

Spiroergometrie – Schritt für Schritt

H. Semper, P. Kühnelt, P. Seipp



Die Spiroergometrie ist zeit- und geräteaufwändig. Für die strukturierte Auswertung muss man das Zusammenspiel von Herz, Lunge und Metabolismus unter körperlicher Belastung genau kennen. Daher wird sie oft nur von spezialisierten pneumologischen, kardiologischen oder sportmedizinischen Zentren angeboten; in der allgemeinen internistischen Praxis und Ausbildung wird sie seltener angewandt – trotz ihrer differenzialdiagnostischen Aussagekraft.

Grundlagen

Die Spiroergometrie ist eine Belastungsuntersuchung, durch die sich die körperliche Leistungsfähigkeit beurteilen lässt. Im Vergleich zur herkömmlichen Ergometrie erlaubt sie eine detailliertere Aussage zu Schweregrad und Ätiologie einer Belastungseinschränkung [1].

Zahlreiche Parameter werden bei der Spiroergometrie direkt gemessen. Dazu gehören:

- Atemfrequenz
- Atemvolumina
- Atemfluss
- Sauerstoffsättigung
- endexpiratorischer Sauerstoff- und Kohlendioxidpartialdruck (PETO₂, PETCO₂)

Weitere Parameter werden automatisiert berechnet, etwa:

- Sauerstoffaufnahme (VO₂)
- Kohlendioxidabgabe (VCO₂)
- respiratorischer Quotient VCO₂/VO₂ (Respiratory Exchange Ratio, RER)
- O₂-Puls
- Atemäquivalente für O₂ und CO₂
- Alveolo-arterielle Partialdruckdifferenz (AaDO₂)

Der belastungsabhängige Verlauf der Blutgase wird über ergänzend entnommene Blutgasanalysen bestimmt.

Merke

Die Spiroergometrie erfolgt als Fahrradbelastung (sitzend oder halbliegend) oder als Laufbandbelastung. Hierbei unterscheiden sich die Sollwerte für die maximale Sauerstoffaufnahme: Diese fällt bei der Fahrradbelastung 10–20% niedriger aus [2].

Um valide Daten zu erheben, ist ein standardisiertes schrittweises Vorgehen bei Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Untersuchung notwendig.

Indikationen

Da mittels Spiroergometrie die körperliche Leistungsfähigkeit erfasst wird, sollte sie bei Belastungseinschränkung und Belastungsdyspnoe ungeklärter Ätiologie erwogen werden. Ergänzend zur Standarddiagnostik erlaubt sie, eine Aussage hinsichtlich kardialer oder pulmonaler Limitation sowie Trainingsmangel zu machen [1].

Die Untersuchung ist wichtig in der Diagnostik und Verlaufsbeurteilung der pulmonalen Hypertonie sowie bei der Risikoabschätzung vor operativen Eingriffen. Vor lungenresezierenden Operationen hilft sie, das mögliche Ausmaß des zu resezierenden Areals bei präoperativ eingeschränkter Lungenfunktion zu kalkulieren [3]. Auch bei Begutachtungen und Leistungsdiagnostik im Bereich der Sportmedizin wird sie mitherangezogen.

Risiken und Kontraindikationen

Die Kontraindikationen entsprechen denen einer herkömmlichen Ergometrie. Ernsthafte Komplikationen werden bei 1 bis 5/10 000 Untersuchungen beschrieben (Letale Komplikationen 0,5/10 000) [1, 6].

Merke

Am Untersuchungsort muss die technische Ausstattung für die Notfallversorgung vorhanden sein.

► **Tab. 1** BORG-Skala [7] zur subjektiven Einschätzung der Erschöpfung.

Wert	Subjektives Empfinden
6	überhaupt nicht anstrengend
7	extrem leicht
8	
9	sehr leicht
10	
11	leicht
12	
13	etwas anstrengend
14	
15	anstrengend
16	
17	sehr anstrengend
18	
19	extrem anstrengend
20	maximale Anstrengung

► **Tab. 2** Modifizierte BORG-Skala [7].

