

ACCEPTED: August 2022

PUBLISHED ONLINE: September 2022

Winkert K, Kirsten J. Cardiopulmonary exercise testing – methodological aspects. Dtsch Z Sportmed. 2022; 73: 184-189. doi:10.5960/dzsm.2022.538

ERRATUM

Current version was revised on September 28, 2023.

Cardiopulmonary Exercise Testing – Methodological Aspects

Spiroergometrie – Methodische Aspekte

1. ULM UNIVERSITY HOSPITAL, Division of Sports and Rehabilitation Medicine, Department of Medicine, Ulm, Germany

Zusammenfassung

- **Kardiopulmonale Belastungstests** (engl. cardiopulmonary exercise testing, CPET, auch als Spiroergometrie bekannt) ermöglichen eine nicht-invasive Diagnostik der Reaktion des Lungen-, Herz-Kreislauf- und Skelettmuskelsystems auf körperliche Belastung. Daher findet CPET in der Sportmedizin ein breites Anwendungsspektrum, das von der Diagnostik bei Erkrankungen über präoperative Screenings bis hin zum Monitoring im Spitzensport reicht.
- **Um qualitativ hochwertige und diagnostisch aussagekräftige CPET-Daten zu gewährleisten**, sind hohe Reliabilitäts- und Validitätsstandards erforderlich. Eine systematische Qualitätssicherung und -kontrolle bei der täglichen Anwendung von CPET ist somit unerlässlich. Dabei müssen methodische Aspekte, sowie die Eigenschaften der jeweiligen CPET-Ausrüstung, Kalibrationsverfahren, Verifizierung, Wartung, Vorbereitung und Plausibilitätsprüfungen berücksichtigt werden.
- **Da für Spiroergometriergeräte** Unterschiede in der Reliabilität und Validität zwischen den unterschiedlichen Technologien, Geräten unterschiedlicher Hersteller und sogar Geräten identischer Bauart, berichtet werden, sollte sich die Wahl des geeigneten Spiroergometriergeräts nach dem Verwendungszweck und nachvollziehbaren Daten zur Reliabilität und Validität richten.
- **Eine sorgfältige Kalibrierung** und Überprüfung aller Sensoren, sowie deren Zusammenwirken und die Wartung aller Geräte müssen regelmäßig durchgeführt und im Längsschnitt überwacht werden. Darüber hinaus sind standardisierte Umgebungsbedingungen mit ausreichender Zirkulation und Austausch der Raumluft während der Messungen unerlässlich. Da der Ergometertyp und das Testprotokoll verschiedene Zielwerte bei CPET beeinflusst, ist eine adequate Auswahl für das verfolgte diagnostische Ziel, sowie eine Standardisierung erforderlich. Patienten müssen vor dem Test über den Testablauf umfassend informiert werden und eindeutige Zeichen zur nonverbalen Kommunikation vorab vereinbart werden. Die korrekte Verkabelung des Patienten mit der verwendeten Ausrüstung ist von hoher Bedeutung.
- **Zur Erkennung und Behebung von Fehlfunktionen** des Spiroergometriergeräts sollten Plausibilitätsprüfungen der Messgrößen während der Ruhe-, Entlastungs-, Belastungs- und Erholungsphase des Tests durchgeführt werden. Eine allgemeine Plausibilitätsprüfung sollte entsprechend der Faustformeln nach Rühle die Überprüfung adäquater Ruhewerte und Steigerungsraten für Atemminutenvolumen (\dot{V}_E), Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) und respiratorische Austauschrate (engl. respiratory exchange ratio, RER) umfassen.
- **Vor der endgültigen Dateninterpretation**, z.B. der Bestimmung der ventilatorischen Schwellen oder der $\dot{V}O_{2max}$ bzw. $\dot{V}O_{2peak}$, sollte erneut eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden und festgestellt werden ob eine tatsächliche Ausbelastung durch den Patienten erreicht wurde.
- **Zusammenfassend** sollte eine Verfahrensweisung für die Qualitätssicherung und -kontrolle in jeder Einrichtung etabliert sein. Diese sollte auch eine intuitive Datenvisualisierung mit Schwellenwerten für „bestandene“ oder „nicht bestandene“ Qualitätskontrollen oder Ausreißer und ungewöhnlichen Trends umfassen.

SCHLÜSSELWÖRTER:

CPET, Belastungstests, körperliche Fitness

Einführung

Die Messung der Ventilation und des Gasaustausches während submaximaler und maximaler körperlicher Belastung ermöglicht die nicht-invasive Untersuchung der Reaktionen des Lungen-, Herz-Kreislauf- und Skelettmuskelsystems. In der Sportmedizin wird die kardiopulmonale Belastungsuntersuchung (engl. cardiopulmonary exercise testing, CPET, auch als Spiroergometrie bekannt) daher häufig in einem breiten Spektrum von der Diagnostik bei Erkrankungen über präoperative Screenings bis hin zum Monitoring im Spitzensport eingesetzt.

