

W. Pankow<sup>1</sup> · H.F. Becker<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Innere Medizin III, Krankenhaus Neukölln, Berlin

<sup>2</sup> Zentrum für Innere Medizin, Medizinische Poliklinik, Philipps-Universität Marburg

# Langzeitmonitoring der Atemfunktion und der Blutgase

## Zum Thema

Beim Langzeitmonitoring von Blutgaskonzentrationen und Atmung konnten in den letzten Jahren Fortschritte erzielt werden. Es gibt allerdings noch viele technische Probleme zu lösen, besonders bei den bevorzugt verwendeten nichtinvasiven Methoden; auch die Meßgenauigkeit läßt bei verschiedenen Techniken zu wünschen übrig. Konsequenzen daraus sind, sich niemals nur mit einer Meßmethode zufriedenzugeben und ebenso die notwendige klinische Beobachtung unbedingt beizubehalten. Sieht man von der einfachen Registrierung der Atemfrequenz einmal ab, wird man sich bei dem derzeitigen Aufwand des Langzeitmonitoring auf Einzelfälle beschränken unter den Indikationsstellungen:

- Beginn einer maschinellen Beatmung bei (noch) spontaner Atmung
- Beendigung einer maschinellen Beatmung
- Kontrolle einer ausreichenden O<sub>2</sub>-Gewebeversorgung bei Beatmung
- Kontrolle von Intubation und Fehlintonation

Über die verschiedenen Möglichkeiten und Grenzen des Langzeitmonitoring von Blutgaskonzentrationen und Atmung wird hier eine Übersicht gegeben.

## Schlüsselwörter

Monitoring · Atemmechanik · Blutgase

Während die kontinuierliche Überwachung hämodynamischer Parameter in der Intensivmedizin seit langem etabliert ist, beschränkt sich das Monitoring der Atemfunktion und des Gasaustauschs meist auf einfache Daten aus der klinischen Beobachtung (z.B. Atemfrequenz), ergänzt durch punktuelle Blutgasanalysen. Die so erhobenen Befunde reichen bei der Mehrzahl der Patienten aus, um eine suffiziente Überwachung und Steuerung der Therapie zu gewährleisten. Bei einem Teil der Patienten wären jedoch zusätzliche Informationen in folgenden Situationen wünschenswert:

1. beim spontan atmenden Patienten: Klärung der Frage, ob und zu welchem Zeitpunkt eine maschinelle Beatmung erfolgen sollte,
2. beim beatmeten Patienten: Frage der suffizienten Versorgung des Gewebes mit Sauerstoff und Erfassung möglicher Schädigung durch die Ventilation (z.B. Barotrauma und Sauerstofftoxizität)
3. in der Entwöhnungsphase: optimaler Zeitpunkt des Weanings vom Respiратор und Steuerung assistierter Beatmungsformen.

Als wesentliche Anforderungen an das Monitoring muß gelten, daß sich aus den Meßwerten eine Beeinflussung der Therapie ergeben kann. Die Methode sollte wenig invasiv und wenig störanfällig sein und auch eine sich anbahnende Störung möglichst frühzeitig erfassen. Weiterhin sollten die Befunde möglichst spezifisch und sensitiv sein

sowie auch wirtschaftlichen Anforderungen genügen.

Unzweifelhaft kann das Monitoring respiratorischer Parameter einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Betreuung von Problempatienten leisten. Zur Vermeidung unnötiger Belastungen für den Patienten und einer Datenüberflutung von Arzt und Pflegepersonal, die u.a. zu Fehlentscheidungen führen kann, sollte umfangreiches Monitoring auf den begründeten Einzelfall beschränkt werden. Bei entsprechender Indikation können jedoch in Zukunft durch ein erweitertes respiratorisches Monitoring wichtige Daten erhoben werden, die eine verbesserte Steuerung der Therapie ermöglichen.

Als ein Beispiel sinnvollen Monitorings kann die Entwicklung kostengünstiger Pulsoxymeter betrachtet werden, welche die kontinuierliche Messung eines wichtigen Blutgasparameters ermöglichen und in der Patientenüberwachung heute einen festen Platz einnehmen. Dagegen konnten bislang in der klinischen Routine differenzierte Parameter der Atemmechanik wie Compliance, Resistance und Atemarbeit aufgrund technisch bedingter Einschränkungen nicht kontinuierlich gemessen werden. Dies gilt auch für so wichtige Daten aus der Blutgasanalyse wie Sauerstoffpartialdruck, Kohlendioxidpartialdruck und pH-Wert. Durch technologische Fortschritte zeichnet sich hier inzwischen ein Wandel ab.

Dr. W. Pankow

Innere Medizin III, Krankenhaus Neukölln,  
Rudower Straße 48, D-12351 Berlin

**Tabelle 1**  
**Parameter und Messmethoden für kontinuierliches Monitoring der Atmung**

Parameter	Messmethode
<i>Nicht-invasiv bei Spontanatmung</i>	
Atemfrequenz Atemmuster und Atemtiefe Synchronität der thorakalen und abdominalen Atemexkursionen	Respirationsinduktionsplethysmographie
<i>Invasiv (beim intubierten Patienten)</i>	
Atemzugvolumen	Pneumotachograph
Atemwegsdruck	Messfühler am Tubus od. im Ventilator
Atemmechanik	s. Text
Atemarbeit	Ösophagusdruck
Atemantrieb	P <sub>01</sub>
Intrinsischer PEEP	Ösophagusdruck
<i>Blutgase-Gasaustausch</i>	
CO <sub>2</sub>	Kapnographie
O <sub>2</sub> -Sättigung	Pulsoxymetrie
Blutgase, pH-Wert	invasive Blutgasanalyse

Gleichzeitig hat sich die Beatmung weg von starren Beatmungsmodi und hin zu flexiblen Beatmungskonzepten verändert. Besonders bei langzeitbeatmeten Patienten werden zur Vermeidung von Atemmuskulaturatrophie und hohen Spitzendrücken Beatmungsmodi angewandt, welche die Spontanatmung unterstützen aber nicht unterdrücken [42, 58]. Um solche differenzierten Beatmungskonzepte umzusetzen, ist der kontinuierliche Zugriff auf Daten der Atemmechanik und des Gasaustauschs wünschenswert. Tabelle 1 nennt Atemparameter die kontinuierlich aufgezeichnet werden können.

Die folgenden Ausführungen stellen Möglichkeiten des Langzeitmonitorings des Gasaustauschs und der Atmung ohne Anspruch auf Vollständigkeit vor. Da ihr Einsatz in klinischen Studien bisher nur wenig untersucht ist, muß jede Bewertung der praktischen Bedeutung naturgemäß noch zurückhaltend erfolgen.

### Nichtinvasives und invasives Blutgasmonitoring

Die arterielle Blutgasanalyse ist eine wichtige Methode zur Beurteilung der Oxygenation, des Gasaustauschs, der Ventilation und der Homöostase des Säure-Basen-Haushalts. Sie liefert zudem genauere Meßwerte als jede andere

Methode. Nachteilig ist der nur intermittierende Zugriff auf Daten. Die Zahl der Blutgasanalysen ist nicht zuletzt durch den damit verbundenen Blutverlust begrenzt. Für das Monitoring des Gasaustauschs stehen nichtinvasive und neuerdings auch invasive Methoden zur Verfügung.

### Pulsoxymetrie

Die weiteste Verbreitung hat die Pulsoxymetrie gefunden. Sie wird nicht mehr nur in der Anästhesie sondern zunehmend auch zur Überwachung auf

Intensivstationen und Allgemeinstationen eingesetzt [9, 19, 33, 44]. Die Puls-oxymetrie ist für Monitoring über längere Zeiträume aus mehreren Gründen besonders geeignet. Das Verfahren ist nichtinvasiv und einfach handhabbar. Es ist keine Kalibrierung nötig, und es bedarf keiner Unterbrechungen der Messung (wie etwa die transkutane Sauerstoffmessung wegen der Aufheizung der Elektroden). Nachteile sind Meßungenauigkeiten bei Körperbewegungen und bei Zuständen, die mit peripherer Vasokonstriktion einhergehen, wie Hypotension und Hypothermie. Ein weiterer wichtiger Nachteil ist, als Folge der S-förmigen Sauerstoffbindungskurve, die mangelnde Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen des Sauerstoffpartialdrucks im Bereich von PaO<sub>2</sub>-Werten über 60–70 mmHg. In der Regel wird eine therapeutische Intervention in Form von Sauerstoffapplikation oder Beatmung aber erst unterhalb dieses Bereichs und damit bei einem pulsoxymetrisch erkennbaren Abfall der Sauerstoffsättigung notwendig.

