

Stoffwechselformel M3 – Die Ruhespirometrie aus der Sicht der Biophysik und praxisorientierten Wissenschaft

Michael Marx

Einleitung

In einer Welt der Technik und Automatisierung ist das körperliche Leistungsvermögen im täglichen Leben von untergeordneter Relevanz. Somit sinkt in der heutigen Wohlstandsgesellschaft die körperliche Aktivität, allerdings bleiben die biologischen Gesetzmäßigkeiten unberührt und werden dem gegenüberstehend mit einem Überschuss an Nahrungsangeboten konfrontiert. Alarmierende Zahlen Übergewicht und Fettleibigkeit deutscher Staatsbürger belegen diese Entwicklung. Die Folge: Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes mellitus bis hin zu Krebs haben ein pandemisches Ausmaß erreicht. Die Zahlen und Fakten zahlreicher empirischer Erhebungen zeigen, dass beim Nahrungs- und Bewegungsverhalten der Deutschen Handlungsbedarf besteht. Als Reaktion entwickeln Industrie und Gewerbe zahlreiche Produkte und mögliche Lösungen, da dieser Markt ein enormes Potenzial an Wertschöpfung bietet.

So können heute Stoffwechsel- und Atemgasmessungen (Spirometrie) valide und praxistauglich angeboten werden. Noch vor wenigen Jahren waren die kostenintensive Anschaffung sowie Wartung und die notwendige Fachexpertise für die technisch komplexen Geräte, Faktoren, die einer möglichen Auseinandersetzung mit derartigen Messverfahren entgegenstanden [9]. Dies hat sich in den letzten Jahren geändert. Die Messsysteme sind günstiger geworden und die Bedienung konnte erleichtert und auf Anwendungsbereiche spezialisiert werden [2].

Aktualität

Während eine Vielzahl von Forschungsarbeiten über die Trainingssteuerung und Leistungsdiagnostik in Bezug auf die Spirometrie veröffentlicht wurden, schenkt die Wissenschaft der Atemgasmessung als „Ruheatemmessung“ noch immer wenig Beachtung. Einer der wesentlichen Gründe dafür ist, dass laut Fachliteratur eine zielgerichtete und fundierte Atemgasanalyse eines Probanden nur unter Ausbelastung möglich ist. So fassten KROIDL et al. (2010) zusammen: „Die Begründung für Belastungsuntersuchungen ist, dass die Erfassung von Ruhewerten

im pulmonalen und kardialen Bereich keinen sicheren Rückschluss auf Belastungswerte ermöglicht.“ Die Differenz von bis zu 33% zwischen Ruhe- und Belastungswerten bei maximaler Sauerstoffaufnahme (VO_2max) [9] sind aber insbesondere für die Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit des Probanden relevant.

Jedoch können Parameter wie Sauerstoffverwertung, Kohlenstoffdioxidabgabe, Atemminutenvolumen, respiratorischer Quotient und Atemfrequenz auch detaillierte Rückschlüsse auf die Stoffwechselformel geben. Als Quintessenz ist festzustellen, dass eine Spirometrie als Ruheumsatzmessung die Grundlage für eine Stoffwechselformel und eine anschließende Ernährungs- bzw. Stoffwechselberatung bieten kann, denn die Bestimmung des individuellen Kalorienverbrauchs und des Verbrennungsprofils ist eine Basisgröße für die Gewichtskontrolle des Menschen [10].

Die meisten Menschen befinden sich bewegungsphysiologisch betrachtet überwiegend in einem sogenannten „Ruhezustand“. Die Belastungsdifferenzierung zwischen erhöhter sportlicher, beruflicher und lebensstilbedingter Belastung sowie der muskulär nichtbelastenden Phasen in Schlaf- und Ruhephasen zeigt, dass die Ruhestoffwechselprozesse anteilsmäßig mit ca. 75-80% deutlich überwiegen.

Die Forschergruppe um Müller, Bösy-Westphal, Klaus, Kreymann, Lührmann et al. (2004) [11] publizierte neue Referenzwerte für den Ruheenergieumsatz (resting energy expenditure) der deutschen Bevölkerung und erstellte eine aktuelle Datenbank. Sie wies nach, dass die Vorhersage des Ruheenergieumsatzes nach den Formeln der WHO z.T. deutliche Abweichungen zu den tatsächlichen Messwerten zeigte.

Die Abhandlung von HOLDY (2004) [5] vergleicht moderne Geräte der indirekten Kalorimetrie, beschreibt moderne Erklärungsansätze für die Interpretation von gemessenem Ruheenergieumsatz, diskutiert die klinische Anwendbarkeit von indirekter Kalorimetrie und bewertet den Energiestoffwechsel bezüglich Körperzusammensetzung sowie zellulärem und organischem Energieumsatz. Als Zusammenfassung führt er an, dass die indirekte Kalorimetrie in gleicher Art und Weise Beachtung finden und zur Anwendung kommen muss wie gewöhnliche klinische Tests.

Eine Studie der Forschergruppe Javed, He, Davidson, Thornton, Aalbu et al. [7] beschäftigte sich 2010 mit dem Thema des Beitrags von Gehirn und Organmasse mit hohen metabolischen Umsätzen (high metabolic rate organ = HRMO) in Bezug auf den Ruheenergieumsatz unter Ausschluss der fettfreien Masse. Das Endergebnis konnte belegen, dass schon verhältnismäßig kleine interindividuelle Varianzen der HMRO signifikante Auswirkungen auf den Ruheenergieumsatz haben und die Variablen wie Alter, Rassenzugehörigkeit und Geschlecht in der Erklärung des Ruheenergieumsatzes aufgehoben werden.