Um qualitativ hochwertige und diagnostisch aussagekräftige CPET-Daten in Quer- und Längs-

schnittuntersuchungen zu gewährleisten, sind hohe Reliabilitäts- und Validitätsstandards erforderlich, was einen systematischen Prozess der Qualitätssicherung und -kontrolle bei der täglichen Anwendung von CPET voraussetzt. Daher ist gut geschultes Personal unerlässlich, welches sich mit methodischen Aspekten wie Gerätefunktion, Kalibrierung, Verifizierung, Wartung, CPET-Vorbereitung und Plausibilitätskontrollen auskennt.

Diese kurze Übersichtsarbeit konzentriert sich primär auf diese methodischen Aspekte und soll aktuelle methodische Leitlinien und Empfehlungen zusammenfassen. Für detailliertere Aspekte wie



Article incorporates the Creative Commons Attribution – Non Commercial License. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



QR-Code scannen und Artikel online lesen.

CORRESPONDING ADDRESS:

Dr. hum.biol. Kay Winkert
University Hospital Ulm
Division of Sports and Rehabilitation Medicine
Leimgrubenweg 14, 89075 Ulm, Germany
✉: kay.winkert@uni-ulm.de

die klinische Anwendung und Interpretation von CPET oder umfassende Standards verweisen wir auf bestehende klinische Übersichtsarbeiten (7, 22, 23) und Positionspapiere (1, 18).

Ausrüstung

Gerätekunde

Heutzutage werden in den meisten Belastungslaboren automatisierte Spiroergometriergeräte mit (i) Atemzug-für-Atemzug (BxB), (ii) konventioneller Mischkammer (MIX) oder (iii) dynamischer Mikro-Mischkammer (DMC) Technologie verwendet. Obwohl diese Geräte eine einfache Messungen der Ventilation und des Gasaustauschs mehr oder weniger in Echtzeit ermöglichen, werden in der Literatur Unterschiede zwischen den Technologien (3, 15, 16, 30), zwischen den Geräten verschiedener Hersteller (2, 5, 12) und zwischen baugleichen Geräten (14, 29) in Bezug auf Reliabilität und Validität berichtet.

Daher sollte sich die Wahl des geeigneten Spiroergometriergerätes nach dem Verwendungszweck sowie nachvollziehbaren Daten zur Reliabilität und Validität richten.

Für den klinischen Einsatz scheinen schnell reagierende BxB-Systeme, die die Erfassung von so genannten Intra-Breath Daten ermöglichen geeignet zu sein. BxB-Systeme sind jedoch anfällig für durch das so genannte Time-Delay zwischen Volumen und Gasmessung hervorgerufene Messfehler, insbesondere bei hohen Atemfrequenzen (20), was Strategien z. B. im Bereich der Datenglättung erfordert.

Folglich werden zumindest für die Bestimmung von Maximalwerten in Athletenpopulation MIX- und DMC-Systeme aufgrund ihrer robusteren Gasaustauschmessung bei hohen Atemfrequenzen als überlegen diskutiert (3, 31). Für weitere Einblicke in die Messprinzipien und die Datenverarbeitung bei CPET verweisen wir auf Ward (26).

Kalibrierung und Verifizierung

Die Reliabilität und Validität eines Spiroergometriergerätes wird primär durch (i) die Genauigkeit und Stabilität der eingebauten Sensoren (Umgebungsluft, Volumen/Volumenstrom, Gas), (ii) die genaue Kalibrierung aller Sensoren, (iii) die Integration aller Messsignale durch komplexe Algorithmen und Korrekturen sowie (iv) eine adäquate Trocknung der Gasprobe bestimmt (13). Daher muss eine sorgfältige Kalibrierung und Überprüfung aller Sensoren und des komplexen Zusammenwirkens dieser durchgeführt und überwacht werden.

Auf der Grundlage der Herstellerrichtlinien und den folgenden Empfehlungen, sollte in jeder Einrichtung ein Standardverfahren mit definierten Werten für „bestandene“ oder „nicht bestandene“ Qualitätskontrollen festgelegt, kommuniziert und umgesetzt werden.

In Tabelle 1 sind die empfohlenen Kalibrierungen, sowie deren Häufigkeit für die verschiedenen Sensortypen zusammengefasst. Die Kalibrierungsverfahren und -algorithmen werden von den Herstellern festgelegt und können daher variieren. Die Kalibrierung der Gassensoren umfasst normalerweise z. B. die so genannte Slope und Offset, Delay-Time und Response-Time. Vor der Kalibrierung ist eine angemessene Aufwärmzeit des Spiroergometriergerätes gemäß den Richtlinien des Herstellers erforderlich, die in der Regel zwischen 30 und 60 Minuten beträgt.

