

Appliguide

PDF PROOF

**Messung des Gasaustausches
und der indirekten Kalorimetrie**



Messung des Gasaustausches und der indirekten Kalorimetrie

Jukka Takala, MD, PhD
Professor Anesthesiologie and Intensiv Care
Director, Critical Care Research Program
Division of Intensive Care
Department of Anesthesiology and Intensive Care
Kuopio University Hospital
Kuopio, Finland

Korrespondenz:
Jukka Takala
Department of Anesthesiology and Intensive Care
Kuopio University Hospital
FIN-70210 Kuopio, Finland
Tel: +358 17 173 311
Fax: +358 17 173 443
e-mail: jukka.takala@kuh.fi

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Einführung	2
Methodische Überlegungen zur Gasaustauschmessung	3
Deltatrac	3
Bedside-Modul	6
Physiologische Aspekte der Gasaustauschmessung	9
Sauerstoffverbrauch	9
Kohlendioxidproduktion	10
Respiratorischer Quotient und Respiratorische Gasaustausch Relation (RER)	11
Energieumsatz	12
Methodische Überlegungen zur klinischen Anwendung	13
Repräsentative Beispiele und Fallstudien klinischer Anwendungen der Gasaustauschmessung	15
Präoperative Ernährung	15
Längerfristige postoperative Ernährung	17
Längerfristige Intensivbehandlung	18
Ernährung und Beatmung	21
Veränderung des Sauerstoffverbrauchs und des Sauerstoffangebots	23
Kontinuierliches Monitoring des Herz-Zeit-Volumens (HZV)	24
Komponenten des Beatmungsbedarfs	25
Steigerung des Atemminutenvolumens	26
Messung der alveolären Ventilation	27
Technische Probleme und physiologische Änderungen	28
Zusammenfassung	32
Literaturvorschlag	33

Vorwort

Die Absicht dieses Buches ist es, eine Einführung in die Grundprinzipien und die klinische Anwendung der Gasaustauschmessung zu geben. Es wird der physiologische und technische Hintergrund beschrieben sowie abschließend der Schwerpunkt auf Beispiele und klinische Anwendungen gelegt.

Für die Leser, die an weiterführenden und detaillierteren physiologischen sowie technischen Informationen interessiert sind, wird auf das „Handbook of Gas Exchange and Indirect Calorimetry“ verwiesen (J. Takala and P. Meriläinen, Datex-Ohmeda Document 876710).

PDF PROOF

Einführung

Fortschritte in der Medizintechnik ermöglichen eine exakte Messung des Gasaustausches der Lunge unter verschiedenen klinischen Bedingungen. Die neueren Geräte zur indirekten Kalorimetrie sind portabel und einfach anzuwenden, was den Einsatz in der klinischen Routine erleichtert. Die klinische Anwendung reicht von der Bestimmung des Energiebedarfs, der Ernährung in Mangelsituationen sowie bei Fettleibigkeit bis hin zur umfassenden Analyse der Beatmung und des Sauerstofftransport bei Patienten mit komplexen kardiorespiratorischen Problemen. Auch wenn die Messung einfach ist, sind für genaue und reproduzierbare Ergebnisse Kenntnisse der Grundprinzipien der Messmethodik und ihrer physiologischen Grundlagen erforderlich. Die indirekte Kalorimetrie ist anfällig für Messfehler. Für die routinemäßige Durchführung sind daher Qualitätskontrollen notwendig.

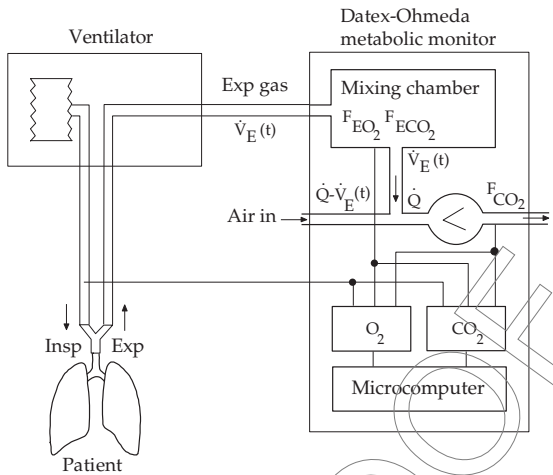
Trotz genauer Messungen beeinflussen einige klinische und physiologische Faktoren die Qualität der Gasaustauschmessung. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden. Der Zusammenhang zwischen Beatmung und Gasaustausch ist dabei von entscheidender Bedeutung. Jede Änderung der alveolären Ventilation zeigt eine Änderung der CO_2 -Abgabe, was jedoch nicht einer Änderung der metabolischen CO_2 -Produktion entspricht. Erst mit dem erneuten Erreichen eines Gleichgewichts entspricht die CO_2 -Abgabe der CO_2 -Produktion. Gleiches gilt auch für die Messung des Sauerstoffverbrauchs, wobei die Störungen von kürzerer Dauer sind. Schmerzen und plötzliche Veränderungen der Gewebepfusion führen ebenfalls zu einer Beeinflussung der Sauerstoffaufnahme wie auch der CO_2 -Abgabe im Gewebe. Dieser Zusammenhang wird in dem Abschnitt „Physiologische Aspekte der Gasaustauschmessung“ nochmals näher erläutert.

Methodische Überlegungen zur Gasaustauschmessung

Neuere Geräte zur indirekten Kalorimetrie ermöglichen eine kontinuierliche, nicht-invasive Erfassung des respiratorischen Gasaustausches. Die meisten derzeit verfügbaren Geräte verwenden eine „open-circuit“-Technik. Das expiratorische Gas wird gesammelt, das Gasvolumen oder der Flow bestimmt und die inspiratorische sowie die expiratorische Sauerstoff- und die Kohlendioxidkonzentration analysiert. Sauerstoffverbrauch ($\dot{V}O_2$) und Kohlendioxidproduktion ($\dot{V}CO_2$) werden aus diesen Daten berechnet. Sowohl inspiratorischer als auch expiratorischer Flow müssen bestimmt werden. Gebräuchlicher ist jedoch, dass nur ein Flow wird bestimmt und der andere über die Haldan'sche Transformation berechnet wird. Die Haldan'sche Transformation setzt voraus, dass nur O_2 und CO_2 in der Lunge ausgetauscht werden und der Rest des Atemgases (ausgenommen Wasserdampf) dasselbe Volumen im inspiratorischen und expiratorischen Gas haben. Wenn ein Flow bekannt ist, kann der andere berechnet werden. Eine kontinuierliche Messung des Atemgas-Flows ist mit Problemen wie Einflüssen durch Luftfeuchtigkeit, Änderungen in der Gaszusammensetzung, Sekret und einer dynamischen Flowantwort der Sensoren verbunden. Komplizierte Kompensationen, Kalibrationsalgorithmen und eine häufige Reinigung sind notwendig um diese Effekte zu eliminieren.

Deltatrac

Der Deltatrac umgeht dieses Problem der Flowsensoren durch Anwendung einer Dilutionsmethode, wobei ausgeatmete Gase in einem bekannten, konstanten Flow verdünnt werden.



$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{Q} \cdot F_{CO_2}$$

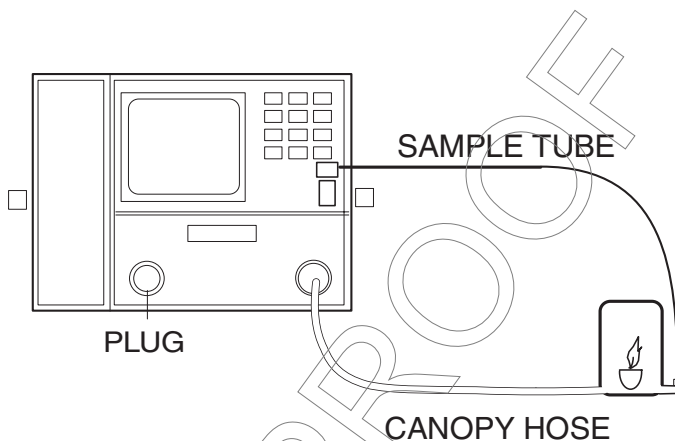
$$RQ = \frac{1 - F_{IO_2}}{F_{IO_2} - F_{EO_2} - \frac{F_{ECO_2} - F_{IO_2}}{RQ}}$$

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{CO_2} / RQ$$

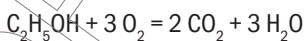
Durch einen Flowgenerator wird ein konstanter Flow erzeugt, der vom zugeführten Expirationsgas unabhängig ist. Vielfältige Analysen der ein- und ausgeatmeten Gase und der verdünnten Expirationsgase sind erforderlich. Die Haldan'sche Transformation wird dabei angewandt. Die Einzelheiten der Messtechnik werden in „Handbook of Gas Exchange and Indirect Calorimetry“, S. 39-41 erläutert.

