

## 4 9-Felder-Grafiken nach Wasserman

### Das Wichtigste in Kürze

Wir besprechen hier den Aufbau der 9-Felder-Grafiken nach Wasserman und die Zuordnung der Felder zu den einzelnen Organbereichen. Die drei Beiträge zur 9-Felder-Grafik (9-FG) – Kardiozirkulation – Ventilation – Gasaustausch – stehen im Mittelpunkt unserer Aufmerksamkeit. Die von Karlman Wasserman (► Abb. 4.1) und seiner Arbeitsgruppe vorgeschlagene Systematik beinhaltet eine grafische Wiedergabe der spiroergometrisch erhobenen Messdaten mittels der 9-Felder-Grafik (9-Panel Plot). Diese Darstellung ist durch die Verfügbarkeit der Breath-by-Breath-Methode (vielfache Messungen über einen Atemzug) in Verbindung mit einer unmittelbaren Datenanalyse möglich geworden – ähnlich wie die „Zeitreihenanalysen“ im Schlaflabor. Die Messungen basieren praktisch immer auf einer Rampenbelastung (s. Kap. 2.3.5).

In einer didaktischen Systematik hat es sich bewährt, die 9-FG hinsichtlich ihrer Aussagen zur Zirkulation und Leistung, zur Ventilation und zum Gasaustausch zu besprechen.

In diesen 3 Teilkapiteln werden die entsprechenden Fachbegriffe wie  $\dot{V}O_2$  peak,  $\dot{V}O_2$  max, Atemgrenzwert, Atemzugvolumen, Totraumventilation und End-tidal-Partialdrücke (PET) für  $O_2$  und  $CO_2$  besprochen.

Wir weisen auf die grafische Analyse (Formanalyse) hin, die außerordentlich hilfreich ist und in Bildform die Dynamik der Belastungsphysiologie beschreibt. Der Leser erfährt, in welchen Feldern der 9-FG welche Messwerte dargestellt sind. Schließlich stellen die Autoren kurz eine standardisierte Form der Befundmitteilung vor.

### 4.1 9-Felder-Grafik (9-FG) nach Wasserman – klassische und „neue“ Version (2013)

Alle Felder haben eine x-Achse und i. d. R. mehrere y-Achsen ( $y_1$ ,  $y_2$ , ggf. auch  $y_3$  und  $y_4$ ). Hier ist sinnvoller Platz für individuelle Anordnungen und Vorlieben.

Beispiel: Meist findet sich die Atemreserve [BR] in Feld 8 als  $y_2$ , mitunter taucht sie aber auch in Feld 1 als  $y_3$  (neben VE und Watt) auf.

Die Zunahme weiterer y-Achsen ( $y_3$ ,  $y_4$ ) erhöht den Informationsgehalt der Felder, die Komplexität geht aber ein wenig auf Kosten der Übersichtlichkeit.

In der „klassischen“ Anordnung der Neun Felder (9 Panel Plot) sind die x-Achsen mit dem Zeitstrahl (sechs Felder, nämlich 1, 2, 3, 6, 8, 9) oder mit physiologischen Va-



Abb. 4.1 Prof. Karlman Wasserman aus Los Angeles zu Besuch bei der Spiroergometrie-Arbeitsgruppe in Mainz im Januar 2004 (Foto mit freundlicher Genehmigung von G. Borkenhagen).

riablen (drei Felder, nämlich Feld 4 [ $\dot{V}CO_2$ ], Feld 5 [ $\dot{V}O_2$ ], Feld 7 [VE]) belegt.

Die „neue“ Anordnung (2013) variiert insofern von der klassischen Darstellung, als alle sechs Felder mit Zeitbezug auf der x-Achse jetzt die linke und die mittlere Spalte ausfüllen, während die drei Felder mit den physiologischen Variablen der rechten Spalte zugeordnet sind. Dadurch wird es ermöglicht, innerhalb der Spalten die Bestimmung der Schwellen mit einer vertikalen Linie auf der Zeitachse zu vergleichen. Die Felder stehen in der neuen Anordnung auch eher in der Reihenfolge der systematischen Datenanalyse: Beginn mit der Sauerstoffaufnahme und Leistung, dann kardiale Funktion mit Herzfrequenz und Sauerstoffpuls, anaerobe Schwelle mit V-Slope und Atemäquivalentkurven, dann Ventilation und Atemeffizienz und zum Schluss der Gasaustausch, die metabolische Belastung, die Atemreserve und das Atemmuster.

Die Spiroergometrie Arbeitsgruppe hat dies beim Jahrestreffen 2014 gemeinsam diskutiert, sie betrachtet den Mehrwert der „neuen“ Anordnung als eher gering und hat keine klare Empfehlung dafür ausgesprochen. Die Autoren schließen sich diesem Votum an.

## 4.2 Aufbau der 9-Felder-Grafik und Einführung

Die 9-Felder-Grafik (9-FG) wurde entwickelt, um die Fülle der Messdaten in einer übersichtlichen und geräteunabhängigen Form einheitlich auf einer Seite darzustellen. Sie wurde im Laufe der Jahre kontinuierlich weitergeführt und weist deshalb leicht abgewandelte Variationen auf. Die Grundstruktur bleibt jedoch gleich.

Einzelne Felder geben schwerpunktmäßig Informationen zu den verschiedenen Organbereichen. Dabei scheint es zunächst verwirrend, dass diese nicht zusammenhängend angeordnet sind, sondern über die 9-Felder-Darstellung „verstreut“ erscheinen. Für den Anfänger kommt erschwerend hinzu, dass der Interpretationsweg ebenfalls nicht der dargestellten Anordnung folgt, sondern man in der Grafik hin- und herspringt. Trotzdem weist die Reihenfolge der Parameter eine Logik auf.

Die 9-Felder-Grafik soll deshalb zunächst in dieser Abfolge vorgestellt werden. Die Felder sind durchgehend von 1 bis 9 nummeriert. Die Zählfolge beginnt oben links und folgt dem normalen Schriftlauf von links nach rechts und beginnt dann in der neuen Zeile wieder links.

► **x-Achsen.** Messwerte werden entweder gegen die laufende Testzeit oder gegen andere Messparameter aufgetragen. Bei einem der Hersteller wird auf der x-Achse statt der Testzeit die Wattleistung dargestellt. Diese Form der Darstellung ist sinnvoll, wenn ausschließlich mit Rampenprogrammen belastet wird, ansonsten ist eine Dateninterpretation weniger gut möglich. Die Autoren empfehlen eine Darstellung über die Zeit.

