der Sportmedizin. Dtsch Z Sportmed 64 (2013) 362-366.

Tabelle 1: Ausbelastungskriterien (für gesunde Erwachsene), ihre häufigsten Definitionen und wesentliche Punkte, die bei der Anwendung berücksichtigt werden sollten (7). VO_2 : Sauerstoffaufnahme; HF_{max} : maximale Herzfrequenz (altersentsprechender Normwert: Laufbandergometrie 220 minus Lebensalter, Fahrradergometrie 200 minus Lebensalter); RER_{max} : maximaler respiratorischer Quotient; La_{max} : maximale Blutlaktatkonzentration; Verifikationstest: nach Abschluss des Rampen-/Stufentests durchgeführter Dauertest bis zur Erschöpfung bei nahmaximaler bis supramaximaler Intensität.

Ausbelastungskriterium	Häufigste Definition	Zu beachten
Plateau der VO_2	VO_2 -Anstieg $<150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$	VO_2 -Anstieg ist protokollabhängig; häufig tritt trotz Ausbelastung kein Plateau auf
HF_{max}	$\geq 100\%$ oder $\pm 10 \text{ min}^{-1}$ des „altersentspr. Normwerts“	Hohe interindividuelle Variabilität
RER_{max}	$>1,10$	Hohe interindividuelle Variabilität; bei steilen Protokollen höher als bei flachen
La_{max}	$>8 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$	Hohe interindividuelle Variabilität (u. a. sportartabhängig)
Borg-Skala (6-20)	>18	Kein objektives Kriterium
Verifikationstest	VO_{2max} Rampen-/Stufentest = VO_{2max} Verifikationstest	Relativ neues Kriterium; kein einheitliches Protokoll; (bislang) nicht etabliert

wofür es jedoch keine einheitliche Empfehlung gibt. Wiederholte Spiroergometrien sollten stets mit demselben Gerät erfolgen. Bei der Beurteilung von Trainingseffekten muss zudem eine Tag-zu-Tag-Schwankung von bis zu 5% berücksichtigt werden. Zur Ableitung von Trainingsempfehlungen ist die VO_{2max} wenig geeignet, da die metabolische Beanspruchung bei bestimmten Prozentsätzen der VO_{2max} kaum vorhersagbar ist.

Submaximale Kennwerte für die Ausdauerleistungsfähigkeit sind spiroergometrisch bestimmte Schwellen. Anders als die VO_{2max} spiegeln sie vornehmlich periphere metabolische Prozesse wider und sind besonders für die Leistung über längere Ausdauerdistanzen relevant. Die erste ventilatorische Schwelle („ventilatory threshold 1“ VT1 bzw. VT bzw. „anaerobic threshold“ AT) entspricht etwa dem ersten Laktatanstieg und liegt in der Regel bei Ausdauerleistungssportlern zwischen 60 und 70% VO_{2max} bzw. bei Untrainierten zwischen 45 und 60% VO_{2max} . Die zweite ventilatorische Schwelle (VT2 bzw. „respiratory compensation point“ RCP) tritt meist etwas verzögert zur individuellen anaeroben Laktatschwelle auf; sie liegt bei Ausdauerleistungssportlern etwa zwischen 80 und 90% VO_{2max} und bei Untrainierten zwischen 70 und 80% VO_{2max} .

Zur spiroergometrischen Bestimmung von Schwellen eignen sich Rampenprotokolle am besten. Für die Bestimmung der VT1 ist keine Ausbelastung erforderlich, während die Bestimmung der seltener betrachteten VT2 nahezu Ausbelastung voraussetzt. Es empfiehlt sich eine kombinierte Nutzung verschiedener Bestimmungskriterien, die in Tabelle 2 dargestellt und an anderen Stellen (5,9) erläutert sind. Die ventilatorischen Schwellen weisen eine nennenswerte Inter- und Intraobservervariabilität auf und sind im Einzelfall nicht immer eindeutig identifizierbar. In Studien hat sich daher eine Doppelbestimmung durch zwei erfahrene Untersucher etabliert. Nach wie vor wird in Deutschland die Laktatschwellenbestimmung bevorzugt, wohingegen im angloamerikanischen Raum die spiroergometrische Schwellenbe-