Wert	Subjektives Empfinden
0	keine Luftnot
0,5	sehr, sehr leichte Luftnot
1	sehr leichte Luftnot
2	leichte Luftnot
3	mäßige Luftnot
4	mäßig bis schwere Luftnot
5	schwere Luftnot
6	
7	sehr schwere Luftnot
8	
9	sehr, sehr schwere Luftnot
10	maximale Luftnot

Absolute Kontraindikationen

- akuter Myokardinfarkt (3 – 5 d)
- instabile Angina pectoris
- unkontrollierte Herzrhythmusstörungen mit Symptomatik und/oder eingeschränkter Hämodynamik
- symptomatische schwere Aortenstenose
- dekompensierte Herzinsuffizienz
- nicht-kontrolliertes Asthma bronchiale, schwere akut exazerbierte COPD
- akute extrakardiopulmonale Erkrankung mit der Gefahr einer Verschlechterung unter Belastung

- akute Lungenarterienembolie, Myokarditis, Perikarditis, V. a. Aortendissektion, akute Bein-/ Beckenvenenthrombose
- psychokognitive Beeinträchtigung mit Unfähigkeit zur Kooperation [4]

Relative Kontraindikationen

- KHK mit Hauptstammstenose oder Stenose der RCA bei Rechtsversorgertyp
- Herzklappenerkrankungen mäßigen Schweregrades mit hämodynamischer Einschränkung
- bekannte Elektrolytstörung
- RR > 200/120 mmHg in Ruhe
- Tachyarrhythmie oder Bradyarrhythmie
- hypertroph obstruktive Kardiomyopathiem (HOCM) oder andere Ausflussbahnbehinderungen
- höhergradige AV-Blockierungen
- fortgeschrittene oder komplizierte Schwangerschaft
- Epilepsie mit Gefahr einer belastungsinduzierten Konvulsion
- orthopädische Beeinträchtigung
- physische und/oder psychische Beeinträchtigungen [4]

Abbruchkriterien

- Brustschmerzen verdächtig auf Angina pectoris
- Ischämiezeichen im EKG
- komplexe Herzrhythmusstörungen
- AV-Block 2. oder 3. Grades
- neuer Schenkelblock
- Abfall des RR um 20 mmHg unter Belastung
- RR-Entgleisung (> 250 mmHg sys bzw. 120 mmHg dia)
- schwere Entsättigung (SaO₂ < 80%) mit Symptomatik, bzw. PaO₂ < 40 mmHg
- plötzliche Blässe
- Verwirrung, Schwindel
- Ateminsuffizienz [4]

Schritt für Schritt

Aufklärung des Patienten, Erheben personenbezogener Daten

Zunächst stellt der anfordernde Arzt während eines ausführlichen Anamnesegesprächs mit körperlicher Untersuchung die Indikation zur Spiroergometrie. Liegen Kontraindikationen für die Belastungsuntersuchung vor?

Es folgt eine ausführliche Aufklärung. Die Zielsetzung der Untersuchung und die Wichtigkeit der Ausbelastung des Patienten werden thematisiert. Man erläutert die BORG-Skala zur subjektiven Einschätzung der Erschöpfung (► **Tab. 1**) bzw. die modifizierte Skala zur Frage nach empfundener Luftnot (► **Tab. 2**).



► **Abb. 1** Basisuntersuchungen der Spiroergometrie: Aufzeichnen eines EKG, Ruhe-Blutgasanalyse (BGA).

Merke

In den 30 Minuten vor der Untersuchung soll keine Nahrungsaufnahme erfolgen.

Um die personenbezogenen Sollwerte der Messparameter zu generieren, werden Daten für Geschlecht, Alter und Gewicht erhoben und in die Untersuchungssoftware eingegeben.