Die Zeit auf der x-Achse sollte so gewählt werden, dass der gesamte Test mit Ruhephase, Leertreten, Testphase und Erholungsbereich möglichst formatfüllend dargestellt wird. Unnötig lang gewählte Zeiten verschlechtern die Darstellung und erschweren die Interpretation. In der Praxis reicht meist eine Zeitachse über 20 min aus; für spezielle Fragestellungen (Sport- oder Arbeitsmedizin) wird man ggf. die Zeitachse mit 45–60 min einstellen.

► **y-Achsen.** Auf den y-Achsen bewährt sich eine „selbstskalierende“ Achsendarstellung (Autoskalierung, s. Abbildungen auf Umschlaginnenseite vorne).

► **Feld 1.** Ursprünglich Atemminutenvolumen vs. Testzeit, jetzt auch zusätzlich Leistung vs. Testzeit. Hier findet sich die Messung der Ventilation als Atemminutenvolumen ( $\dot{V}_E$  auf y1-Achse) über den Belastungstest bzw. in Abhängigkeit von der Leistung. In neueren Versionen ist deshalb die Wattleistung auf der y2-Achse aufgetragen.

► **Feld 2.** Herzfrequenz (HR), Sauerstoffpuls vs. Testzeit. Zentrale kardiale Funktionsgröße ist die Herzfrequenz im

Verlauf der Belastung. Dazu passt der aus der Herzfrequenz berechnete Sauerstoffpuls.

► **Feld 3.** Ursprünglich Sauerstoffaufnahme ( $\dot{V}O_2$ ), Kohlendioxidabgabe ( $\dot{V}CO_2$ ) vs. Testzeit, jetzt zusätzlich Leistung vs. Testzeit. Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidabgabe sind Größen des Energiestoffwechsels und stellen die Gesamtleistungsfähigkeit des muskulären und kardio-pulmonalen Systems dar. Auch in Feld 3 wird in neueren Versionen die Wattleistung auf der y3-Achse eingetragen, sodass visuell bereits das Verhältnis von Sauerstoffaufnahme zur Leistung zu erkennen ist.

► **Feld 4.** Kohlendioxidabgabe ( $\dot{V}CO_2$ ) vs. Atemminutenvolumen ( $\dot{V}_E$ ). Die Kohlendioxidproduktion steuert die Ventilation. Das Verhältnis von Ventilation zu Kohlendioxidabgabe stellt somit Zustände von Hyper- oder Hypoventilation sowie Veränderungen der Atemökonomie durch Totraumventilation oder ein gestörtes Ventilations-Perfusions-Verhältnis dar.

► **Feld 5.** Ursprünglich Kohlendioxidabgabe vs. Sauerstoffaufnahme, jetzt zusätzlich Herzfrequenz vs. Sauerstoffaufnahme. Nächster logischer Schritt ist die Bestimmung der aerob-anaeroben Schwelle als Maß der Ausdauerleistungsfähigkeit in Form des aerob-anaeroben Überganges VT1. Diese wird grafisch in Form der V-Slope-Darstellung aufgetragen. Es ist das einzige Feld mit der Sauerstoffaufnahme auf der x-Achse. Deshalb kann in dieser Grafik das Verhältnis von Herzfrequenz zu Sauerstoffaufnahme mit dargestellt werden. Es spiegelt in inverser Form ähnlich wie der Sauerstoffpuls den Sauerstofftransport pro Herzschlag wider. Der Begriff „V-Slope“ wurde gewählt, da er griffig die beiden betrachteten Volumina (für  $O_2$  und  $CO_2$ ) und deren Entwicklung über die Belastungsperiode beschreibt.

► **Feld 6.** Atemäquivalente (EQ  $O_2$  und EQ  $CO_2$ ) vs. Testdauer. Dieses Feld stellt die Atemäquivalente für  $O_2$  und  $CO_2$  dar. Es zeigt, wie viel ventiliert werden muss, um 1 l  $O_2$  aufzunehmen bzw. 1 l  $CO_2$  abzugeben. Der Verlauf der Kurven ermöglicht ebenfalls die Bestimmung der ventilatorischen aeroben Schwelle VT1 (wie Feld 5). Der Tiefpunkt der Atemäquivalentkurve für  $O_2$  wurde von Hollmann 1958 als Punkt des optimalen Wirkungsgrades (POW) bezeichnet. Er zeigt, dass an der ventilatorischen aeroben Schwelle der Wirkungsgrad der Ventilation im Hinblick auf die Sauerstoffaufnahme optimal ist. Die Kurvenverläufe beschreiben wie Feld 4 auch die Atemökonomie.

► **Feld 7.** Atemzugvolumen ( $V_t$ ) vs. Atemminutenvolumen ( $\dot{V}_E$ ). Das Feld beschreibt das Atemmuster. Dargestellt ist der Verlauf des Atemzugvolumens ( $V_t$ ) in Abhängigkeit von der Ventilation ( $\dot{V}_E$ ). Daraus kann die Atemfrequenz abgeleitet werden, weil das Atemminuten-