Tabelle 2: Goldstandardmethode (fett gedruckt) und Hilfskriterien (nicht fett gedruckt) zur Bestimmung von ventilatorischer Schwelle 1 (VT1) und ventilatorischer Schwelle 2 (VT2) (5). Darstellungen sind nach der 9-Felder-Graphik (vgl. Abbildung 1) nummeriert und nach dem Schema y-Achse vs. x-Achse beschrieben. VO_2 : Sauerstoffaufnahme; VCO_2 : Kohlendioxidabgabe; VE/VO_2 : Atemäquivalent für O_2 ; VE/VCO_2 : Atemäquivalent für CO_2 ; $PETO_2$: end-tidaler O_2 -Partialdruck; $PETCO_2$: endtidaler CO_2 -Partialdruck; VE: Ventilation.

VT1 / AT	VT2 / RCP
Feld 5 – VCO_2 vs. VO_2 (V-Slope-Methode): Erster überproportionaler Anstieg von VCO_2 gegenüber VO_2	Feld 4 – VE vs. VCO_2: Überproportionaler Anstieg von VE gegenüber VCO_2
Feld 6 – VE/VO_2 und VE/VCO_2 vs. Zeit: Anstieg von VE/VO_2 ohne gleichzeitigen Anstieg von VE/VCO_2	Feld 6 – VE/VO_2 und VE/VCO_2 vs. Zeit: Anstieg von VE/VCO_2
Feld 9 – $PETO_2$ vs. Zeit: Anstieg von $PETO_2$	Feld 9 – $PETCO_2$ vs. Zeit: Abfall von $PETCO_2$
Feld 1 – VE vs. Zeit: Erster überproportionaler Anstieg von VE	Feld 1 – VE vs. Zeit: Zweiter überproportionaler Anstieg von VE

stimmung überwiegt. Schwellen bilden geringe Unterschiede in der Leistungsfähigkeit sensitiver ab als die VO_{2max} . Zudem ermöglichen sie die Ableitung präziserer Trainingsempfehlungen, was in (5) beschrieben ist.

Neben der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit kann bei speziellen Fragestellungen im Rahmen von Studien auch die anaerobe Kapazität spiroergometrisch als maximal akkumuliertes O_2 -Defizit (MAOD) erfasst werden (2). Das MAOD ist die Differenz zwischen theoretischem Sauerstoffbedarf und gemessener Sauerstoffaufnahme (VO_2) während einer supramaximalen Dauerbelastung bis zur Erschöpfung. Das genaue Vorgehen ist uneinheitlich und sowohl Validität als auch Reliabilität werden in der Literatur kritisch diskutiert. Weiterhin wird die Spiroergometrie zur Messung der Bewegungsökonomie bzw. Effizienz genutzt. Beim Laufen betrachtet man die VO_2 oder den Energieumsatz (siehe unten) während definierter submaximaler Dauerbelastung unter sorgfältiger Standardisierung als Maß für die Ökonomie. Für Vergleiche zwischen Läufern wird empfohlen, die VO_2 in $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-0,75}$ oder $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{0,66}$ anzugeben (2). Im Radsport wird die Ökonomie häufig als Leistung im Verhältnis zur VO_2 in $\text{W}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ angegeben. Die Brutto-Effizienz („gross efficiency“) wird als prozentualer Anteil der erbrachten Leistung (umgerechnet in $\text{kcal}\cdot\text{min}^{-1}$) an der aufgewendeten Energie (ebenfalls in $\text{kcal}\cdot\text{min}^{-1}$) berechnet.

BESTIMMUNG DES ENERGIEUMSATZES

Unter indirekter Kalorimetrie versteht man die spiroergometrische Bestimmung von Energieumsatz und Substratverbrauch. Sie lässt sich bei Dauerbelastungen oder speziellen Stufentests anwenden. Anhand von VO_2 und respiratorischem Quotienten (RER) können der Energieumsatz sowie das Verhältnis von Kohlenhydrat zu Fettstoffwechselung abgeschätzt werden, da zwischen verstoffwechseltem Substrat, VO_2 , Kohlendioxidabgabe (VCO_2) und Energieproduktion eine stöchiometrische Beziehung besteht. Der Eiweißstoffwechsel wird bei dieser Methode vernachlässigt, er liegt jedoch unter Belastung (außer bei Glykogenverarmung) konstant $<1\%$. Da der Substratumsatz von aktuell verfügbaren Nährstoffen beeinflusst wird, sollte die Ernährung standardisiert werden.