Bei der Beurteilung der SaO<sub>2</sub> müssen verschiedene Fehler- und Störmöglichkeiten berücksichtigt werden. CO-Hämoglobin und Methämoglobin werden ebensowenig erfaßt wie Verschiebungen der Sauerstoffbindungskurve. Die SaO<sub>2</sub> erlaubt nur eine Aussage zum Sauerstoffgehalt des Bluts, wenn auch der Hämoglobinwert bekannt ist. Beim anämischen Patienten kann eine trügerisch hohe SaO<sub>2</sub> die Diagnose der Hypoxie verzögern. Abb. 1 demonstriert, wie falsche Sicherheit vorgespiegelt

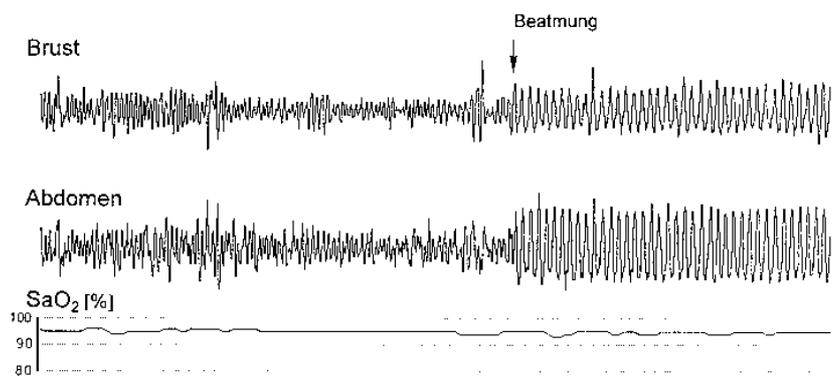


Abb. 1 ▲ Mittels Respirationsinduktionsplethysmographie (RIP) wurden die thorakalen und abdominalen Atemexkursionen bei einer Patientin mit Muskeldystrophie aufgezeichnet. Infolge eines Atemwegsinfekts atmet sie am Rand der Erschöpfung. Zeichen dafür sind die hohe Atemfrequenz und die variablen Atemzüge. Die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung erfaßt die kritische Situation nicht. Mit assistierter Maskenbeatmung kann die drohende Erschöpfung der Atemmuskulatur abgewendet werden: die Atemexkursionen werden größer und die Atemfrequenz nimmt deutlich ab

## Übersicht

werden kann, wenn man sich auf das Monitoring eines einzelnen Parameters verläßt. Das Beispiel zeigt, daß sich ein Patient bereits in einem erheblichen respiratorischen Streßzustand befinden kann, ohne daß dies anhand der Puls-oxymetrie erkennbar ist. Dennoch besteht weitgehende Einigkeit darüber, daß die Pulsoxymetrie bei der Überwachung respiratorisch instabiler Patienten einen wichtigen Stellenwert hat.

### Transkutane Messung von $P_{O_2}$ und $P_{CO_2}$

Die schon länger verfügbare Methode der transkutanen Sauerstoffpartialdruckmessung hat sich nur in der Pädiatrie durchgesetzt. Bei Erwachsenen sind die Meßergebnisse zu ungenau. Dies ist bedingt durch die dickere Haut und die wechselnde Hautdurchblutung [29]. Durch Aufheizen der Elektroden wird eine lokale Hyperthermie erzeugt, um eine Vasodilatation der Hautkapillaren zu erzeugen. Daher muß bei länger dauernden Messungen die Elektrodenposition gewechselt werden, um Verbrennungen zu vermeiden. Die transkutane  $CO_2$ -Messung ist mit dem gleichen Problem behaftet. Allerdings korrelieren die Werte besser mit dem arteriellen  $P_{CO_2}$  [28]. Bei einigen Monitoringsystemen sind Pulsoxymetrie und transkutane  $P_{CO_2}$ -Messung in einem Apparat zusammengeführt. Abb. 2 zeigt eine ambulant durchgeführte transkutane Blutgasmessung bei einem heimbeatmeten Patienten. Die  $CO_2$ -Messung gibt Änderungen des arteriellen

len Kohlendioxidpartialdrucks verzögert wieder und ist daher zum Monitoring respiratorisch instabiler Patienten nicht geeignet.

### Kapnographie

Die Messung des  $CO_2$ -Partialdrucks in der Expirationsluft stellt heute ein Standardverfahren dar [22, 40, 44]. Der end-expiratorische  $P_{CO_2}$  ( $P_{ETCO_2}$ ) weicht beim Gesunden nur wenige Torr vom arteriellen  $P_{CO_2}$  ( $P_{aCO_2}$ ) ab. Mittels Ultrarotabsorption wird bei der Kapnographie die  $CO_2$  Konzentration der Luft bestimmt. Durch die hohe Auflösung wird bei den heute im stationären Bereich üblichen Geräten jeder Atemzug komplett als Kurve dargestellt. Während der Inspiration liegt der  $P_{CO_2}$  bei Null, steigt in der Expiration dann rasch an, um gegen Ende ein Plateau zu erreichen, den  $P_{ETCO_2}$ . Die Kapnographie hat den Vorteil, technisch einfach durchführbar und auch mit tragbaren Geräten überall einsetzbar zu sein. Aus diesem Grund liegt ein Einsatzbereich in der Notfallmedizin als Methode zur Erkennung der Fehlintonation bzw. zur Kontrolle und Dokumentation der trachealen Intubation. Als Fehlermöglichkeiten müssen jedoch falsch niedrige Werte bei unzureichender Perfusion der Lunge im Schock [37, 49] sowie selten falsch normale  $P_{ETCO_2}$ -Werte nach kohlen säurehaltigen Getränken bei ösophagealer Intubation berücksichtigt werden [63].

Als nichtinvasives Verfahren ist die Kapnographie auch prinzipiell zur

Langzeitmessung geeignet, wobei jedoch auch hierbei Limitationen der Methode berücksichtigt werden müssen. Obwohl beim Gesunden der  $P_{ETCO_2}$  nur gering unter dem  $P_{aCO_2}$  liegt, können bei Patienten mit Atemantriebsstörungen oder Versagen der Atemmuskulatur gerade in Situationen, in denen sich die Ventilation akut ändert, große Diskrepanzen zwischen arteriellem und end-expiratorischem Wert auftreten [60]. Auch bei respiratorischer Insuffizienz infolge obstruktiver Ventilationsstörung und bei instabilem Kreislauf mit erniedrigtem Herzminutenvolumen korreliert der  $P_{ETCO_2}$  nur schlecht mit dem arteriellen  $P_{CO_2}$ . Die mittels Kapnographie gemessenen Werte sollten daher in Intervallen durch Blutgasanalysen überprüft werden. Somit ist der Wert der Kapnographie als Langzeitmeßparameter auf den eines Indikators begrenzt, der dennoch wertvolle Hinweise liefert. Situationen, in denen der  $P_{ETCO_2}$  ansteigt, sind z.B. eine Hypoventilation, ein Anstieg der  $CO_2$ -Produktion oder eine Abnahme des Herzzeitvolumens. Ein erniedrigter  $P_{ETCO_2}$  tritt bei Hyperventilation, Abnahme des Herzzeitvolumens, massiver Lungenembolie bzw. erniedrigter pulmonaler Perfusion sowie bei Leck im Beatmungssystem oder Tubusobstruktion auf.