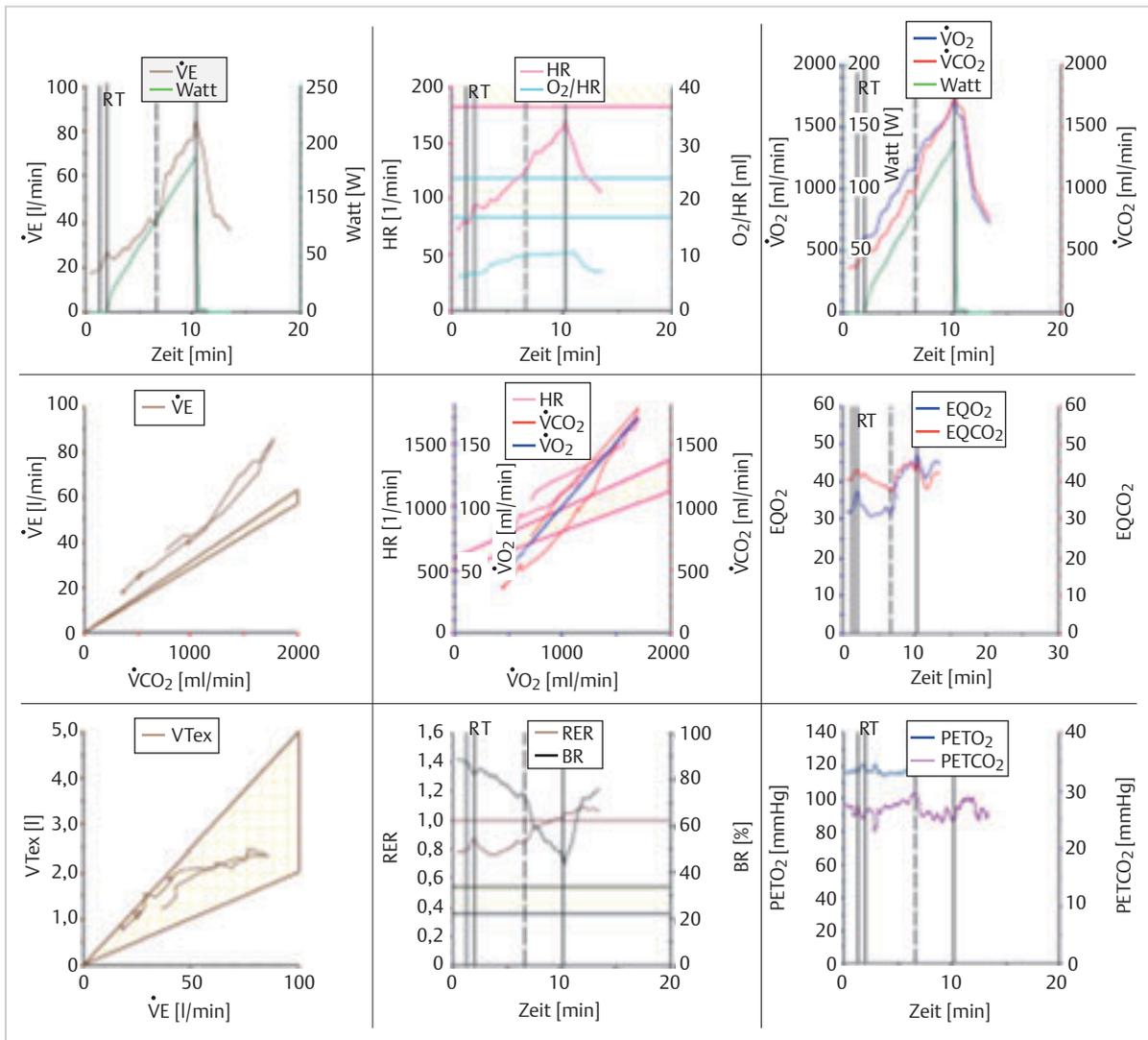


Abb.4.2 9-Felder-Grafik in der klassischen Anordnung.

volumen ja das Produkt aus Atemzugvolumen und Atemfrequenz ist. Die Atemfrequenz findet sich als Isoplethe (Linie gleicher Zahlenwerte) mit der Atemfrequenz 20 bzw. 50.

► **Feld 8.** Ursprünglich RER vs. Testzeit, jetzt zusätzlich Atemreserve (BR) in % vs. Testzeit. Der Verlauf der RER (Respiratory Exchange Ratio) kann in der Ruhephase und zu Beginn der Belastungsphase Hinweise auf willkürliche oder unwillkürliche Hyperventilation geben und stellt als maximal erreichter Wert bzw. im Verlauf der Erholung nach Belastungsabbruch das Ausmaß metabolischer Ausbelastung dar. Unter Belastung (nicht in der Erholungsphase) erreichte RER-Werte von 1,05 bis 1,15 werden als Zeichen einer guten Mitarbeit und Anstrengung interpretiert. Umgekehrt weisen maximal erreichte Werte unter

1,0 in der Regel auf einen frühzeitigen Belastungsabbruch, ohne dass Zeichen einer metabolischen Ausbelastung mit Laktatanstieg oder metabolischer Azidose entstanden sind, z. B. Abbruch wegen peripherer Limitierung bei peripherer arterieller Verschlusskrankheit oder motivationsbedingt.

► **Feld 9.** PET=Partialdruck End-tidal – endexpiratorische Partialdruckwerte für Sauerstoff (PET O<sub>2</sub>) und Kohlendioxid (PET CO<sub>2</sub>) vs. Testzeit, ergänzt ggf. durch (offline) bestimmte und zeitgerecht eingespielte Blutgaswerte (PaO<sub>2</sub>, PaCO<sub>2</sub>). Die Messung dieser Werte wurde erst durch Systeme mit zeitlich hochauflösenden Messsensoren ermöglicht. Es wird innerhalb der Expiration der Verlauf der Partialdruckwerte gemessen und der Wert unmittelbar vor erneuter Inspiration (also „end-tidal“)