Eine ordnungsgemäße Kalibration ist unerlässlich, denn ein Messfehler der Minutenventilation ($\dot{V}E$) von z. B. 5% führt zu einem proportionalen Messfehler der Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), während bereits ein Messfehler von 1% bei der Fraktion

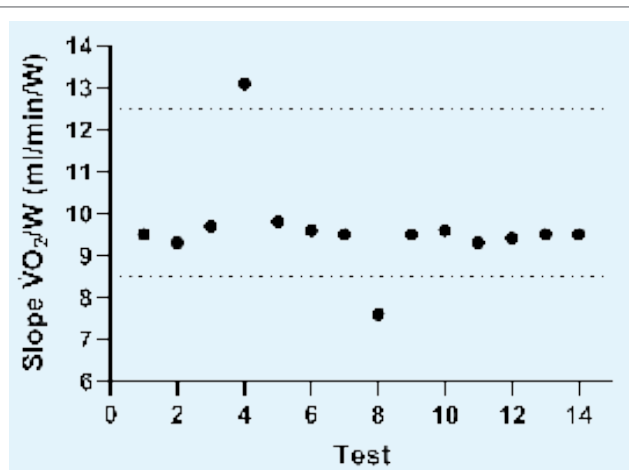


Abbildung 1

Schematisches Beispieldiagramm zur intuitiven visuellen Identifizierung von Messwertausreißern für die Steigung zwischen Last und Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2/W$). Die Schwellenwerte (gestrichelte Linien) sind mit 8,5 und 12,5 ml/min/W für die Fahrradergometrie angegeben (6).

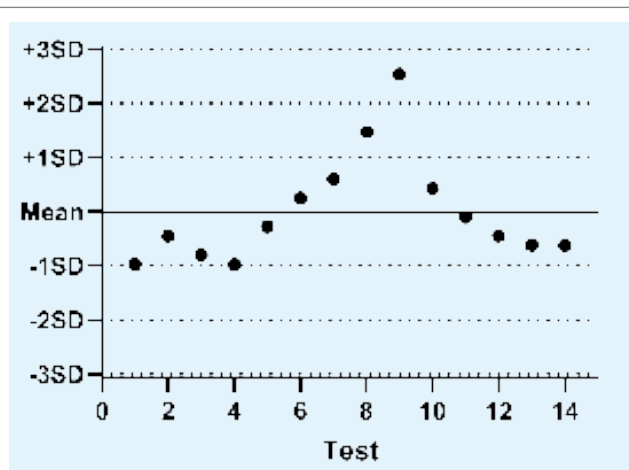


Abbildung 2

Schematisches Beispiel eines Levey-Jennings-Diagramms zur intuitiven visuellen Identifizierung von Messwertausreißern und bedenklichen Trends unter Anwendung der in Tabelle 4 aufgeführten Westward-Kriterien.

des ausgeatmeten Sauerstoffs (FEO_2) die $\dot{V}O_2$ um 6,5% verändern kann und sich beide Fehler ($\dot{V}E$, FEO_2) zu 11,7% hinsichtlich der $\dot{V}O_2$ summieren können (25).

Gassensoren werden normalerweise durch eine Zweipunkt-kalibrierung kalibriert, d. h. durch die Bestimmung einer linearen Korrekturgleichung auf der Grundlage der Umgebungsluft (O_2 20,93%, CO_2 0,03%) und eines Referenzgases (z. B. O_2 16%, CO_2 5%). Kleine Abweichungen in der Umgebungsluft könnten daher zu einer fehlerhaften Kalibrierung führen, weshalb eine optimale Frischluftzufuhr während des Kalibrationsvorganges unbedingt gewährleistet sein muss.

Während die Überprüfung (nach der Sensorkalibrierung) einzelner Sensoren durch den Vergleich mit einem entsprechenden Referenzwert, z. B. unter Verwendung eines Referenzgases oder einer Kalibrationspumpe, einfach durchgeführt werden kann, ist die Überprüfung der komplexen Messgrößen des Spiroergometriergerätes wie z. B. Kohlendioxidabgabe ($\dot{V}CO_2$) und $\dot{V}E$ komplexer. Zu diesem Zweck werden die Verwendung von Stoffwechselsimulatoren oder die biologische Validierungen in regelmäßigen Abständen empfohlen. >

Tabelle 1

Empfohlene Kalibrierungsroutine. Vor der Kalibrierung ist eine angemessene Aufwärmzeit des Spiroergometrieerätes gemäß den Herstellerrichtlinien (30-60 Minuten) erforderlich.

SENSOR	KALIBRATION	HÄUFIGKEIT
Umgebung	Thermometer, Barometer, Hygrometer	Mit jeder Gaskalibration
Volumen/Volumenstrom	3 L Pumpe, wenn möglich über niedrige, mittlere und hohe Volumenströme	Bevor jedem Test
Gas	Zwei-Punkt Kalibrierung mittels Umgebungsluft (O ₂ 20,93%, CO ₂ 0,03%) und Referenzgas (O ₂ 16%, CO ₂ 5%)	Täglich mindestens vor dem ersten Test, optional/empfohlen bei mehreren Tests in festgelegten Abständen und nach Wechsel der Absaugstrecke

Tabelle 2

Zusammenfassung der Westgard-Kriterien für die Identifizierung von Ausreißern und bedenklichen Trends (26, 27). SD=Standardabweichung.

