

Aus der I. Medizinischen Abteilung der Allgemeinen Poliklinik der Stadt Wien
(Vorstand: Univ. Prof. Dr. H. Czitober)

Quantitative Analyse der körperlichen Leistungsfähigkeit unter Non-Steady-State-Belastung

W. Reiterer

1. Einleitung

Aus anamnestischen Daten und Befunden der physikalisch-klinischen Untersuchung gelingt es dem erfahrenen Kliniker durchaus, sich ein verlässliches Bild über die Funktionsreserven von Herz-Kreislauf und Lunge des Patienten zu machen. Zur genaueren Quantifizierung der körperlichen Leistungsfähigkeit und zum Aufdecken abnormer Reaktionen und limitierender Mechanismen sind ergometrische Untersuchungen unentbehrlich geworden.

2. Methodik

Das Konzept für die leistungsphysiologischen Untersuchungen ist die symptom-limitierte Ausbelastung des Probanden. Nach dem Aufwand und fortschreitend im Untersuchungsgang wählen wir zuerst die *einfache Fahrradergometrie in sitzender Position* (Stufe I). Als weitere Methoden werden die *Ergospirometrie* (Stufe II) und die Bestimmung der *zentralen Hämodynamik* (Stufe III) eingesetzt. Für nicht-invasive Leistungsprüfungen wird die Belastungsintensität in 2-Minuten-Intervallen (rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie) gesteigert. Steady-state-Bedingungen gelten nur für die Bestimmung der hämodynamischen Meßwerte. Die aufwendigen Untersuchungsverfahren (Stufe II und III) laufen rechnerunterstützt ab (3).

Der *Untersuchungsaufwand* soll primär der *klinischen Fragestellung* gerecht werden. Auf den Patienten bezogen wollen wir die zumutbare alltägliche, berufliche Belastungsintensität und Angriffspunkte zur medikamentösen Therapie erkennen. Vereinfacht ausgedrückt, wird ein Kardiologe eher an Meßdaten der Volumleistung, sowie der Vor- und Nachlast interessiert sein, ein Pulmonologe eher Informationen über die Atemarbeit und Effektivität der Atmung anstreben. Wir haben versucht, durch ein rechnerunterstütztes Verfahren unter ansteigender Belastungsintensität (non-steady-state) alle diese unterschiedlichen Fragestellungen weitgehend in einem Arbeitsgang zu beantworten. In unserem Labor an der Poliklinik Wien verfügen wir über

diagnostische Möglichkeiten zur umfassenden Lungenfunktionsprüfung und Analyse der Herz-Kreislauffunktion. Als Belastungsmodus haben wir die *rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie*, 2-Minuten-Stufen-Test, standardisiert. Diese Methode wird als kardiologisches Untersuchungsverfahren in Österreich einheitlich eingesetzt. Dieses Testmodell verwenden wir aber auch bei pulmonologischen Patienten (1, 2, 4, 5, 6).

3. Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden soll über das Verhalten von Meßdaten unter non-steady-state Belastung und über neuere Meßwerte, die durch den Einsatz der Datenverarbeitung zugänglich werden, berichtet werden.

Bei der ergometrischen Untersuchung fallen als *Meßwerte* an: Die tolerierte Belastungsstufe, das EKG zur Form- und Rhythmusanalyse und zur Bestimmung der Herzfrequenz beat-to-beat und die Blutdruckwerte. Subjektive Daten ergeben sich durch die semiquantitative Einschätzung des Ermüdungsgrades und der Intensität von z. B. pektanginösen Beschwerden. Die Leistungseinbuße entspricht der Abweichung der Ist-Leistung von einem geschlechts-, alter- und gewichtsabhängigen Soll-Wert in Prozenten. Das Auftreten abnormer Reaktionen (subjektive Beschwerden, EKG-Veränderungen, Herzfrequenz- und Blutdruckregulation) ist in Relation zur tolerierten Belastungsintensität zu werten (1, 4). In der Stufe II der nicht-invasiven Funktionsprüfung (Ergospirometrie) führt die Einbeziehung von Meßwerten, wie Sauerstoffaufnahme, Kohlensäureausscheidung, Atemzugvolumen, Ausatemströmung und fakultativ die Bestimmung alveolärer Gasproben zur Quantifizierung der Leistungsbreite. Über den Meßwert Sauerstoffaufnahme gelangen wir zu abgeleiteten Meßgrößen, wie die Anpassung an den Belastungsimpuls (VO_2 zur 1. Belastungsminute), die anaerobe Energiebereitstellung (Sauerstoffaufnahme in Relation zur geleisteten Arbeit) und die Dauerleistungsgrenze (Beziehung der Meßwertspaare Sauerstoffaufnahme und Atemminutenvolumen). Die Effektivität des Gasaustausches ist am Verhalten der Parameter der Blutgasanalyse und am Ausmaß der alveolären Ventilation (funktioneller Totraum) abzulesen. Durch den Rechereinsatz ist es uns möglich geworden, sämtliche Meßwerte halbminütig zu erfassen, mit Solldaten zu vergleichen, abgeleitete Größen on-line zu berechnen und Meßwertsveränderungen graphisch darzustellen. Voraussetzungen für die rechnerunterstützte Ergospirometrie waren Untersuchungen über das *Normalverhalten von Meßwerten* unter ansteigender Belastungsintensität (1, 2, 5).