### Kontinuierliche intraarterielle Blutgasmessung

Die methodischen und technischen Beschränkungen der nichtinvasiven Me-

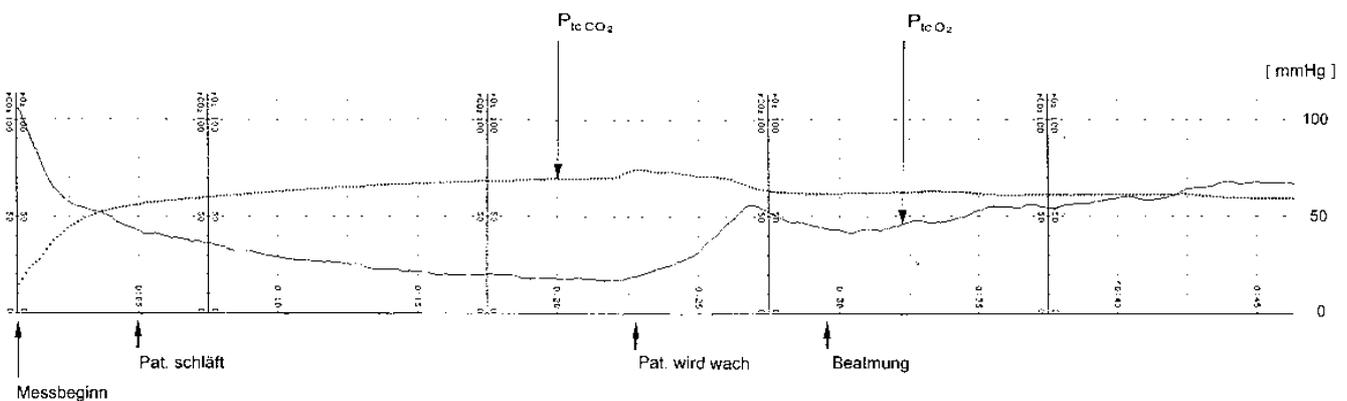


Abb. 2 ▲ Bei einem heimbeatmeten Patienten mit Kyphoskoliose wird als Maß für die Ventilation der transkutan gemessenen Kohlendioxidpartialdruck ( $P_{tcCO_2}$ ) und als Maß für die Oxygenation der transkutane Sauerstoffpartialdruck ( $P_{tcO_2}$ ) simultan aufgezeichnet. Als Zeichen der Hypoventilation im Schlaf steigt der  $P_{tcCO_2}$  bei gleichzeitigem Abfall des  $P_{tcO_2}$ . Die assistierte nasale Beatmung verbessert die Ventilation

thoden und die Tatsache, daß die herkömmliche Blutgasanalyse nur intermittierend erfolgen kann und damit der richtige Zeitpunkt für therapeutische Interventionen eventuell verpaßt wird, hat die Entwicklung invasiver Monitoringsysteme vorangetrieben. 1992 kam der erste kontinuierlich intraarteriell messende Blutgasmonitor (CIBAG) von der Firma Puritan-Bennet auf den Markt. Die neue Technologie basiert auf einer fluoreszenzoptischen Methodik [14, 25, 57].

Eine hochenergetische Lichtquelle überträgt die ultraviolette Strahlung einer bestimmten Wellenlänge mittels Fiberglasoptik auf die Spitze einer Optode. Dort trifft sie auf Fluoreszenzfarbstoffe, die für Sauerstoffmoleküle und Wasserstoffionen im umgebenden Blut empfindlich sind. Eine semipermeable Membran begrenzt den Kontakt zwischen Farbstoff und Blut auf bestimmte Ionen. Der Fluoreszenzabfall ist direkt proportional zur Konzentration der Sauerstoff- oder Wasserstoffionen im Farbstoff. Der Sensor kann über eine Standardkanüle intraarteriell plziert werden.

Das System adaptiert die Blutgaswerte an die Körpertemperatur und kalibriert sich selbst. Übereinstimmend wurden präzise Werte für Kohlendioxidpartialdruck und pH auch bei Patienten mit extremen Abweichungen vom Normalwert gemessen [31, 38, 45, 48]. Im Gegensatz zu den anderen Studien fanden Roupie et al. [45] allerdings eine deutliche Abweichung der PaO<sub>2</sub>-Werte. Dies ist wahrscheinlich auf die Empfindlichkeit des Sauerstoffsensors gegenüber leichten Beschädigungen während der Applikation am Patienten zurückzuführen [32]. Eine erhöhte Inzidenz an Thrombosen wurde bisher nicht beobachtet.

Wichtigster Nachteil der Methode sind ihre hohen Kosten [23]. Puritan-Bennet hat Sensoren zunächst für 300 US Dollar verkauft, bei einem Produktionspreis von 1000 Dollar. Auch dieser Verkaufspreis ist noch sehr hoch angesichts der Tatsache, daß der Sensor in der Regel nach drei Tagen gewechselt werden muß. Langzeitmonitoring wird dadurch extrem teuer. Gerade für langzeitbeatmete Patienten ist das neue Verfahren aber interessant, denn es hilft, die vielen Blutentnahmen für Blutgasanalysen zu minimieren. Weil die hohen Ko-

sten die Vermarktungsaussichten erschweren, haben inzwischen 2 von zunächst 3 Herstellern die Produktion von CIBAG eingestellt. Bei dem einzigen noch erhältlichen System Paratrend 7 von Pfizer Biomedical Sensors kostet die Meßstation 20000 Dollar und ein Sensor 275 Dollar [32]. Die Verbreitung der neuen Technologie wird entscheidend davon abhängen, ob es vielleicht auch durch neue Meßverfahren gelingt, die Kosten wesentlich zu reduzieren.

### Gemischtvenöse und zentralvenöse Sauerstoffsättigung

Arterieller Sauerstoffpartialdruck und SaO<sub>2</sub> informieren lediglich über das Sauerstoffangebot, nicht aber ob dieses Angebot dem Bedarf entspricht und noch weniger über die Gewebeoxygenierung. Die gemischtvenöse und mit Einschränkungen auch zentralvenöse O<sub>2</sub>-Sättigung erlauben diesbezüglich eine bessere Abschätzung. Im Gegensatz zur SaO<sub>2</sub> ändern sich diese beiden Parameter parallel mit dem Sauerstoffpartialdruck, weil sie auf dem steilen Abschnitt der Sauerstoffbindungskurve liegen. Die Langzeitmessung kann neuerdings kontinuierlich nach dem Verfahren der Reflexionsphotometrie erfolgen, da Hämoglobin unterschiedlicher Sauerstoffsättigung unterschiedliche Lichtabsorptionseigenschaften besitzt. Über optische Fasern wird Licht durch einen Pulmonalis- oder einen zentralvenösen Katheter

geleitet. Aus der Menge des reflektierten Lichts läßt sich die Sauerstoffsättigung berechnen.

Bei der Interpretation der Messwerte muß beachtet werden, daß die O<sub>2</sub>-Bilanz des Organismus global erfaßt wird. Erniedrigte Werte können Folge eines erhöhten Sauerstoffverbrauchs, ebenso aber auch Konsequenz einer gestörten O<sub>2</sub>-Aufnahme oder eines gestörten O<sub>2</sub>-Transports durch erniedrigtes Hämoglobin oder reduziertes Herzzeitvolumen sein. Andererseits kann bei Sepsis die gemischtvenöse SO<sub>2</sub> infolge lokaler arteriovenöser Shuntverbindungen und einer verringerten O<sub>2</sub>-Ausschöpfung erhöht sein, obwohl die Gewebeoxygenierung gestört ist. Daraus ergibt sich, daß die gemischtvenöse und zentralvenöse SO<sub>2</sub> globale Parameter der Sauerstoffbalance sind, die durch mehrere Faktoren determiniert werden. Auch bei Kenntnis mehrerer Faktoren kann nur bedingt auf die Gewebeoxygenierung geschlossen werden, da lokale mikrozirkulatorische Bedingungen nicht wiedergespiegelt werden [43, 50]. Dennoch sind die Parameter wertvoll bei der frühzeitigen Erkennung einer gestörten O<sub>2</sub>-Bilanz bei schwerkranken Patienten.

### Nichtinvasives Monitoring der Atmung

Viele Patienten werden auf der Intensivstation lediglich überwacht, und speziel-

Tabelle 2  
Bedrohliche pulmonale Situationen (modifiziert nach [46])

Erkrankung	Frühe Zeichen
Atemmuskeldysfunktion/-ermüdung	Tachypnoe
Lungenembolie	Tachypnoe
Lungenödem	Tachypnoe
Status asthmaticus	Tachypnoe
Schwere Pneumonie	Tachypnoe
Exazerbierte chron. obstruktive Lungenerkrankung	Tachypnoe, erniedrigtes Atemzugvolumen, paradoxe Atmung
Atemregulationsstörungen	obstruktive und/oder zentrale Apnoen und Hypopnoen
Sedativa-Überdosierung	obstruktive und/oder zentrale Apnoen, Hypopnoen, Bradypnoen
Zwerchfellschwäche und -parese	paradoxe Atmung
Respiratorische Insuffizienz nach Extubation	Tachypnoe, obstruktive und/oder zentrale Apnoen, Hypopnoen, Bradypnoen

le therapeutische Maßnahmen, wie maschinelle Beatmung, müssen nicht ergriffen werden. Bei spontan atmenden, nicht intubierten Patienten kann man aber auf die mit Hilfe eines invasiven Zugangs (Beatmungstubus) ermittelten Atemfunktionsgrößen nicht zugreifen. Das Monitoring der Atmung beschränkt sich meist auf den Versuch, Apnoen mittels Impedanzplethysmographie zu erfassen. Dieses Verfahren hat aber wegen seiner Artefaktanfälligkeit nur einen eingeschränkten Wert [46].