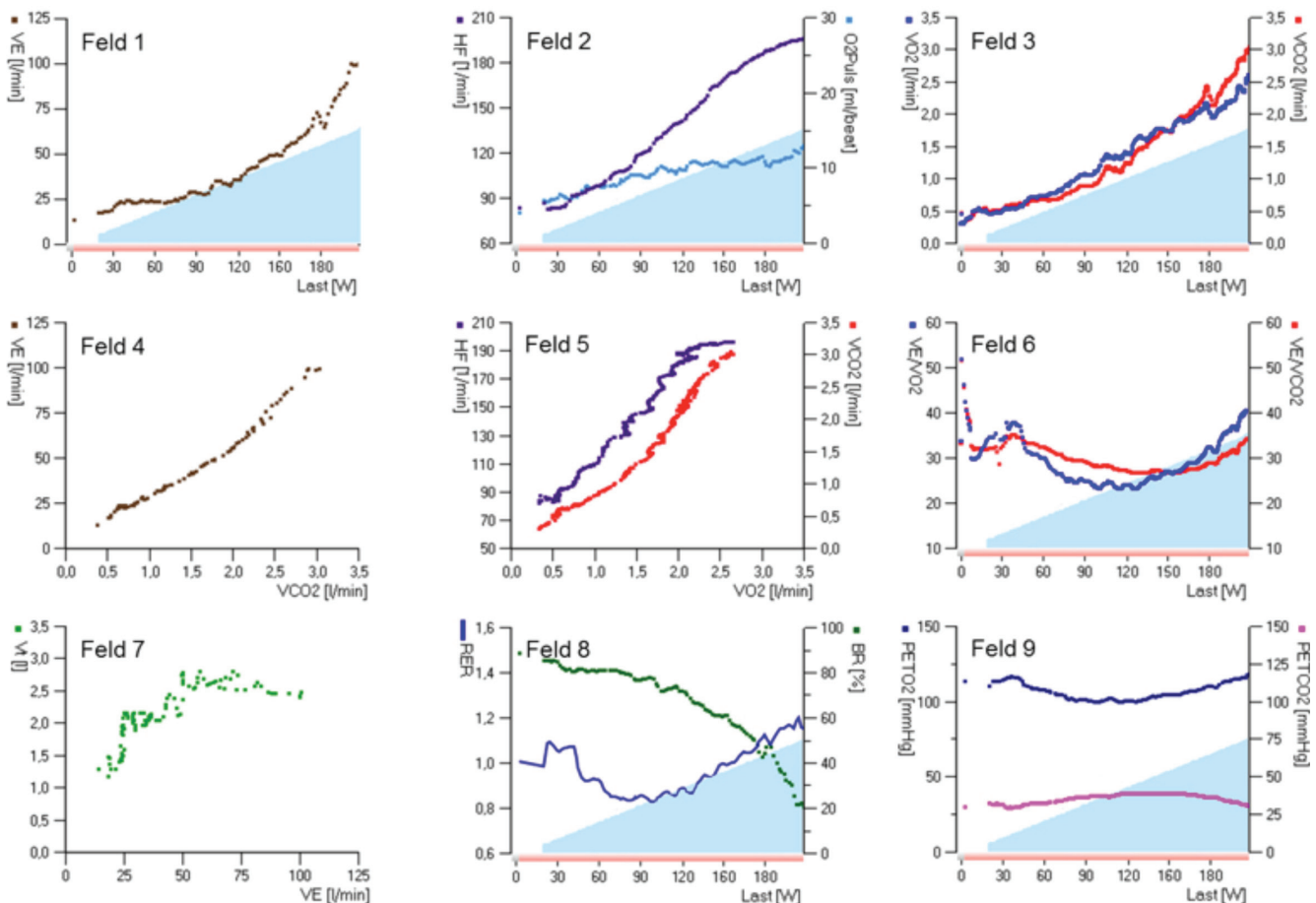


Abbildung 1: Normalbefund einer 9-Felder-Graphik (rampenförmig durchgeführte Fahrradspiroergometrie bei einer gesunden 32-jährigen Frau; Start bei 20 Watt, Steigerung um 17 Watt pro Minute; Lastprofil blau hinterlegt). VE: Ventilation, HF: Herzfrequenz; O₂-Puls: Sauerstoffpuls, VO₂: Sauerstoffaufnahme, VCO₂: Kohlendioxidabgabe, VE/VO₂: Atemäquivalent für O₂, VE/VCO₂: Atemäquivalent für CO₂, V_T: Atemzugvolumen, RER: Respiratorischer Quotient, BR: Atemreserve, PETO₂: end-tidaler O₂-Partialdruck, PETCO₂: end-tidaler CO₂-Partialdruck.

Um den Energieverbrauch und Substratumsatz anhand der Atemgase zu berechnen, stehen verschiedene Tabellen und Formeln zur Verfügung, die sich darin unterscheiden, welche Kohlenhydrate (Glukose oder Glykogen) und welche Fettsäuren als Substrate angenommen werden. Die Ergebnisse unterscheiden sich bei Fett- und Kohlenhydratstoffwechsel um etwa 3 bzw. bis zu 6 % (4). Ein Überblick sowie eine aktuelle Formel, die unterschiedliche Belastungsintensitäten berücksichtigt, sind in (4) gegeben. Alle Formeln setzen voraus, dass die gemessenen Atemgase allein die Zellatmung widerspiegeln. Bei höheren Belastungsintensitäten entsteht jedoch durch die Bikarbonatpufferung von bei der Laktatproduktion anfallenden Wasserstoffionen zusätzliches CO₂, welches zu einem nicht-metabolisch erhöhten RER und damit zu einer Unterschätzung des Fettstoffwechsels führt. Die Bestimmung des Fett- und Kohlenhydratstoffwechsels mittels indirekter Kalorimetrie ist daher bei Belastungsintensitäten ab der VT1 mit einem zunächst geringen Fehler behaftet und sollte nur bis maximal 75 % VO_{2max} angewendet werden (4). Der Energieumsatz kann jedoch mithilfe eines mittleren kalorischen Äquivalents (4,85 kcal pro Liter O₂) ohne Berücksichtigung des Substratumsatzes auch bei höheren Intensitäten abgeschätzt werden.