Wissenswerte Basis

In der Wissenschaft müssen elementare Begriffe definiert sein, sodass Begriffe mit überschneidenden Aspekten klar voneinander abgegrenzt werden. Begriffe wie Energieumsatz, Spirometrie und Kalorimetrie werden häufig übergreifend verwendet. Die Zusammenhänge und Abgrenzungen werden nachfolgend kurz erläutert.

Als Energieumsatz (energy expenditure) wird die Menge an Energie bezeichnet, die der Körper in Wärme umwandelt. Er ist keine feste, sondern eine vitale Kenngröße und findet ihre Abhängigkeit in den Parametern Ernährungszustand, Ernährung, Alter, Geschlecht, Genotyp, körperliche Aktivität sowie Fitness und Gesundheitszustand [10]. Als standardisierte Einheiten des Energieumsatzes haben sich Kilokalorie (kcal) und Kilojoule (kJ) etabliert.

Des Weiteren setzt sich der tägliche oder auch 24-h-Energieumsatz aus den Summanden Ruheenergieumsatz (resting energy expenditure), arbeitsinduzierte Thermogenese (activity energy expenditure) und nahrungsinduzierte Thermogenese (diet-induced thermogenesis) zusammen [10]. „Der ‚Ruheenergieumsatz‘ ersetzt heute den sog. ‚Grundumsatz‘. Der Ruheenergieumsatz ist die realistischere Kenngröße, da die ursprünglich für die Messung des Grundumsatzes vorgeschriebenen Messbedingungen in der Praxis tatsächlich nicht eingehalten werden können“ [10]. Der Proband muss unbekleidet, morgens direkt nach dem Aufstehen, nüchtern (mind. 12 Stunden keine Nahrungsaufnahme), ruhig, entspannt liegend, bei thermoneutraler Umgebungstemperatur (27–32°C) gemessen werden [8, 13].

Der Ruheenergieumsatz bezeichnet den Umsatz bei geistiger und körperlicher Ruhe und liegt um 10–15 % über dem Grundumsatz [13]. Weiterhin soll drei bis vier Stunden vor der Messung keine Nahrung aufgenommen werden, sodass die nahrungsinduzierte Thermogenese keinen Einfluss auf das Ergebnis nimmt [9]. Diese gibt den Anteil des Energieumsatzes an, der für die Verdauungs-, Resorptions- und Speicherarbeit aufgewendet werden muss [8]. Die arbeitsinduzierte Thermogenese wird durch jegliche körperliche Aktivi-

tät charakterisiert.

Zur Verdeutlichung sind die prozentualen Anteile der einzelnen Summanden zum 24-h-Energieumsatz dargestellt [10]:

Summand	Anteil am 24-h-Energieumsatz
Ruheenergieumsatz	60–70%
Nahrungsinduzierte Thermogenese	5–10%
Arbeitsinduzierte Thermogenese	20–30%

Ziel der Spirometrie ist die Erfassung des respiratorischen Gasstoffwechsels und der Lungenvolumina bei einer kontinuierlichen Aufzeichnung [6]. Spirometrie und Spiroergometrie sind Methoden der pulmonalen Funktionsdiagnostik. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden Spirometer ausschließlich zur Messung der Lungenvolumina eingesetzt [12].

Moderne, rechnergestützte Spirometriesysteme messen neben Atemmechanik und den ventilatorisch mobilisierbaren Atemvolumina auch die Werte des Gasaustausches wie Sauerstoffaufnahme und Kohlenstoffdioxidabgabe [2, 6, 8].

Die Spiroergometriesysteme messen zusätzlich Leistungsfähigkeit, Pulsfrequenz und ggf. Blutdruck der Probanden. Die Aufzeichnung eines Elektrokardiogramms (EKG) ist ebenfalls eine Option. Durch das diagnostische Verfahren der Spiroergometrie kann somit aufgezeigt werden, welche Leistung äußerstenfalls erbracht werden kann. Die Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit durch das objektive Kriterium der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_2max) kann nur durch die Spiroergometrie erreicht werden [6].

Die Kalorimetrie ist eine Methode zur Messung des Energiestoffwechsels. Diese kann beim Menschen direkt (wärmeanalytisch) wie auch indirekt (gasanalytisch) durchgeführt werden [1].

Die direkte Kalorimetrie (direct calorimetry, DC) misst die Wärmeabgabe des Körpers. Die Wärmeabgabe entspricht nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik dem Energieumsatz. Die direkte Kalorimetrie repräsentiert die wissenschaftliche Referenzmethode und somit die gültigste Methode zur Messung des Energieumsatzes. Der Proband hält sich dabei in einer isolierten Kalorimeterkammer auf. Die produzierte Wärme des Probanden wird bei direkten Kalorimetern moderner Bauart durch Luft- oder auch Wasserströme abgeführt und die Wärmeabgabe aus Temperaturdifferenz und Flussgeschwindigkeit berechnet [10]. „Dafür ist meist ein erheblicher apparativer und damit kostspieliger Aufwand notwendig“ [2]. Müller [10] beziffert die Kosten für ein direktes Kalorimeter auf ca. 1 Mio. Euro und empfiehlt aufgrund der Trägheit der Messmethode eine Mindestmessdauer von 24 Stunden.