WESTGARD KRITERIEN	
Regel 1	Eine "Warnung" liegt vor, wenn ein Messwert $\pm 2SD$ überschreitet.
Regel 2	Ein "Problem" liegt vor, wenn ein Messwert $\pm 3SD$ überschreitet.
Regel 3	Ein "Problem" liegt vor, wenn zwei aufeinanderfolgende Messwerte $\pm 2SD$ überschreiten.
Regel 4	Ein "Problem" liegt vor, wenn vier aufeinander folgende Messwerte $\pm 1SD$ überschreiten.
Regel 5	Ein "Problem" liegt vor, wenn zehn aufeinanderfolgende Messwerte auf der gleichen Seite des Mittelwerts liegen.
Regel 6	Regel 6: Ein "Problem" liegt vor, wenn sieben aufeinander folgende Messwerte progressiv nach oben/unten weisen.

Tabelle 3

Belastungsprotokollwahl nach der „Treppenfrage“ (6, 17, 33, 34).

“WIE VIELE STOCKWERKE KÖNNEN SIE SCHNELL HINAUFGEHEN, OHNE ANZUHALTEN?”
Eine Etage entspricht etwa 50 W, was z. B. einer leichten Wanderung oder Golfspielen entspricht, Belastungssteigerung von 5 W/min empfohlen.
Zwei Stockwerke entsprechen etwa 100 W, was z. B. Nordic Walking oder Radfahren in der Ebene, Gartenarbeit entspricht, Belastungssteigerung von 10 W/min empfohlen.
Drei Stockwerke entsprechen etwa 125-150 W, was z. B. Schwimmen oder Bergwandern entspricht, Belastungssteigerung von 15 W/min empfohlen.
Vier Stockwerke entsprechen etwa 200 W (vergleichbar mit einem Lauftempo von ≥ 10 km/h), Belastungssteigerung von 20 W/min empfohlen.

Bei einem Stoffwechselsimulator handelt es sich um eine motorbetriebene Pumpe, welche durch die Verbindung mit einer dynamischen Mischkammer, sowie Referenzgasflasche, eine reliable und valide Simulation verschiedener Ventilations- und Gasaustauschraten auf BxB Basis ermöglicht (11). Entsprechend der hohen Anschaffungs- und Betriebskosten, sind Stoffwechselsimulatoren kaum verbreitet. Des Weiteren gibt es nur vereinzelt Simulatoren, welche die natürlichen Variationen

der Atemmuster sowie temperierte und feuchte Gasmischungen erzeugen können. Daher sind Stoffwechselsimulatoren besser geeignet, die Stabilität und Reliabilität von Spiroergometrieeräten zu testen, als für eine ganzheitliche Bewertung der Validität.

Im Gegensatz dazu sind biologische Validierungen relativ einfach zu realisieren. Hierzu muss lediglich eine gesunde Person wöchentlich oder zumindest monatlich eine Reihe von standardisierten konstanten Belastungen (jeweils etwa 6 Minuten) oder einen Rampentest durchführen. Während die regelmäßige Wiederholung von standardisierten konstanten Belastungen die Überprüfung der Stabilität innerhalb und zwischen den Tests bei niedrigen bis mittleren Belastungsintensitäten unterhalb der anaeroben Schwelle ermöglichen, erlauben Rampentests den Vergleich von Maximalwerten und der Steigung zwischen Belastung und $\dot{V}O_2$, die bei der Fahrradergometrie zwischen 8,5 und 12,5 ml/min/W liegen sollte (6). Die erhobenen Werte müssen dann im fortlaufenden Längsschnitt verglichen werden.

Während es keine gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich der Reliabilität und Validität von Spiroergometrieeräten gibt, welche als Referenzwerte für die Validierung und Qualitätskontrollen verwendet werden können, liegen Empfehlungen von Gesellschaften und Publikationen für die Reliabilität und Validität von $\dot{V}E_2$, $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ zwischen 2 und 5% (1, 9, 10). Die Gesamtvariabilität dieser Messgrößen, die sich aus der technischen und biologischen Variabilität bei Mehrfachmessungen zusammensetzt, wird mit einem Variationskoeffizienten (CV) von 6-8% angegeben (4, 19). Zum weiteren Verständnis der Variation zwischen den erhobenen Messwerten und zur Definition von Ausreißerkriterien wird die Arbeit von Westgard et al. (27, 28) empfohlen, deren Kriterien in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Für die Visualisierung der gesammelten Kalibrations- und Verifizierungsdaten wird die Verwendung eines Levey-Jennings-Diagramms in Kombination mit den Westgard-Kriterien empfohlen, wodurch Ausreißer einfach erkannt und ungewöhnliche Trends identifiziert werden können. Darüber hinaus können „bestandene“ oder „nicht bestandene“ Qualitätskontrollen anhand definierter Referenzwerte einfach visualisiert werden. Ein Beispiel für visualisierte Referenzwerte und ein Levey-Jennings-Diagramm findet sich in Abbildung 1 und 2.