Respiratorisches Monitoring nicht-beatmeter Patienten soll die drohende Ateminsuffizienz vorhersagen, um Beatmungsmaßnahmen rechtzeitig zu ergreifen. Einer engmaschigen Überwachung bedürfen Erkrankungen oder Organkomplifikationen, bei denen die Atemmuskulatur im Verhältnis zu ihrer Kapazität überbeansprucht wird. Tabelle 2 führt dafür Beispiele und klinische Zeichen auf. Sicher ist und bleibt die Beobachtung am Krankenbett Basis jeder klinischen Einschätzung des respiratorischen Zustands des Patienten. Aber schon das Erfassen eines so einfachen Parameters wie der Atemfrequenz durch Inspektion und Zählen ist zeitaufwendig und häufig auch ungenau. Zudem ist diese Methode diskontinuierlich. Gleiches gilt noch mehr für das Atemmuster.

### Respirationsinduktionsplethysmographie

Als kontinuierliches Meßverfahren kommt in erster Linie die Respirationsinduktionsplethysmographie (RIP) in Betracht. Dabei werden Umfangsänderungen des Thorax und des Abdomens mit Hilfe von zwei Atemgurten gemessen und als Atemsignale dargestellt und aufgezeichnet [7, 46]. Neben der Atemfrequenz wird die Synchronität bzw. Asynchronität der thorakalen und abdominalen Atemexkursionen erfaßt. Bei entsprechender Kalibrierung kann über einen Zeitraum von 1–2 Stunden mit Einschränkungen auch das Atemzugvolumen und das intrathorakale Gasvolumen abgeschätzt werden [59]. Wichtigste Einschränkung der Methode ist ihre Störanfälligkeit gegenüber Körperbewegungen und Lageänderungen. Dennoch sind die mit RIP gemessenen Atemsignale nach eigener Erfahrung wesentlich stabiler als solche, die mit der Impedanzplethysmographie erzeugt werden.

Klinisch bedeutsam geworden ist die RIP durch ihren breiten Einsatz in der Diagnostik schlafbezogener Atemstörungen. Erst in den letzten Jahren wurde auf ihren möglichen Stellenwert in der Überwachung respiratorisch insuffizienter Patienten hingewiesen [46, 51]. Anhand der Abb. 1 wurde bereits auf die Limitation der Pulsoxymetrie beim Erkennen einer drohenden Erschöpfung der Atmung hingewiesen. Dargestellt sind die mittels RIP aufgezeichneten Atemkurven einer Patientin mit Muskeldystrophie, deren respiratorische Situation sich durch einen Atemwegsinfekt akut verschlechtert hatte. Die Atmung ist frequent, und die Atemexkursionen sind sehr variabel. Nach Unterstützung durch assistierte Positivdruckbeatmung über eine Nasenmaske nimmt die Atemfrequenz ab, das Atemzugvolumen wird größer und seine Variabilität deutlich geringer. Die gleichzeitig mitaufgezeichnete  $\text{SaO}_2$  läßt erkennen, daß dieser Parameter die bedrohliche respiratorische Situation nicht erfaßt. Obwohl mittels RIP gewonnene Daten als sensitive Indikatoren für erfolgreiches Weaning von der Beatmung beschrieben wurden [46, 53, 54], fehlen noch breite klinische Untersuchungen, die den Wert dieser Methode in der Intensivmedizin und bei der Überwachung gefährdeter Patienten evaluieren.

Zur direkten Messung der Ventilation kann ein Pneumotachograph eingesetzt werden, der an einer Nasen- bzw. Nasenmundmaske angebracht wird. Dieses Verfahren wurde u.a. bei Patienten mit respiratorischer Insuffizienz unter nichtinvasiver Beatmung [39] oder  $\text{O}_2$  Therapie [2] sowie bei Patienten mit schlafbezogenen Hypoxiephasen [5, 6] beschrieben. Nachteilig sind die Notwendigkeit einer Maske, die von manchen Patienten nicht toleriert wird und Meßungenauigkeiten bei Maskenlecks in sich birgt. Dennoch bietet diese Methode die Möglichkeit der exakten Messung des Atemminutenvolumens und des Zeitverhältnisses von In- und Expiration im Langzeitverlauf ohne die methodisch bedingten Ungenauigkeiten der RIP. Systeme für den klinischen Einsatz stehen jedoch bislang noch nicht zur Verfügung.

### Invasives Monitoring der Atmung

Neben der Gewährleistung eines suffizienten Gasaustauschs ist die Reduktion der Atemarbeit wichtigstes Ziel der maschinellen Beatmung. Die Atemarbeit ist ein Maß für die Nachlast der Atemmuskeln. Die Atemmuskulatur muß bei jedem Atemzug eine bestimmte Kraft aufbringen, um elastische, resistive und Trägheitswiderstände des respiratorischen Systems zu überwinden [34]. Typisches Beispiel für stark erhöhte elastische Widerstände ist das akute Atemnotsyndrom (ARDS), Beispiel für stark erhöhte resistive Widerstände die exazerbierte chronisch-obstruktive Atemwegserkrankung.

Moderne assistierende Beatmungsformen wie druckunterstützte Spontanatmung („Pressure Support“) haben gegenüber der herkömmlichen kontrollierten Beatmung u.a. den Vorteil, daß hohe Spitzendrucke vermieden werden und dadurch das Risiko von Barotraumen vermindert wird. Voraussetzung ist ein adäquater Atemantrieb, denn der Patient beeinflusst bei dieser Beatmungsform über die Aktivität der Atemmuskulatur den Atemfluß und das Atemminutenvolumen [61]. Wird der Patient nicht übermäßig sediert, kann man in der Regel von einem erhöhten Atemantrieb ausgehen. Während der Beatmung können sich aber in Abhängigkeit vom Krankheitsprozeß Atemantrieb und Nachlast der Atemmuskeln ändern. Die durch die Meßgrößen Resistance und Compliance definierten Parameter der Atemmechanik unterliegen bei schweren Krankheitszuständen wie dem ARDS einer deutlichen Dynamik. Soll bei gleichbleibender Ventilation die Entlastung der Atemmuskulatur auf gleichem Niveau fortgeführt werden, muß man folglich die Druckunterstützung durch das Beatmungsgerät den sich verändernden Verhältnissen anpassen.

Wie sich die Interaktion der einzelnen Komponenten der Bewegungsgleichung des respiratorischen Systems im Verlauf einer assistierten Beatmung über einen längeren Zeitverlauf entwickelt, ist schwer vorherzusagen. Der kontinuierliche Zugriff auf atemmechanische Daten könnte daher dazu beitragen, die Beatmung mit den klini-