Die einfache Anwendung der modernen Gasaustauschmonitore führt zu einem gewissen Vertrauen der Anwender in die Messtechnik. Gas-Sensoren, Flow und übergreifende System-Funktionen sollten jedoch bei jeder Messung konsequent kalibriert und überprüft werden. Die Schlüsselkomponente, der vom Deltatrac verwendeten Methode, ist der Flowgenerator. Die Stabilität über einen langen Anwendungszeitraum ist gut. Die Leistungsfähigkeit bedarf trotzdem einer regelmäßigen Überprüfung.

Das Alkoholbrenner-Test-Set aus dem Herstellerangebot bietet eine einfache, reproduzierbare Möglichkeit zur quantitativen Verbrennung von Alkohol. Wenn eine bekannte Menge von Alkohol verbrannt wird und die Gesamtmenge des produzierten CO_2 gemessen und mit der erwarteten Menge verglichen wird, kann der Flow des Flowgenerators berechnet werden.



Ethanol wird nach der folgenden chemischen Reaktion oxidiert:



Die Atomgewichte von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff sowie Ethanol werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

C	12.011 g
H	1.008 g
O	15.999 g
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46.069 g

Das molare Volumen von Gas unter STPD (Standard Temperature and Pressure, Dry gas) Bedingungen ist 22.4138 l. Unter Anwendung der oben genannten Reaktionsgleichung wird berechnet, daß 1 g Ethanol unter Verbrennung 0,973 Liter CO_2 produziert. Die Dichte von Ethanol beträgt 0,78522 g/ml bei 25 °C. Ein Volumen von 5 ml reinen Alkohol (100%) produzieren folglich 3820 ml Kohlendioxid.

Erwachsenen Flow Konstante:

$$\text{Neuer Flow} = 1,03 * \frac{3820 \text{ ml}}{\text{Gesamtmenge CO}_2 \text{ in ml}} * \text{alter Flow}$$

Pädiatrische Flow Konstante:

$$\text{Neuer Flow} = \frac{3820 \text{ ml}}{\text{Gesamtmenge CO}_2 \text{ in ml}} * \text{alter Flow}$$

Die Gas-Sensoren sollten vor jeder Messung kalibriert und die gesamte Systemleistung regelmäßig durch Messung des RQs von verbranntem Alkohol geprüft werden. Eine detaillierte Diskussion verschiedener Aspekte der Validität der Gasaustauschmessung kann im „Handbook of Gas Exchange and Indirect Calorimetry“, S. 46-55 nachgeschlagen werden.

Bedside-Modul

Kombinierte Messungen von Atemgasen und Flow ermöglichen ein kontinuierliches Monitoring des Sauerstoffverbrauchs und der Kohlendioxidproduktion bei intubierten Patienten. Der Energieumsatz und der respiratorische Quotient können ebenso berechnet werden.

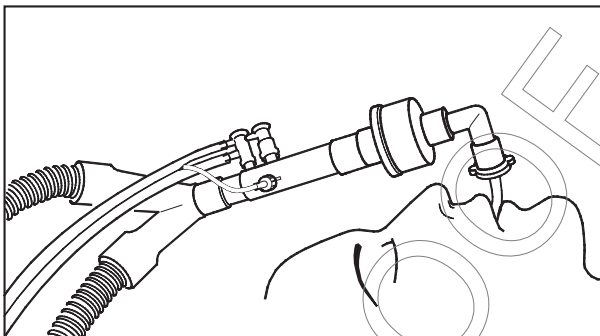
Im Gasmodul von Datex-Ohmeda wird ein paramagnetischer Sensor zur Messung der Sauerstoff-Kurve benutzt und die Infrarot-Bank für die CO₂-Kurve. Beide Messungen basieren auf dem Seitenstrom-Prinzip.

In dem im Atemweg des Patienten lokalisierten D-Lite Flow Sensor wird der Flow basierend auf dem Druckabfall über einen patentierten Widerstand für turbulente Flüsse gemessen.

Die Atemzug-für-Atemzug Messung des pulmonalen Gasaustausches ist technisch sehr anspruchsvoll und verlangt hochentwickelte Kompensations- und Datenverarbeitungsalgorithmen, um für den klinischen Bereich hinreichend genaue Ergebnisse zu erzielen.

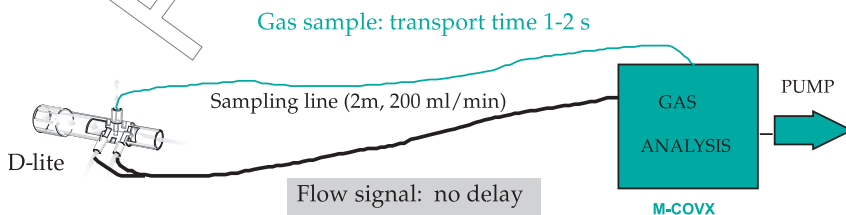
Durch das Seitenstromprinzip werden die Gaskonzentrationen und der Flow nicht simultan gemessen. Wenn eine Gasprobe den D-Lite-Sensor durchströmt, wird das Flow-Signal mit einer zu vernachlässigenden

ABBILDUNG 1



Verzögerung (weniger als 10 ms) aufgezeichnet, da sich die Druckdifferenz zum Modul durch den Atemschlauch mit Schallgeschwindigkeit fortleitet. Im Gegensatz dazu braucht die Gasprobe ungefähr 1,5 s um durch den Probenschlauch zum Modul zu gelangen, wo zunächst die O_2 und dann die CO_2 Konzentration gemessen wird.

ABBILDUNG 2

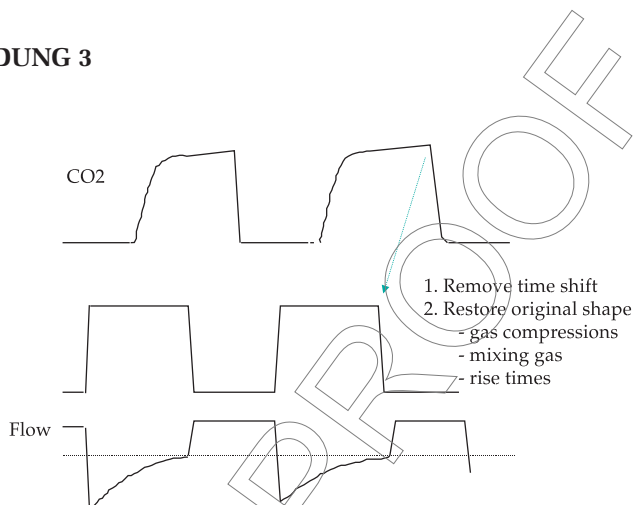


Synchronisation von Gas- und Flow-Kurven

Die Transportzeitverzögerung ist nicht konstant, muss aber für Fluktuationen im Probenschlauch, Druckunterschiede beim D-Lite und Veränderungen der Gaskonzentrationen kompensiert werden.

Zusätzlich müssen die endgültigen Anstiegszeiten der O₂- und CO₂-Sensoren durch einen Dekonvolutionsalgorithmus kompensiert werden.

ABBILDUNG 3



Gaskurven Rekonstruktion

Nach Rekonstruktion der tatsächlichen Wellenform der Gaskonzentrationen und Verschiebung der Kurven zum passenden Flow-Signal, basieren die endgültigen Berechnungen auf einer mathematischen Integration aus dem Produkt von Flow und dem jeweiligen Gassignal. Zusätzlich kommt die Haldan'sche Transformation wie im Deltatrac zur Anwendung, um die Notwendigkeit der absolut genauen Volumenbestimmung in beide Richtungen zu umgehen. Dadurch, dass alle diese Aufgaben eine hohe Rechenleistung erfordern, wurden spezielle Algorithmen entwickelt, um eine Software zu erhalten, die in einem Modul mit begrenzter Rechenleistung arbeiten kann.

Physiologische Aspekte der Gasaustauschmessung

Der Gasaustausch kann auch über einen kurzen Zeitraum Atemzug für Atemzug bestimmt werden. Ein Messzyklus von 20 bis 30 Minuten ist dabei aber vorzuziehen. Eine Verlängerung der Messperiode führt zu valideren Informationen über den mittleren Gasaustausch. Schnelle, passagere Änderungen des Gasaustausches können physiologisch sein und z.B. bei Veränderungen der physischen Aktivität, Stress oder als Artefakt bei instabilen inspiratorischen Gaskonzentrationen oder bei Veränderungen der Atemmuster auftreten. Diese können zu einer abrupten Änderung der inspiratorischen oder expiratorischen Gaskonzentration führen, sowohl unter maschineller Beatmung als auch Spontanatmung.

Sauerstoffverbrauch

Die indirekte Kalorimetrie misst den Sauerstoffverbrauch als auch die Sauerstoffaufnahme in der Atemluft. Akute Änderungen der Atmung, hämodynamische oder physische Aktivität können unabhängig von der Messmethode zu einer breiten Variabilität des $\dot{V}O_2$ führen. Flüchtige Änderungen im gemessenen $\dot{V}O_2$ werden in längeren Messungen erfasst.