Mit der indirekten Kalorimetrie werden die Basisgrößen VO_2 und VCO_2 gemessen und anschließend

aus den Messwerten der Energieumsatz berechnet [2]. Ahlers pointierte diese Relation bereits 1967 im folgenden Zitat: „Die indirekte Kalorimetrie beruht auf dem Grundsatz, dass die abgegebene Energie (Wärme) nur aus der Oxidation des Nahrungsmittelabbaus stammen kann. Um diese Energie freizusetzen, bedarf der Organismus des Sauerstoffs.“ Die Messung des Gasaustausches geschieht über ein Mundstück mit Nasenklammer, eine Atemmaske, eine belüftete Atemhaube oder in einer Respirationskammer. Spirometrie- und Spiroergometriesysteme nutzen die Methode der indirekten Kalorimetrie. Messdauer und -aufwand sind im Vergleich zur direkten Kalorimetrie gering und werden mit 5 min bis 6 h, je nach Anwendungszweck, angegeben [8]. Somit steht fest, dass die indirekte Kalorimetrie im klinischen wie auch ambulanten Einsatzbereich die Präferenz gegenüber der direkten Kalorimetrie erhält.

Historischer Hintergrund

Die geschichtliche Zusammenfassung der Spirometrie zeigt, dass schon früh im 17. Jahrhundert erste Messungen durch BORELLI zur Atmung des Menschen stattfanden und wissenschaftliches Interesse an der Lungenfunktion bestand. Weiterhin veröffentlichte VIERORDT mit seinem Expirator erste Messgrößen der Volumetrie, die Näherungswerte zu unseren heutigen Daten darstellen. HUTCHINSON entwickelte 1846 das erste Spirometer und leitete damit die Geburtsstunde der Spirometrie ein. Die Spirometrie hatte damals prophylaktischen Charakter und sollte als Ergänzung zur Perkussion und Auskultation die Tuberkulose frühzeitig erkennen. Schließlich führte Douglas 1911 die Atemgasanalyse ein und vervollständigte somit die Spirometrie. KNIPPING stellte 1929 eine Verbindung zwischen Ergometrie und Spirometrie her, aus welcher die klinische Leistungsdiagnostik der Spiroergometrie hervorgeht.

Einflussfaktoren

Die Durchführungsbedingungen für die indirekte Kalorimetrie zur Messung des Ruheenergiestoffwechsels sollten unbedingt eingehalten werden. Die wichtigste Bedingung ist, dass der Proband sich in einem Stadium der physischen und psychischen Ruhe befindet. Die physische Ruhe ist recht einfach durch Anweisungen des Diagnostikers zu gewährleisten. Die psychische Ruhe des Probanden ist dagegen komplizierter einzuhalten, da diese „internen Faktoren“ des Probanden kaum zu überwachen bzw. schwer zu beeinflussen sind. Klinker et al. [8] machen diesen Zusammenhang wie folgt deutlich: „Emotionen erhöhen den Energieumsatz, indem sie den Muskeltonus und den Sympathikotonus verändern können. Adrenalin und Noradrenalin sowie Schilddrüsenhormone (Trijodthyronin) steigern den Energieumsatz ebenso wie eine

Schwangerschaft“. Deshalb ist bei der Messung auf einen beruhigenden und entspannten Ablauf zu achten.

De Marées [2] zeigt die Abhängigkeit von Emotionen und physischen Reaktionen am Beispiel der Hyperventilation. „Eine erhebliche Fehlerquelle bei der indirekten Kalorimetrie stellt die Hyperventilation dar, ein Phänomen, das bereits durch das Anlegen der Atemmaske auf emotionalem Wege ausgelöst werden kann“. Die Hyperventilation kann anhand der Ventilation und an der Gaskonzentration erkannt werden. Ein zu schnelles und zu tiefes Atmen bei sinkender CO_2 -Konzentration sind Indikatoren für die Hyperventilation [2].

Des Weiteren ist bei der indirekten Kalorimetrie darauf Wert zu legen, dass diese durch geschultes Personal durchgeführt wird. Eine Eichung und Wartung des Geräts muss spezifisch nach Handbuch und Instruktionen des Herstellers erfolgen. Die Kalibrierung des Systems soll vor jeder Messung erfolgen. Die Gasanalysatoren müssen, abhängig vom verwendeten Messprinzip und von der Qualität der Analysatoren, nach festgesetzten Zeiträumen geeicht werden [10].

Überdies ist die Nahrungskarenz des Probanden von 3–4 Stunden ein wichtiger Faktor [9]. Dadurch wird die nahrungsinduzierte Thermogenese ausgeschaltet.

Schließlich ist die thermoneutrale Umgebung (27–32°C) eine wichtige Einflussgröße für den Energiestoffwechsel.

Atemgasanalyse

„Die eigentliche Atmung findet in den Körperzellen [...] statt, und zwar in den Mitochondrien“ [4]. HABER verdeutlicht mit diesem Satz, dass die mitochondriale Zellatmung, nämlich die Diffusion des O_2 und CO_2 in die bzw. aus den Mitochondrien, das Ziel der Lungenatmung darstellt und die Grundlage für den Energiestoffwechsel und letztendlich aller Lebensvorgänge ist. Der Transport von O_2 und CO_2 in die bzw. aus der Körperzelle gewährleistet die „innere Atmung“ und somit alle Lebensvorgänge [4]. Für diesen basalen Stoffwechsel sind maßgeblich zwei Mechanismen entscheidend. Auf der einen Seite ist die Konvektion und auf der anderen die Diffusion zu nennen. Weiterhin sind zwei Transportrichtungen aufzuführen. Zum einen die Transportrichtung des O_2 von der atmosphärischen Luft zur Körperzelle und zum anderen die des CO_2 zur umgebenden Atmosphäre [2, 4].