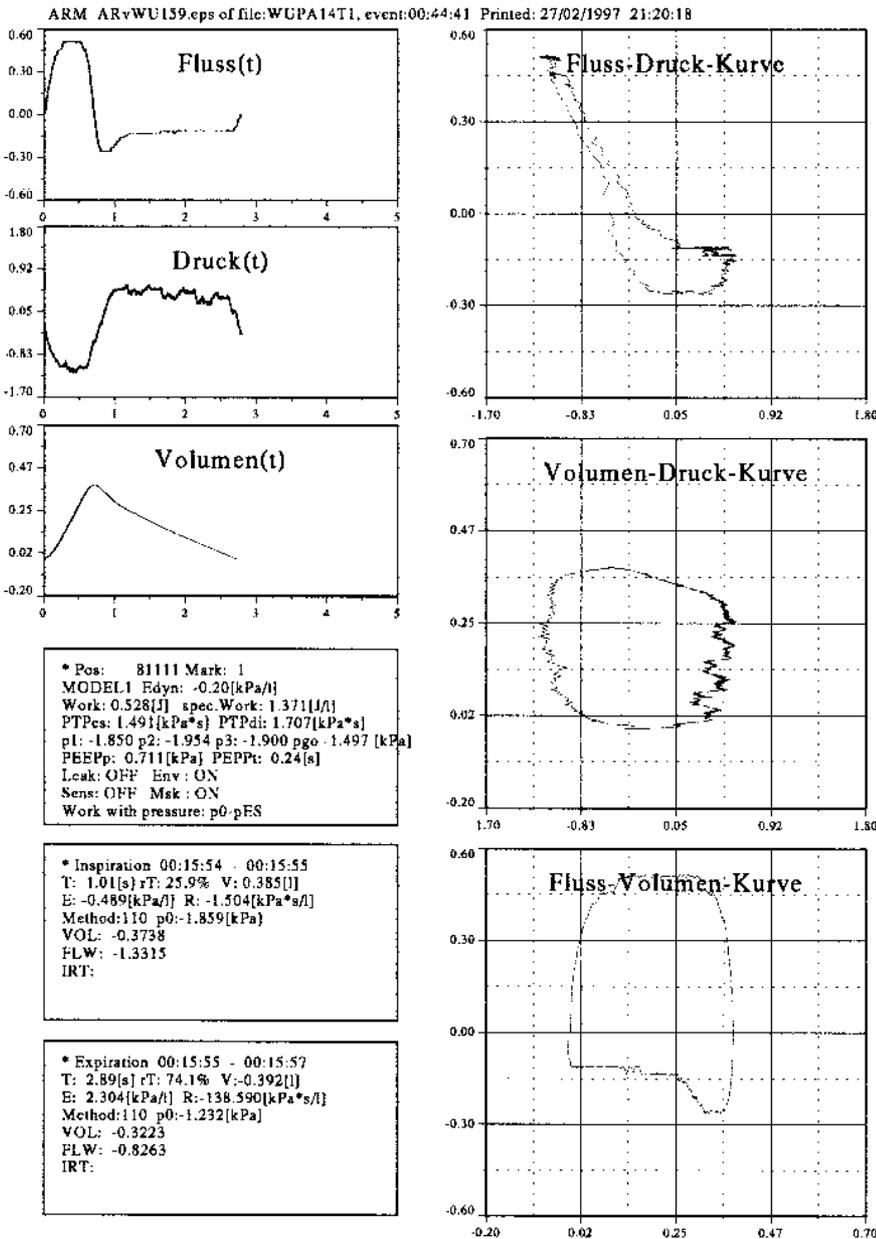


Abb. 3 ▲ Unser Analyseprogramm errechnet aus dem Atemfluß und aus dem Ösophagusdruck verschiedene atemmechanische Variablen wie Resistance, dynamische Elastance, intrinsischer PEEP, resistente Atemarbeit und ösophageales Druck-Zeit-Integral als Maß für die Atemmuskeltätigkeit. Gleichzeitig kann die Atemmechanik auch anhand der graphisch dargestellten Fluß-Druck-Kurven, Volumen-Druck-Kurven und Fluß-Volumen-Kurven abgeschätzt werden

schen Erfordernissen besser in Übereinstimmung zu bringen [1].

### Meßmethodik

Compliance und Resistance wurden bislang beim muskelrelaxierten Patienten diskontinuierlich durch spezielle, mit Hilfe des Beatmungsgeräts durchgeführte Manöver ermittelt [12, 27, 52]. Moderne Ventilatoren erlauben zudem die grobe kontinuierliche Einschätzung

der elastischen und resistiven Widerstände durch die zeitnahe Darstellung von Druck-Volumenkurven und Fluß-Volumenkurven, nicht jedoch von numerischen Daten. Von Brunner wurde die schon länger bekannte Methode der linearen Approximation in die Funktionsanalyse bei maschinell beatmeten Patienten eingeführt [10]. Dabei wird die Bewegungsgleichung des respiratorischen Systems in viele Einzelgleichungen aufgelöst. Mit Hilfe einer Viel-

zahl von Meßdaten werden die Gleichungen so gelöst, daß die berechnete Druckkurve möglichst gut mit der realen Kurve übereinstimmt.

Dieses Vorgehen hat mehrere Vorteile: 1. Die Verwendung vieler Einzelmesspunkte macht das Verfahren im Vergleich zu den auf 2 Meßpunkten beruhenden traditionellen Methoden weniger abhängig von Artefakten. 2. Mit Hilfe moderner Rechner stehen atemmechanische Werte online zur Verfügung. 3. Resistance und Compliance werden simultan berechnet. 4. Atemmechanische Besonderheiten wie turbulente Störungen oder intrinsischer positiver end-expiratorischer Druck (intrinsischer PEEP) können als Nebenbedingungen in das physikalische Modell integriert werden und erlauben so eine genauere Analyse der Atemmechanik.

In den letzten Jahren wurde dieses Verfahren in der klinischen Praxis überprüft und weiterentwickelt [11]. Atemwegsdruck und Fluß werden nicht in den Atemwegen, sondern am Beatmungstubus oder sogar im Beatmungsgerät gemessen. Die ermittelten Daten spiegeln nur begrenzt die realen physiologischen Verhältnisse wider, weil durch den Beatmungstubus der Atemwegswiderstand künstlich erhöht wird. Mit Hilfe einer speziellen Berechnungsmethode läßt sich dies aber rechnerisch so berücksichtigen, daß die kontinuierlich berechnete Resistance weitgehend den natürlichen Atemwegswiderstand erfaßt [17]. Von Guttman und Mitarbeitern wurde das Verfahren auch an die physiologischen Besonderheiten beim ARDS adaptiert [18]. Wir haben inzwischen ein computergestütztes Programm zur kontinuierlichen Atemanalyse entwickelt, das sich auf die oben beschriebene Methodik der linearen Approximation stützt. Es beinhaltet spezielle Algorithmen zur Artefakterkennung und erlaubt so eine recht zuverlässige Analyse atemmechanischer Variablen über einen längeren Zeitraum [47].

Resistance, Compliance und intrinsischer PEEP sind wichtige Determinanten, um pulmonale Krankheitsprozesse zu verfolgen und die Beatmungstherapie zu steuern. Mit dem Monitoring der Atemarbeit kann zusätzlich der Energieaufwand erfaßt werden, den die Atemmuskulatur leisten muß [1]. Die Atemarbeit kann aus dem elektronisch berechneten Integral

## Übersicht

der Druck-Volumenschleife ermittelt werden [56]. Beim spontan atmenden Patienten wird die Aktivität der Atemmuskeln entweder durch den Vergleich der Druckkurven von kontrollierter und assistierter Beatmung [35] oder besser mit Hilfe des Ösophagusdrucks [34] bestimmt.

Abb. 3 zeigt beispielhaft, wie sich vom Ösophagusdruck und Atemfluß abgeleitete Kurven und Parameter einschließlich der Atemarbeit darstellen lassen. Die so bei spontaner Atmung ermittelte Atemarbeit berücksichtigt allerdings nur die zur Ausdehnung der Lunge erforderliche Arbeit und nicht die Energie zur Expansion des Brustkorbs. Isometrische Muskelkontraktionen werden ebenfalls nicht erfaßt. Beispielsweise muß die Atemmuskulatur bei Patienten mit Lungenüberblähung oder mit kurzer Expirationszeit zur Überwindung von intrinsischem PEEP Kraft erzeugen, bevor Luft in die Lungen strömt [55]. Dies wird bei der klassischen Analyse der Atemarbeit nicht berücksichtigt. Das Integral des Drucks über die Zeit spiegelt die Energetik der Muskeln in dieser Situationen besser wider und ist als ösophageales Druck-Zeit-Integral elektronisch relativ leicht ermitteln [34].

Abb. 4 zeigt Atemkurven eines Patienten bei spontaner Atmung und während assistierter Beatmung. Als

Ausdruck der Übertragung der Atemarbeit vom Patienten auf das Beatmungsgerät nimmt die Amplitude des Ösophagusdrucks ab und der am Tubus gemessene Druck zu. Die bei diesem Beispiel zusätzlich gemessene Aktivität des Zwerchfells als transdiaphragmaler Druck erfordert die Positionierung eines zweiten Drucksensor im Magen. Der transdiaphragmale Druck ist bisher nur bei wissenschaftlichen Untersuchungen untersucht worden.

### Warum Monitoring der Atmung?

Weil die beschriebenen Verfahren wichtige Determinanten der Atemmechanik, der Atemmuskeltätigkeit und des Gasaustauschs kontinuierlich aufzeichnen können, werden sie zukünftig eine wichtige Rolle bei klinischen und physiologischen Untersuchungen spielen [11]. Der Begriff Monitoring bezieht sich aber auf unmittelbar praktisch-klinisches Handeln. Monitoring hat die Aufgabe, wichtige physiologische Variablen durch häufige Datenerfassung zeitnah wiederzugeben, um die Dynamik eines Krankheitsprozesses zu erfassen, bedrohliche Zustände frühzeitig zu erkennen, Therapieentscheidungen rechtzeitig zu treffen und die Therapie zu steuern [51].