KLINISCHE DIAGNOSTIK IN DER SPORTMEDIZIN

In der Sportmedizin dient die Spiroergometrie von Patienten insbesondere der nicht-invasiven Abklärung von Dyspnoe. Über die Änderungen der Atemgaskonzentrationen und der Ventilation während zunehmender körperlicher Belastung lassen sich Rückschlüsse auf die Integrität von Atmung, Gasaustausch, kardiozirkulatorischem System und Sauerstoffextraktion auf muskulärer Ebene ziehen, wenn die einzelnen Messgrößen Normwerte und -verläufe aufweisen. Anders können Abweichungen von der physiologischen Norm Limitationen der einzelnen beteiligten Organsysteme widerspiegeln. Die einzelnen Messgrößen und ihre Beziehungen zueinander werden in der sogenannten 9-Felder-Graphik dargestellt (Abb. 1) (10). Die Felder 2, 3 und 5 repräsentieren hierbei überwiegend die Funktion des kardiozirkulatorischen Systems, die Felder 1 und 7 die Ventilation und die Felder 6 und 9 den Gasaustausch. Feld 4 wird sowohl durch die Ventilation als auch die Kardiozirkulation beeinflusst. Vor der Analyse der einzelnen Felder sollte festgehalten werden, ob Ausbelastung erreicht wurde und ob die Leistungsfähigkeit (VO_{2max}) so eingeschränkt ist, dass man von einer Limitation sprechen kann. Mit der Möglichkeit, das Ausmaß der Limitation auf die Leistungsfähigkeit zu objek-

	Athlet	Trainingsmangel	kardiale Limitation	pulmonale Limitation
VO _{2max}	↑	↓	↓	↓
VE/VCO ₂ an AT oder Slope	≤34	≤34	>34	>34
Atemreserve	N/<15%	>15%	>15%	<15%
Verlauf des O ₂ -Pulses	N	N	P	N/P

