

## Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO<sub>2</sub>max)

Meyer T, Kindermann W  
 Institut für Sport- und Präventivmedizin  
 Fachbereich Klinische Medizin der Universität des Saarlandes, Saarbrücken

### Zusammenfassung

Die maximale Sauerstoffaufnahme stellt für die ergometrische Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit einen zuverlässigen, nichtinvasiv meßbaren Parameter dar. Eine adäquate Bestimmung erfordert die Beachtung verschiedener methodischer Erfordernisse. Anhand der maximalen Sauerstoffaufnahme kann die aerobe Leistungsfähigkeit sowohl im Längsschnitt als auch auf der Basis vorhandener Normwerte beurteilt werden. Für die Ableitung von Trainingsempfehlungen ist jedoch zu beachten, daß validierte submaximale (Schwellen-)Werte zumeist exaktere Angaben liefern.

### Einleitung und Definition

Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO<sub>2</sub>max) ist die klassische Meßgröße zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit - insbesondere der Ausdauerleistungsfähigkeit - und bezeichnet die maximale Menge an Sauerstoff, die bei schwerer körperlicher Arbeit aufgenommen werden kann. Sie gilt als „Bruttokriterium“ der kardio-pulmonal-metabolischen Kapazität, da sie alle an der Leistungserbringung beteiligten Mechanismen umfaßt. Dazu gehören die äußere Atmung, der Gasaustausch in der Lunge, das Herzzeitvolumen (HZV), der O<sub>2</sub>-Transport im Blut, die belastungs-gerechte Verteilung des HZV (einschließlich kollateraler Vasokonstriktion) sowie die O<sub>2</sub>-Aufnahme in die Arbeitsmuskulatur (kurze Diffusionswege, metabolische Kapazität). Einige dieser Teilbereiche können durch Training verändert werden (z.B. HZV, metabolische Leistung der Muskulatur), andere sind nicht oder kaum einflußbar (Gasaustausch). So weisen Ausdauersportler wie Langstreckenläufer, Radfahrer oder Triathleten eine höhere maximale Sauerstoffaufnahme auf als Un-

trainierte. Eine Bestimmung der VO<sub>2</sub> max wird einerseits im Leistungssport zur Einschätzung des aktuellen Ausdauertrainingszustandes vorgenommen. Andererseits dient sie in der inneren Medizin zur orientierenden Beurteilung des Schweregrads verschiedener kardiopulmonaler Erkrankungen bzw. der resultierenden körperlichen Einschränkungen. Darüber hinaus kann die VO<sub>2</sub>max zur Erfolgskontrolle einer Behandlung eingesetzt werden.

### Normwerte

Die VO<sub>2</sub>max wird absolut in Litern pro Minute angegeben, ein Bezug auf die Körpermasse ist jedoch für Vergleiche zwischen verschiedenen Personen zumeist sinnvoll, weil einsetzbare Muskelmasse, Herzgröße und Blutvolumen sich in Abhängigkeit vom Körpergewicht unterscheiden. Schwerere Menschen besitzen durchschnittlich mehr Muskelmasse, größere Herzen und mehr Blut, so daß sich bei identischem Ausdauertrainingszustand gegenüber „Leichtgewichten“ eine höhere VO<sub>2</sub>max ergibt. In Sportarten, in denen das Körpergewicht nicht selbst getragen werden muß, kann ein Vergleich der Absolutwerte aussagekräftiger sein (z.B. Rudern, Bahnradfahren, Schwimmen). In diesen Disziplinen haben Individuen mit größerer Körpermasse Vorteile - daher beispielsweise die getrennten Leichtgewichtswettbewerbe beim Rudern. Eine ausschließliche Zunahme des Körpergewichts führt somit zu einer Verringerung der gewichtsbezogenen VO<sub>2</sub> max.

Hochausdauertrainierte Läufer erzielen maximale Sauerstoffaufnahmewerte von bis zu 90 ml/min • kg, die höchsten Absolutwerte werden bei Radfahrern und Rudern mit etwa 6 l/min gemessen. Nicht ausdauertrainierte gesunde Erwachsene liegen je nach Geschlecht und Alter zwi-

schen 2 und 3,5 l/min bzw. 30 und 50 ml/min • kg; bei herzkranken Patienten werden Werte um 1-1,5 l/min entsprechend 15-20 ml/min • kg gemessen. Ab dem 30. Lebensjahr ist mit einer jährlichen Abnahme der maximalen Sauerstoffaufnahme von etwa 1% zu rechnen. Eine VO<sub>2</sub>max von <12 ml/min • kg wird von der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie als meistgenutzter ergometrischer Richtwert genannt, um die Indikation zur Herztransplantation zu stellen. Die Weber-Klassifikation der Herzinsuffizienz (5) bezieht für eine funktionelle Bewertung ebenfalls die maximale Sauerstoffaufnahme ein. Die VO<sub>2</sub>max liegt bei Frauen in der Regel etwa 10-15% unter jener der Männer. Eine detailliertere Zusammenstellung von Normwerten, orientiert an Geschlecht, Alter, Gewicht und Art der durchgeführten Ergometrie, kann (4) entnommen werden.