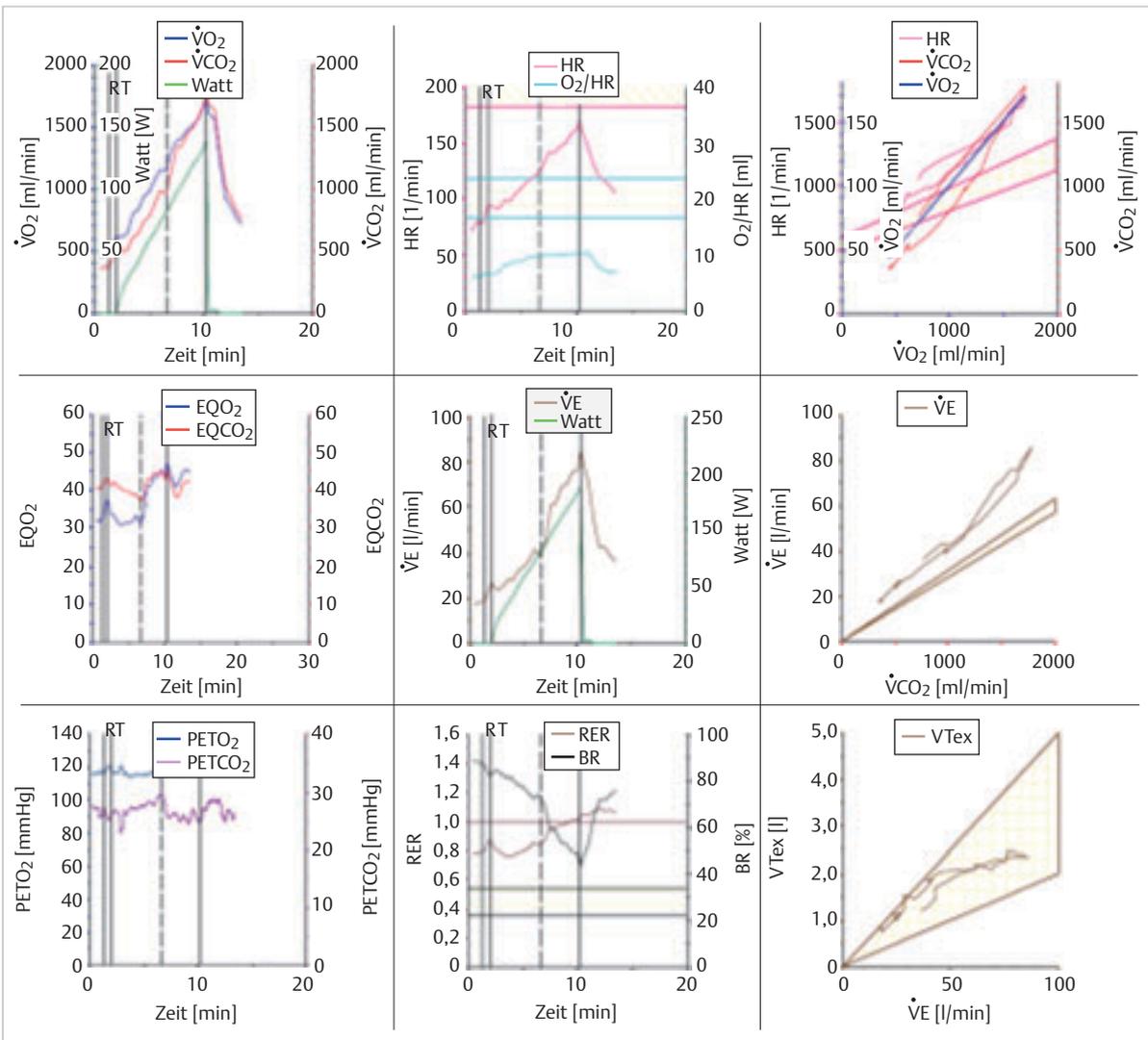


Abb. 4.3 9-Felder-Grafik in der neuen Anordnung (2013).

verwendet. Dies sollte bei Abwesenheit wesentlicher Verteilungsstörungen in der Lunge dem alveolären Partialdruck entsprechen.

Mit alten Messsystemen, die über den Douglas-Sack expiratorische Gasvolumina sammelten und darin die gemischten Gasanteile bestimmten, war diese Messung nicht möglich. Der Verlauf der Partialdruckwerte kann ebenfalls zur Bestimmung der aeroben ( $VT_1$ ) und anaeroben Schwelle ( $VT_2$ ) verwendet werden. In Relation zu arteriellen oder arterialisierten (kapillar aus dem hyperämisierten Ohr läppchen) Blutgaswerten ( $PaO_2/PaCO_2$ ) können Gasaustauschstörungen erfasst werden. Die parallel punktuell gemessenen Blutgasdaten werden in der Grafik mit dargestellt.

### Merke

Durch verschiedene Darstellung können aus den Basisdaten Informationen in unterschiedlicher Form präsentiert werden. Folgende Felder sind wechselseitig komplementär: Feld 4 und 6; Feld 2 und 5; Feld 5 und 8 sowie Feld 3 und 5.

- So wird beispielsweise in Feld 4  $\dot{V}CO_2$  gegen  $\dot{V}E$  aufgetragen. In Feld 6 wird das Verhältnis dieser beiden Werte ( $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ) als Atemäquivalent über den zeitlichen Verlauf im Test dargestellt.
- In Feld 5 wird  $\dot{V}CO_2$  vs.  $\dot{V}O_2$  aufgetragen. Der Quotient dieser Parameter entspricht der RER, die über den zeit-

lichen Verlauf in Feld 8 eingezeichnet ist. Zudem wird in Feld 5  $\dot{V}O_2$  vs. HR dargestellt; der Quotient dieser beiden Parameter findet sich in Feld 2 als  $O_2$ -Puls.

- Auch Feld 3 und Feld 5 stellen vergleichbare Informationen in Bezug auf  $\dot{V}O_2$  und  $\dot{V}CO_2$  in unterschiedlicher Form dar.

Die korrespondierenden Felder stellen also im Wesentlichen gleiche Informationen in unterschiedlicher Form dar, damit vereinfachen und ergänzen sie aber die visuelle Beurteilung physiologischer oder pathophysiologischer Phänomene.

Dies sind bewährte Vorgaben. Jeder Anwender kann jedoch in einer individuell gewünschten Darstellung davon abweichen, bzw. er kann auch neue Felder generieren.

## 4.3 9-Felder-Grafik: Felder zur Zirkulation und Leistung

### 4.3.1 Kardiozirkulatorische Felder im Überblick

Wir besprechen hier

- $\dot{V}O_2$  peak,  $\dot{V}O_2$  max,
- $\dot{V}O_2$  bei VT 1,
- $\Delta\dot{V}O_2$  zu  $\Delta$ Watt (aerobe Kapazität),
- Herzfrequenz, Herzfrequenzreserve und  $O_2$ -Puls sowie
- die entsprechende grafische Darstellung in Feld 3, 2, 5 und 8.

Zu den Feldern der Kardiozirkulation und Leistung korrespondieren folgende Parameter, die üblicherweise tabellarisch erfasst werden:  $\dot{V}O_2$  peak / max, Watt,  $\dot{V}O_2$ /kg Körpergewicht,  $\dot{V}O_2$  % Soll,  $\dot{V}O_2$ VT 1, aerobe Kapazität ( $\Delta\dot{V}O_2/\Delta$ WR),  $O_2$ -Puls, HR, HRR, RER, RR.

#### Merke

Die Zirkulation „verbindet“ den externen Gasaustausch (äußere Atmung) mit dem internen Gasaustausch (innere Atmung).

► **Felder 3, 2, 5 sowie 4 und 8.** Die Felder 3, 2 und 5 sind für kardiozirkulatorische Gesichtspunkte primär informativ – sie beschreiben die Brutto-Leistungsfähigkeit des Organismus. Das Feld 8 gibt Information über die Metabolik und die Mitarbeit. Feld 4 bietet bei der Interpretation sekundärer ventilatorischer Effekte – verursacht durch die Pathologie in der Kardiozirkulation – zusätzliche Informationen, wenn auch dieses Feld nicht typischerweise den primären „Kardio-Feldern“ zuzuordnen ist. Im Detail wird Feld 4 in Kap. 4.5.3 besprochen.

Nach dem Prinzip des 3-Kompartiment-Modells nach K. Wasserman kann ein „Zahnrad“ (hier z.B. Ventilation,

Lunge) die Fehlfunktion eines andern Zahnrades (hier Kardiozirkulation, Herz) partiell kompensieren.

Zur Orientierung sind die 9-Felder-Grafik (9-FG) eines Patienten mit Herzinsuffizienz und Oszillationen sowie das Schema mit Heraushebung des „Kardio-Blicks“ nachfolgend aufgeführt (► Abb. 4.4 u. ► Abb. 4.5).

► **Interpretation.** Zur Interpretation der kardiozirkulatorischen Felder gehören

- Zahlenwerte an den jeweiligen Achsen,
- die in Bezug auf die dargestellten Sollwertbereiche zu sehen sind, sowie
- die Formanalyse der Kurven, wie z. B. Steigung (Slope), Entwicklung (Dynamik) und Normabweichung.