Basisuntersuchungen

Vor Beginn der Belastungsuntersuchung werden unter Ruhebedingungen ein EKG aufgezeichnet (► **Abb. 1**) und eine Spirometrie durchgeführt (► **Abb. 2**). Mithilfe der Ruhe-Spirometrie wird der individuelle Atemgrenzwert (Maximum Voluntary Ventilation, MVV) bestimmt: $MVV = FEV1 \cdot 35$; FEV: Forced expiratory volume). So lässt sich die Atemreserve zum Ende der Belastung beurteilen.

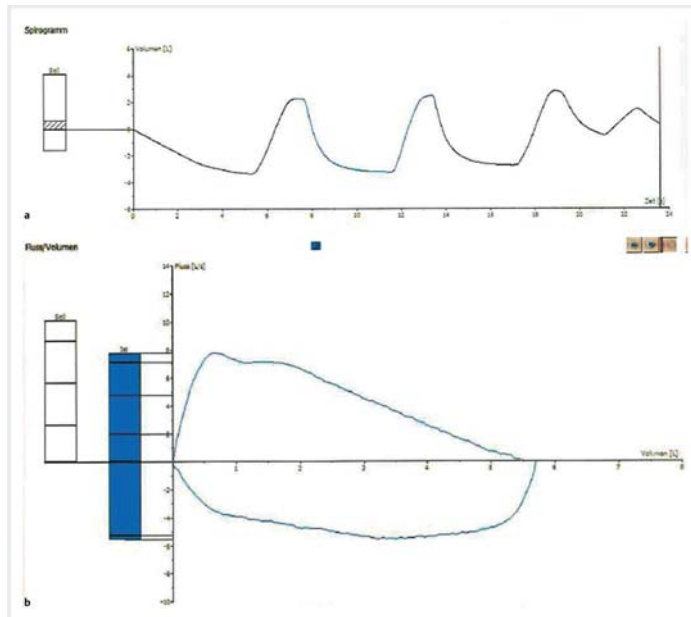
Erstellen des Belastungsprotokolls

Bei der Spiroergometrie sind Stufen- oder Rampenbelastung möglich. Meist erfolgt eine Belastung nach Rampenprotokoll mit grafischer Darstellung der Ergebnisse in der 9-Felder-Grafik nach Wassermann (bessere Auswertbarkeit, Darstellbarkeit und Genauigkeit der VO_2max).

Das Belastungsprotokoll wird so gestaltet, dass eine Belastungszeit von 8–12 min möglich ist. Hierfür werden Belastungssteigerungen um eine definierte Watt-Zahl von 5–25W innerhalb eines Intervalls von 10–60s festgelegt [6].

Eichung

Bei der Spiroergometrie werden hochsensible Sensoren (zur Messung von Atemfluss-, Volumen-, O_2 - und CO_2 -Werten) eingesetzt, die regelmäßig kalibriert werden müssen. Bei den Gas-Sensoren werden dafür – je nach Herstellerangabe – vor jeder Untersuchung Raumluft und standardisiertes Kalibrations-Gas verwendet. Die



► **Abb. 2** Ruhespirometrie zur Bestimmung des individuellen Atemgrenzwertes.



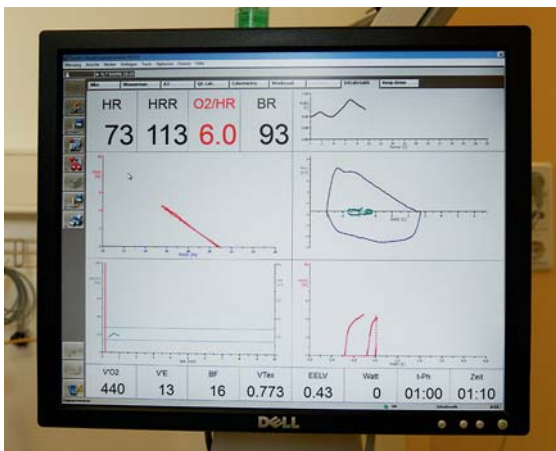
► **Abb. 3** Anlage von 12-Kanal-EKG, Blutdruckmanschette und Maske bzw. Mundstück.