An dieser Stelle sei auf die Differenzierung der Begriffe RQ (Respiratorischer Quotient) und RER (respiratory exchange rate) hingewiesen. Es gibt eine begriffliche Trennung für das Verhältnis von VCO_2 zu VO_2 für den Bereich der Lunge und des Gewebes. Oftmals werden die Termini RER und RQ in der Lehre und Forschung zusammengefasst zu dem einheitlichen Gesamtbegriff RQ. Diese Konvergenz führt zu

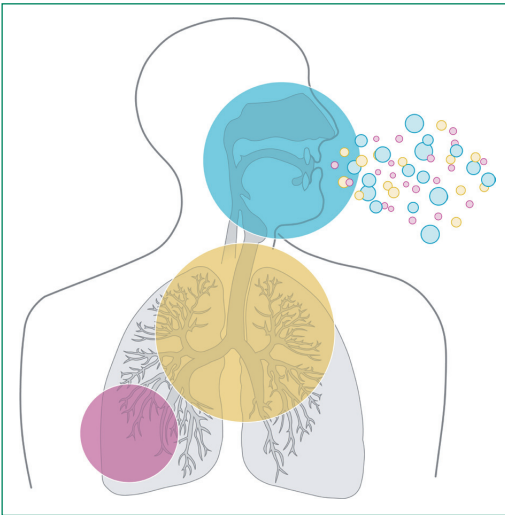


Abb. 1 Darstellung der Gasatmung

einer Unschärfe, die insbesondere für die Atemgasmessung zu ungenauen Messwerten führen kann [9]. Der „Lungen-RQ“ (RER) muss nicht zwangsläufig gleich dem Stoffwechsel-RQ (RQ) sein. Insbesondere bei unnatürlicher Atmung, wie Hyper- und Hypoventilation, wird der RER vom RQ entkoppelt. Somit spiegelt der gemessene Wert des Verhältnisses von VCO_2 zu VO_2 nicht den mitochondrialen Stoffwechsel im Gewebe wider und ist stringent betrachtet kein aussagekräftiger Wert für den Stoffwechsel des Organismus. Letztendlich schlussfolgert die Spirometrie mit der RER auf die Stoffwechseltätigkeit des Probanden. Dabei ist zu beachten, dass der RER mit 40–45 Sekunden Verzögerung und nur beim gesunden Probanden den RQ widerspiegeln kann [9]. Bei idealer Atmung entspricht die RER dem des RQ. Dieses Stadium wird als Steady State bezeichnet. Für diese Phase des Gleichgewichts und der Konstanz definiert HOLDY [5] Validierungskriterien für die indirekte Kalorimetrie. Demnach ist ein Steady State bei gesunden Probanden erreicht, wenn die Varianz von VO_2 und VCO_2 innerhalb von drei zusammenhängenden Minuten nicht mehr als 10% beträgt. Somit ist zu konstatieren, dass das Erfüllen des Steady State ein essentielles Validitätskriterium für die richtige Messung des Ruheenergieumsatzes ist, da im Falle des Steady State der „Lungen-RQ“ (RER) dem des Stoffwechsel-RQ (RQ) entspricht [5, 9]. Moderne und valide Messsysteme werden durch eine Mess- und Auswertungssoftware so gesteuert, dass während der Messung dem Diagnostiker visuelle Signale mit Feedback- und Korrekturfunktionen der gemessenen Atemzüge aufgezeigt werden.

Bei der Stoffwechselmessung in Ruhe, unter Nutzung der indirekten Kalorimetrie durch die Spirometrie, ist insbesondere wichtig, dass eine ruhige Atmung und somit das Atemzugvolumen von zwischen 500–800 ml gewährleistet ist. Darüber hinaus ist der Totraum

(volume deadspace) bei der indirekten Kalorimetrie eine relevante Größe. Der anatomische Totraum bezeichnet den Raum zwischen den oberen Atemwegen und den Bronchien, der stets luftgefüllt ist, in dem jedoch kein Gasaustausch stattfindet [8]. Die Aufgabe dieses Totraums ist die Erwärmung, Anfeuchtung und Reinigung der Inspirationsluft. Außerdem ist der anatomische vom funktionellen Totraum zu unterscheiden. Der funktionelle Totraum beinhaltet die Bereiche des Alveolarraums, die zwar ordnungsgemäß belüftet, jedoch nicht durchblutet werden und dadurch nicht am Gasaustausch teilnehmen. Beim gesunden Menschen entspricht der anatomische Totraum nahezu dem des konstanten Gesamt-Totraums von ca. 150 ml und somit ca. 30% des Atemzugvolumens [3, 9]. Bei der indirekten Kalorimetrie wird der funktionelle Totraum jedoch „künstlich“ durch Gassammlungssysteme wie Mundstück (ca. 50 ml) oder Maske (ca. 130 ml) erweitert. Je flacher die Atmung (Ruheatmung bzw. Atemzugvolumen), desto gravierender fällt der Totraum für die Volumenmessung des Gasaustauschs ins Gewicht. Je vertiefter die Atmung (Belastung bzw. Atemzugvolumen + Zusatzvolumen), desto unbedeutender ist der Totraum für die Volumenmessung des Gasaustauschs [3]. Somit pendelt die Luft bei der Ventilation im (erweiterten) Totraum und muss unter messtechnischen Aspekten Beachtung bei der Verrechnung durch die Spirometriesysteme finden [9] (S. 133). Wenn eine korrekte Einberechnung des erweiterten Totraums für Gassammlungssysteme erfolgt, sind nach SEGAL (1987) keine signifikanten Effekte für die indirekte Kalorimetrie festzustellen.