Unter aeroben Bedingungen, hängt der $\dot{V}O_2$ von der metabolischen Aktivität der Gewebe ab.

Die verschiedenen Substrate, die zur Energiegewinnung genutzt werden, beeinflussen bei einer vorgegebenen metabolischen Rate auch den $\dot{V}O_2$.

Die Sauerstoffmenge, die zur Produktion von 1 kcal Energie aus Kohlenhydraten benötigt wird, beträgt 207 ml, von Fett 213 ml und von Proteinen 223 ml.

Wenn der metabolische Sauerstoffbedarf des Gewebes die angebotene Sauerstoffmenge übersteigt, hängt der Sauerstoffverbrauch des Gewebes vom Sauerstoffangebot ab. Es wird dann Laktat durch den anaeroben Stoffwechsel produziert. Der unter anaeroben Stoffwechsel gemessene $\dot{V}O_2$ aus dem Atemgas entspricht nicht dem Sauerstoffbedarf im Gewebe, da sich im Gewebe eine Sauerstoffschuld entwickelt. Treten wieder aerobe Bedingungen ein, zeigt sich die Sauerstoffschuld in einem Anstieg des Sauerstoffverbrauchs.

Kohlendioxidproduktion

Die Messung der Kohlendioxidproduktion ($\dot{V}CO_2$) mittels indirekter Kalorimetrie kann eine Fehleranfälligkeit besitzen, wenn nicht die enge Beziehung zwischen $\dot{V}CO_2$, alveolärer Ventilation (VA) und arteriellem CO_2 ($PaCO_2$) berücksichtigt wird. Nach dem Bohr'schen Gesetz ist $\dot{V}CO_2 = \dot{V}A \cdot PaCO_2/k$, wobei k eine von Einheit und Messbedingungen wie Druck, Temperatur und Feuchtigkeit abhängige Konstante ist. Diese Konstante beträgt 0,1150, wenn $\dot{V}CO_2$ in ml/min, Standard Temperatur (0°C) und trockenem Gas (STPD), VA in l/min, 37°C, und Wasserdampf gesättigtem Gas (BTPS) und $PaCO_2$ in kPa angegeben werden. Die Bohr'sche Gleichung demonstriert, dass die Messung der CO_2 -Produktion empfindlich auf Änderungen in der Atmung reagiert: Jede Änderung der alveolären Ventilation zeigt sich in einer Änderung der $\dot{V}CO_2$, bis erneut ein Gleichgewicht des $PaCO_2$ eingetreten ist.

Im Gleichgewicht hängt die $\dot{V}CO_2$ von der metabolischen Aktivität der Gewebe und - ebenfalls wie die Sauerstoffaufnahme - von den Substraten des Energiestoffwechsels ab. Die Produktion von 1 kcal Energie aus Kohlenhydraten führt zu 207 ml CO_2 , aus Fett zu 151 ml und aus Proteinen zu 181 ml CO_2 . Jede sich verändernde Variable aus der Bohr'schen Gleichung führt zu einer Änderung des im Körper gespeicherten CO_2 . Soll die metabolische CO_2 -Produktion bestimmt werden, muss der gespeicherten CO_2 -Menge genügend Zeit geben werden, um sich zu stabilisieren. Die dafür erforderliche Zeit variiert zwischen 30 und 120 Minuten. Eine kontinuierliche Messung des Gasaustausches ermöglicht die Erkennung eines Gleichgewichts.

Respiratorischer Quotient und Respiratorische Gasaustausch Relation (RER)

Das Verhältnis von $\dot{V}CO_2$ und $\dot{V}O_2$ wird respiratorischer Quotient (RQ) genannt, wenn es unter Gleichgewichtsbedingungen gemessen wird. Liegt kein Gleichgewicht vor, ist die Bezeichnung Respiratorische Gasaustausch Relation (RER) treffender. Von einem Gleichgewicht ausgehend, reflektiert der RQ die Mischung der Substrate, die zur Energiegewinnung metabolisiert werden. Der RQ von Kohlenhydraten beträgt 1, der RQ von Fett 0,7 und der RQ von Proteinen beträgt annähernd 0,81. Eine detaillierte Analyse der Substratoxidation erfordert die Messung der Harnstoffausscheidung im Urin zur Erfassung der Proteinoxidation und Berechnung des nicht proteingebundenen RQs. In der klinischen Anwendung werden größere Verschiebungen in der Substratoxidation an der Änderung des Gesamt-RQs erkannt. Eine Steigerung der Glukoseoxidation zeichnet sich durch einen RQ nahe 1 ab, wogegen eine steigende Fettverbrennung zu einem RQ nahe 0,7 führt. Ein RQ im Gleichgewicht über 1 spricht für eine Fettsynthese, was unter klinischen Bedingungen eine Rarität ist und mit einer exzessiven Kohlenhydratnahrung verbunden ist. Auch unter diesen Bedingungen steigt der RQ selten über 1,3. Ein RQ im Gleichgewicht unter 0,7 ist ebenso selten, könnte aber bei einer Ketoazidose beobachtet werden, wenn die Ketonkörper unvollständig oxidiert und mit dem Urin ausgeschieden werden. RQ-Werte über 1,0 und unter 0,7 sollten demnach gründlich auf Messfehler und fehlende Gleichgewichtsbedingungen geprüft werden. Die häufigste Ursache für unphysiologische oder fehlerhafte RQ-Werte sind Veränderungen in der Atmung: Hyperventilation lässt den RQ ansteigen, Hypoventilation vermindert den RQ bis jeweils ein erneutes Gleichgewicht der gespeicherten CO_2 -Menge im Körper erreicht wurde. Analog dazu lässt eine Sauerstoffschuld den RQ ansteigen, wogegen der Ausgleich einer Sauerstoffschuld zur Reduktion des RQs führt.

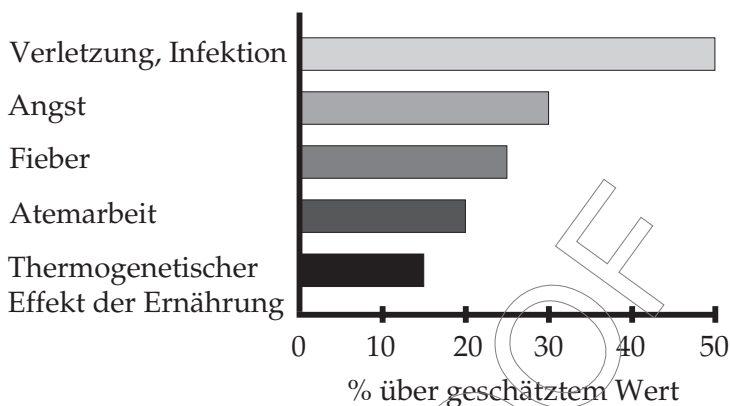
Energieumsatz

Der Energieumsatz kann durch die indirekte Kalorimetrie nicht direkt gemessen werden, aber aus den Gasaustauschvariablen und der Proteinverbrennung berechnet werden. Der relative Anteil der Proteinverbrennung am Gesamt-Energieumsatz ist auch unter katabolen Bedingungen klein und kann geschätzt oder vernachlässigt werden, ohne einen größeren Fehler bei der Bestimmung des Energieumsatzes zu erhalten. Verschiedene Formeln sind zu diesem Zweck entwickelt worden. Die Formel nach Weir ist dabei die gebräuchlichste. Wenn $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ in ml/min STPD und Harnstoff im Urin in g/d angegeben werden, beträgt der Energieumsatz in kcal/d = $5,50 * \dot{V}O_2 + 1,76 * \dot{V}CO_2 - 1,99 * \text{Harnstoff-N}$. Die mathematische Herleitung dieser Formel findet sich im „Handbook of Gas Exchange an Indirect Calorimetry“, S. 16.

Normalwerte in Ruhe für $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ variieren je nach Körpergröße, Alter und Geschlecht des Patienten. Grobe Schätzungen der Normalwerte können nach der Harris-Benedict Formel berechnet werden, die sich auf Untersuchungen an gesunden Probanden von 1919 stützt. Verschiedene Studien haben diese Formel zur Berechnung des Ruhe-Energieumsatzes als relativ genau evaluiert. Eine detaillierte Diskussion der Normalwerte findet sich ebenfalls im „Handbook of Gas Exchange an Indirect Calorimetry“, S. 19-20.

Ein Anstieg des Energieumsatzes spiegelt sich im proportionalen Anstieg von $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ wieder. Ein kurzzeitiger Anstieg um bis zu 200% tritt bei Kältezittern oder Krampfanfällen auf. Krankheitsbilder, die mit einem Hypermetabolismus einhergehen wie z.B. Verletzungen und Sepsis können einen Anstieg des Sauerstoffverbrauchs um 50%, in Extremfällen auch um bis zu 100%, verursachen (Abb. 4). Patienten mit schweren Lungenerkrankungen und einer Beeinträchtigung der Atemmechanik können einen deutlichen Anstieg der Atemarbeit aufweisen: Der Sauerstoffverbrauch durch die Atmung kann bis zu 20% des gesamten $\dot{V}O_2$ betragen, wobei er unter normalen Bedingungen nur 5% des gesamten $\dot{V}O_2$ ausmacht.