Die ► Abb. 4.6 zeigt beispielhaft an Feld 3, dass bei der Beurteilung der in den Feldern abgebildeten Daten und deren Verläufe neben den absoluten Zahlenwerten insbesondere die Formanalyse zu beachten ist, worunter die Steigung (Slope) und die allgemeine Entwicklung (Dynamik) verstanden wird.

In ► Abb. 4.6a zeigt sich eine eindeutige Linearität von  $\dot{V}O_2$  ([ml/min], blau) parallel zur Leistung ([Watt], grün), die  $\dot{V}O_2$ -Sollwerte werden sogar überschritten, es findet eine Überkreuzung von  $\dot{V}CO_2$  und  $\dot{V}O_2$  (RER > 1) statt. Die VT 1 (grünes Dreieck) liegt im Sollwertbereich für  $\dot{V}O_2$ . Dagegen zeigt ► Abb. 4.6b ein völlig anderes Bild mit „groben haarnadelförmigen Schwingungen“ der  $\dot{V}O_2$  (blau) und einem ausgeprägten horizontalen Verlauf trotz steigender Leistung (grün). Die Dynamik der Sauerstoffkurve unter Belastung unterscheidet sich in diesem Fall gravierend von der in ► Abb. 4.6a.

#### Merke

Aus „typischen Kinetikverläufen“ kann bedingt auf die zugrunde liegende pathophysiologische Störung geschlossen und das Krankheitsbild eingegrenzt werden.

► **Ergänzungen.** Die ursprüngliche Darstellung nach Wasserman der Felder 3, 2, 5 und 8 wird von den meisten Geräteherstellern um eine weitere y-Achse für die Rampendarstellung in Feld 3, um den „Erwartungskorridor der HR“ und die Winkelhalbierende für die VT 1-Bestimmung in Feld 5 ergänzt. Diese erweiterte Darstellung wurde durch H. Eschenbacher (Fa. Jaeger, Würzburg) entwickelt.

Im nachfolgenden Teil sollen die Felder im Einzelnen mit ihren charakteristischen Befunden dargestellt werden.

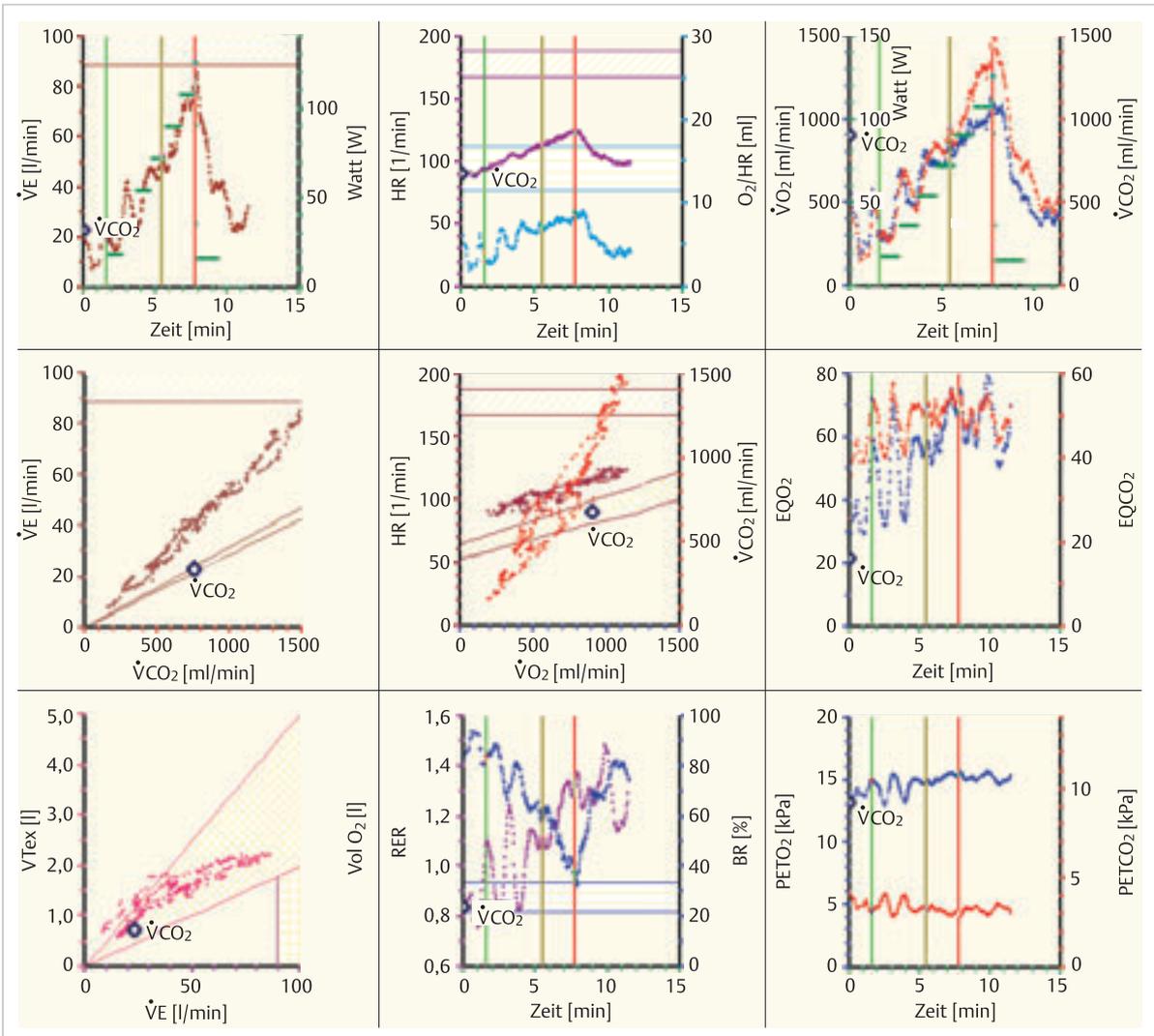


Abb. 4.4 Übersicht der 9-Felder-Grafik bei einem Patienten mit Herzinsuffizienz, basierend auf K. Wasserman, hier bereits mit Modifikationen in den Feldern 3, 5, 7 und 8.