Wartung

Um die ordnungsgemäße Funktionsweise aller CPET-Geräte zu gewährleisten, ist eine regelmäßige Wartung und Evaluierung gemäß den herstellerepezifischen Empfehlungen erforderlich. Zu den relevantesten Bauteilen gehören die CO₂- und O₂-Gassensoren, die eingebauten Umgebungssensoren, die Gesamtdichtigkeit des Systems sowie die Absaugstrecke und die verwendete Kalibrationspumpe.

In modernen Spiroergometrieeräten werden primär drei verschiedene Arten von O₂-Sensoren verwendet: (i) Zirkoniumdioxid-Brennstoffzellen, (ii) paramagnetische Analysatoren und (iii) Halbeinwegsysteme (polarographische Elektroden oder galvanische Brennstoffzellen) (13). Die beiden letztgenannten Sensortypen, die vor allem in kleinen stationären oder tragbaren Geräten eingesetzt werden, müssen alle 6-12 Monate ausgetauscht werden und können nicht nur zu Beginn und am Ende ihrer Lebensdauer, sondern auch bei Langzeittests einen z. T. erheblichen Drift aufweisen (8), den es wie beschrieben gilt regelmäßig zu überprüfen.

Darüber hinaus müssen Absaugstrecken, welche die Aufgabe haben die Gasprobe zu trocknen bzw. an die Luftfeuchtigkeit der Umgebung anzugleichen (auch bekannt als Nafion™) je

nach Verwendungshäufigkeit etwa alle 2 Monate ersetzt werden, wobei eine gelbliche Verfärbung der transparenten Schläuche ein eindeutiger Indikator für einen Austausch ist. Darüber hinaus ist es sinnvoll nach lang andauernden Tests oder kurzen Zeitabständen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tests, die Absaugstrecken zu wechseln, was wiederum eine neue Gaskalibrierung erforderlich macht.

Außerdem sollten die Referenzgasflaschen auf das Verfallsdatum, Undichtigkeiten und den Mindestfüllstand geprüft werden. Letzteres ist wichtig, da die meisten Gassensoren empfindlich auf Druck bzw. die Durchflussrate reagieren und von der Norm abweichende Werte den Kalibrierungsprozess beeinträchtigen können.

CPET-Vorbereitung

Testumgebung

Das Belastungslabor sollte groß genug sein, um alle Geräte unterzubringen und einen Rundumzugang zu dem Patienten ermöglichen. Die Überwachungsmonitore sollten für den Patienten nicht sichtbar sein. Um standardisierte Umgebungsbedingungen wie Raumtemperatur (18-22 °C), Luftfeuchtigkeit (30-40%), O₂ (20,93%) und CO₂ (0,03%) zu ermöglichen, muss das Labor gut klimatisiert sein und über eine ausreichende Zirkulation und Austausch der Raumluft verfügen. Wenn letzteres nicht der Fall ist, sollte ein obligatorischer Ventilator verwendet werden, um abnormale CO₂- und O₂-Gaskonzentrationen im Atembereich des Patienten zu vermeiden.

Auswahl des Ergometers und Belastungsprotokolls

Entsprechend der Studienlage haben die Wahl des Ergometers und des Belastungsprotokolls einen Einfluss auf verschiedene CPET Zielgrößen (24, 32). Daher ist die Auswahl entsprechend des diagnostischen Zieles sowie eine entsprechende Standardisierung von wesentlicher Bedeutung.

CPET wird in der Regel auf einem Fahrradergometer durchgeführt, da es für ein breites Spektrum von Patienten (geringe Fitness, geringe motorische Fähigkeiten, Gelenkprobleme etc.) geeignet ist, eine genaue Messung der externen Belastung ermöglicht und zusätzliche Monitorings Möglichkeiten problemlos (EKG, Blutdruck, Blutentnahme) ermöglicht. Andere Ergometer Typen wie Laufbänder und Ruderergometer erfordern die Aktivierung von mehr Muskelmasse, was mit einer höheren $\dot{V}O_2$ peak einhergeht, setzen aber ein höheres Maß an Fitness und spezifischen Bewegungsfertigkeiten voraus. Daher ist in den meisten klinischen Anwendungen die Fahrradergometrie die bevorzugte Ergometrie Form, während für ein Athleten Klientel eher sportartspezifische Ergometer Typen verwendet werden sollten.

Grundsätzlich sollte das Belastungsprotokoll eine Ruhe-, Erwärmungs-, Belastungs- und Erholungsphase umfassen. Für die meisten klinischen Anwendungen sollten inkrementelle oder rampenförmige Belastungsprotokolle eine Belastungszeit von 10±2 Minuten aufweisen, wobei die Startlast und das Inkrement an das Fitnessniveau des Patienten angepasst werden sollte. Die Wahl einer angemessenen Laststeigerung sollte sicherstellen, dass die Patienten eine maximale Beanspruchung sowie eine valide $\dot{V}O_2$ -Peak erreichen können. Eine zu rasche Steigerung der Last führt häufig zu einem vorzeitigen Testabbruch, aufgrund einer frühzeitigen Laktatazidose, Hyperventilation oder muskuläres Versagen, sodass die zweite ventilatoische Schwelle (VT2) und $\dot{V}O_2$ peak oftmals nicht valide bestimmt werden können.