ABBILDUNG 4



Faktoren, die den Energieumsatz beeinflussen

Hämodynamisch schwerwiegende Ereignisse, wie ein Herz-Kreislaufversagen, können akut den $\dot{V}O_2$ und die $\dot{V}CO_2$ reduzieren. Bei einer sich anschließenden normalisierenden Gewebepfusion kann ein kompensatorischer Anstieg hervorgerufen werden.

Methodische Überlegungen zur klinischen Anwendung

Die Messung des Gasaustausches am spontan-atmenden Patienten sollte vorzugsweise mit einer Haube erfolgen, da alle Methoden, die die Atemwege (z.B. Mundstücke und Nasenklammern) oder das Atemmuster verändern sowie Angst auslösen können, die $\dot{V}O_2$ - und die $\dot{V}CO_2$ -Rate beeinflussen. Wenn eine Haube verwendet wird, ist ein hoher Gesamtfluss durch die Haube erforderlich, um eine CO_2 -Akkumulation zu verhindern. Die Verdünnung des Expirationsgases mit dem hohem Flow reduziert die inspiratorisch-expiratorische Gaskonzentrationsdifferenz. Die Verwendung von inspiratorisch erhöhten Sauerstofffraktionen mit einer Standard-Haube ist nicht möglich. Die Messung mit einem FiO_2 von 40 bis zu 50 % ist jedoch durch Verwendung eines speziellen Sauerstoffzufuhrsatzes für den Deltatrac II möglich.

Gasaustauschmessungen am mechanisch beatmeten Patienten sind anfällig für verschiedene potentielle Fehlerquellen:

1. Hohe positive Beatmungsdrücke im Schlauchsystem des Beatmungssystems können die Gasanalyse stören.
2. Die Haldan'sche Transformation sollte normalerweise nicht bei hohen inspiratorischen Sauerstofffraktionen angewendet werden. In der Praxis stellt ein FiO_2 von 0,6 bis 0,7 die Obergrenze dar.
3. Instabilität der inspiratorischen Sauerstofffraktion durch die Charakteristik des Gasmischers und durch Veränderungen des Gasdruckes der Gasquelle.
4. Leckagen im Beatmungssystem
5. Temperatur und Feuchtigkeit

Die durch hohe Beatmungsdrücke, Temperatureffekte und Feuchtigkeit auftretenden Fehler können durch einen entsprechenden Geräteaufbau vermieden werden. Die inspiratorische Sauerstoffkonzentration kann durch den Gebrauch einer Mischkammer (wie einen Befeuchter) und durch einen entsprechenden Druckregulator zwischen Gasquelle und dem Beatmungsgerät (ausreichender Druck und Flow müssen gewährleistet sein!) stabilisiert werden.

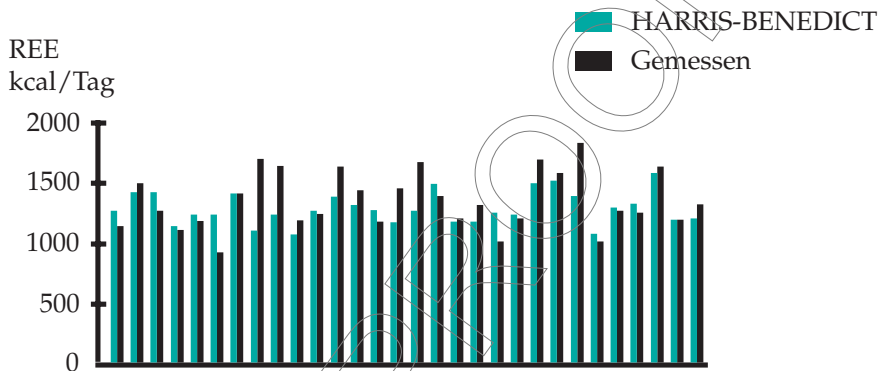
Verschiedene Beatmungsstrategien können zu technischen wie auch zu physiologischen Problemen in der Ergebnisinterpretation führen. Eine Änderung der inspiratorischen Sauerstofffraktion ist vielfach unter kontrollierter maschineller Beatmung vermeidbar. Allerdings sind größere Variationen durch technische Charakteristika der Gasmischer bei anderen Beatmungsmodi wie z.B. bei der intermittierenden maschinellen Beatmung (IMV) zu erwarten. Zusätzlich erhöht ein variables Atemmuster unvermeidlich die physiologische Variation des Gasaustausches. Der Effekt der physiologischen Veränderung auf die gemessenen Mittelwerte kann durch eine Verlängerung der Messperiode vermindert werden.

Repräsentative Beispiele und Fallstudien klinischer Anwendungen der Gasaustauschmessung

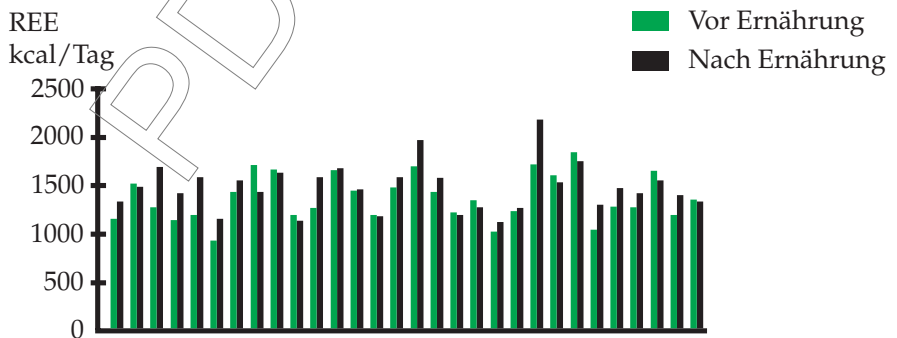
Präoperative Ernährung

Abbildung 5-6: Eine präoperative hochkalorische Ernährung kann bei Patienten mit signifikanten Gewichtsverlust oder geplanter großer Bauchchirurgie indiziert sein. Die für die hochkalorische Ernährung verbleibende Zeit ist normalerweise aus praktischen Gründen auf ein bis zwei Wochen begrenzt. Das Ziel dieser Ernährung ist die Wiederherstellung körperlicher Ressourcen durch eine positive Energie- und Proteinbalance. Kennzeichnend für viele Patienten, die eine präoperative Ernährung benötigen, ist eine Mangelernährung oder eine maligne Erkrankungen. Die Mangelernährung selbst führt zu einer Verminderung des Energieumsatzes. Die maligne Erkrankung dagegen erhöht den Energieumsatz, wodurch sich die klinische Evaluation des Energiebedarfs schwierig gestaltet. Die Messung des Energieumsatzes anstelle einer Schätzung gewährleistet, dass die präoperative Ernährung eine adäquate Energiemenge beinhaltet ohne das Risiko einer bedeutsamen Überernährung. Die Abbildungen demonstrieren Ergebnisse von Gasaustauschmessungen an 30 Patienten, bei denen die präoperative Ernährung vor großen gastro-intestinalen Eingriffen indiziert war. Die Spannweite des pränutritiven Energieumsatzes ist groß. Die Differenz zwischen dem gemessenen und vorhergesagten Energieumsatz (berechnet nach Harris-Benedict) kann für den einzelnen Patienten nicht verwertet werden (Abbildung 2). In diesem Fall scheinen ungefähr 1/3 der Patienten trotz der Mangelernährung hypermetabol zu sein, 1/6 dagegen hypometabol. Der Energieumsatz vor der Ernährung kann als Richtwert für den Ernährungsbedarf genutzt werden. Durch die Nahrungszufuhr kommt es zu einem deutlichen Anstieg des Energieumsatzes. Der Energieumsatz nach der Nahrungszufuhr beträgt ungefähr den 1,2fachen Wert des Energieumsatz vor der Nahrungsaufnahme, wie in den Abbildungen 2-3 für die gleichen 30 Patienten gezeigt wird. Bei annähernd 1/6 der Patienten ist der Anstieg des Energieumsatzes während der Nahrungszufuhr so hoch, dass die Energiebilanz negativ ist, obwohl die Energieaufnahme weiter gesteigert wird.