Für keines der dargestellten Monitoringverfahren ist bisher ein Einfluß auf die Prognose gesichert. Ein solcher Nachweis dürfte allerdings auch schwer zu führen sein. Auch inwieweit die einzelnen Parameter Bedeutung für Therapieentscheidungen haben ist nur wenig untersucht worden. Demzufolge ist die Bewertung der Verfahren kontrovers [20, 21]. Es gilt besonders die Gefahr einer Datenüberflutung des betreuenden Personals zu beachten. Zu viel Monitoring kann kontraproduktiv sein, weil zu viele falsche Alarmer in der Praxis ignoriert werden oder sogar zum Abschalten der Alarmvorrichtungen führen [20, 21]. Die Betreuung vieler Monitore darf auch auf keinen Fall die Beobachtung des Patienten beeinträchtigen.

In welchen Situationen können kontinuierlich abgeleitete Daten der Atmung und des Gasaustauschs nützlich sein? Die Entscheidung, wann bei respiratorischer Insuffizienz intubiert und maschinell beatmet werden muß, basiert in der Regel auf klinischen Kriterien. Dyspnoe, Tachypnoe, Einsatz der Atemhilfsmuskulatur, paradoxe Atmung sind Determinanten, die in die klinische Bewertung eingehen. Die Blutgasanalyse ist die wichtigste Zusatzuntersuchung. Nichtinvasives Monitoring der Atmung könnte diese diskontinuierlichen Informationen er-

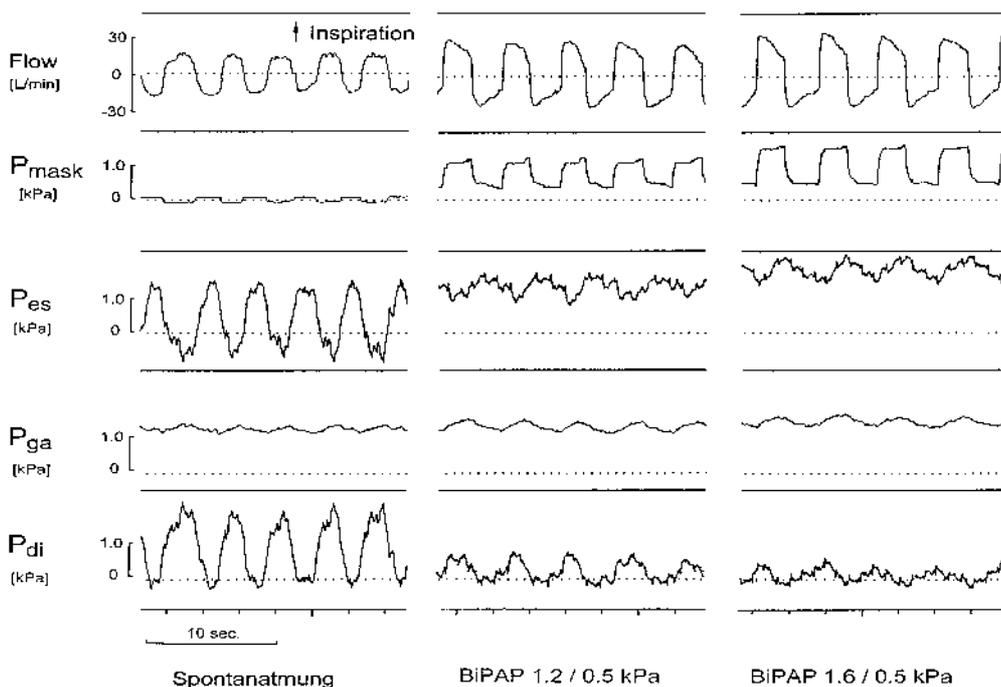


Abb. 4 ◀ Durch assistierte Beatmung mit BiPAP wird die Atemarbeit vom Patienten auf das Beatmungsgerät übertragen. Dies ist zeigt sich an der Amplitudenabnahme des ösophagealen Drucks (Pes) und des transdiaphragmalen Drucks (Pdi). Durch die zunehmende Gerätearbeit steigt der am Tubus gemessene positive Atemwegsdruck (Paw). Trotz Abnahme der Atemmuskeltätigkeit verbessert sich die Ventilation, erkennbar am gesteigerten Atemfluß

gänzen. Es wurde gezeigt, daß eine so einfache Variable wie die Atemfrequenz Patienten, die erfolgreich von der Beatmung abtrainiert werden konnten, von „Weaning-Versagern“ unterscheiden kann, wenn der zeitliche Trend berücksichtigt wird [30]. Im Gegensatz zu den erfolgreich extubierten Patienten stieg bei allen Patienten, die reintubiert werden mußten, die Atemfrequenz während der Extubationsphase an. Gleiches wurde in Bezug auf einen Parameter, der die Atemsynchronität erfaßt, beobachtet [30, 54]. Atemfrequenz und Atemmuster kann mittels RIP kontinuierlich abgeleitet werden. Für das respiratorische Monitoring von gefährdeten Patienten könnte daher die RIP, möglichst ergänzt durch die Pulsoxymetrie, die sinnvolle Ergänzung zur lange etablierten kardialen Überwachung sein.

Bei nur kurzdauernder Beatmung ist der kontinuierliche Zugriff auf atemmechanische Daten nicht notwendig. Bei schwerwiegenden pulmonalen Erkrankungen wie dem ARDS sind dagegen differenzierte Beatmungsstrategien erforderlich, die an die wechselnde Atemmechanik angepaßt werden müssen. Langzeitbeatmung ist außerdem mit dem Problem der drohenden Inaktivitätsatrophie der Atemmuskeln behaftet. Daher werden hier zunehmend druckunterstützte Spontanatmungsformen eingesetzt [26, 56]. Es ist aber bekannt, daß auch assistierende Beatmungsverfahren die Atemmuskulatur stark belasten können [35]. Monitoring atemmechanischer Parameter, die über die Nachlast der Atemmuskeln (Compliance, Resistance, intrinsischer PEEP) ebenso wie über die Atemarbeit Auskunft geben, könnten helfen, die maschinelle Beatmung besser an die physiologischen Erfordernisse einer kontrollierten Entlastung der Atemmuskulatur bei gleichzeitiger Reduzierung der Spitzendrücke anzupassen [36].

Neuerdings sind Monitoringsysteme, die diese wichtigen Parameter der Atemfunktion kontinuierlich darstellen, kommerziell erhältlich (z.B. Bicare, Irvine, USA). Banner und Mitarbeiter haben mit Hilfe eines solchen Systems gezeigt, daß die druckunterstützte Beatmung so titriert werden kann, daß daraus entweder eine partielle oder vollständige Entlastung der

Atemmuskulatur resultiert [3, 4]. Dies könnte auch für die Entwöhnungsphase langzeitbeatmeter Patienten nützlich sein [26]. Studien, die verschiedene Weaning-Konzepte verglichen haben, sind zu unterschiedlichen Ergebnissen gekommen [8, 13]. Dabei ist eine Beatmungsstrategie, die die Atemarbeit vom Beginn der Beatmung bis zum Weaning berücksichtigt, bisher noch nicht mit einer nach herkömmlichen Indices gesteuerten Beatmung verglichen worden. Gluck und Mitarbeiter haben aber kürzlich gezeigt, daß durch Monitoring der Atemarbeit die Entwöhnungszeit vom Respirator verkürzt werden kann [15]. Zwar ist Monitoring der Atemmechanik und der Atemarbeit überwiegend noch Mittel der klinischen Forschung, vereinzelt werden die neuen Methoden aber bereits in der klinischen Routine eingesetzt [J. Guttman, persönl. Mitteilung].

Es liegt nahe, bestimmte, kontinuierlich gemessene atemmechanische Parameter auch als automatische Steuerungselemente für das Beatmungsgerät im Sinne einer closed-loop Beatmung zu nutzen [24]. So ist beispielsweise die proportional-assistierte Beatmung (PAV) ein produktionsreifes Verfahren, das den Druckabfall im Beatmungssystem als Maß der Atemanstrengung des Patienten kontinuierlich mißt und mit einem positiven Druck nahezu unmittelbar beantwortet [62]. Dieser Beatmungsmodus ist dadurch direkt an den Atemantrieb des Patienten gekoppelt und soll so die Interaktion zwischen Patient und Ventilator verbessern. Erste klinische Studien mit diesem neuen Beatmungsmodus sind erfolversprechend [16, 41].

## Fazit für die Praxis

Die Methoden des Langzeitmonitorings von Blutgaskonzentrationen und Atmung seien mit Vor- und Nachteilen stichwortartig zusammengestellt.

### Nichtinvasive Langzeitmessung von O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> im Blut:

#### Pulsoxymetrie

**Vorteile:** einfache Handhabung, keine Kalibrierung, kontinuierliche Messung.

**Nachteile:** Meßgenauigkeiten bei Bewegungen und peripherer Vasokonstriktion bei Hypotonie und Hypothermie, mangelnde Empfindlichkeit im wichtigen PaO<sub>2</sub>-Bereich über 60–70 mmHg. Keine Erfassung von CO- und Methämoglobin. Risiko der Überschätzung des O<sub>2</sub>-Gehalts bei Anämie.