Der Anstieg der *Herzfrequenz* über den Ruhewert in Relation zur Belastungsintensität (Watt/kg KG) ist in Abbildung 1 wiedergegeben. Für die Beurteilung des *Blutdruckverhaltens* fand sich die günstigste Beziehung zwischen Blutdruckverhalten und Belastungsintensität in der Darstellung von Blutdruckverhalten und Belastungsintensität in der Darstellung von Blutdruckanstieg (mm Hg; Y) in Relation zur relativen Belastung (Watt/kg KG; X): $Y = -2,8 + 24,1 X$; $r = 0,77$; $s_y \cdot x = 16,3$ (männliche Probanden; Alter 30—49 Jahre). Bei weiblichen Probanden war die untersuchte Bezie-

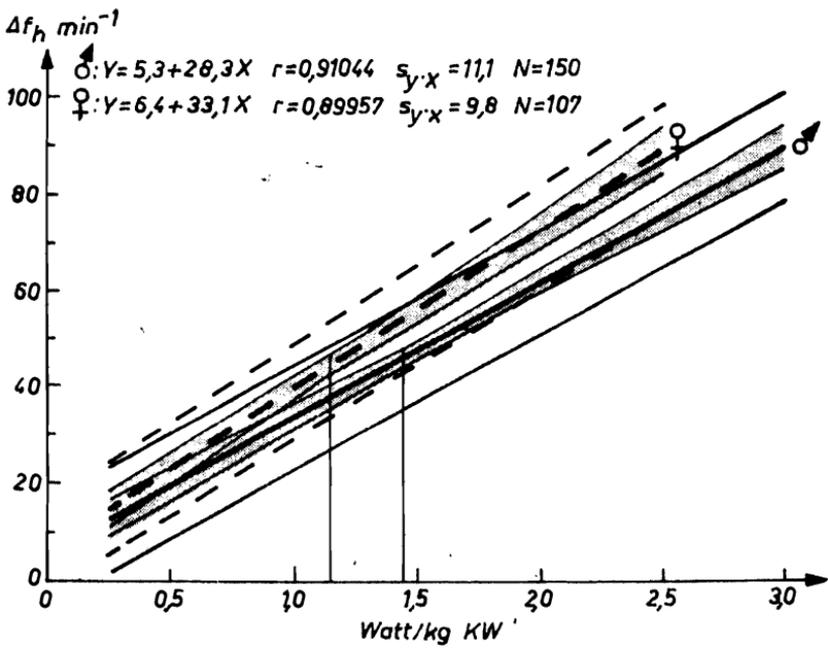


Abb. 1 Anstieg der Herzfrequenz in Relation zur Belastungsintensität (zit. aus Lit. 1)