ABBILDUNG 5

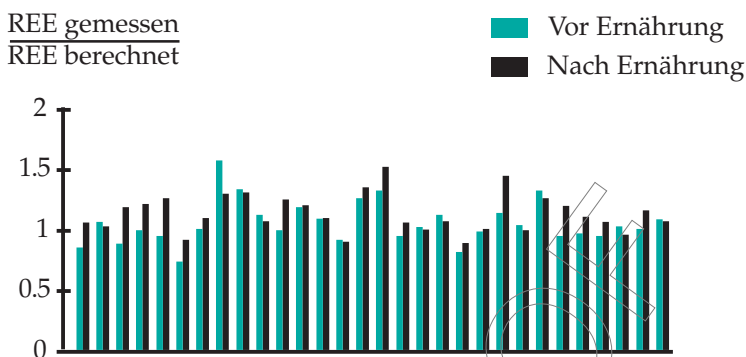


Berechneter und gemessener Energieumsatz bei gesättigten Patienten vor präoperativer Ernährung



Veränderungen des Energieumsatzes während präoperativer Ernährung bei gesättigten Patienten

ABBILDUNG 6



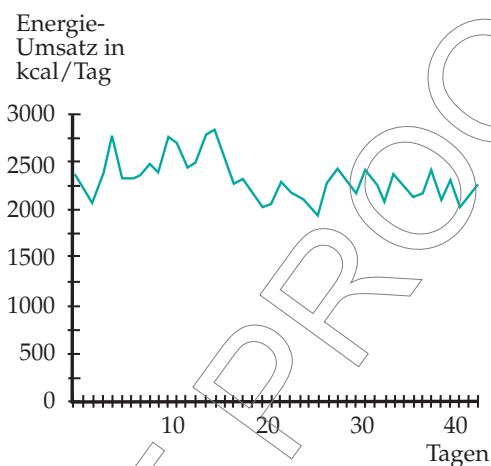
Veränderungen von gemessenem / berechnetem Energieumsatz während der präoperativen Ernährung gesättigter Patienten

Längerfristige postoperative Ernährung

Abbildung 7: Postoperative Komplikationen nach großen gastrointestinalen Eingriffen können sowohl eine längerfristige parenterale als auch enterale Ernährung erforderlich machen. Infektionen, chirurgische Interventionen und körperliche Aktivität des Patienten führen zu einer erheblichen Änderungen des Energieumsatzes und demzufolge zum vermehrten Risiko einer inadäquaten Ernährung. Eine längerfristig bestehende negative Energiebilanz kann zu Wundheilungsstörungen und eine Überernährung zu einer erhöhten pulmonalen Belastung führen. Die folgende Abbildung zeigt die Änderung des Energieumsatzes eines Patienten, der sich nach konservativer Therapie einer akuten Pankreatitis einer Pankreasresektion unterziehen musste. Der postoperative Verlauf wurde durch ein akutes Lungenversagen und einige septische Perioden kompliziert. Der Patient war während der ersten zwei Wochen meist hypermetabol. Sein berechneter Energieumsatz lag bei 1600 kcal/Tag, sein tatsächlicher Energieumsatz reichte von 2100 bis 2800 kcal (30 – 73 % über dem berechneten). Während der Genesung und einer schrittweisen Erholung blieb er für einige Wochen bemerkenswert hypermetabol (ungefähr +30 ...+40 %). Es ist offensichtlich, dass sowohl während der akuten Phase eines komplizierten, lang andauernden postoperativen

Verlaufs als auch während der Erholungsphase ein erhöhtes Risiko für eine Fehlernährung besteht. Die Messung des Energieumsatzes vereinfacht die Berechnung und Ermittlung einer adäquaten Ernährung.

ABBILDUNG 7



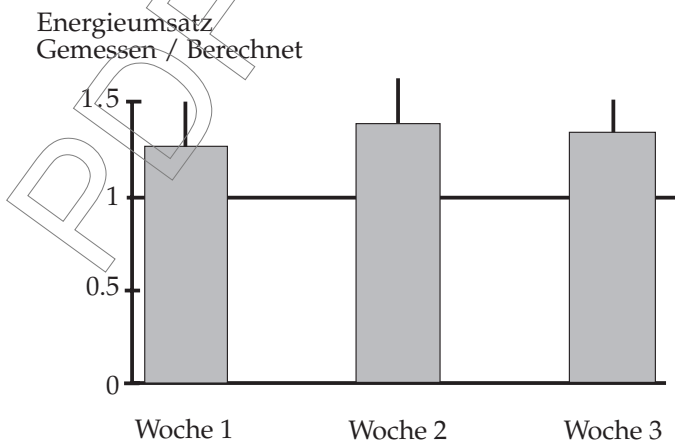
Energieumsatz während längerer schwerer Sepsis und schrittweiser Erholung

Längerfristige Intensivbehandlung

Abbildungen 8-10: Der mittlere Grad des Hypermetabolismus nach chirurgischen Eingriffen oder bei Traumapatienten kann bei manchen Patientengruppen mit relativ hoher Genauigkeit geschätzt werden. Bei Patienten mit unkomplizierten Verläufen kann damit die orale Ernährung schnell wieder aufgenommen werden. Größere Fehler sind in der Regel hier beim geschätzten Energiebedarf klinisch irrelevant. Annähernd 10 % der Intensivpatienten brauchen eine längerfristige Intensivbehandlung. Der durchschnittliche Grad des Hypermetabolismus ist relativ konstant, wie in Abbildung 8 mit dem mittleren wöchentlichen Energieumsatz

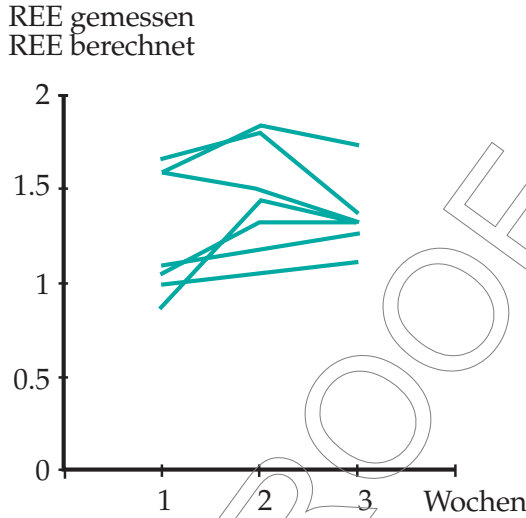
(dargestellt als Verhältnis von gemessenem zu berechnetem Energieumsatz) während drei aufeinanderfolgende Wochen für eine Gruppe von 7 Patienten, die längerfristig einer Intensivbehandlung bedurften, gezeigt wird. Im Gegensatz dazu besteht eine hohe individuelle Variabilität zwischen den Patienten (Abbildung 9). Abbildung 10 zeigt das Muster des täglichen Energieumsatzes bei einem 28-jährigem männlichen Patienten, der schwere Verbrennungen III° an 50 % der Körperoberfläche erlitt. Wie zu erwarten, ist der Patient hypermetabol. Das Ausmaß des Hypermetabolismus variiert erheblich und ist geringer als nach traditionellen Schätzungen erwartet wird. Da sowohl eine starke Überernährung als auch eine andauernde Unterernährung vermieden werden sollten, hilft die Messung des Energieumsatzes hier bei der Gestaltung und Beibehaltung einer adäquaten Ernährung bei diesen Patienten.

ABBILDUNG 8



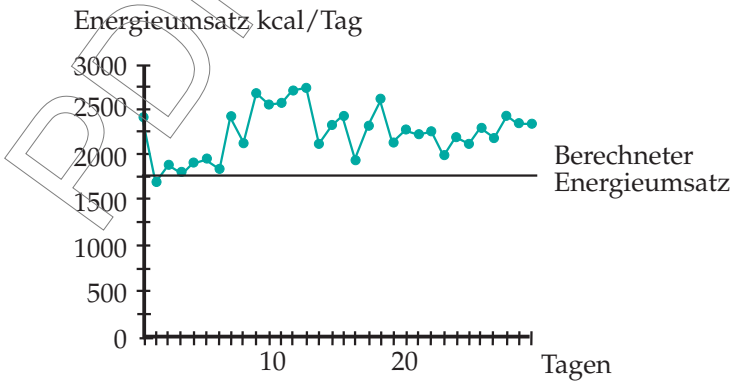
Hypermetabolismus während einer längerfristigen Intensivbehandlung

ABBILDUNG 9



Variation des mittleren Energieumsatzes während einer längerfristigen Intensivbehandlung

ABBILDUNG 10



Variation des Energieumsatzes während einer längerfristigen Intensivbehandlung nach großflächigem Verbrennungstrauma (50 % III. Grades)

Ernährung und Beatmung

Die Zusammenhänge zwischen Energieumsatz, Ernährung und Beatmungspflicht werden schematisch in Abbildung 11 gezeigt. Es ist offensichtlich, dass der Muskelabbau als das Resultat einer Mangelernährung oder eines Hyperkatabolismus unvermeidlich die Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur beeinträchtigt. Ernährung kann den Atembedarf durch eine vermehrte CO_2 -Produktion steigern. Die CO_2 -Produktion steigt an, wenn große Mengen Kohlenhydrate verabreicht werden. Daraus resultierend außerdem ein Anstieg des RQs. Insbesondere bei einer durch Überernährung induzierten Lipidsynthese ist der Anstieg der CO_2 -Produktion hoch. Bei Patienten mit schwerer Atemstörung kann eine relativ kleine Veränderung des RQs in Bezug auf den Atembedarf kritisch sein. Die Abbildung 12 zeigt die Änderung des Atembedarfs, des Gasaustausches und des Atemminutenvolumens bei einem Patienten mit Lungenversagen und einer längeren Beatmungsdauer, wobei die Steigerung der Lipidaufnahme und die daraus resultierende Reduktion des RQs das Weaning ermöglichte. Die Messung des Gasaustausches hilft die Energiebalance zu halten und zeigt daneben, ob die gewünschte Antwort auf die Änderung der Ernährung erreicht wurde. Dadurch, dass sowohl Überernährung als auch Mangelernährung zu Problemen beim Weaning führen können, ist die Messung des Gasaustausches und des Energieumsatzes besonders sinnvoll bei Patienten mit längerer Beatmungsdauer.