Stoffwechselbestimmung

Die Stoffwechselbestimmung gibt Aufschluss über den aktuellen Stand des Energie- und Substratstoffwechsels eines Menschen. Im Nachfolgenden sollen die Schätzung des Energieumsatzes auf Grundlage von Formeln und die Messung des Ruheenergieumsatzes mittels indirekter Kalorimetrie erörtert werden. Es sollte berücksichtigt werden, dass sich die unvollständige Verbrennung von Proteinen in den Stickstoffanteilen des Harnstoffs widerspiegelt und der Methode der indirekten Kalorimetrie in der Beurteilung des Substratstoffwechsels Grenzen setzt.

Der Ruheenergieumsatz eines Menschen kann abgeschätzt werden durch die Anwendung von Schätzformeln. Diese beruhen auf Studien der indirekten Kalorimetrie mit unterschiedlich großen Stichproben. Nach Abschätzung des Ruheenergieumsatzes kann mit Hilfe von sog. Aktivitätsfaktoren (physical activity level, PAL) der 24-h-Energieumsatz errechnet werden [10]. Dabei wird ein Aktivitätsprotokoll des Probanden als Basis genommen und die einzelnen Tätigkeiten des Testtages mit den PAL multipliziert. „Die Schätzformeln sind im Einzelfall ungenau“ [Müller, 2007, 10].

Bei gesunden Menschen ist ein mittlerer Fehler von $\pm 15\%$ zu verzeichnen, im Einzelfall kann die Abweichung 30% betragen [10]. Die Schätzformel nach HARRIS & BENEDICT wurde 1913 veröffentlicht und ist bis heute weit verbreitet. Durch die Formel wird der Ruheenergieumsatz (kcal/d) anhand von Größe, Gewicht, Alter und Geschlecht berechnet.

$$\begin{aligned} \text{Frauen} &= 655,096 + 1,850 \times \text{Größe (cm)} + 9,563 \times \text{Gewicht (kg)} - 4,676 \times \text{Alter (Jahre)} \\ \text{Männer} &= 66,473 + 5,003 \times \text{Größe (cm)} + 13,752 \times \text{Gewicht (kg)} - 6,755 \times \text{Alter (Jahre)} \end{aligned}$$

Eine neuere Formel für die Berechnung des Ruheenergieumsatzes (kcal/d) hat die WHO 1985 herausgegeben:

Männer	
0–3 Jahre	$60,9 \times \text{Gewicht (kg)} - 54$
3–10 Jahre	$22,7 \times \text{Gewicht (kg)} + 495$
10–18 Jahre	$16,6 \times \text{Gewicht (kg)} + 77 \times \text{Größe (m)} + 572$
18–30 Jahre	$15,4 \times \text{Gewicht (kg)} - 27 \times \text{Größe (m)} + 717$
30–60 Jahre	$11,3 \times \text{Gewicht (kg)} + 16 \times \text{Größe (m)} + 901$
>60 Jahre	$8,8 \times \text{Gewicht (kg)} + 1128 \times \text{Größe (m)} - 1071$
Frauen	
0–3 Jahre	$61 \times \text{Gewicht (kg)} - 51$
3–10 Jahre	$22,5 \times \text{Gewicht (kg)} + 499$
10–18 Jahre	$7,4 \times \text{Gewicht (kg)} + 482 \times \text{Größe (m)} + 217$
18–30 Jahre	$13,3 \times \text{Gewicht (kg)} + 334 \times \text{Größe (m)} + 35$
30–60 Jahre	$8,7 \times \text{Gewicht (kg)} - 25 \times \text{Größe (m)} + 865$
>60 Jahre	$9,2 \times \text{Gewicht (kg)} + 637 \times \text{Größe (m)} - 302$

Müller et al. [11] haben zwei Formeln mit Bezug auf den Body Mass Index (BMI) verfasst, um die weitere Unterscheidung der Gewichtsklassifizierung einzubeziehen. Diese sind die zurzeit aktuellsten Schätzformeln.

Für normalgewichtige und adipöse Menschen:

$$\text{Ruheenergieumsatz (MJ/d)} = 0,047 \times \text{Gewicht (kg)} + 1,009 \times \text{Geschlecht (W = 0, M = 1)} - 0,01452 \times \text{Alter (Jahre)} + 3,21$$

Für untergewichtige Menschen (BMI < 18,5 kg/m₂):

$$\text{Ruheenergieumsatz (MJ/d)} = 0,07122 \times \text{Gewicht (kg)} - 0,02149 \times \text{Alter (Jahre)} + 0,82 \times \text{Geschlecht (W = 0, M = 1)} + 0,73$$

Nach Müller [10] können durch die Messung des Ruheenergieumsatzes mittels indirekter Kalorimetrie Krankheitsbilder erkannt und zielgerichtet Maßnahmen bzw. Therapien eingeleitet werden. Dieses gilt insbesondere für unklaren Gewichtsverlust, Gewichtszunahme, Übergewicht, Adipositas, Untergewicht, Kachexie und metabolische Beurteilung instabiler Stoffwechsellagen.

Kroidl et al. [9] bestätigen diese Aussage und bekräftigt die indirekte Kalorimetrie als führendes Verfahren zur Messung des Ruheenergieumsatzes. Die hohe Genauigkeit und die einfache Durchführbarkeit der spirometrischen Ruheumsatzmessung prädestinieren dieses Verfahren für die Bestimmung des täglichen

Energieverbrauchs beispielsweise im Rahmen von Gewichtsreduktionsprogrammen. Hierbei ist die indirekte Kalorimetrie anderen Verfahren zur Bestimmung des Grund- bzw. Ruheumsatzes wie etwa der Bioimpedanzanalyse oder herzfrequenzbasierten Verfahren überlegen [9]. Die Messung des Ruheenergieumsatzes geht vom stöchiometrischen Verhältnis zwischen

- dem Verbrauch von O₂
- der Bildung von CO₂
- der Menge an verstoffwechselten Substraten
- der Summe freierwerdender Energie

bei der Oxidation der Nährstoffe aus. Dieses Verhältnis lässt aus der gemessenen Menge von O₂ und CO₂ den Rückschluss auf die umgesetzte Energiemenge zu [2]. Die Kenntnis des kalorischen Äquivalentes von O₂ ist für die Berechnung des Ruheenergieumsatzes erforderlich.