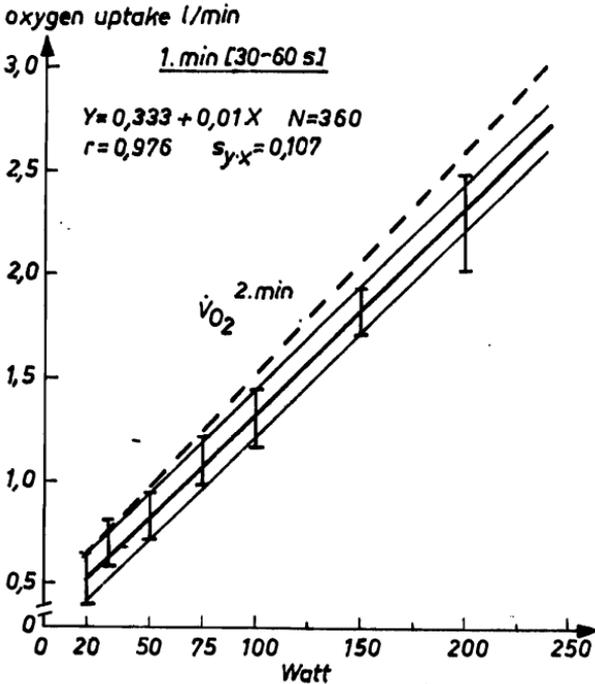


Abb. 2 Beziehung zwischen Sauerstoffaufnahme (1 min unter rektangulär-triangularer Belastung) und Wattzahl (zit. aus Lit. 2)

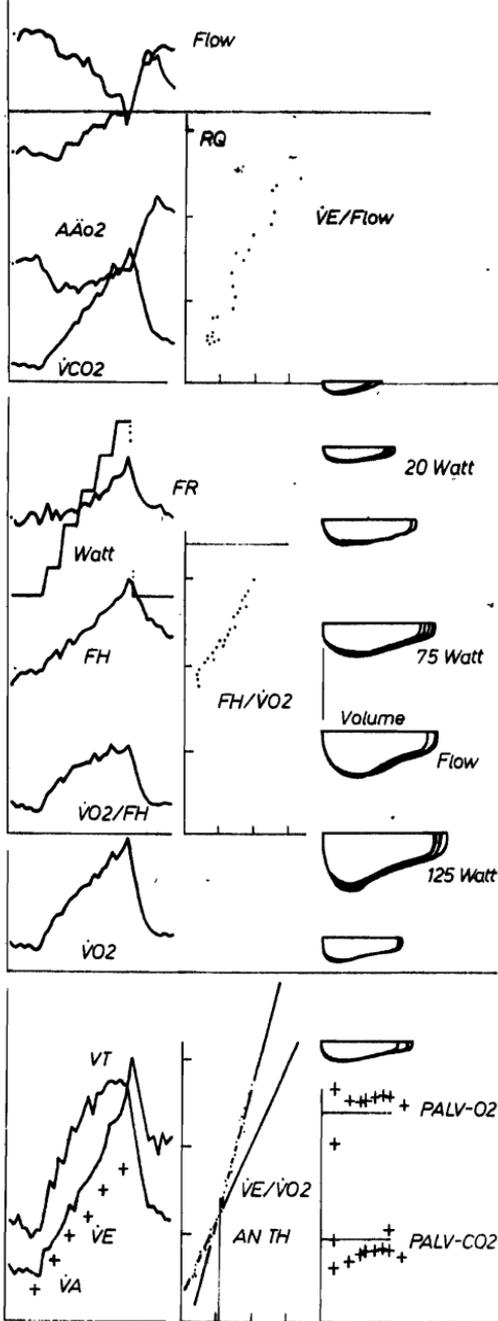


Abb. 3 Graphische Darstellung ausgewählter ergospirometrischer Meßwerte unter non-steady-state-Belastung (rechnerunterstützte Ergospirometrie) zeitlicher Verlauf und Veränderungen der Meßwerte Atemminutenvolumen (VE), alveoläre Ventilation (VA), Atemzugvolumen (VT), Sauerstoffaufnahme (VO2), Sauerstoffpuls (VO2/fh), Herzfrequenz (fh), Belastungsstufe (Watt), Atemfrequenz (fr), Kohlendioxidabgabe (VCO2), Atemäquivalent (AÄO2), respiratorischer Quotient (RQ) und Strömung (Flow). Flow-Volumen-Kurven. Korrelationsanalysen zwischen den Meßwerten VE/Flow, fh/VO2 und VE/VO2 (Bestimmung der anaeroben Schwelle - an TH). Verhalten alveolärer Gasproben (palv O2; palv CO2) in Relation zur VO2

hung weniger eng, und unter geringer Belastungsintensität zeigte sich ein etwas größerer Druckanstieg.

Die Messung der *Sauerstoffaufnahme* in halbminütigen Intervallen ermöglichte die Berechnung der in Abbildung 2 gezeichneten Beziehung zwischen Sauerstoffaufnahme zur 1. Belastungsminute und der Belastungsintensität. Eine gleichwertig gute Beziehung fanden wir zwischen der Sauerstoffaufnahme zur 2. Minute (Y; l/min) und der Belastungsintensität (X; Watt): $Y = 0,435 + 0,0108 X$; $r = 0,966$; $s_{y \cdot x} = 0,138$; $N = 376$; range: 20—200 Watt. Geschlechtsspezifische Unterschiede waren nicht festzustellen. Der Einfluß des Körpergewichtes wurde insofern berücksichtigt, als Probanden mit einem Broca-Index von 92—105 in die Berechnungen aufgenommen wurden.

