

6 Monitoring der Beatmung

6.1 Klinische und technische Überwachung der Beatmung

Alexander Humberg

Beatmete Patienten sollten mehrmals täglich klinisch untersucht werden. Es ist darauf zu achten, ob die Beatmung effektiv und sicher ist und ob sich seit der letzten Untersuchung Veränderungen ergeben haben. Ebenso müssen die Einstellungen am Beatmungsgerät regelmäßig überprüft werden. Folgende Fragestellungen können helfen, die Untersuchung strukturiert zu gestalten.

6

Merke

Wichtige Fragestellungen an den klinischen Untersucher:

- Wirkt der Patient gestresst (starkes Schwitzen, Tachykardie, Hypertonie)?
- Besteht ein Anhaltspunkt für eine insuffiziente Beatmung (Zyanose, ineffektives Mitatmen, paradoxe Atmung, Schaukelatmung)?
- Hebt und senkt sich der Thorax symmetrisch?
- Gibt es Zeichen eines subkutanen Emphysems (Palpation)?
- Sind beide Lungen beidseits gut und seiten- gleich (!) belüftet (dazu vergleichende Auskultation an verschiedenen Stellen)?
- Wie sind die Atemgeräusche (Obstruktion, Rasselgeräusche, Nebengeräusche)?
- Ist die Tubuslage korrekt und ist der Cuff-Druck adäquat?

M!

derung der spektralen Absorption kann darüber hinaus die Herzfrequenz dargestellt werden.

Eine klinisch wichtige Einschränkung der Interpretation der Oxygenierung stellt die Anwesenheit von Dyshämoglobinen, wie Kohlenmonoxidhämoglobin oder Methämoglobin, bei der Inhalation von Kohlenmonoxid oder Stickstoffmonoxid (Stickstoffmonoxidtherapie) dar. Dadurch kann die Oxygenierung falsch-hoch eingeschätzt werden. Aber auch fetales Hämoglobin kann zur Abschätzung falsch-hoher Oxygenierungswerte führen.

Des Weiteren kann eine unzureichende periphere Durchblutung (Schock, Vasopressortherapie) die Messung der Sauerstoffsättigung beeinträchtigen.

Merke

Bei Kindern ist häufig die Darstellung des arteriellen Sauerstoffgehalts durch die Bewegung der Extremitäten eingeschränkt. Fehlmessungen und konsekutive Fehlinterpretationen können die Folge sein. Eine reduzierte Sauerstoffsättigung sollte zunächst klinisch kontrolliert werden. Ein Blick auf die Pulskurve im Vergleich zum abgeleiteten EKG (Elektrokardiogramm) kann ebenfalls helfen, die Qualität der aktuellen Messung einzuschätzen. Zusätzlich sollte die Funktionalität der Technik (z. B. Kabelbruch des Sensors) kontrolliert werden.

M!

6.1.1 Pulsoxymetrie

Pulsoxymeter messen die Sauerstoffsättigung im Blut nach dem Prinzip der Spektrofotometrie anhand der Absorption von rotem und infrarotem Licht durch oxygeniertes Blut. Anhand von Mengenveränderungen des Blutes während Systole und Diastole und der daraus resultierenden Verän-

6.1.2 Blutgasanalyse

Die führende Messmethode den respiratorischen Status einzuschätzen, ist die Bestimmung der Blutgaspartialdrücke für Sauerstoff und Kohlendioxid. Die Bestimmung der Gase aus dem arteriellen Blut bei beatmeten Patienten ist dabei der Goldstandard.

Arterielle Umbilikalkatheter oder periphere arterielle Katheter bei Neugeborenen und älteren Kindern können einen kontinuierlichen Zugang zum arteriellen System bieten. Arterielle Punktionen der A. radialis, der A. ulnaris oder der A. dorsa-

lis pedis vermitteln dem Untersucher valide Blutgaswerte. Zu beachten ist, dass einliegende Katheter das Infektions- und Thromboserisiko erhöhen und regelmäßige Punktionen von Arterien nur begrenzt möglich sind. Oftmals wird alternativ Blut aus dem peripheren Kapillarbett zur Analyse verwendet. Diese Werte können annähernd die Blutgase darstellen, sollten aber vorsichtig interpretiert werden (z.B. hoher $p\text{CO}_2$ bei peripherer Zyanose). Ebenso kann das Vermischen von venösem und arteriellem Blut zu Interpretationsfehlern führen.

Hinweis

Nach Entnahme der Blutprobe sollte aufgrund der fortgesetzten metabolischen Vorgänge die Probe zügig untersucht werden.

6.1.3 Kontrolle der Tubuslage

Nach Intubation oder bei Zweifel an der korrekten Lage des Tubus muss dessen Lage innerhalb des trachealen Systems kontrolliert werden.