Volumen- bzw. Flusskalibration erfolgt vor der ersten Messung des Tages und nach Wechsel der Sensoren mittels Handpumpe. Bei Temperaturänderung sind im Laufe des Tages ggf. auch mehrfache Kalibrationen notwendig.

Da sie die Sauerstoffkonzentration in der Atemluft beeinflussen, sollte man vor jeder Kalibration Raumtemperatur, aktuellen Barometerdruck und momentane Luftfeuchtigkeit bestimmen [6] und, falls dies nicht automatisiert erfolgt, diese manuell eingeben. In regelmäßigen Abständen ist eine biologische Eichung mit einem gesunden Probanden ratsam.



► **Abb. 4** Ruhephase von 2–5 min.



► **Abb. 5** Aufwärmphase von 1–2 min.

Vorbereitung

Der Patient setzt sich in bequemer Position auf das Ergometer. 12-Kanal-EKG, Blutdruckmanschette und Maske bzw. Mundstück werden angelegt (► **Abb. 3**). Anschließend wird hyperämisierende Salbe an das Ohrläppchen gestrichen, um die Entnahme von kapillären Blutgasanalysen vorzubereiten.

Ruhephase

Die Untersuchung beginnt mit einer Ruhephase von 2–5 min (► **Abb. 4**). Hierbei werden Ruhe-Blutdruck und Ruhe-Blutgasanalyse bestimmt. Zusätzlich wird die

erste Intradbreath-Kurve erhoben, indem aus der momentanen Atemlage maximal eingeatmet wird (IC-Manöver). Die Intradbreath-Kurven dienen der Beurteilung des Atemmusters unter Belastung; insbesondere lässt sich eine dynamische Überblähung durch belastungsabhängige Zunahme des endexpiratorischen Lungenvolumens (EELV) erkennen.

Merke

Unter Ruhebedingungen solle VO_2 zwischen 2,5 und 4,5 ml/kg/min liegen und RER zwischen 0,8 und 1,0. Ausnahme: RER > 1,0 bei Aufregung und/oder abnormer Atmung. Deutliche Abweichungen weisen auf Messfehler hin [6].

Aufwärmphase

In der Aufwärmphase tritt der Proband für 1–2 min ohne eine angelegte Last in die Pedale (► **Abb. 5**). Hierbei wird ein mögliches Missverhältnis von Ventilation und Perfusion ausgeglichen („Physiologischer Nullabgleich“). Normalerweise kommt es nun zum Abfall des RER sowie der Atemäquivalente („Wannenbildung“). VO_2 ist höher als in Ruhe, bleibt für die Dauer der Aufwärmphase jedoch konstant und steigt erst unter Rampenbelastung linear an.

Rampenbelastung

Nach Abschluss der Aufwärmphase beginnt die Rampenbelastung nach vordefiniertem Protokoll (► **Abb. 6**, ► **Abb. 7**). Der Proband versucht, eine Trittfrequenz von 55–60/min über die gesamte Dauer der Untersuchung einzuhalten. Insbesondere bei sportmedizinischen Untersuchungen sind ggf. auch höhere Trittfrequenzen möglich, um eine frühzeitige Ermüdung zu verhindern. Während der Belastung werden mindestens alle 2–3 min automatische oder manuelle Blutdruckmessungen, Blutgasanalysen durchgeführt; bei pneumologischen Fragestellungen außerdem 2 weitere Intradbreath-Manöver im submaximalen und maximalen Belastungsbereich.

Um eine Belastungsobstruktion zu beurteilen, können (wenn technisch durchführbar) maximale Fluss-Volumenkurven ergänzt werden: vor Beginn der Belastung, kurz vor Belastungsende und in der frühen Erholungsphase. Die Messwert-Änderung während der Untersuchung muss am Monitor verfolgt werden, um Abbruchkriterien zu erfassen und die Plausibilität der Messergebnisse zu überprüfen.