Die Beziehung des *Atemminutenvolumens* (l/min; Y) zur 2. Belastungsminute zur Belastungsintensität (X; Watt) war mit der linearen Gleichung $Y = 11,07 + 0,285 X$ ($r = 0,944$; $s_{y \cdot x} = 4,8$; Belastungsintensität unter der Ausdauerleistungsgrenze) zu beschreiben (Abb. 3). Der Beginn einer Hyperventilation, sei es aus emotionellen Gründen oder infolge metabolischer Azidose, wird durch die Abweichung vom Sollwert angezeigt.

Für die Vorhersage ventilatorischer Funktionsreserven bewährt sich die Beziehung zwischen höchster momentaner *Ausatemströmung* (Flow-Volumen-Analyse unter Belastung) und Atemminutenvolumen: Y (Flow l/sec) = $-0,005 + 0,0455 X$ (Atemminutenvolumen, l/min); $r = 0,95$; $s_{y \cdot x} = 0,134$.

Die *Reproduzierbarkeit* der Meßwerte Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme ist ausgezeichnet, größere Abweichungen ergeben sich für die Blutdruckmessungen.

Bereits während der Untersuchung wird eine Kenngröße, ein Index für die *anaerobe Energiebereitstellung* errechnet. Hierbei wird der kalorische Wert der Sauerstoffaufnahme über dem Ruhewert in Relation zum Energiebedarf für eine Belastungsstufe unter steady-state Bedingungen gesetzt. Da unter 2-Minuten-Stufen die aktuelle Sauerstoffaufnahme dem steady-state-Wert nachhinkt, wird das aerobe Energiedefizit durch anaerobe Energiebereitstellung zu decken sein: Durch die Sauerstoffspeicher Myo- und Hämoglobin, durch den Abbau von ATP und Kreatinphosphat, sowie überwiegend durch Glykolyse. Die absolute Größe des Meßwertes ist von Interesse zur Beurteilung von Trainierten. Bei Patienten ist der prozentuelle Anteil des anaeroben Energiekompartiment diagnostisch wichtig: Bei verminderter Volumsleistung beträgt die anaerobe Energiebereitstellung 30 bis 40% des Energiegesamtbedarfes der Muskelarbeit (2).

Die graphische Darstellung von Meßwertpaaren der Sauerstoffaufnahme und des Atemminutenvolumens unter non-steady-state Belastung führt zur unblutigen Bestimmung der *Dauerleistungsgrenze* (anaerobe Schwelle). Die Treffsicherheit der Methode entspricht der Bestimmung der einsetzenden metabolischen Azidose mittels Parameter, wie Laktatanstieg über 4,0 mmol/l und Basenüberschuß (base excess) über -5 mmol/l. Die einsetzende Hyperventilation infolge der Laktatazidose verändert die lineare Beziehung zwischen Atemminutenvolumen und Sauerstoffaufnahme, wodurch bei der graphischen Darstellung durch den Rechner der Bereich der anaeroben Schwelle verlässlich und genau abgelesen werden kann. Wie für die maximale

Sauerstoffaufnahme können wir den Altersgang der Dauerleistungsgrenze bei untrainierten Probanden angeben (anaerobe Schwelle in l/min Sauerstoffaufnahme = $2,63 - 0,02 X$; X = Alter in Jahren; $r = -0,63$). Sofern Koronarkranke den Test nicht wegen Beschwerden vorher unterbrechen, finden wir ihre Dauerleistungsgrenze unter dem Durchschnittswert gelegen. Als Kontrast liegt die Dauerleistungsgrenze von z. B. ausdauertrainierten Skilangläufern mit 3,6 l/min VO_2 über der maximalen Sauerstoffaufnahme von Normalpersonen (4, 6, 8).