1	HR O <sub>2</sub> -Puls Plateau Overshoot	$\dot{V}O_2$ $\dot{V}CO_2$ RER = 1 Rampe aerobe Kapazität
$\dot{V}E$ $\dot{V}CO_2$ Slope Offset	HR Korridor VT1, VT2	6
7	RER (BR) (Laktat)	9

**Abb. 4.5** Schema der 9-Felder-Grafik mit „Kardio-Blick“ (zu ▶ Abb. 4.4). Die „primären Kardio-Felder“ sind blau, das Feld 4 und Feld 8 mit den „sekundären ventilatorischen Effekten“ sind hellblau dargestellt. In den Feldern sind darüber hinaus die typischen Messparameter und die eventuell zu beobachtenden „kinetischen Aspekte“ aufgeführt, die in diesem Kapitel besprochen werden. HR: Herzfrequenz; O<sub>2</sub>-Puls: Schlagvolumen (SV) × arteriovenöse Ausschöpfung (AVDO<sub>2</sub>); Plateau: Sistieren von SV × AVDO<sub>2</sub>; Overshoot: kurzer Postbelastungs-Peak von HR;  $\dot{V}O_2$ : Sauerstoffaufnahme;  $\dot{V}CO_2$ : Kohlendioxidabgabe; RER: Respiratory Exchange Rate; Rampe: Watt/min; aerobe Kapazität:  $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ ;  $\dot{V}E$ : Minutenvolumen; Slope: Steigung; Offset: Y-Achsendurchgang von  $\dot{V}E$ ; Korridor: erwartete HR-Entwicklung; VT1/VT2 = ventilatorische Schwelle 1 bzw. 2; BR: Atemreserve.

### 4.3.2 Feld 3: $\dot{V}O_2 - \dot{V}CO_2 -$ Rampe – RER

#### Grafische Darstellung von Feld 3

##### Merke



- Die Entwicklung der  $\dot{V}O_2$ -Aufnahme (blau) wird über die Zeitachse (▶ Abb. 4.7) dargestellt. Die Farbe für  $\dot{V}O_2$  lehnt sich an die „Gaskennung“ im deutschen Sprachraum (Sauerstoff = blau) an, im amerikanischen ist die Sauerstoffkurve rot dargestellt.
- Die Kohlendioxidabgabe ( $\dot{V}CO_2$ ) wird rot dargestellt (im amerikanischen Sprachraum blau).
- Die grüne Linie entspricht der Last, in der Regel als Rampenbelastung.
- Die Skalierung von  $\dot{V}O_2$  und Leistung ist so eingestellt, dass  $\dot{V}O_2 \approx 10 \times$  Watt gilt.
- Die Sollwertbereiche für Sauerstoff und Watt sind in blauer Markierung dargestellt.

### Parameter in Feld 3

#### Maximale Sauerstoffaufnahme am Belastungsende: $\dot{V}O_2$ peak und $\dot{V}O_2$ max

Die maximal erreichte Sauerstoffaufnahme bei Ausbelastung wird unterschiedlich benannt (▶ Abb. 4.8) in Abhängigkeit von

- der Höhe der  $\dot{V}O_2$  in Bezug auf den Referenzwert (Sollwert höher oder niedriger) und
- ihrem kinetischen Verhalten im Verlauf und vor allem gegen Ende der Belastung.

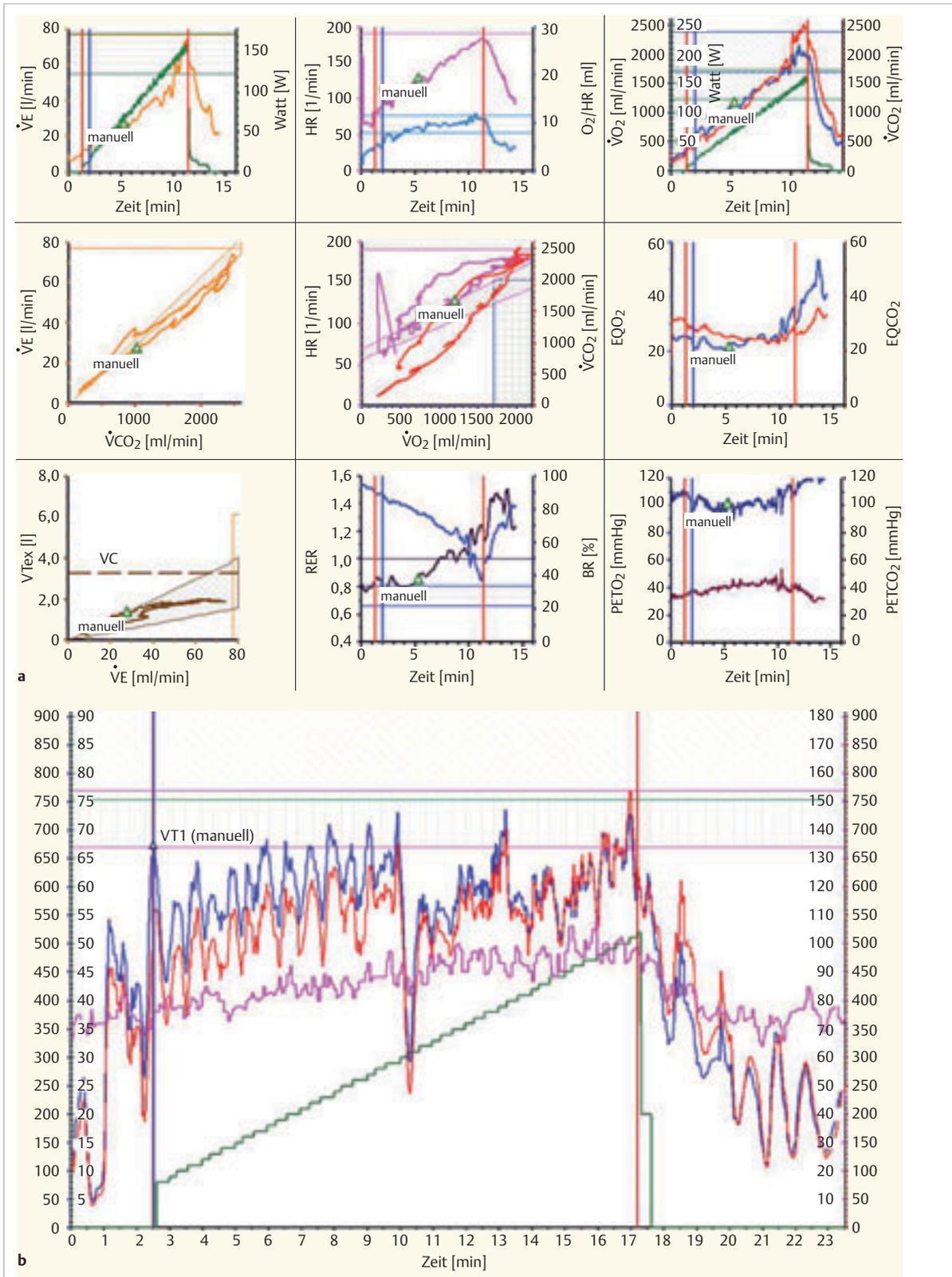
▶ **Definitionen.**  $\dot{V}O_2$  max ist die maximal erreichte  $\dot{V}O_2$ , die durch die Abflachung des  $\dot{V}O_2$ /Leistung-Verhältnisses gekennzeichnet ist und der maximal möglichen Sauerstoffaufnahme für das Individuum und die spezifische Belastungsform entspricht.