Die einfachste, aber auch unsichere Methode dafür ist die seitenvergleichende Auskultation des Thorax. Andere unsichere Zeichen, wie der Anstieg der Sauerstoffsättigung, das Beschlagen des Tubus, das Ausbleiben von Geräuschen im Epigastrium oder das Heben und Senken des Thorax, geben zwar verwertbare Hinweise, ersetzen aber nicht die Durchführung sicherer Methoden. So sollte bei Unsicherheit über die korrekte Tubuslage sowie nach jeder Intubation der p_{etCO_2} (endtidaler

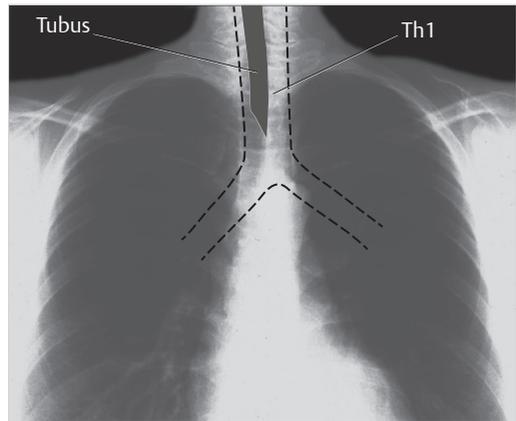


Abb. 6.1 Optimale Position des Tubus im Röntgenbild zwischen 1. und 2. Brustwirbel. Th = Brustwirbel

6

Kohlendioxidpartialdruck) gemessen werden (► Tab. 6.1). Vor allem bei Neugeborenen, Säuglingen und Kleinkindern muss eine Röntgenuntersuchung des Thorax durchgeführt werden. Verbreitete Tabellen zur Bestimmung der Tubuslage in Relation zum Gestationsalter oder zur Körpergröße und zum Körpergewicht können allenfalls einen Anhaltspunkt für die angestrebte Tubuslage geben.

Im Röntgenbild des Thorax sollte sich der Tubus unmittelbar unterhalb der Glottisebene und deutlich oberhalb der Karina darstellen. Da die Position der Klavikula je nach Lage des Kindes in der Bildgebung hoch variabel ist (vom 4. Zervikalwirbel bis zum 2. Thorakalwirbel), sollte diese nicht als Landmarke für die Bestimmung der Tubuslage genutzt werden. Sicherer ist es, als Maß für eine korrekte Lage des Tubus den 1.–2. Brustwirbel zu nutzen (► Abb. 6.1, ► Abb. 6.2).

Tab. 6.1 Sichere und unsichere Intubationszeichen.

Unsichere Intubationszeichen	Sichere Intubationszeichen
<ul style="list-style-type: none"> • Thoraxexkursionen • Auskultation eines Atemgeräuschs • Beschlagen der Tubusinnenwand • adäquate Sauerstoffsättigung 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachweis von p_{etCO_2} • bronchoskopischer Nachweis einer intratrachealen Lage • direkte Inspektion des Tubusverlaufs durch die Stimmbänder
p_{etCO_2} = endtidaler Kohlendioxidpartialdruck	

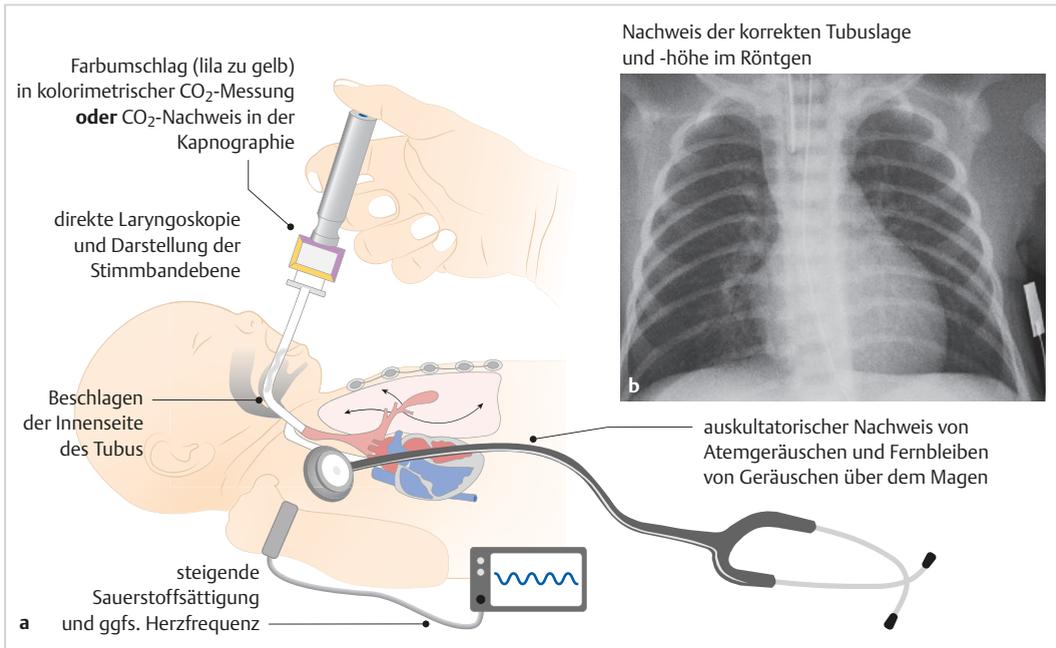


Abb. 6.2 Kontrolle der Tubuslage. a Sichere und unsichere Zeichen der korrekten Intubation. b Adäquate Tubuslage im Röntgenbild beim Neonaten. (Quelle: Quelle Röntgen: Olbertz D. Beatmung. In: Jorch, Hübler, Hrsg. Neonatologie. 1. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2015. DOI: 10.1055/b-002-85528)

Merke

Im Röntgenbild des Thorax sollte der Tubus sich auf Höhe des 1.–2. Brustwirbels befinden.