Tabelle 3: Wesentliche spiroergometrische Parameter bei der Beurteilung von pulmonalen oder kardialen Limitationen oder Trainingsmangel (gut Trainierte können bei Maximalbelastung ihre Atemreserve komplett aufbrauchen, ohne dass eine pulmonale Erkrankung vorliegt) (3, 8, 10). N: normal; P: pathologisch.

tivieren, dient die Spiroergometrie im klinischen Einsatz auch dazu, Überlebenswahrscheinlichkeiten oder das präoperative Risiko bei Patienten mit internistischen Erkrankungen (z. B. schwere Herzinsuffizienz oder COPD) abzuschätzen.

Für die Beurteilung kardialer Limitationen ist neben dem EKG der Verlauf des Sauerstoffpulses (O₂-Puls, Feld 2) wesentlich. Er zeigt die VO₂ pro Herzschlag an und ist damit direkt abhängig vom Herzminutenvolumen als Produkt von Herzfrequenz und Schlagvolumen. Ein bei ansteigender Belastung früh stagnierendes oder gar absinkendes Schlagvolumen zeigt – eine adäquat ansteigende Herzfrequenz und intakte periphere Sauerstoffextraktion vorausgesetzt – ein frühes Plateau oder gar ein Absinken im O₂-Puls. Daneben findet sich bei kardialer Limitation neben der Reduktion der VO_{2max} auch eine reduzierte VO₂ an der VT1 (3). Als Ausdruck einer gesteigerten Atemarbeit, die durch die kardiopulmonale Kongestion verursacht wird, findet sich auch bei chronischer Herzinsuffizienz eine pathologische Steigerung von VE/VCO₂ (> 34, Feld 4), wobei die Steigerung negativ mit der Prognose korreliert (3, 8).

Bei der Frage nach einer pulmonalen Limitation steht zunächst die Beurteilung der Atemreserve im Vordergrund (Feld 7, ggf. Feld 8). Normal ist ein maximales Atemminutenvolumen, das mehr als 15% unter der maximalen willentlichen Ventilation („maximal voluntary ventilation“, MVV) liegt. Vorsicht ist bei der von der Software hinterlegten MVV geboten, da diese meist durch Multiplikation der für Alter, Geschlecht und Gewicht angenommenen Einsekundenkapazität mit 35 ohne Berücksichtigung einer eingeschränkten Einsekunden- oder Vitalkapazität berechnet wird. Hier ist die direkte Messung des MVV zu empfehlen. Neben der Ausschöpfung der Atemreserve finden sich bei pulmonaler Limitation ein pathologisch gesteigertes VE/VCO₂ als Hinweis auf eine erhöhte Totraumventilation (Feld 4) sowie bei gestörtem Gasaustausch auch pathologische Verläufe der endtidalen Gaskonzentrationen wie ein fehlender Abfall des PETCO₂ (Feld 9). Bei Störungen des regionalen Gasaustauschs wie bei subakuten Lungenembolien findet man pathologische Werte für VE/VCO₂, VO_{2max} und PETO₂ bei normaler Atemreserve. Bei klinischen Fragestellungen z. B. nach Gasaustauschstörungen sollte zur exakten Bestimmung der Sauerstoffsättigung, der Totraumventilation (V_D/V_T) und der arterio-alveolären Sauerstoffkonzentration (AaDO₂) zusätzlich eine Blutgasanalyse durchgeführt werden. Insbesondere die nicht-invasive Bestimmung der V_D/V_T ist unpräzise.

Letztlich bleibt festzuhalten, dass mit einer auffälligen Spiroergometrie allein meist keine Diagnose gestellt werden kann. Die sorgfältige Interpretation der 9-Felder-Graphik erlaubt es aber, notwendige Untersuchungen wie bildgebende Verfahren oder weiterführende kardiale und pulmonale Analysen auf den Weg zu bringen und so zur Diagnose zu kommen. Allerdings sollten Auffälligkeiten in der 9-Felder-Graphik sorgfältig vor dem Hintergrund

von Anamnese, Leistungsfähigkeit und anderen kardiopulmonalen Befunden (Ruhe- und Belastungs-EKG, Echokardiographie, Lungenfunktion) reflektiert werden, um keine falsch-positiven Schlüsse zu ziehen.