INFO

Hinweise für Messfehler unter Belastung

- RER < 0,7
- VE (Atemminutenvolumen) nicht im Bereich der „Neuner-Regel“ (9l/min in Ruhe, für jede Steigerung um 25 W + 9l/Min)
- AaDO₂ < 10 mmHg
- VCO₂ > VO₂ am Übergang von Aufwärmphase zur Rampenbelastung
- VO₂ nicht im Bereich Ruhe-Umsatz + 10 * Watt
- Tidalvolumen (Vt) > 60% Vitalkapazität (VC)

Belastungsende

Nach Beendigung der Belastung (durch den Probanden oder den Untersucher) wird innerhalb von 1 min die subjektiv empfundene Belastung und Dyspnoe mithilfe der BORG-Skalen (► Tab. 1, ► Tab. 2) erhoben (► Abb. 8). Der Grund für den Belastungsabbruch wird dokumentiert.

INFO

Hinweise für das Erreichen einer maximalen Ausbelastung

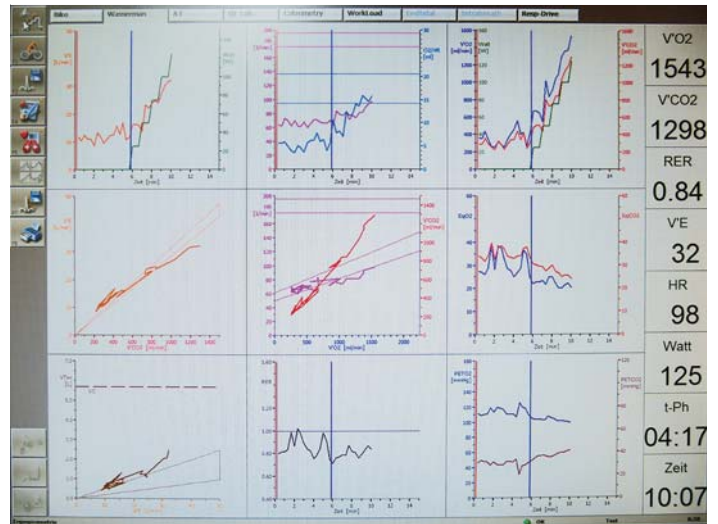
- Erreichen des Sollwertes für
 - VO₂ (bzw. Erreichen eines maximalen Plateaus)
 - die maximale Leistung
 - die Herzfrequenz
 - Hinweis auf ventilatorische Limitation (Atemminutenvolumen nähert sich dem Atemgrenzwert)
 - RER > 1,15
 - maximale Erschöpfung des Patienten (BORG 9–10) [1]

Erholungsphase

Während der Erholungsphase von wenigen Minuten werden weiterhin Kreislauf- und Atemparameter erfasst. Optional wird, insbesondere bei relevanter Veränderung der Blutgaswerte in pathologische Bereiche, eine Kontrolle zur BGA nach 20 min entnommen (► Abb. 9).

Nachbereitung und Auswertung

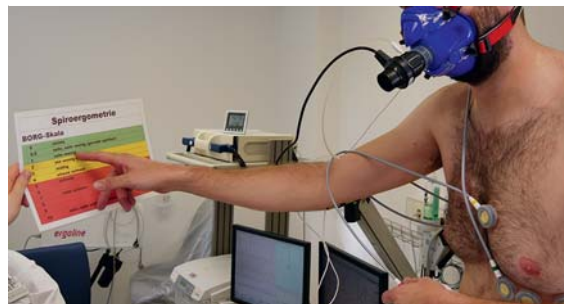
Ist die Erholungsphase vorüber, werden mit der 9-Felder-Grafik manuell die ventilatorischen Schwellen VT1 und VT2 zur Bestimmung des anaerob-aeroben Übergangs definiert.



► Abb. 6 Rampenbelastung nach vordefiniertem Protokoll (Darstellung in der 9-Felder-Grafik).