Unter dem kalorischen Äquivalent versteht man diejenige Energiemenge an Joule, die bei der Reaktion der betreffenden Substanz mit 1 Liter Sauerstoff freigesetzt wird. Das kalorische Äquivalent kann berechnet werden, wenn die zur Oxidation des jeweiligen Nährstoffes erforderliche Sauerstoffmenge und die dabei freiwerdende Energie bekannt sind [2]. Nach de Marées [2] ist von folgenden kalorischen Äquivalenten für die Oxidation von Substraten auszugehen.

$$\text{kalorisches Äquivalent des O}_2 \text{ (Glukose)} = 21,1 \text{ kJ/l O}_2$$

$$\text{kalorisches Äquivalent des O}_2 \text{ (Fett)} = 19,6 \text{ kJ/l O}_2$$

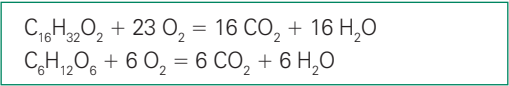
$$\text{kalorisches Äquivalent des O}_2 \text{ (Eiweiß)} = 18,8 \text{ kJ/l O}_2$$

Zur Bestimmung des Ruheenergieumsatzes ist der gemessene VO₂ mit dem kalorischen Äquivalent zu multiplizieren. Das Ergebnis ist der Ruheenergieumsatz in Kilojoule pro Minute.

Die oben aufgeführten kalorischen Äquivalente spiegeln jedoch nur die reine „Verstoffwechslung“ eines einzigen Substrats wider. Dies ist praktisch nur in absoluter Seltenheit der Fall, wie im Hungerzustand oder in der Kohlenstoffhydratmast. Die Realität ist der Abbau aller drei Substrate aus der gemischten Nahrung. Somit gilt es, das Mengenverhältnis zu bestimmen. Dies wird bei der indirekten Kalorimetrie durch die „respiratory exchange rate“ (CO₂-Abgabe/O₂-Aufnahme in der Lunge) erfüllt. Sie ist ein dimensions-

loser Wert und ermittelt sich durch die Division von VCO_2 durch VO_2 [2].

Die „respiratory exchange rate“ gibt das Verhältnis des VCO_2 zum VO_2 für den Bereich der Lunge zum Zeitpunkt der Messung an. Sie hat in Ruhe eine Breite von 0,7–1 und leitet sich aus der chemischen Bilanz von O_2 und CO_2 bei der Oxidation der Substrate ab. Ein Rechenbeispiel soll dies demonstrieren. Als Bruttoformel werden einerseits Stearinsäure ($C_{16}H_{32}O_2$) und andererseits Glucose ($C_6H_{12}O_6$) verglichen [1].



Die oben angegebene chemische Reaktion bewirkt folgende Stoffwechsel-RQ „respiratorischer Quotient“ (CO_2 -Abgabe/ O_2 -Aufnahme am Mitochondrium)

Fett	$RQ = CO_2/O_2 = 16/23 = 0,696$
Kohlenstoffhydrate	$RQ = CO_2/O_2 = 6/6 = 1,0$

Für die Substrate ergeben sich folgende „respiratory exchange rates“ (CO_2 -Abgabe/ O_2 -Aufnahme in der Lunge) nach Durchschnittsanalysen von de Marées [2]:

Kohlenstoffhydrate	≈ 1,00
Fett	≈ 0,7
Eiweiß	≈ 0,81

Durch die „respiratory exchange rate“ ist es möglich, das Mengenverhältnis des Substratstoffwechsels von Kohlenstoffhydraten und Fetten zu bestimmen, jedoch nicht der Anteil vom Eiweiß. Für die Bestimmung des Eiweißanteils an der Substratoxidation ist die Messung der Stickstoffausscheidung im Urin erforderlich [10]. Allerdings ist zu beachten, dass nach de Marées [2] die Veränderung des Eiweißanteils in der Nahrung von ±5% einen Fehler bei der Bestimmung des Ruheenergieumsatzes von ±0,4% produziert. Klink et al. [8] stimmt der überschaubaren Bedeutung des Proteinanteils an der Ruheenergieumsatzmessung zu: „Da Proteine nur eine geringe Rolle spielen, beschränkt man sich im Wesentlichen auf Glucose und Fettsäuren.“ Der Eiweißanteil in der Nahrung eines Mitteleuropäers entspricht im Durchschnitt einem Wert von 15%, der als fixer Wert in der Fachliteratur ebenfalls veranschlagt wird [2, 8].

Nachdem die „respiratory exchange rate“ (RER) ermittelt wurde, kann aus dieser mit der Formel ($gK\ddot{A} = 4,33 \times RQ + 16,37$) der gemischte kalorische Äquivalent (gKÄ) bestimmt werden [8]. Diese Formel geht von einem Eiweißgehalt in der Nahrung von 15% aus. Die Konstante 4,33 wird dabei mathematisch vorausgesetzt. Für die Bestimmung des Ruheenergieumsatzes in kJ/min muss schließlich der gKÄ mit der VO_2 multipliziert werden.