#### Transkutane Messung von PO<sub>2</sub> und PCO<sub>2</sub>

**Vorteile:** in der Pädiatrie bewährt.

**Nachteile:** Ungenauigkeit beim Erwachsenen wegen zu dicker Haut. Rasche Änderungen werden nur verzögert erfaßt. Verbrennungsgefahr infolge der lokalen Hyperthermie.

#### Kapnographie

**Vorteile:** technisch einfach, tragbare Geräte, besonders zur Intubationskontrolle geeignet.

**Nachteile:** nur bedingte Abschätzung des arteriellen PCO<sub>2</sub> möglich.

#### Invasive Langzeitmessung der Blutgase:

##### Kontinuierliche intraarterielle Blutgasmessung

**Vorteile:** selbstkalibrierend, automatische Temperaturkorrektur der Blutgaswerte, kontinuierliche relativ präzise Meßwerte.

**Nachteile:** mechanisch empfindliche O<sub>2</sub>-Sensoren, hohe Kosten (ca. DM 160/Tag)

##### Gemischt- und zentralvenöse O<sub>2</sub>-Sättigung

**Vorteil:** frühzeitige Erfassung einer gestörten O<sub>2</sub>-Bilanz

**Nachteil:** unspezifisch, invasiv. Keine Information zum Verhältnis von O<sub>2</sub>-Angebot zu O<sub>2</sub>-Bedarf.

#### Nichtinvasive Langzeitmessung der Atmung:

##### Impedanzplethysmographie:

**Vorteil:** einfache Handhabung

## Übersicht

**Nachteil:** Artefaktanfälligkeit, lediglich orientierende Parameter.

### Respiratorische Induktionsplethysmographie:

**Vorteile:** nichtinvasiv, semiquantitativ, Erfassung der Desynchronisation von thorakaler und abdominalen Atemexkursionen.

**Nachteil:** Störanfälligkeit bei Bewegungen und Lageveränderung der Sensoren.

### Pneumotachographie

**Vorteil:** quantitativ auswertbar, nichtinvasiv.

**Nachteile:** Atemmaske bei Spontanatmung erforderlich, Meßungenauigkeiten bei Maskenlecks.

### Invasive Langzeitmessung der Atemmechanik:

**Vorteile:** kontinuierliche Bestimmung von Resistance, Compliance und Atemarbeit möglich.

**Nachteil:** invasives Verfahren, da Ösophagusdruckmessung und Maske bzw. Tubus erforderlich sind.

Der klinische Befund, ergänzt durch punktuelle Messungen der Blutgase, reicht zur Beurteilung der Atmung meist aus. Ein weitergehendes Monitoring respiratorischer Parameter kann bei Problempatienten wertvolle Informationen liefern. Die Auswahl der Meßmethode richtet sich nach den Anforderungen im Einzelfall unter Abwägung von Nutzen und Risiko. Nach gegenwärtigen Erfahrungen haben sich die transkutane Messung von  $PO_2$  und  $PCO_2$  beim Erwachsenen und die Impedanzplethysmographie der Atmung wenig bewährt.

Pulsoxymetrie und Kapnographie haben trotz der zu beachtenden Limitationen einen festen klinischen Stellenwert. Bei langzeitbeatmeten Patienten mit schweren Lungenerkrankungen liefert die kontinuierliche Messung von Resistance, Compliance und Atemarbeit sowie der gemischtvenösen  $SaO_2$  wichtige Informationen zur Atemmechanik und zur  $O_2$ -Bilanz. Trotz aller technischen Möglichkeiten bleibt der detaillierte klinische Untersuchungsbefund die unverzichtbare Basis der Patientenbetreuung, der durch individuell indizierte, möglichst nichtinvasiv und kontinuierlich erhobene Daten ergänzt werden kann.

## Literatur

1. Armaganidis A, Roussos C (1995) **Measurement in the work of breathing in the critically ill patient.** In: Roussos C (Hrsg) *The Thorax*, Marcel Dekker, New York, p 1231–1274
2. Aubier M, Murciano D, Milic-Emili J, Touaty E, Daghfous J, Pariente R, Derenne JF (1980) **Effects of the administration of  $O_2$  on ventilation and blood gases in patients with chronic obstructive pulmonary disease during acute respiratory failure.** *Am Rev Respir Dis* 122:747–754
3. Banner MJ, Jaeger MJ, Kirby RR (1994) **Components of the work of breathing and implications for monitoring ventilator-dependent patients.** *Crit Care Med* 22:515–523
4. Banner MJ, Kirby RR, Gabrielli A, Blanch PB, Layon AJ (1994) **Partially and totally unloading respiratory muscles based on real-time measurements of work of breathing.** *Chest* 106:1835–1842
5. Becker HF (1997) **Pathophysiologie und Klinik der respiratorischen Insuffizienz.** *Med Klin* 92, S1, 10–13
6. Becker HF, Piper A, McNamara SG, Flynn W, Grunstein RR, Peter JH, Sullivan CE (1997) **Breathing during sleep in patients with nocturnal oxyhemoglobin desaturation.** *Am J Respir Crit Care Med* 155:A674
7. Branson RD, Campbell RS (1993) **Impedance pneumography, apnea monitoring, and respiratory inductive plethysmography.** In: Kacmarek RM, Hess D, Stoller JK (Hrsg) *Monitoring in respiratory care.* Mosby, St. Louis, S 479–495
8. Brochard L, Rauss A, Benito S, Conti G, Mancebo J, Rekić N, Gasparetto A, Lemaire F (1994) **Comparison of three methods of gradual withdrawal from ventilatory support during weaning from mechanical ventilation.** *Am J Respir Crit Care Med* 150:896–903
9. Browton DL, Scuderi PE, Harris L, Haponik EF (1991) **Pulse oximetry monitoring outside the intensive care unit: progress or problem?** *Ann Intern Med* 115:450–454
10. Brunner JX, Wolff G (1988) **Pulmonary function indices in critical care patients.** Springer, Berlin, S 18–33
11. Brunner JX, Thomson JD (1993) **Computerized ventilation monitoring.** *Respir Care* 38:110–124
12. Burchard H, Sydow M (1995) **Atemmechanik beim beatmeten Patienten.** In: List WF, Metzler H, Pasch T (Hrsg) *Monitoring in Anästhesie und Intensivmedizin.* Springer, Berlin, S 432–473
13. Esteban A, Frutos F, Tobin MJ, Alía I, Solsona JF, Valverdú I, Fernández R, de la Cal M, Benito S, Tomás R, Carriedo D, Marcías S, Blanco J (1995) **A comparison of four methods of weaning patients from mechanical ventilation.** *N Engl J Med* 332:345–350
14. Gilbert HC, Vender JS (1996) **Pro: Is continuous intra-arterial blood gas and pH monitoring justifiable?** *J Clin Monit* 12:179–181
15. Gluck EH, Barkoviak MJ, Balk RA, Casey LC, Silver MR, Bone RC (1995) **Medical effectiveness of esophageal balloon pressure manometry in weaning patients from mechanical ventilation.** *Crit Care Med* 23:505–509
16. Gutheil T, Pankow W, Becker HF, Juhász J, Staminitz A, Grote L, Peter JH, von Wichert P (1997) **Atemanstrengung unter nichtinvasiver Proportional Assist Ventilation (PAV) bei Patienten mit respiratorischer Insuffizienz.** *Med Klin* 92 (Sonder-Nr. 1):85–89
17. Guttmann J, Eberhard L, Fabry B, Zappe D, Bernhard H, Lichtwarck-Aschoff M, Adolph M, Wolff G (1994) **Determination of volume-dependent respiratory system mechanics in mechanically ventilated patients using the new SLICE method.** *Technol Health Care* 2:175–191
18. Guttmann J, Eberhard L, Wolff G, Bertschmann W, Zeravik J, Adolph M (1994) **Maneuver-free determination of compliance and resistance in ventilated ARDS patients.** *Chest* 102:1235–1242
19. Harris K, Bölanchette T (1993) **Monitoring in adult general care.** In: Kacmarek RM, Hess D, Stoller JK (Hrsg) *Monitoring in respiratory care.* Mosby, St. Louis, S 689–732
20. Hess D (1990) **Noninvasive monitoring in respiratory care – present, past, and future: an overview.** *Respir Care* 35:482–499
21. Hess D, Kacmarek RM, Stoller JK (1993) **Perspectives on monitoring in respiratory care.** In: Kacmarek RM, Hess D, Stoller JK (Hrsg) *Monitoring in respiratory care.* Mosby, St. Louis, S 1–11