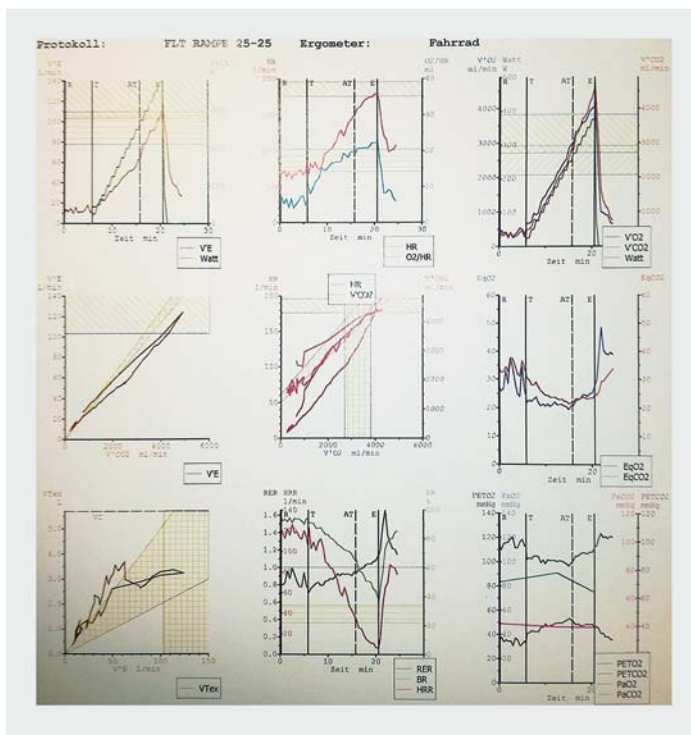
► Abb. 7 Belastung des Probanden nach Rampenprotokoll.



► Abb. 8 Beendigung der Belastung. Erhebung der subjektiv empfundenen Dyspnoe mit Hilfe der BORG-Skala.

Probentyp T KOMMENTAR	Kapillär 37,0 °C 0		Probentyp T KOMMENTAR	Kapillär 37,0 °C 375 Watt	
Blutgas Ergebnis			Blutgas Ergebnis		
pH	7,388	[7,360 - 7,440]	↓ pH	7,291	[7,360 - 7,440]
pO ₂	83,4 mmHg	[75,0 - 100]	pO ₂	75,5 mmHg	[75,0 - 100]
pCO ₂	42,2 mmHg	[35,0 - 45,0]	pCO ₂	39,6 mmHg	[35,0 - 45,0]
Temperatur Korrektur			Temperatur Korrektur		
pH(T)	7,388	[7,360 - 7,440]	↓ pH(T)	7,291	[7,360 - 7,440]
pO ₂ (T)	83,4 mmHg	[75,0 - 100]	pO ₂ (T)	75,5 mmHg	[75,0 - 100]
pCO ₂ (T)	42,2 mmHg	[35,0 - 45,0]	pCO ₂ (T)	39,6 mmHg	[35,0 - 45,0]
Oxymetrie Ergebnis			Oxymetrie Ergebnis		
↑ ctHb	17,4 g/dL	[12,0 - 16,0]	↑ ctHb	18,5 g/dL	[12,0 - 16,0]
sO ₂	96,3 %	[94,0 - 98,0]	↓ sO ₂	93,7 %	[94,0 - 98,0]
Säure Basen Status			Säure Basen Status		
cHCO ₃ ⁻ (P.st) _C	24,5 mmol/L	[22,0 - 26,0]	↓ cHCO ₃ ⁻ (P.st) _C	18,8 mmol/L	[22,0 - 26,0]
cHCO ₃ ⁻ (P) _C	25,4 mmol/L	[22,0 - 26,0]	↓ cHCO ₃ ⁻ (P) _C	19,1 mmol/L	[22,0 - 26,0]
ABE _C	0,2 mmol/L	[-2,0 - 2,0]	↓ ABE _C	-7,0 mmol/L	[-2,0 - 2,0]
SBE _C	0,4 mmol/L	[-2,0 - 2,0]	↓ SBE _C	-7,5 mmol/L	[-2,0 - 2,0]

► **Abb. 9** Blutgasanalyse (BGA), **a** in Ruhe **b** und während Belastung im maximalen Bereich.