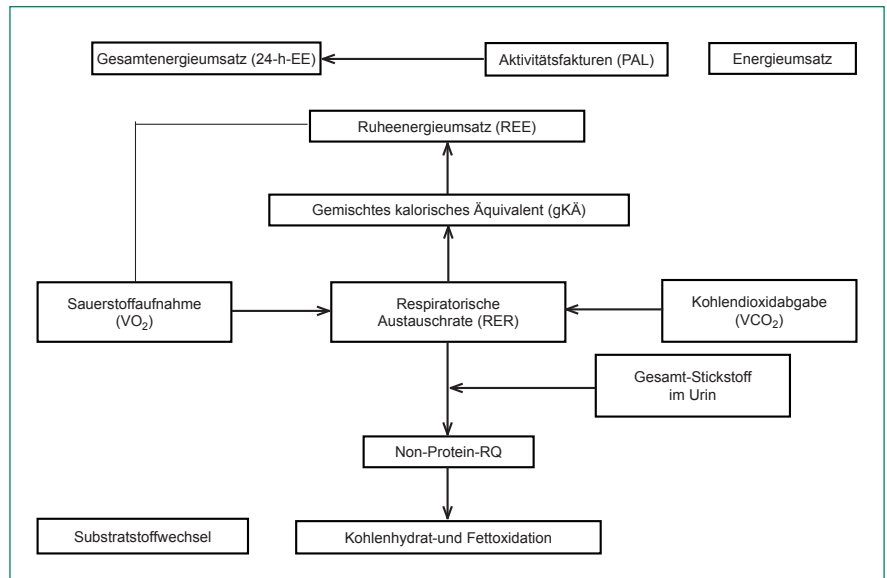


Abb. 2 Schematische Darstellung der Bestimmung des Energieumsatzes und Substratstoffwechsels mittels indirekter Kalorimetrie (modifiziert nach Müller, 2007, S. 85)

Der Schätzfehler des 24-h-Energieumsatzes in Kombination mit der Ruheenergieumsatzmessung mittels indirekter Kalorimetrie liegt bei 5–10% [10]. Der Variationskoeffizient der indirekten Kalorimetrie für die Messung des Ruheenergieumsatzes liegt bei 5% [10]. Die indirekte Kalorimetrie wird durch Kenntnis der Harnstoffproduktion respektive der Stickstoffausscheidung im Urin die Bestimmung des Substratstoffwechsels verbessern. Durch die Eliminierung der Protein-Komponente in der „respiratory exchange rate“ (RER) ist eine genauere Vorhersage über die Verhältnisse von Kohlenstoffhydrat- und Fettoxidation möglich, sofern der Proteinanteil in der Nahrung deutlich über 15% liegen sollte [10].

Moderne Geräte mit aktuellen technischen Applikationen wie z.B. rechnergestützte Stationen oder

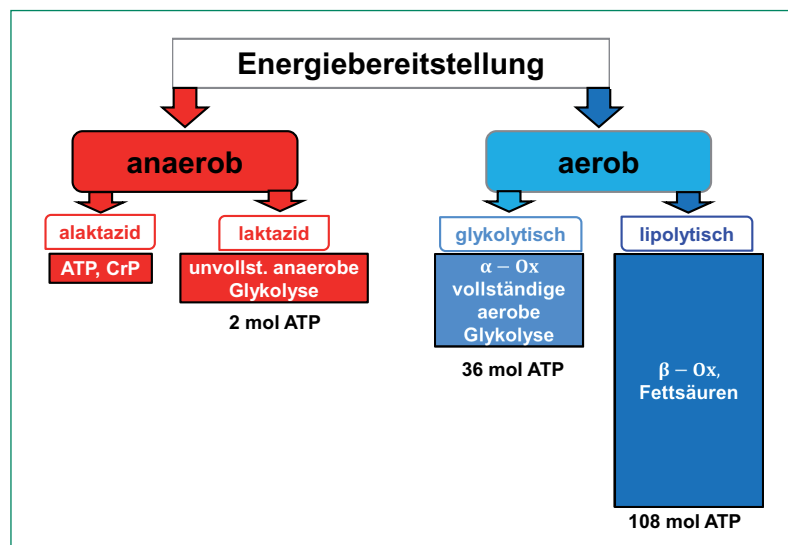


Abb. 3 Darstellung zur ATP-Produktion aus Glucose- bzw. Fettoxidation

auch handliche Apparate mit Softwareunterstützung nehmen dem Diagnostiker die oben dargestellte Rechenarbeit ab [9]. Kroidl et al. betonen jedoch auch die Notwendigkeit einer Aufbereitung und sinnvollen Präsentation dieser „Datenflut“.

Praxisorientierte Wissenschaft

Der Ruheenergieumsatz sollte überwiegend auf Fettverbrennung basieren.

Fettabbau durch Sport

Ein nahezu unerschöpflicher Energiespeicher von rund 50.000 kcal steht im Fettgewebe zur Verfügung. Weil jedoch sehr viel Sauerstoff zur Energiefreisetzung aus Fett benötigt wird (viermal mehr als zur Glykolyse), wird dieser Nährstoff erst bei mäßigen und lang andauernden Belastungen in größerem Umfang genutzt. Doch genau das lässt sich ändern!