ABBILDUNG 11

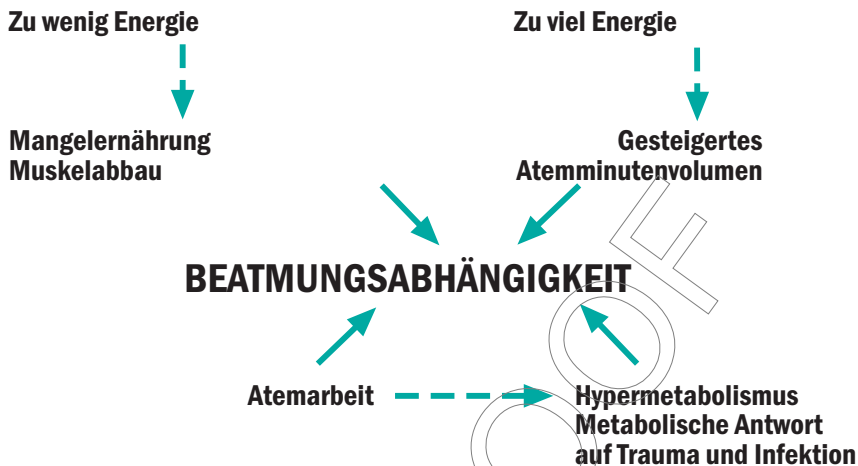
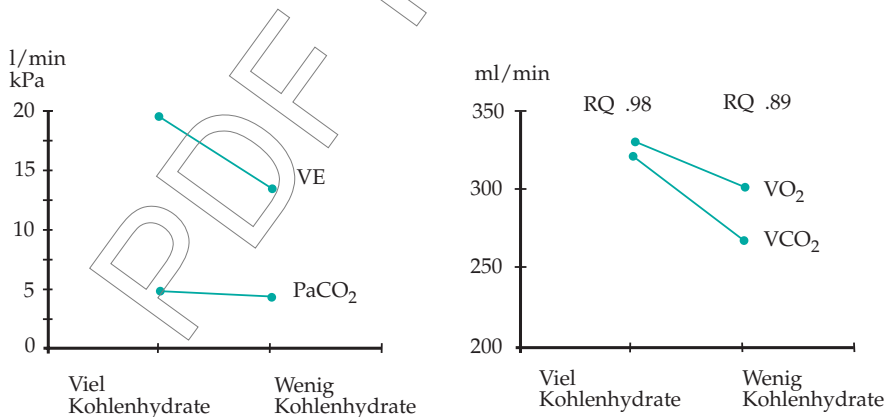


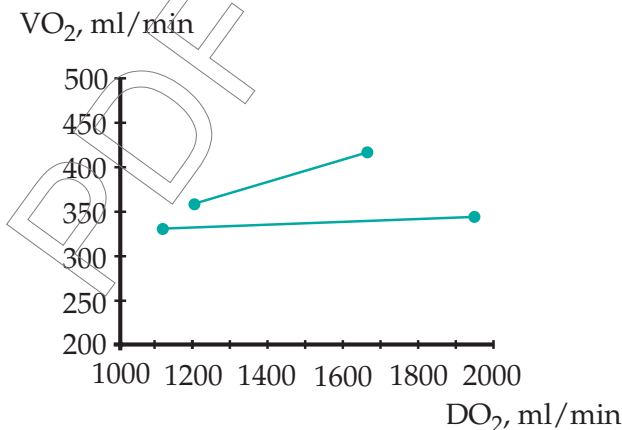
ABBILDUNG 12



Veränderung des Sauerstoffverbrauchs und des Sauerstoffangebots

Die gleichzeitige Messung von Sauerstoffangebot und Sauerstoffverbrauch kann eine Gewebsminderperfusion demaskieren. Wenn der Sauerstoffverbrauch bei einem erhöhten Sauerstoffangebot ansteigt, ist es sinnvoll, das erhöhte Sauerstoffangebot beizubehalten. Abbildung 13 zeigt zwei Patienten mit unterschiedlichen Sauerstoffverbrauchs-Antwortmustern auf ein gesteigertes HZV (und Sauerstoffangebot) bei akutem Lungenversagen (ARDS). Eine inadäquate Gewebspfusion wurde vermutet und versucht, das HZV durch Dobutamin zu steigern. Der resultierende deutliche Anstieg des Sauerstoffverbrauchs bei einem Patienten reflektiert wahrscheinlich die verbesserte Gewebspfusion. Andererseits ist ein steigendes Sauerstoffangebot die physiologische Folge eines erhöhten Sauerstoffverbrauchs.

ABBILDUNG 13



Antwort von VO_2 auf einen akuten Anstieg des DO_2 bei ARDS

Kontinuierliches Monitoring des Herz-Zeit-Volumens (HZV)

Abbildungen 14-15: Das Herz-Zeit-Volumen kann nach dem Fick'schen Prinzip kontinuierlich bestimmt werden, wenn Gasaustauschdaten (Sauerstoffverbrauch) mit arterieller und gemischt-venöser Sauerstoffsättigung (bestimmt durch ein Oximeter) und der Hämoglobinkonzentration kombiniert werden. Relativ einfache Computerprogramme können kontinuierlich HZV-Werte berechnen. Dies ermöglicht das Monitoring der Reaktionen auf vasoaktive Medikamente und Veränderungen der Beatmungsstrategien bei Patienten mit eingeschränkter kardiorespiratorischer Funktion. Diese Abbildungen zeigen die Veränderung des HZV und des Sauerstoffangebots bei einem Patienten mit Low Cardiac Output Syndrom nach einem herzchirurgischen Eingriff und dem Behandlungsversuch mit vasoaktiven Medikamenten sowie der PEEP-Behandlung eines Patienten bei beginnendem ARDS. Das Versagen auf Dobutamin alleine wurde schnell offensichtlich, dagegen konnte eine prompte Reaktion auf einen zusätzlichen Vasodilatator beobachtet werden. Der optimale PEEP Level, der zum maximalen Sauerstoffangebot führte, konnte beim Patienten mit ARDS ebenfalls schnell ermittelt werden.

ABBILDUNG 14

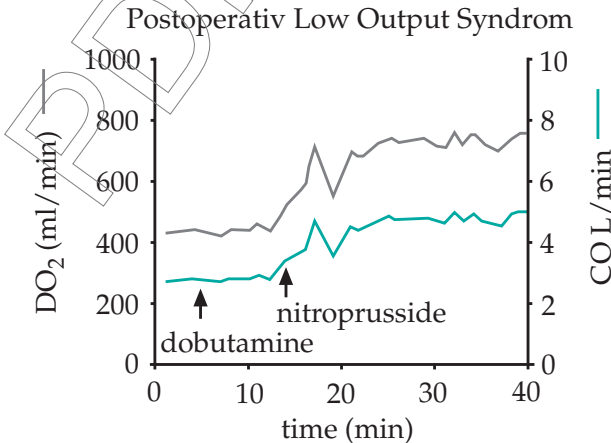
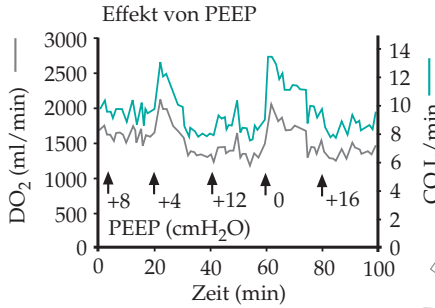


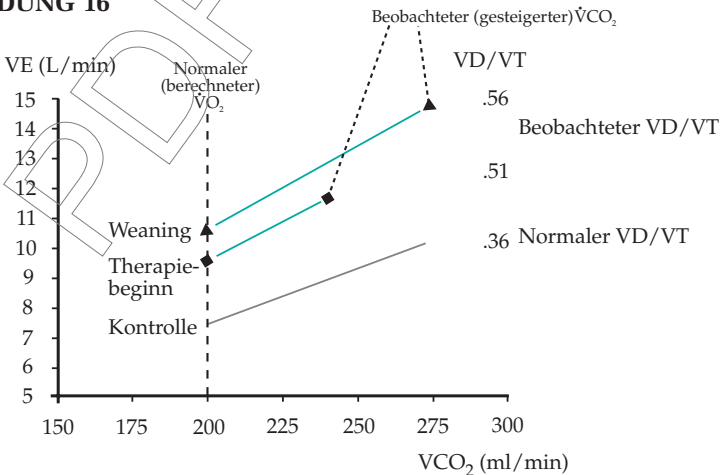
ABBILDUNG 15



Komponenten des Beatmungsbedarfs

Abbildung 16: Die Messung des Gasaustausches kann dazu genutzt werden, die Komponenten ausfindig zu machen, die für einen erhöhten Beatmungsbedarf verantwortlich sind, soweit die Bohr'sche Gleichung ($\dot{V}E = 0,1150 \cdot \dot{V}CO_2 / PaCO_2 \cdot (1 - VD/VT)$) zur Bestimmung der gemessenen Werte ($\dot{V}E$ l/min, $\dot{V}CO_2$ ml/min, STPD, $PaCO_2$ kPa) angewendet wird. Wie die Abbildung zeigt, kann eine gesteigerte $\dot{V}CO_2$ durch Hypermetabolismus das Atemminutenvolumen deutlich steigern und die Hauptkomponente dieser Steigerung sein. Die Messung des Gasaustausches kann helfen, die Ursache der Beatmungsabhängigkeit herauszufinden.