► **Abb. 10** Befundausdruck.

Die VT1 ist gekennzeichnet durch vermehrt anfallendes CO₂ aus der Laktatpufferung und der hiermit verbundenen Steigerung der Ventilation. Sie lässt sich bestimmen durch:

- die V-Slope-Methode (Wechsel der Steigung der VO₂/VCO₂-Kurve von <1 auf >1 in Feld 5 der 9-Felder-Grafik)
- den Nadir bzw. definitiven Anstieg des Atemäquivalents für O₂ (Feld 6)
- den Nadir bzw. definitiven Anstieg des PETO₂ (Feld 9)

Die VT2 beschreibt den Zeitpunkt der überproportionalen Ventilation, die aus der metabolischen Azidose folgt, die während der Belastung entsteht. Sie lässt sich bestimmen durch:

- das Verhältnis VE zu VCO₂ (Anstieg VE/VCO₂-Slope in Feld 4)
- den Nadir bzw. Anstieg des Atemäquivalents für CO₂ (Feld 6)
- den Beginn des PETCO₂-Abfalls (Feld 9) [8]

Insbesondere bei sportmedizinischen Fragestellungen zur Ausdauerleistungsfähigkeit erfolgt eine direkte Laktatschwellenbestimmung im Blut, um den anaerob-aeroben Übergang unter Belastung zu erfassen.

Abschließend werden die erhobenen Daten detailliert, standardisiert und fragestellungsbezogen ausgewertet und ein zusammenfassender Bericht erstellt (► **Abb. 10**).

Erstveröffentlichung

Dieser Beitrag wurde erstveröffentlicht in: Dtsch Med Wochenschr 2019; 144: 39–45.

Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Autorinnen/Autoren



Dr. med. Hannes Semper

ist Facharzt für Innere Medizin und Pneumologie und Oberarzt an der Klinik für Pneumologie der Evangelischen Lungenklinik Berlin.



Dr. med. Paul Kühnelt

ist Facharzt für Innere Medizin und Pneumologie an der Klinik für Pneumologie der Evangelischen Lungenklinik Berlin.



Philip Seipp

ist Facharzt für Innere Medizin und Pneumologie an der Klinik für Pneumologie der Evangelischen Lungenklinik Berlin.

Korrespondenzadresse

Dr. med. Hannes Semper
Ev. Lungenklinik Berlin Buch
Klinik für Pneumologie
Lindenberger Weg 27
13125 Berlin
E-Mail: Hannes.Semper@pgdiakonie.de

Literatur

- [1] American Thoracic Society, American College of Chest Physicians. ATS/CCCP-Statement on cardiopulmonary exercise testing. *AM J Respir Crit Care Med* 2003; 167: 211–277
- [2] Myamura M, Honda Y. Oxygen intake and cardiac output during maximum treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 1972; 32: 185–188
- [3] Salati M, Brunelli A. Risk stratification in lung resection. *Cur Surg Rep* 2016; 4: 37
- [4] Meyer FJ et al. Belastungsuntersuchungen in der Pneumologie. *Pneumologie* 2013; 67: 16–34
- [5] Guazzi M, Arena R, Halle M et al. 2016 focused update: clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. *Circulation* 2016; 133: e 694–e711
- [6] Balady GJ, Arena R, Sietsema K et al. Clinician's Guide to Cardiopulmonary Exercise Testing in Adults: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation* 2010; 122: 191–225
- [7] Borg G. Anstrengungsempfinden. *Dt Aerztebl* 2004; 101: A1026–A1021
- [8] Westhoff M, Rühle KH, Greiwing A et al. Ventilatorische und metabolische (Laktat-)Schwellen: Positionspapier der Arbeitsgemeinschaft Spiroergometrie. *Dtsch Med Wochenschr* 2013; 138: 275–280

Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/a-0849-0549>
Pneumologie 2019; 73: 233–239
© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0934-8387