### Interpretation (Laktatschwellen vs. VO<sub>2</sub>max)

Die maximale Sauerstoffaufnahme kann zur Beurteilung der aeroben Leistungsfähigkeit herangezogen werden. Es ist jedoch zu beachten, daß submaximale Parameter (z.B. Laktatschwellen) zumeist besser mit Wettkampfleistungen korrelieren. Problematisch sind auch von der VO<sub>2</sub> max abgeleitete Empfehlungen für das Training, da einerseits Meßprobleme im Maximalbereich (siehe unter „Praktische Hinweise“) in Betracht zu ziehen sind, andererseits keine gesicherten Prozentsätze für bestimmte Trainingsformen vorliegen. Bei Untrainierten können aerobe Trainingseffekte ab einem Intensitätsbereich von 50-60% der VO<sub>2</sub>max erwartet werden, bei Trainierten liegen diese Prozentsätze geringfügig höher.

### Praktische Hinweise

Die korrekte ergometrische Bestimmung der VO<sub>2</sub>max setzt eine hohe Ausbelastung voraus, die anhand verschiedener Kriterien beurteilt wird (2, 3; Tab. 1). Am eindeutigsten ist das sogenannte „levelling off“ (Abb. 1) - eine konstant bleibende Sauerstoffaufnahme trotz zunehmender äußerer Belastung. Häufig ist jedoch ein solches Plateau nicht zuverlässig zu erken-

# STANDARDS IN DER SPORTMEDIZIN

nen. Weitere Anhaltspunkte des Ausbelastungsgrads sind die im Test erreichte höchste Herzfrequenz (Faustformel für max. Herzfrequenz s. Tab. 1), die maximale Laktatkonzentration (>8-10 mmol/l; Be-

Objektive Ausbelastungskriterien	
levelling off	O <sub>2</sub> -Anstieg < 150 ml/min
max. Herzfrequenz	220 – Lebensalter (Laufband) 200 – Lebensalter (Fahrrad)
max. Laktatkonzentration	8-10 mmol/l
max. Respiratorischer Quotient	> 1,1-1,15
max. Atemäquivalent	> 35

Tab. 1: Kriterien zur Beurteilung des Ausbelastungsgrades bei Tests zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme (modifiziert nach 2,4)

stimmung in den ersten Nachbelastungsminuten) sowie spirometrische Parameter (max. Respiratorischer Quotient > 1,1 bzw. ergänzend – ohne krankhafte Veränderung des physiologischen Totraums – max. O<sub>2</sub>-Atemäquivalent > 35). Je nach Verfügbarkeit dieser Parameter stellt oftmals nur eine kombinierte Betrachtung sämtlicher Kriterien eine befriedigende

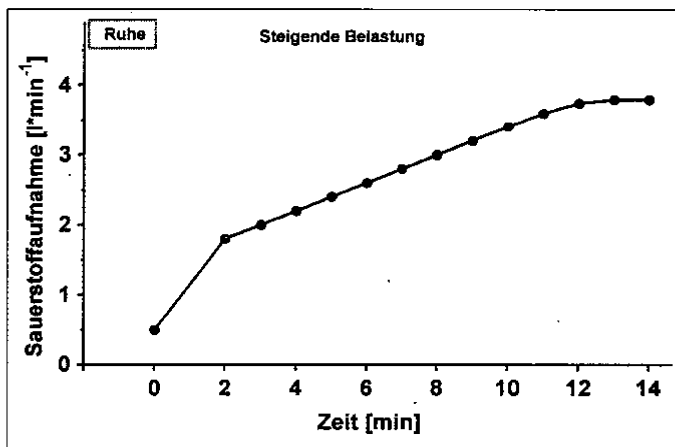


Abbildung 1: Verlauf der Sauerstoffaufnahme bei ansteigender Belastung; levelling off ab der 12. Minute

Lösung dar - zusammen mit dem subjektiven Eindruck des erfahrenen Untersuchers und eventuell vorliegenden Ergebnissen von früheren Untersuchungen.