Für pulmonologische Aspekte der Leistungsminderung hat sich in unserem Labor der Vergleich der Flow-Volumen-Kurven unter Belastung mit der Flow-Volumen-Kurve im forcierten Vitalkapazitätsmanöver bewährt. Bei Probanden mit normaler Atemmechanik liegt der maximale Flow-Wert unter Belastung noch deutlich unter dem Flow-Wert bei 50% der forcierten Vitalkapazität. Wir haben hierfür den Begriff *Flowreserve* geprägt. Beim Patienten mit obstruktiver Lungenerkrankung ist die Flow-Volumen-Kurve bei Belastungsabbruch mit der Kurve aus dem Vitalkapazitätsmanöver deckungsgleich, sofern sich nicht noch Effekte der dynamischen Kompression überlagern. Aus den angegebenen Beziehungen zwischen Belastungsintensität und Atemminutenvolumen und Atemminutenvolumen zu Flow können die funktionellen Reserven vorhergesagt werden.

Durch fakultative Analyse endexpiratorischer, somit alveolärer Gasproben während der einzelnen Belastungsstufen können wir das Verhalten der *alveolären Ventilation*, des funktionellen Totraumes verfolgen. Bei Normalpersonen fällt der funktionelle Totraum von ca. 30% auf 12—15% ab. Bei Patienten mit großem funktionellen Totraum, z. B. Emphysem, verändert sich der Totraumanteil im Vergleich zum Ruhewert nicht. Durch Zuordnung von arteriellen Blutgaswerten zu den alveolären Gasproben wird das Verhalten der arterio-alveolären Gasdruckdifferenzen graphisch dokumentiert.

4. Schlußfolgerung

Die Vorteile der non-steady-state Belastung für die Fahrradergometrie zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit sind folgende: Der Proband hat sich an eine ansteigende Belastungsintensität anzupassen, dieser Vorgang vollzieht sich rasch bei geringen Anteilen an anaerober Energiebereitstellung; der Zeitaufwand ist minimal; die 2-Minuten-Intervalle genügen, um die Veränderung von Meßwerten sicher zu beurteilen ohne erhöhtes Risiko für den Patienten; durch symptom-limitierte Ausbelastung werden limitierende Faktoren der kardio-pulmonalen Leistungsfähigkeit sicher erkannt; der Proband erholt sich rasch; die Meßwerte sind gut reproduzierbar; durch die rechnerunterstützte Ergospirometrie gelangen wir zu einer quantifizierenden Beschreibung des physischen Leistungsvermögens mit Ist-Soll-Wertvergleich und Berechnung von abgeleiteten Meßgrößen bereits während der Untersuchung, wodurch kardiologischen und pulmonologischen Fragestellungen gerecht wird.

Literatur

1. *Reiterer, W.*: Methodik eines rektangulär-triangularen Belastungstestes. *Herz/ Kreislauf*, 7 (1975), 457—462
2. *Reiterer, W.*: Evaluation of physical performance by rectangular-triangular bicycle ergometry and computer-assisted ergospirometry. *Basic. Res. Cardiol.* 71 (1976), 482—503
3. *Reiterer, W.*: Computer assisted evaluation of ergospirometric parameters and central hemodynamics in exercise testing. In: *Computers in Cardiology*, St. Louis 1976, p. 265—267. IEEE Catalog No. 76CH1160-1C
4. *Reiterer, W.*: Kriterien der körperlichen Leistungsfähigkeit. *Wien. med. Wschr.* 127 (1977), Suppl. 42
5. *Reiterer, W.*: Relevanz ergospirometrischer Befunde aus kardiologischer und pulmonologischer Sicht. Tagungsbericht der Arbeitsgemeinschaft für klinische Atemphysiologie, Österr. Gesellschaft f. Lungenerkrankungen und Tbc. Graz 1977, S. 63—72
6. *Reiterer, W., H. Czitober*: Die Wertigkeit verschiedener ergometrischer Belastungsformen in der Beurteilung von beta-Rezeptorenblockern. *Zeitschrift f. Kardiologie*, Suppl. 5 (1978), S. 79
7. *Bachl, N., W. Reiterer, L. Prokop, H. Czitober*: Bestimmungsmethoden der anaeroben Schwelle. *Österr. Journal f. Sportmedizin*, 8 (1978), 9—12
8. *Reiterer, W., N. Bachl, H. Czitober, L. Prokop*: Verlaufsbeobachtung über die Dauerleistungsfähigkeit von Skilangläufern mittels rechnerunterstützter Ergospirometrie. *Österr. Journal f. Sportmedizin*, 9 (1979), 8—12

OA Dr. med. *W. Reiterer*, FCCP.

I. Medizinische Abteilung
der Allgemeinen Poliklinik der Stadt Wien
Mariannengasse 10
A-1090 Wien, Österreich