$\dot{V}O_2$  peak ist die maximal erreichte  $\dot{V}O_2$  ohne Abflachung des  $\dot{V}O_2$ /Leistung-Verhältnisses, sodass u. U. unklar bleibt, ob das Leistungsmaximum tatsächlich erreicht wurde.

Im Sprachgebrauch wird  $\dot{V}O_2$  max und  $\dot{V}O_2$  peak im Allgemeinen nicht unterschieden.

▶ **peak  $\dot{V}O_2$ .** Die peak  $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2$  peak) ist jeweils zum Zeitpunkt der maximalen Belastung erreicht. Der Begriff beschreibt die im Belastungstest höchste  $\dot{V}O_2$  ohne Plateaubildung oder sog. Levelling off. Dabei stellt die peak  $\dot{V}O_2$  den „normalen Endpunkt“ der O<sub>2</sub>-Aufnahme am Ende der Belastung dar. Der Aspekt der Mitarbeit ist zu beachten. Die  $\dot{V}O_2$ -Kurve und -Kinetik zeigen eine „Spitze“ (Peak) und kein Plateau. Bis zum Belastungsende steigt die O<sub>2</sub>-Aufnahme an und endet dann abrupt in einer „spitzen“ Form (peak  $\dot{V}O_2$ ). In ▶ Abb. 4.8 sieht man überdies auch, dass eine gute Leistungsfähigkeit vorliegt ( $\dot{V}O_2 > 2$  l), da die Soll- $\dot{V}O_2$  erreicht wurde (▶ Abb. 4.8 u. ▶ Abb. 4.6a).

▶ **Max  $\dot{V}O_2$ .** Die Max  $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2$  max) zeigt eine andere Kurvenkinetik: Trotz weiter gesteigerter Belastung steigt  $\dot{V}O_2$  nicht weiter an. Dies wird als „Levelling off“ bezeichnet. Im klinischen Alltag wird dies meist nicht erreicht.  $\dot{V}O_2$  max ist ein eher selten beobachteter Wert am Ende der Belastung (▶ Abb. 4.9). Man erreicht ihn bei guter (sehr guter) Motivation. Er beschreibt den Sachverhalt, dass trotz weiter abgeforderter Belastung die O<sub>2</sub>-Aufnahme nicht gesteigert werden kann, da die Kapazitäten von Zirkulation, Ventilation, Gefäßfaktoren und Energieverwertung in der Muskulatur jetzt ausgeschöpft sind.



**Abb. 4.6** Feld 3, Kinetik von  $\dot{V}O_2$

**a** Feld 3:  $\dot{V}O_2$  peak. Beachte: 1. absolute Zahlenwerte, 2. Steigung (Slope) und 3. Formanalyse (Frage: Peak? Abflachung?).

**b** Hier ist eine völlig andere Kinetik von  $\dot{V}O_2$  zu beobachten. Beachte auch hier: 1. absolute Zahlenwerte, 2. Steigung (Slope) und 3. Formanalyse (Frage zur Formanalyse: Peak? Abflachung?), hier: Oszillationen!



1	2	3
4	5	6
7	8	9

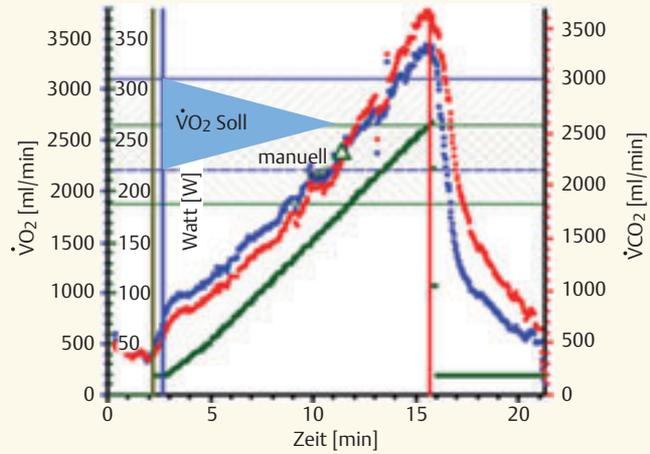


Abb.4.7 9-Felder-Grafik: Feld 3, Position und Detaildarstellung.

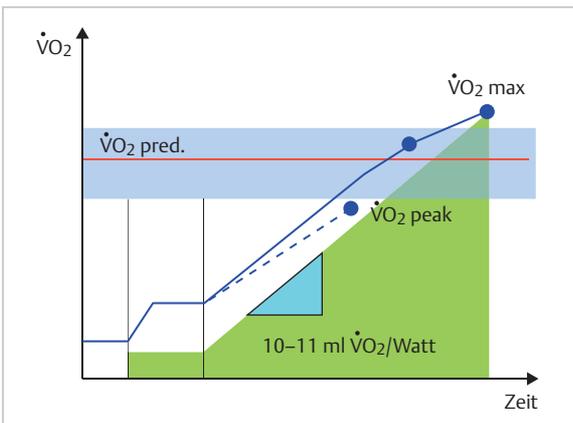


Abb.4.8  $\dot{V}O_2$  max und  $\dot{V}O_2$  peak: maximal erreichte  $\dot{V}O_2$ .  $\dot{V}O_2$  pred: Referenzwert für  $\dot{V}O_2$ .

### Kohlendioxidabgabe im Belastungsverlauf

Die kinetische Entwicklung der Kohlendioxidabgabe ( $\dot{V}CO_2$ ) verläuft in Feld 3 etwas anders als die der  $O_2$ -Kurve. Während die Sauerstoffaufnahme streng der steigenden Last (Watt) im Verhältnis  $\sim 10 \times$  Watt folgt, steigt die  $\dot{V}CO_2$  durch Pufferung im Fettgewebe und dadurch verzögerte Elimination zunächst langsamer an. Sie entwickelt nach diesen initialen Umverteilungsvorgängen ebenfalls eine lineare Beziehung, die dem aeroben Energieumsatz aus Kohlenhydrat- und Fettverbrennung entspricht, bis es dann zu einem übermäßigen Anstieg von  $\dot{V}CO_2$  aus der Laktatpufferung und zur Überkreuzung mit  $\dot{V}O_2$  kommt.