Für Untrainierte stellt eine hinreichende Ausbelastung in der Praxis oft das wesentliche Problem dar, weil keine Gewöhnung an sportliche Erschöpfung vorliegt. Daher extrapolieren einige Untersucher von submaximalen Werten auf die VO<sub>2</sub>max. Dieses Vorgehen verringert die Präzision der Bestimmung erheblich. Wird auf eine Spirometrie verzichtet und die Sauerstoffaufnahme über Faustformeln (für Fahrradergometrie etabliert:

500 ml + 10 x Watt) aus der erreichten Leistung ermittelt, vergrößert sich der Fehler.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Art der Belastung. In der Regel ist die auf dem Laufband erreichbare Sauerstoff-

aufnahme wegen der größeren eingesetzten Muskelmasse (=mehr beteiligte Mitochondrien) höher als bei der Fahrradergometrie oder Handkurbelergometrie.

Radspezifisch Trainierte sind jedoch in der Lage, auf dem Fahrrad ihre tatsächliche VO<sub>2</sub>max zu mobilisieren, da durch die sportartspezifische Bewegung die trainierte Muskulatur beansprucht und optimal ausbelastet werden kann. Entsprechendes gilt für die Ruderergometrie bei Ruderern. Man spricht daher bei nicht auf dem Laufband erhobenen Maximalwerten häufig von der VO<sub>2</sub>peak, der testspezifisch

maximalen Sauerstoffaufnahme. Erwähnenswert ist, daß in den USA die VO<sub>2</sub>max fast ausschließlich auf dem Laufband bestimmt wird. Es wird bei den üblichen Protokollen (nach Bruce oder Balke) stufenweise neben der Geschwindigkeit auch die Neigung erhöht. Auf diese Weise versucht man, die koordinativen Schwierigkeiten bei hohen Intensitäten für untrainierte Patienten zu minimieren.

Darüber hinaus muß das gewählte Belastungsprotokoll in die Bewertung einbezogen werden, denn übliche stufenförmige Tests (mit zwei- bis dreiminütiger Stufenlänge) stellen trotz vieler sonstiger Vorteile für die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme keine Ideallösung dar. Bei bekannter Leistungsfähigkeit im aerob-anaeroben Übergang kann eine konstante Belastung im anaeroben Bereich vorgegeben werden, die bis zur Erschöpfung oder bis zum Auftreten des levelling off durchgehalten werden soll. Al-

ternativ kann ein steiles stufen- oder rampenförmiges Protokoll gewählt werden. In jedem Falle sollte eine Gesamtbelastungsdauer von etwa 8 bis 15 Minuten angestrebt werden (1), weil diesseits und jenseits dieser Grenzen wegen einer längeren Anlaufzeit der O<sub>2</sub>-liefernden Prozesse bzw. muskulärer Ermüdung nicht die tatsächliche VO<sub>2</sub> max gemessen werden kann. Bei schlecht belastbaren Patienten kann im Einzelfall die angegebene Mindestdauer unterschritten werden.

Moderne Spirometriegeräte erlauben zwar eine hohe Präzision, und die Reproduzierbarkeit der Messungen ist zumeist sehr gut. Aber bei sehr intensiven Belastungen, die für die VO<sub>2</sub>max-Bestimmung unumgänglich sind, ist durch hohe Atemzeitvolumina, Speichelproduktion und Einflüsse schneller Bewegungen (Undichtigkeiten, Erschütterungen) mit Meßungenauigkeiten von bis zu 5% zu rechnen, die bei der vergleichenden Beurteilung im Quer- und Längsschnitt zu berücksichtigen sind. Beim Einsatz von sogenannten „breath by breath“-Systemen muß im Vergleich zu Mischkammergeräten (Sammlung der Ausatemluft über definierte Zeiträume) beachtet werden, daß eine adäquate Mittelung der Rohwerte über einen entsprechenden Zeitraum stattfindet, um artefizielle Resultate zu vermeiden. Eine Durchsicht der Rohdaten auf Plausibilität im Bereich der Maximalwerte ist in der Regel unerlässlich.

## Literatur

1. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, Whipp BJ: Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol* 55 (1983) 1558-1564.
2. Duncan GE, Howley ET, Johnson BN: Applicability of VO<sub>2</sub>max criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Med Sci Sports Exerc* 29 (1997) 273-278.
3. Howley ET, Bassett jr. DR, Welch HG: Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27 (1995) 1292-1301.
4. Lentner C (ed.): Geigy Scientific Tables - Volume 5: Heart and Circulation. CIBA-GEIGY, Basel, 1990, 209-213.
5. Weber KT, Janicki JS: Cardio pulmonary exercise testing. WB Saunders Co, Philadelphia, 1986.

Anschrift des Verfassers:  
Dr. Tim Meyer  
Inst. für Sport- und Präventivmedizin  
Universität des Saarlandes  
66041 Saarbrücken