ABBILDUNG 16



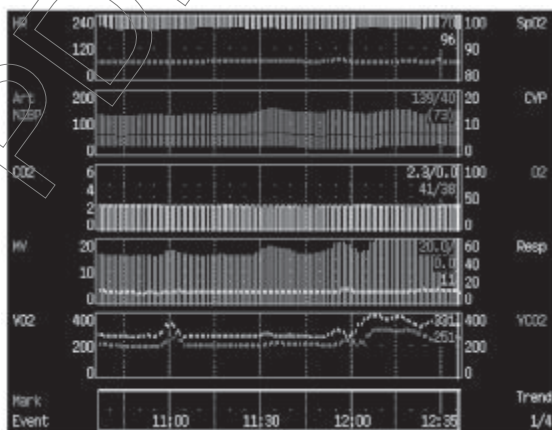
Atemminutenvolumen bei ARDS

Steigerung des Atemminutenvolumens

Ein älterer, männlicher Patient wurde mit akutem Lungenversagen bei postoperativer Peritonitis und Sepsis auf die Intensivstation aufgenommen. Er war intubiert und im Assist/Control Modus mechanisch beatmet. Am zweiten Tag der Intensivbehandlung um 12:10 Uhr zeigte der Patient einen akuten Anstieg des Atemminutenvolumens von 15 l/min auf mehr als 20 l/min, während das endtidale CO_2 und die arterielle Sauerstoffsättigung (Pulsoximeter) stabil blieben. Die körperliche Untersuchung zeigte keine relevante Änderung bis auf einen akut gestiegenen Atemantrieb. Die Blutgasanalyse zeigte unveränderte PaO_2 - und PaCO_2 -Werte.

Die CO_2 -Produktion stieg akut von rund 200 ml/min auf mehr als 300 ml/min. Dieser Anstieg durch einen Beginn einer akuten Bakteriämie war die Ursache für den Anstieg des Atemminutenvolumens. Der akute Ausbruch der Sepsis kann die Lungenfunktion verschlechtern und ein gesteigertes Atemminutenvolumen durch einen Anstieg der VD/VT hervorrufen, obwohl ein unverändertes Verhältnis von endtidalem zu arteriellem CO_2 diese Möglichkeit zunächst sicher ausschließt.

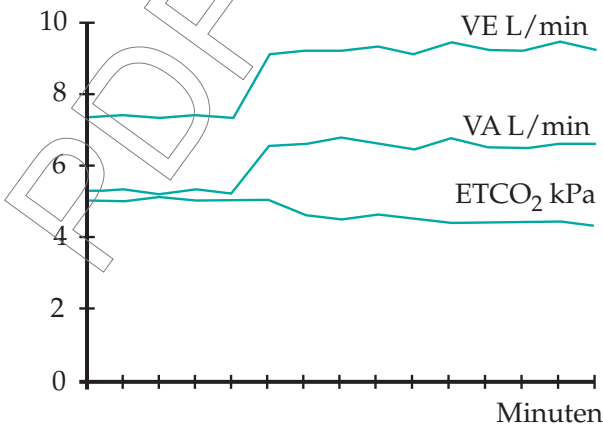
ABBILDUNG 17



Messung der alveolären Ventilation

Abbildung 18: Die Bohr'sche Gleichung kann auch zur Messung der Veränderung der alveolären Ventilation bei modifizierten Beatmungseinstellungen herangezogen werden. Der Vorteil dieser Technik ist, dass der erreichte Level der alveolären Ventilation prompt erfasst wird, obwohl die Änderung von PaCO_2 und endtidalem CO_2 noch andauern, bis sich dann ein erneutes Gleichgewicht des Körper- CO_2 eingestellt hat. Abbildung 14 zeigt die Änderung des VA als Reaktion auf ein angestiegenes Atemminutenvolumen. Der endgültige Level der VA konnte nach 2-3 Minuten beobachtet werden, wobei sowohl endtidales CO_2 (ETCO_2) und PaCO_2 sich kontinuierlich bis zu 60 – 90 Minuten weiter verändern. Durch Anwendung der Gasaustauschmessung können die Reaktionen auf größere Änderungen der Beatmungseinstellungen schnell beobachtet werden.