Für die notwendige Ex-ante-Schätzung der Belastungsfähigkeit eines Patienten und die Auswahl eines geeigneten

Tabelle 4

Grundlegende Plausibilitätsprüfung für die Fahrradergometrie. Normalwerte nach Rhüle (21), Abweichungen von mehr als ±10% und dem Ausschluss einer pathologischen Funktionsstörung kennzeichnen einen wahrscheinlichen Messfehler. VE=Minutenventilation, $\dot{V}O_2$ =Sauerstoffaufnahme, RER=respiratory exchange ratio.

BAISIS PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG FÜR VE, $\dot{V}O_2$ UND RER	
PHASE	PRÜFUNG
Ruhe	VE 9 l/min, $\dot{V}O_2$ 5 ml per kg Körpermasse, RER ≥0,7<1,0
Erwärmung	Anstieg VE und $\dot{V}O_2$, weitere Normalisierung des RER oder leichter Einstieg
Belastung	VE Anstieg um 9 l/min pro 25 W, plus 9 l/min Ruheatmung, $\dot{V}O_2$ Anstieg um 10 ml/min pro W, plus 5 ml pro kg Körpermasse, RER in den ersten 2 min <1,0
Erholung	Schnell abfallende $\dot{V}O_2$, gefolgt von einem Abfall der VE, vorübergehender Anstieg des RER

Tabelle 5

Kriterien für die Bestimmung der maximalen Ausbelastung. Für detaillierte Informationen siehe (18). $\dot{V}O_2$ =Sauerstoffaufnahme.

AUSBELASTUNGSKRITERIEN
$\dot{V}O_2$ Plateau
Herzfrequenz erreicht 90% der maximalen Herzfrequenz oder ≤15 1/min der Herzfrequenzreserve
Evidenz für Atemlimitation (Atemreserve <15%)
Expiratorische Volumenflussbegrenzung (auch signifikante Zunahme des endexpiratorischen Lungenvolumens berücksichtigen)
mBorg für Erschöpfung oder Kurzatmigkeit ≥9/10
Maximale Blutlaktatkonzentration ≥8 mmol/L

Belastungsprotokolls stellt die in der Tabelle 3 dargestellte „Treppenfrage“ (6, 17, 33, 34) eine besonders praxistaugliche Hilfestellung dar.

Vorbereitung des Patienten

Während die Patienten vor dem Test Informationen zum Testablauf und zur Kommunikation mittels nonverbaler Zeichen (Vermeidung von Ausreißern in den Messdaten durch Sprechen), ist das richtige Anlegen der CPET-Ausrüstung von hoher Bedeutung.

Um einen dichten und bequemen Sitz der Maske (wenn kein Mundstück verwendet wird) während des gesamten Belastungstests zu gewährleisten, sollten Maskengröße und Kopfband sorgfältig ausgewählt und fixiert werden. Ein obligatorischer Dichtigkeitstest, sollte durch ein- und ausatmen des Patienten, während die Maskenöffnung mit der Hand verschlossen wird durchgeführt werden.

Wenn der Patient vollständig mit allen erforderlichen Geräten, gegebenenfalls einschließlich EKG, Blutdruck- und Pulsoximeter, verbunden und auf dem Ergometer platziert ist, sollte der ordnungsgemäße freie Lauf der Absaugstrecke und anderer Verbindungskabel überprüft werden.

Plausibilitätsprüfung

Um mögliche Fehlfunktionen des Spiroergometriesystems z. B. aufgrund von Defekt oder Drift der Gassensoren, unzureichender Trocknung der Gasprobe, Undichtigkeit der Maske, abgelenkte Absaugstrecken etc. frühzeitig zu erkennen und

beheben zu können, sollten Plausibilitätsprüfungen für die Ruhe-, Erwärmungs-, Belastungs- und Erholungsphase durchgeführt werden. Eine grundlegende Plausibilitätsprüfung sollte adäquate Ruhewerte und Steigungsraten der \dot{V}_E , $\dot{V}O_2$ und respiratorische Austauschrate (engl. respiratory exchange ratio, RER) für eine gegebene Steigerung der Laststufe umfassen. Hierfür bietet die von Rühle (21) vorgeschlagene Daumenregel (siehe Tabelle 4) eine sehr gute Orientierung.

Vor der endgültigen Dateninterpretation, z. B. der VT-Bestimmung wie in früheren klinischen Übersichtsartikeln (22, 23) beschrieben, sollte für jede Protokollphase erneut eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden. Falls erforderlich, sollte anhand der in Tabelle 5 aufgeführten Kriterien ermittelt werden, ob die Anstrengung des Patienten als maximal angesehen werden kann. Wichtig ist, dass der RER aufgrund seiner Variabilität bei Hyperventilation und pathologischen Besonderheiten nicht per se ein zuverlässiger Indikator für die maximale Ausbelastung ist und daher als sekundärer Marker verwendet werden sollte.