Fettabbau durch effektiven Ruhestoffwechsel

Die Voraussetzung dafür, dass die Zellen bzw. Mitochondrien die freien Fettsäuren zur Oxidation nutzen, sind:

- Teilleerte Glykogenspeicher
- Niedriger Insulinspiegel
- Erhöhter Glukagonspiegel
- Hohe Sauerstoffverwertung
- Geringe Säurelast

Mit dieser Konstellation können auch für den Ruheenergieumsatz Fettsäuren genutzt werden. Dabei wird Fett (genauer: Triglyceride) aus den Speichern freigesetzt und nach und nach durch Enzyme (Lipasen) zu Acetyl-CoA abgebaut. Acetyl-CoA kann in den Citratzyklus eingeschleust werden, da es einem Zwischenprodukt dieses Stoffwechselwegs entspricht. Der Abbau einer Fettsäure liefert dabei ungefähr 108 mol ATP, eine große Menge an Energie. Dagegen liefert die anaerobe Glykolyse (Glucoseabbau bei Sauerstoffmangel) lediglich 2 mol ATP und die aerobe Glykolyse (Glucoseabbau in Anwesenheit von Sauerstoff) 36 mol ATP. In der mitochondrialen Regulation spielt die ATP-Steigerung durch die Verschiebung der Verbrennungsprofile eine entscheidende Rolle. Es gibt heute Methoden, mit denen diese Verschiebung herbeigeführt werden kann – eine Revolution in der Fettverbrennung und für Viele die Lösung ihrer gesundheitlichen Probleme. Das Ergebnis kann schnell und exakt mit der Stoffwechsellmessung in Ruhe (Ruhe-spirometrie) ermittelt werden.

Praxisorientierter Einsatz

Für den Einsatz der Stoffwechsellmessung sind nicht nur die Qualitätssicherung weiterer Therapien die ausschlaggebenden Argumente für Praxen und Unter-

nehmen und deren Kunden, wengleich auch diese für eine seriöse Dienstleistung als essenziell gelten sollten. Daneben sind sicherlich auch Wirtschaftlichkeit und Benutzerfreundlichkeit von Interesse, um nur zwei Aspekte zu nennen.

Ein erhöhtes Gesundheitsbewusstsein bietet allen Beteiligten Chancen zur Nutzung der „neuen Gesundheitswirtschaft“, die sich insbesondere durch eine Individualisierung des Angebots auszeichnet. Die Stoffwechsellmessung ist auf Grundlage der heutigen technischen und biophysikalischen Möglichkeiten als seriöse Gesundheitsdienstleistung einzustufen, die nicht nur für den primären Gesundheitsmarkt, sondern auch für Akteure des sekundären Gesundheitsmarkts (wie z. B. Ernährungsberater und Apotheken) interessant sein dürfte.

Resultierend aus soziokulturellen und ökonomischen Einflussfaktoren ist in der heutigen Zeit ein Wandel im Gesundheitssystem zu beobachten. Prognosen zufolge ist auf dem Gesundheitsmarkt auch weiterhin ein hohes Wachstumspotenzial zu erwarten, weshalb die Erschließung neuer Kundenbetreuungsprogramme zielführend für eine Umsatzsteigerung ist. Die indirekte Kalorimetrie bietet im Rahmen der Stoffwechsellmessung eine Möglichkeit zur Positionierung und Expansion.

Michael Marx, Dipl.-Sportwiss. (Univ.)
Bahnhofstraße 52A
83620 Feldkirchen
T +49 (0)8063.2071610
F +49 (0)8063.2071611
m.marx@dg-es.de
www.stoffwechsellmessung.de

Literatur

- [1] Ahlers, K. (1967). *Der Sauerstoffverbrauch in Ruhe (Grundumsatz) bei gesunden Männern und Frauen im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen Messgrößen*. München: Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, S. 8–10
- [2] de Marées, H. (2003). *Sportphysiologie*. Köln: Sport & Buch Strauß., S. 220ff, S. 225, S. 381–386
- [3] Friedrich, O. (2007). *Das Erste – kompakt: Physiologie Gk1*. Heidelberg: Springer, S. 106
- [4] Haber, P. (2007). *Lungenfunktion und Spiroergometrie*. Wien: Springer, S. 1-3ff.
- [5] Holdy, K. E. (2004). *Monitoring Energy Metabolism with Indirect Calorimetry: Instruments, Interpretation, and Clinical Application*. *Nutr Clin Pract* (19), S. 447–454
- [6] Hollmann, W. & Strüder, H. K. (2009). *Sportmedizin*. Stuttgart: Schattauer, S. 320+336
- [7] Javed, F., He, Q., Davidson, L. E., Thornton, J. C., Albu, J. & Bost, J. (2010). *Brain and high metabolic rate organ mass: contributions to resting energy expenditure beyond fat-free mass*. *Am J Clin Nutr* (91), S. 907–912

- [8] Klinker, R., Pape, H.-C., Kurtz, A. & Silbernagl, S. (2010). *Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme, S 268-270, S. 484–488
- [9] Kroidl, R. F., Schwarz, S. & Lehnigk, B. (2010). *Kursbuch Spiroergometrie*. Stuttgart: Georg Thieme, S. 8, S. 11, S. 15, S. 22, S. 52, S. 103, S. 133, S. 216
- [10] Müller, M. J. (2007). *Ernährungsmedizinische Praxis*. Heidelberg: Springer Medizin, S. 79–92
- [11] Müller, M. J., Bosy-Westphal, A., Klaus, S., Kreyman, G., Lührmann, P. M., Neuhäuser-Berthold, M., et al. (2004). *WHO equations have shortcomings for predicting resting energy expenditure in persons from a modern, affluent population: generation of a new reference standard from a retrospective analysis of a German database of resting energy expenditure*. *Am J Clin Nutr* (80), S. 1379–1390
- [12] Renggli, R. (1981). *Die Anfänge der Spirometrie im 19. Jahrhundert*. *Gesnerus* (38), S. 247–258
- [13] Röthig, P. & Prohl, R. (2003). *Sportwissenschaftliches Lexikon*. Schorndorf: Karl Hofmann, S. 233, S. 457