22. Hess D (1993) **Capnography: Technical aspects and clinical applications.** In: Kacmarek RM, Hess D, Stoller JK (Hrsg) Monitoring in respiratory care. Mosby, St. Louis, S 375–405
23. Hoffer JL, Norfleet EA (1996) **Con: Is continuous intra-arterial blood gas and pH monitoring justifiable?** J Clin Monit 12:183–189
24. Iotti GA, Brunner JX, Braschi A, Laubscher T, Olivei MC, Palo A, Galbusera C, Comelli A (1996) **Closed-loop control of airway occlusion pressure at 0.1 second ( $P_{0.1}$ ) applied to pressure-support ventilation: Algorithm and application in intubated patients.** Crit Care Med 24:771–779
25. Kaczmarczyk G (1995) **Blutgase.** In: List WF, Metzler H, Pasch T (Hrsg) Monitoring in Anästhesie und Intensivmedizin. Springer, Berlin, S 392–412
26. Kacmarek RM (1988) **The role of pressure support ventilation in reducing the work of breathing.** Respir Care 33:99–120
27. Kacmarek RM, Hess DR (1993) **Airway pressure, flow and volume waveforms, and lung mechanics during mechanical ventilation.** In: Kacmarek RM, Hess DR, Stoller JK (Hrsg) Monitoring in respiratory care. Mosby, St. Louis, S 497–543
28. Kick O, Vandermeersch E, Mulier JP, Vermaut J, Van Aken H (1992) **Überwachung des Patienten im Aufwachraum. Kontinuierliche transkutane  $O_2$ - und  $CO_2$ -Messung.** Anaesthesist 41:331–334
29. Koff PB, Hess D (1993) **Transcutaneous oxygen and carbon dioxide measurements.** In: Kacmarek RM, Hess D, Stoller JK (Hrsg) Monitoring in respiratory care. Mosby, St. Louis, S 349–374
30. Krieger PB, Ershowski PF (1988) **Noninvasive detection of respiratory failure in the intensive care unit.** Chest 94:254–261
31. Larson CP, Vender J, Seiver A (1994) **Multi-site evaluation of a continuous intra-arterial blood gas monitoring system.** Anesthesiology 81:543–552
32. Larson CP (1996) **Continuous arterial blood gas monitoring: a technology in transition.** Intensive Care Med 22:1141–1143
33. List WF (1995) **Pulsoxymetrie.** In: List WF, Metzler H, Pasch T (Hrsg) Monitoring in Anästhesie und Intensivmedizin. Springer, Berlin, S 329–336
34. Mador MJ, Walsh JM, Tobin MJ (1993) **Work of breathing and respiratory muscle function.** In: Kacmarek RM, Hess D, Stoller JK (Hrsg) Monitoring in respiratory care. Mosby, St. Louis, S 267–308
35. Marini JJ, Rodriguez RM, Lamb V (1986) **The inspiratory workload of patient-initiated mechanical ventilation.** Am Rev Respir Dis 134:902–908
36. Nathan SD, Ishaaya AM, Koerner SK, Belman MJ (1993) **Prediction of minimal pressure support during weaning from mechanical ventilation.** Chest 103:1215–1219
37. Ornato JP, Shipley JB, Racht EM et al. (1992) **Multicenter study of a portable, hand sized, colorimetric end tidal carbon dioxide detection device.** Ann Emerg Med 21:518–523
38. Oropello JM, Manasia A, Hannon E, Lebowitz A, Benjamin E (1996) **Continuous fiberoptic arterial and venous blood gas monitoring in hemorrhagic shock.** Chest 109:1049–1055
39. Pankow W, Hijjeh N, Schüttler F, Penzel T, Peter JH, von Wichert P (1997) **Der Einfluß der nichtinvasiven Beatmung auf die Atemarbeit bei Adipösen.** Med Klin 92:S1, 54–60
40. Pasch T (1995) **Kapnometrie und Kapnographie.** In: List WF, Metzler H, Pasch T (Hrsg) Monitoring in Anästhesie und Intensivmedizin. Springer, Berlin, S 337–366
41. Patrick W, Webster K, Ludwig L, Roberts D, Wiebe P, Younes M (1996) **Noninvasive positive-pressure ventilation in acute respiratory distress without prior chronic respiratory failure.** Am J Respir Crit Care Med 153:1005–1011
42. Rathgeber J (1995) **Moderne Beatmungsverfahren in der Intensivmedizin: Stellenwert, Fehler und Gefahren.** Intensivmed 32:374–386
43. Reinhard K, Hannemann L (1995)  **$O_2$ -Bilanz,  $O_2$ -Transport,  $O_2$ -Verbrauch, gemischtvenöse  $O_2$ -Sättigung.** In: List WF, Metzler H, Pasch T (Hrsg) Monitoring in Anästhesie und Intensivmedizin. Springer, Berlin, S 423–431
44. Roizen MF, Schreider B, Austin W, Carter C, Polk S (1993) **Pulse oximetry, capnography, and blood gas measurements: reducing cost and improving the quality of care with technology.** J Clin Monit 9:237–240
45. Roupie EE, Brochard L, Lemaire FJ (1996) **Clinical evaluation of a continuous intra-arterial blood gas system in critically ill patients.** Intensive Care Med 22:1162–1168
46. Sackner MA, Krieger BP (1995) **Noninvasive respiratory monitoring.** In: Roussos C (Hrsg) The Thorax, Marcel Dekker, New York, S 663–805
47. Schüttler F, Juhász J, Pankow W, Penzel T (1996) **Langzeitanalyse der Atmung im Schlaf.** Wien Med Wschr 146:382–384
48. Shapiro BA, Mahutte CK, Cane RD, Gilmour JJ (1993) **Clinical performance of a blood gas monitor: A prospective, multicenter trial.** Crit Care Med 21:487–494
49. Sum Ping ST, Mehta MP, Symreng T (1992) **Accuracy of the FEF  $CO_2$  detector in the assessment of endotracheal tube placement.** Anesth Analg 74:415–419
50. Teplik R (1993) **Oxygen transport from lung to tissue.** In: Kacmarek RM, Hess D, Stoller JK (Hrsg) Monitoring in respiratory care. Mosby, St. Louis, S 169–225
51. Tobin MJ (1988) **Respiratory monitoring in the intensive care unit.** Am Rev Respir Dis 138:1625–1642
52. Tobin MJ (1992) **Monitoring of pressure, flow and volume during mechanical ventilation.** Respir Care 9:1081–1096
53. Tobin MJ (1992) **Breathing pattern analysis.** Intensive Care Med 18:193–201
54. Tobin MJ, Guenther SM, Perez W, Lodato RF, Mador MJ, Allen SJ, Dantzker DR (1987) **Kenno-Mead analysis of ribcage-abdominal motion during successful and unsuccessful trials of weaning from mechanical ventilation.** Am Rev Respir Dis 135:1320–1328
55. Tobin MJ, Lodato RF (1989) **PEEP, Auto-PEEP, and waterfalls.** Chest 96:449–451
56. Van de Graaff WB, Gordey K, Dornseif SE, Dries DJ, Kleinman BS, Kumar P, Mathru M (1991) **Pressure support. Changes in ventilatory pattern and components of the work of breathing.** Chest 100:1082–1089
57. Venkatesh B, Hendry S-P (1996) **Continuous intra-arterial blood gas monitoring.** Intensive Care Med 22:818–828
58. Weiler N, Heinrichs W (1994) **Moderne Beatmungsformen.** Internist 35:785–803
59. Werchowski JL, Sanders MH, Costantino JP, Sciarba FC, Rogers RM (1990) **Inductance plethysmograph measurement of CPAP-induced changes in end-expiratory lung volume.** J Appl Physiol 68:1732–1738
60. Yamanaka MK, Sue DY (1987) **Comparison of arterial-end-tidal  $P_{CO_2}$  difference and dead space/tidal volume ratio in respiratory failure.** Chest 92:832–835
61. Younes M (1995) **Interactions between patients and ventilators.** In: Roussos C (Hrsg) The Thorax, Marcel Dekker, New York, S2367–2420
62. Younes M (1994) **Proportional assist ventilation.** In: Tobin M (Hrsg) Principles and practice of mechanical ventilation. McGraw-Hill, New York; S 349–369
63. Zbinden S, Schupfer G (1989) **Detection of esophageal intubation: the cola complication.** Anesthesia 44:81