Schlussfolgerung

Diese kurze Übersichtsarbeit soll anhand der beschriebenen methodischen Leitlinien und Empfehlungen Ärzten:innen und Praktikern:innen dabei unterstützen, potenzielle Fehlerquellen zu vermeiden, Messfehler zu erkennen und so eine hohe Datenqualität der CPET zu gewährleisten. Wichtig ist, dass diese Empfehlungen im Sinne eines Best Practice Ansatzes an die spezifischen Bedingungen und Anforderungen der einzelnen Untersuchungsstellen angepasst werden müssen, bevor sie in die tägliche Praxis übertragen werden können.

Um qualitativ hochwertige und diagnostisch aussagekräftige CPET-Daten in Quer- und Längsschnittuntersuchungen zu gewährleisten, sind hohe Reliabilitäts- und Validitätsstandards erforderlich, die einen systematischen Prozess der Qualitätssicherung und -kontrolle bei der täglichen Anwendung von CPET voraussetzen. Da es sich bei CPET jedoch um ein sehr komplexes diagnostisches Instrument handelt, erheben wir keinen Anspruch auf Vollständigkeit. ■

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

Keine

References

- (1) **ATS/ACCP STATEMENT ON CARDIOPULMONARY EXERCISE TESTING.** *Am J Respir Crit Care Med.* 2003; 167: 211-277. doi:10.1164/rccm.167.2.211
- (2) **BABINEAU C, LÉGER LUC, LONG AL, BOSQUET L.** Variability of Maximum Oxygen Consumption Measurement in Various Metabolic Systems. *J Strength Cond Res.* 1999; 4: 318-324.
- (3) **BEIJST C, SCHEP G, VAN BREDA E, WIJN PFF, VAN PUL C.** Accuracy and precision of CPET equipment: a comparison of breath-by-breath and mixing chamber systems. *J Med Eng Technol.* 2013; 37: 35-42. doi:10.3109/03091902.2012.733057
- (4) **COOPER BG, BUTTERFIEL AK.** Quality control in lung function testing. In: *ERS Buyers' Guide Respir Care Prod*; 2009.
- (5) **CROUTER SE, ANTCZAK A, HUDAK JR, DELLAVALLE DM, HAAS JD.** Accuracy and reliability of the ParvoMedics TrueOne 2400 and MedGraphics VO2000 metabolic systems. *Eur J Appl Physiol.* 2006; 98: 139-151. doi:10.1007/s00421-006-0255-0
- (6) **DUMITRESCU D, GREIWING A, HAGER A, HOLLMANN W, MEYER K, SCHOMAKER R.** *Kursbuch Spiroergometrie: Technik und Befundung verständlich gemacht. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage.* Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York; 2015.
- (7) **FRIEDMANN-BETTE B.** Die Spiroergometrie in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik: Application of Spiroergometry in the Diagnosis of Athletic Performance. *Dtsch Z Sportmed.* 2011; 62: 10-15.
- (8) **GARCIA-TABAR I, ECLACHE JP, ARAMENDI JF, GOROSTIAGA EM.** Gas analyzer's drift leads to systematic error in maximal oxygen uptake and maximal respiratory exchange ratio determination. *Front Physiol.* 2015; 6: 308. doi:10.3389/fphys.2015.00308
- (9) **GORE C, ED.** *Physiological Tests for Elite Athletes.* Human Kinetics: Champaign; 2000.
- (10) **HODGES LD, BRODIE DA, BROMLEY PD.** Validity and reliability of selected commercially available metabolic analyzer systems. *Scand J Med Sci Sports.* 2005; 15: 271-279. doi:10.1111/j.1600-0838.2005.00477.x
- (11) **HUSZCZUK A, WHIPP BJ, WASSERMAN K.** A respiratory gas exchange simulator for routine calibration in metabolic studies. *Eur Respir J.* 1990; 3: 465-468.
- (12) **JAKOVljeVIC DG, NUNAN D, DONOVAN G, HODGES LD, SANDERCOCK GRH, BRODIE DA.** Lack of agreement between gas exchange variables measured by two metabolic systems. *J Sports Sci Med.* 2008; 7: 15-22.
- (13) **MACFARLANE DJ.** Automated metabolic gas analysis systems: a review. *Sports Med.* 2001; 31: 841-861. doi:10.2165/00007256-200131120-00002
- (14) **MACFARLANE DJ, WU HL.** Inter-unit variability in two ParvoMedics TrueOne 2400 automated metabolic gas analysis systems. *Eur J Appl Physiol.* 2013; 113: 753-762. doi:10.1007/s00421-012-2483-9
- (15) **MEYER T, GEORG T, BECKER C, KINDERMANN W.** Reliability of gas exchange measurements from two different spirometry systems. *Int J Sports Med.* 2001; 22: 593-597. doi:10.1055/s-2001-18523