Diagnostisch ist die Spiroergometrie bei der Detektion einer dynamischen pulmonalen Überblähung („dynamic hyperinflation“, DH) und einer belastungsinduzierten Stimmbandstörung („vocal cord dysfunction“, VCD). Beide Pathologien können über die Aufzeichnung der Atemschleifen unter Belastung erkannt werden (1). Während beim Auslösen von VCD-Beschwerden typische abgeschnittene („trunkierte“) Inspirationskurven zur Darstellung kommen, bedarf es bei der DH-Diagnostik Positionsmanövern, deren Umsetzung in der Praxis vor allem bei nah-maximaler Belastung häufig schwierig ist.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Spiroergometrie hat in der Sportmedizin ein breites Einsatzfeld, das von der Ausdauerleistungsdiagnostik über die Energieumsatzbestimmung bis zur Untersuchung von Leistungslimitationen reicht. Sie ermöglicht es, zahlreiche Fragestellungen zu Hochleistungssportlern ebenso wie zu Patienten zu beantworten und ist daher als komplexe Methode in der internistisch-leistungsphysiologischen Sportmedizin fest etabliert.

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

LITERATUR

1. DEMPSEY JA, MCKENZIE DC, HAVERKAMP HC, ELDRIDGE MW: Update in the understanding of respiratory limitations to exercise performance in fit, active adults. *Chest*. 134 (2008) 613-622. doi:10.1378/chest.07-2730
2. FRIEDMANN-BETTE B: Die Spiroergometrie in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik. *Dtsch Z Sportmed*. 62 (2011) 10-15.
3. GITT AK, WASSERMAN K, KILKOWSKI C, KLEEMANN T, KILKOWSKI A, BANGERT M, SCHNEIDER S, SCHWARZ A, SENEGES J: Exercise anaerobic threshold and ventilatory efficiency identify heart failure patients for high risk of early death. *Circulation*. 106 (2002) 3079-3084. doi:10.1161/01.CIR.0000041428.99427.06
4. JEUKENDRUP AE, WALLIS GA: Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *Int J Sports Med*. 26 (2005) S28-37. doi:10.1055/s-2004-830512
5. 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) S38-48. doi:10.1055/s-2004-830514
6. MIDGLEY AW, BENTLEY DJ, LUTTIKHOLT H, MCNAUGHTON LR, MILLET GP: Challenging a dogma of exercise physiology: does an incremental

- exercise test for valid $\text{VO}_{2\text{max}}$ determination really need to last between 8 and 12 minutes? *Sports Med.* 38 (2008) 441-447. doi:10.2165/00007256-200838060-00001
7. MIDGLEY AW, MCNAUGHTON LR, POLMAN R, MARCHANT D: Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. *Sports Med.* 37 (2007) 1019-1028. doi:10.2165/00007256-200737120-00002
 8. PONIKOWSKI P, FRANCIS DP, PIEPOLI MF, DAVIES LC, CHUA TP, DAVOS CH, FLOREA V, BANASIAK W, POOLE-WILSON PA, COATS AJ, ANKER SD: Enhanced ventilatory response to exercise in patients with chronic heart failure and preserved exercise tolerance: marker of abnormal cardiorespiratory reflex control and predictor of poor prognosis. *Circulation.* 103 (2001) 967-972. doi:10.1161/01.CIR.103.7.967
 9. SCHARHAG-ROSENBERGER F: Spiroergometrie zur Ausdauerleistungsdiagnostik. *Dtsch Z Sportmed.* 61 (2010) 146-147.
 10. WASSERMAN K, HANSEN JE, SUE DY, STRINGER WW, SIETSEMA KE, SUN XG, WHIPP BJ: *Principles of Exercise Testing and Interpretation.* 5 ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2012.

Korrespondenzadresse:

Dr. phil. Friederike Scharhag-Rosenberger
Nationales Centrum für Tumorerkrankungen (NCT)
Heidelberg
Abteilungen Medizinische Onkologie
und Präventive Onkologie
Im Neuenheimer Feld 460
69120 Heidelberg
E-Mail: fsr@exercise-science.de