ABBILDUNG 18

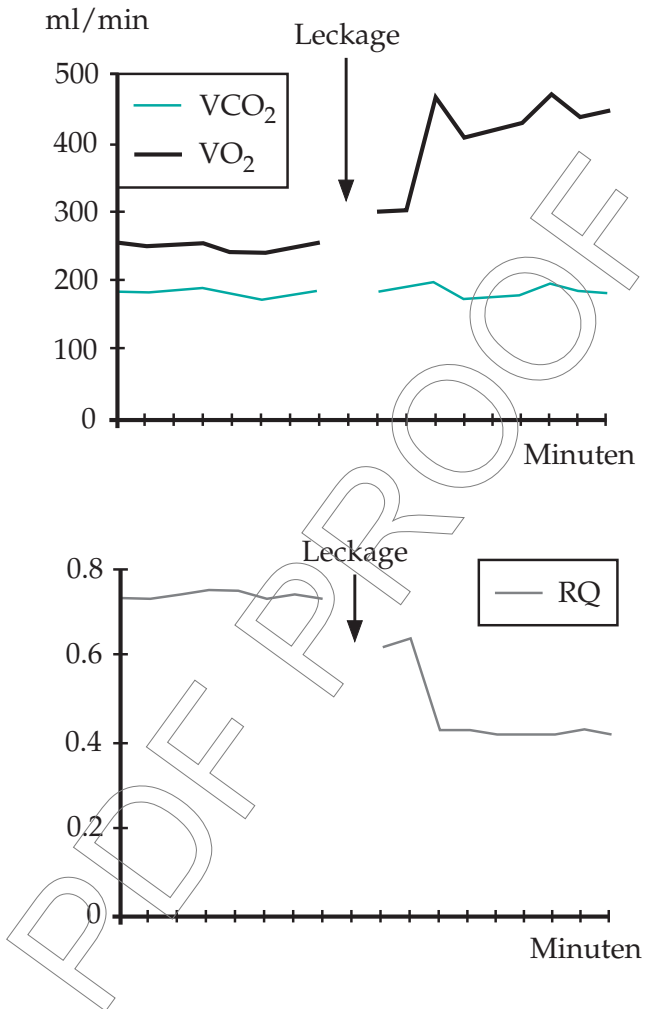


Effekt der Änderung von Beatmungseinstellungen auf die alveoläre Ventilation

Technische Probleme und physiologische Änderungen

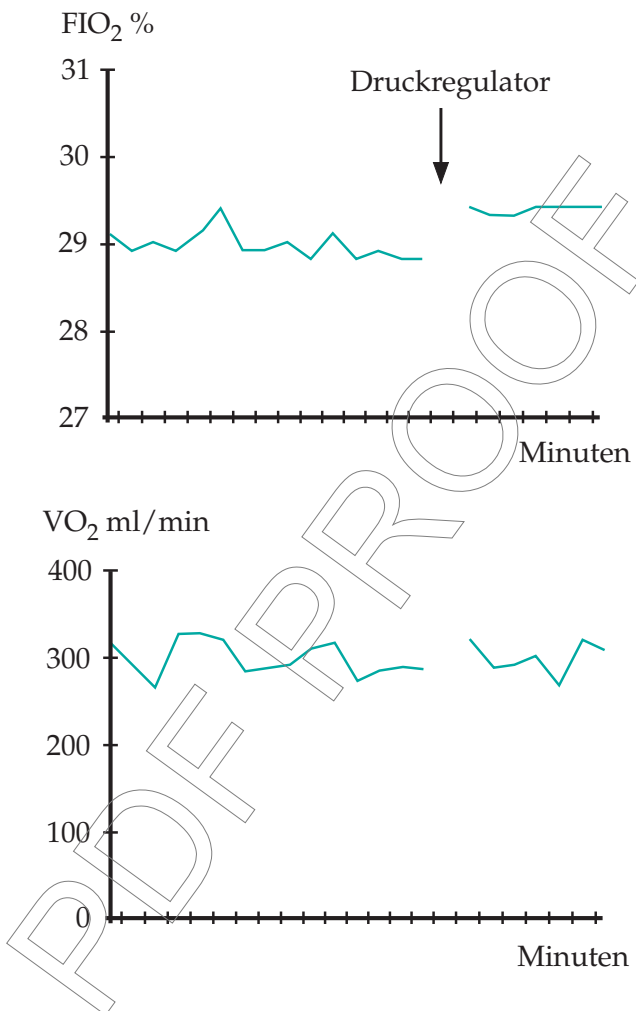
Abbildung 19-22: zeigen technische Probleme und physiologische Änderungen, welche die Ergebnisse oder die Interpretation beeinflussen. Abbildung 19 zeigt einen falsch hohen $\dot{V}O_2$ und niedrigen RQ durch eine Leckage im expiratorischen Gaskreisteil. Der Effekt auf den $\dot{V}CO_2$ ist viel geringer. Abbildung 20 zeigt ein häufiges Problem bei der klinischen Druckgasversorgung. Eine Änderung des Drucks in der Gasversorgung beeinflusst die Funktion des Gasmischers und verursacht eine Änderung des FiO_2 . Dies wird als zusätzliche Veränderung in dem gemessenen $\dot{V}O_2$ reflektiert. Die Veränderung kann durch Anwendung eines Druckregulators, wie in der Abbildung gezeigt, reduziert werden. Die bleibende Veränderung des gemessenen $\dot{V}O_2$ ist hauptsächlich physiologisch und wird durch Änderungen im Atemmuster, häufig bei Modi mit spontaner Atemtätigkeit, verursacht. Der Patient wurde mit einer niedrigen SIMV-Frequenz und Druckunterstützung beatmet. Der Effekt des Beatmungsmodus auf die Stabilität des FiO_2 wird in Abbildung 21 gezeigt. Der FiO_2 unter maschineller Beatmung ist deutlich instabiler, wenn der Patient mit CPAP beatmet wird. Abbildung 22 zeigt die große Variabilität von $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ durch rasche Änderung der metabolischen Aktivität. In diesem Fall verursacht durch einen Grandmal-Anfall bei einem Patienten mit SHT. Andere Faktoren, die zu einer Modifikation der Stoffwechselaktivität führen können, sind u.a. Fieber, Schmerzen und Angst. Es ist wichtig, die potentiellen Änderungen der basalen Stoffwechselrate bei der Interpretation des Gasaustausches mit zu berücksichtigen, wenn Ergebnisse der Gasaustauschmessungen interpretiert werden.

ABBILDUNG 19



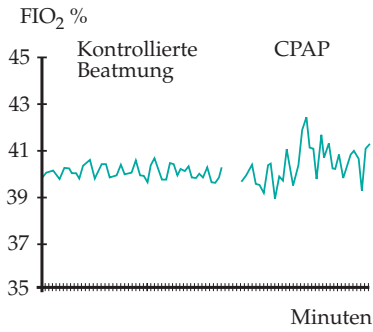
Effekt einer Leckage im expiratorischen Gaskreisl

ABBILDUNG 20



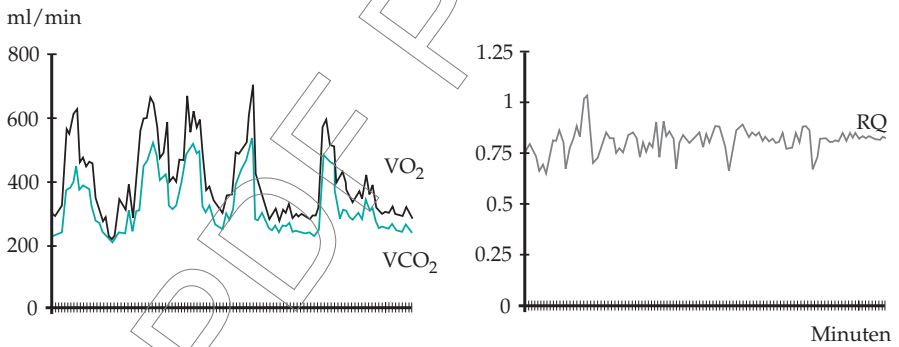
Reduktion der FIO_2 -Variation mit einem Druckregulator

ABBILDUNG 21



Effekt des Beatmungsmodus auf den FiO_2

ABBILDUNG 22



Effekt von epileptischen Konvulsionen auf den Gasaustausch

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren sind portable Geräte zur Messung des Gasaustausches in der klinischen Anwendung verfügbar. Dies hat das Verständnis für den Ernährungsbedarf und die Ernährung in verschiedenen Krankheitsstadien erweitert sowie neue Einblicke in Pathophysiologie und Behandlung von lebensbedrohlichen respiratorischen und hämodynamischen Problemen gegeben. Die Notwendigkeit der Bestimmung des Energieumsatzes bei einigen Patientengruppen mit erheblichen Ernährungsproblemen wird offensichtlich. Die Messung des Gasaustausches und des Energieumsatzes kann damit zu einem integralen Teil des klinischen Monitorings bei der Intensivbehandlung werden.

Technische Voraussetzungen zur genauen Gasaustauschmessung sind hiermit vorhanden, erfordern aber Kenntnis und Verständnis der zugrundeliegenden Physiologie und der eingesetzten Messtechnik, um somit genaue und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Literaturvorschlag

Bursztein S, Elwyn DH, Askanazi J, Kinney JM (eds): Energy metabolism, indirect calorimetry, and nutrition.

Williams & Wilkins, Baltimore, MD, USA, 1989

Snyder JV, Pinsky MR (eds): Oxygen transport in the critically ill.

Year Book Medical Publishers, Inc. Chicago, London, 1987

Nunn JF: Applied respiratory physiology, 3rd ed.

Butterworths, London, 1987.

Kinney JM, Fürst P, Elwyn DH, Carpentier YA: The intensive care patient. In: Kinney JM, Jeejeebhoy KN, Hill GL, Owen OE (eds):

Nutrition and metabolism in patient care pp. 656 - 671. W.B. Saunders

Company, Philadelphia 1988.

Bessey PQ, Wilmore DW: The burned patient. In: Kinney JM,

Jeejeebhoy KN, Hill GL, Owen OE (eds): Nutrition and metabolism in

patient care pp. 672 - 700. W.B. Saunders Company, Philadelphia 1988.

Rothkopf MM, Stanislaus G, Haverstick L et al: Nutritional support in

respiratory failure. Nutrition in Clinical Practice 1989;4:166 - 172

Meriläinen PT: Metabolic monitor.

Int J Clin Monit Comp 1987; 4:167 - 177.

Braun U et al: Evaluation of methods for indirect calorimetry with a

ventilated lung model. Int Care Med 1989; 15:196 - 202.

Takala J, Keinänen O, Väisänen P, Kari A: Measurement of gas

exchange in intensive care: Laboratory and clinical validation of a new

device. Crit Care Med 1989; 17:1041-7.

Lanschot JJB van, Feenstra BWA, Vermeij CG et al: Accuracy of

intermittent metabolic gas exchange recordings extrapolated for

diurnal variation. Crit Care Med 1988;16:737 - 742

Schumacker PT and Cain SM: The concept of a critical oxygen

delivery. Intens Care Med 1987;13:223 - 229

Shoemaker WC, Kram HB, Appel PL: Therapy of shock based on pathophysiology, monitoring and outcome prediction. Crit Care Med 1990;18:19 - 25

Askanazi J, Carpentier YA, Elwyn DH et al: Influence of total parenteral nutrition on fuel utilization in injury and sepsis. Ann Surg 1980;191:40

Roulet M, Detsky AS, Marliss E: A controlled trial of the effect of parenteral nutritional support on patients with respiratory failure and sepsis. Clin Nutr 1983;2:97

Shaw SN, Elwyn DH, Askanazi J et al: Effects of increasing nitrogen intake on nitrogen balance and energy expenditure in nutritionally depleted adult patients receiving parenteral nutrition. Am J Clin Nutr 1983;37:930

Pitkänen O, Takala J, Pöyhönen M et al: Nitrogen and energy balance in depleted patients undergoing major gastrointestinal surgery: response to TPN. Clin Nutr 1991;10:36 - 42

Grote AE, Elwyn DH, Takala J et al: Nutritional and metabolic effects of enteral and parenteral feeding in severely injured patients. Clin Nutr 1987;161 - 167

Jeevanandam M, Young DH, Schiller WR: Influence of parenteral nutrition on rates of net substrate oxidation in severe trauma patients. Crit Care Med 1990;18:467 - 473

Al-Saady NM, Blackmore CM, Bennett ED: High-fat, low-carbohydrate enteral feeding lowers PaCO₂ and reduces the period of ventilation in artificially ventilated patients. Intens Care Med 1989;15:290-5.