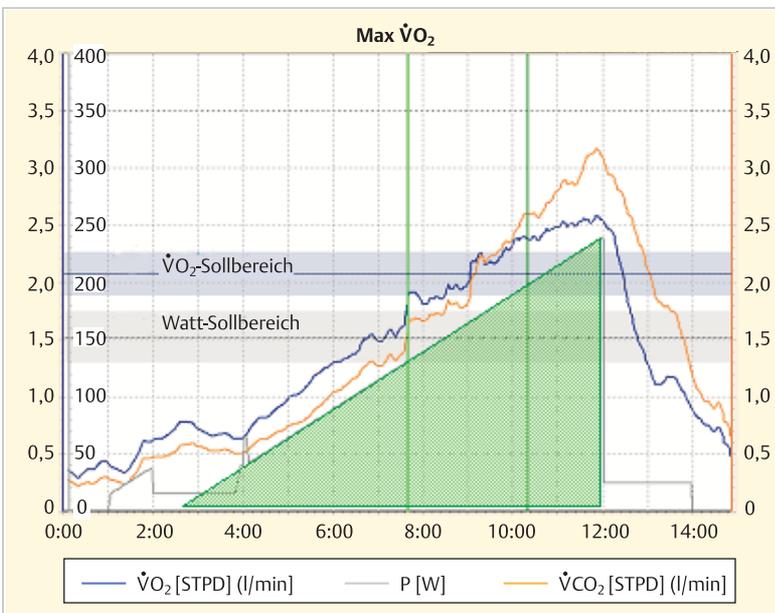


Abb.4.9 Leistungsstarke und hochmotivierte Managerin aus dem Pharmabereich. Leveling off  $\rightarrow \dot{V}O_2$  max.

## RER – Respiratory Exchange Rate

Die Überkreuzung von  $\dot{V}CO_2$  mit  $\dot{V}O_2$  entspricht  $RER = 1$ . Hier sind  $\dot{V}O_2$  und  $\dot{V}CO_2$  gleich hoch. Diese Überkreuzung entspricht nicht VT 1, sondern liegt bereits über VT 1 und kann als Hinweis auf eine gute Mitarbeit und Überschreiten der rein aeroben Energiebereitstellung gewertet werden. Die Beurteilung der  $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$ -Relation zur Bestimmung von VT 1 erfolgt besser aus Feld 5 (s. auch Kap. 4.3.4).

In Feld 3 gelingt zunächst aber eine grobe Orientierung für die Höhe von VT 1, da sie auf keinen Fall später als  $RER = 1$  liegen kann. VT 1 ist somit früher – also „links“ von RER zu vermuten. Eine „gute Mitarbeit“ ist beim Eintreten eines Levelling off oder bei einem ausgeprägten  $\dot{V}CO_2$ -Anstieg in Feld 3 entsprechend einer RER von 1,05–1,15 zu erkennen.

## Kinetik der Messwertkurven in Feld 3

### Kinetik der Sauerstoffaufnahme

Die Steigung der  $\dot{V}O_2$ -Leistungs-Beziehung in Feld 3 ( $\Delta\dot{V}O_2/\Delta\text{Watt-Slope}$ ) beschreibt das Verhältnis der  $O_2$ -Aufnahme ( $\dot{V}O_2$  [ml/min]) zur geleisteten Arbeit (Watt). Dies ist eine ziemlich eng eingestellte physiologische Konstante, die sowohl bei Gesunden (auch Sportlern) wie auch bei Untrainierten gleich groß ist. Dies gilt jedoch nur für die Belastung auf dem Fahrrad (s. Kap. 2.3.3).

In den ► Abb. 4.10 und ► Abb. 4.11 sind unterschiedliche „Kinetiken“ der  $O_2$ -Aufnahme schematisch mit „Abflachung“ unter Belastung dargestellt. Das Abflachen auf unterschiedlichem Niveau hilft „krankhafte“ von „normalen“ Befunden zu unterscheiden:

- Ein *vorzeitiges* Abflachen unterhalb des Sollwertbereiches – im Extremfall ein Plateau – findet sich bei Erkrankungen (z. B. Herzinsuffizienz, Gefäßerkrankungen).
- Physiologisch ist eine *asymptotische* Entwicklung von  $\dot{V}O_2$  am Ende einer erschöpfenden Belastung auf hohem oder sehr hohem Niveau, stets bei optimaler Mitarbeit und hoher anaerober Kapazität.

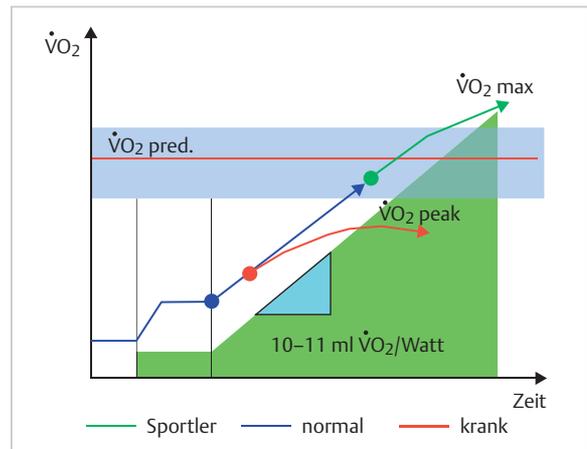


Abb. 4.10 Skizze  $\dot{V}O_2$ -Aufnahme beim Gesunden (normal), einem Sportler und einem Kranken.

- „Normal“: endet als peak  $\dot{V}O_2$  ohne „Levelling off“.
- „very fit“: der Sportler ist sehr fit, was sich am späten Abflachen („Levelling off“) zeigt; maximal erreichte  $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2$  max) oberhalb des Referenzbereiches mit Abflachung des  $\dot{V}O_2/\text{Watt}$ -Verhältnisses.
- „krank“: bei z. B. kardiovaskulären Krankheiten kommt es zu einer vorzeitigen Abflachung der Kurve.

## Aerobe Kapazität – $\Delta\dot{V}O_2/\Delta\text{WR}$

Die aerobe Kapazität beschreibt, ob eine Leistung unter Sauerstoffdeckung erbracht wird oder nicht (► Abb. 4.12). Aktuelle Messsysteme berechnen die aerobe Kapazität aus der Steigung der  $\dot{V}O_2$  (Slope) in Bezug auf die Leistung (Watt).

### Power of Breathing

Es ist zunächst überraschend, dass (Leistungs-)Sportler und Untrainierte in etwa die gleiche aerobe Kapazität haben. Dies wird auch als „Power of Breathing“ bezeichnet.

Man kann es sich an einem Beispiel verdeutlichen: Ein Liter Super-Benzin bewirkt in einem Porsche mehr als in einem alten Lada. Dies liegt aber nicht am Treibstoff, sondern an anderen Umständen, nicht zuletzt am Wirkungsgrad. So erbringt der Gesunde mehr Leistung durch einen besseren Besitz mit Mitochondrien, eine höhere Kapillardichte und z. B. eine bessere Koordination, was letztlich zur Kraft- und Leistungsentwicklung erforderlich ist.