- (16) **PEREZ-SUAREZ I, MARTIN-RINCON M, GONZALEZ-HENRIQUEZ JJ, FEZZARDI C, PEREZ-REGALADO S, GALVAN-ALVAREZ V, JUAN-HABIB JW, MORALES-ALAMO D, CALBET JAL.** Accuracy and Precision of the COSMED K5 Portable Analyser. *Front Physiol.* 2018; 9: 1764. doi:10.3389/fphys.2018.01764
- (17) **POLLOCK M, ROA J, BENDITT J, CELLI B.** Estimation of ventilatory reserve by stair climbing. A study in patients with chronic airflow obstruction. *Chest.* 1993; 104: 1378-1383. doi:10.1378/chest.104.5.1378
- (18) **PRITCHARD A, BURNS P, CORREIA J, JAMIESON P, MOXON P, PURVIS J, THOMAS M, TIGHE H, SYLVESTER KP.** ARTP statement on cardiopulmonary exercise testing 2021. *BMJ Open Respir Res.* 2021; 8: e001121. doi:10.1136/bmjresp-2021-001121
- (19) **REVILL SM, MORGAN MD.** Biological quality control for exercise testing. *Thorax.* 2000; 55: 63-66. doi:10.1136/thorax.55.1.63
- (20) **ROECKER K, PRETTIN S, SORICHTER S.** Gas exchange measurements with high temporal resolution: the breath-by-breath approach. *Int J Sports Med.* 2005; 26: S11-S18. doi:10.1055/s-2004-830506
- (21) **KROIDL RF, SCHWARZ S, LEHNIGK B.** *Kursbuch Spiroergometrie. Technik und Befundung verständlich gemacht.* Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart. 2010. doi:10.1055/b-002-29663
- (22) **SCHARHAG-ROSENBERGER F, SCHOMMER K.** Die Spiroergometrie in der Sportmedizin. *Dtsch Z Sportmed.* 2013; 64: 362-366. doi:10.5960/dzsm.2013.105
- (23) **SCHARHAG-ROSENBERGER F.** Spiroergometrie zur Ausdauerleistungsdiagnostik. *Dtsch Z Sportmed.* 2010; 61: 146-147.
- (24) **TANAKA H, FUKUMOTO S, OSAKA Y, OGAWA S, YAMAGUCHI H, MIYAMOTO H.** Distinctive effects of three different modes of exercise on oxygen uptake, heart rate and blood lactate and pyruvate. *Int J Sports Med.* 1991; 12: 433-438. doi:10.1055/s-2007-1024709
- (25) **TANNER RK, GORE CJ.** *Physiological tests for elite athletes.* 2. ed. Human Kinetics: Champaign, Ill.; 2013.
- (26) **WARD SA.** Open-circuit respirometry: real-time, laboratory-based systems. *Eur J Appl Physiol.* 2018; 118: 875-898. doi:10.1007/s00421-018-3860-9
- (27) **WESTGARD JO, GROTH T, ARONSSON T, FALK H, DE VERDIER CH.** Performance characteristics of rules for internal quality control: probabilities for false rejection and error detection. *Clin Chem.* 1977; 23: 1857-1867. doi:10.1093/clinchem/23.10.1857
- (28) **WESTGARD JO, BARRY PL.** Chapter 4, in: *Cost-effective quality control: managing the quality and productivity of analytical processes.* In: *Improving quality control by use of Multirule control procedures*; 1997.
- (29) **WINKERT K, KAMNIG R, KIRSTEN J, STEINACKER JM, TREFF G.** Inter- and intra-unit reliability of the COSMED K5: Implications for multicentric and longitudinal testing. *PLoS One.* 2020; 15: e0241079. doi:10.1371/journal.pone.0241079
- (30) **WINKERT K, KIRSTEN J, DREYHAUPT J, STEINACKER JM, TREFF G.** The COSMED K5 in Breath-by-Breath and Mixing Chamber Mode at Low to High Intensities. *Med Sci Sports Exerc.* 2020; 52: 1153-1162. doi:10.1249/MSS.0000000000002241
- (31) **WINKERT K, KIRSTEN J, KAMNIG R, STEINACKER JM, TREFF G.** Differences in V̇O₂max Measurements Between Breath-by-Breath and Mixing-Chamber Mode in the COSMED K5. *Int J Sports Physiol Perform.* 2021; 16: 1335-1340. doi:10.1123/ijspp.2020-0634
- (32) **ZUNIGA JM, HOUSH TJ, CAMIC CL, BERGSTROM HC, TRAYLOR DA, SCHMIDT RJ, JOHNSON GO.** Metabolic parameters for ramp versus step incremental cycle ergometer tests. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2012; 37: 1110-1117. doi:10.1139/h2012-098
- (33) **GLAAB T, TAUBE C.** Practical guide to cardiopulmonary exercise testing in adults. *Respir Res.* 2022; 23: 9. doi:10.1186/s12931-021-01895-6
- (34) **GLAAB T, SCHMIDT O, FRITSCH J.** Spiroergometrie kompakt – Physiologie, Durchführung und Auswertung [Guidance to the Interpretation of Cardiopulmonary Exercise Testing]. *Pneumologie.* 2020; 74: 88-102. German. doi:10.1055/a-1069-0611