Bei Adoleszenten und Erwachsenen gilt diese Regel ebenfalls. Bei ihnen ist die Faustregel „Tubus bis zu 2 cm oberhalb der Karina“ allerdings oftmals ausreichend.

Hinweis

Die Durchführung einer Röntgenaufnahme des Thorax nach erfolgreicher Intubation stellt weiterhin den Goldstandard zur Verifikation der Tubuslage dar. Allerdings kann mit dieser Methode nur die optimale Lagehöhe des Tubus kontrolliert werden



6.1.4 Messung des Kohlendioxidgehalts

Eine der wichtigsten Methoden zur Überwachung der Beatmung ist die Bestimmung des Kohlendioxidanteils im arteriellen Blut. Verschiedene Messmethoden wurden bisher entwickelt. So lässt sich die Kohlendioxidkonzentration transkutan, expiratorisch oder arteriell bestimmen. Aufgrund der Genauigkeit und Unabhängigkeit von Einflussfaktoren gilt die arterielle Blutgasmessung als Goldstandard.

Merke

Die Messung des $p_a\text{CO}_2$ (arterieller Kohlendioxidpartialdruck) ist Goldstandard. Alle weiteren Methoden sind Möglichkeiten, den $p_a\text{CO}_2$ abzuschätzen, und unterliegen verschiedenen Limitationen bzw. weisen mögliche Fehlerquellen auf.



Transkutane Kapnometrie

Die transkutane Messung des Kohlendioxidgehalts erfolgt über die pH-Bestimmung einer von der Haut durch eine semipermeable Membran separierten Elektrolytschicht. Das durch die Haut diffundierende Kohlendioxid verändert proportional den pH-Wert dieser Elektrolytschicht. Der pH-Wert kann mittels elektrochemischer Methoden bestimmt werden. Die Messung erfolgt durch Erwärmung und konsekutive Hyperämisierung des kapillaren Gefäßbetts des Hautbereichs. Je nach Gerätetyp und Einstellung wird die Haut auf eine Temperatur von bis zu 42 °C erwärmt.

Durch die Erwärmung und Vasodilatation im betreffenden Hautgebiet kommt es so zu einer Überschätzung des gemessenen Kohlendioxidgehalts gegenüber dem arteriellen $p_a\text{CO}_2$ mit rechnerisch 4,5%/°C. Die Zellen der Epidermis produzieren ebenfalls Kohlendioxid, das mit bis zu 5 mmHg (0,7 kPa) signifikant messbar ist. Der arterielle Kohlendioxidgehalt wird somit bei der transkutanen Messung falsch-hoch gemessen; dies muss bei der Interpretation mitbedacht werden. Zusätzlich können z. B. folgende Faktoren die Diskrepanz zwischen transkutan gemessenem und arteriellem $p\text{CO}_2$ verstärken:

- Hyperoxie ($p_a\text{O}_2$ über 100 mmHg [13,3 kPa])
- Hypoperfusion (z. B. im septischen Schock oder bei Anwendung von Katecholaminen)
- Hautödeme
- subkutanes Fettgewebe

Aus diesen Gründen muss der transkutane $p\text{CO}_2$ regelmäßig mit dem arteriellen abgeglichen werden.



Cave

Die Messtemperatur der Sonde, eine Hyperoxie, eine Gewebehyperperfusion, Hautödeme, der Gebrauch vasokonstriktiver Medikamente und subkutanes Fettgewebe beeinflussen die Messung des transkutanen $p\text{CO}_2$.

Die transkutane Kapnometrie ist ein sicheres und weit verbreitetes Verfahren zur Bestimmung des arteriellen Kohlenstoffdioxidanteils in der Neonatologie (► Abb. 6.3). Untersuchungen konnten zeigen, dass die Bestimmung des transkutanen $p\text{CO}_2$ bei kurzzeitiger Anwendung das Outcome von Neonaten unter mechanischer Beatmung verbesserte. Zudem scheint die transkutane Messung des Kohlendioxidgehalts der Messung des expiratorischen Kohlendioxidgehalts bei Neugeborenen überlegen zu sein. Vorsicht ist allerdings geboten bei Patienten außerhalb der Neonatalperiode sowie bei Patienten mit BPD, Hypoperfusion oder Hautödemen.

Bei Patienten mit fragiler Haut wurden Verbrennungen und allergische Reaktionen auf das Material beschrieben. Durch regelmäßige Veränderung des Messorts können solche Hautschäden vermieden werden.



Merke

Spätestens bei dem Verdacht auf Inkonsistenz der Daten oder nach einer Neuanlage der Sonde muss der arterielle Kohlendioxidgehalt kontrolliert und muss das transkutane Messgerät kalibriert werden.

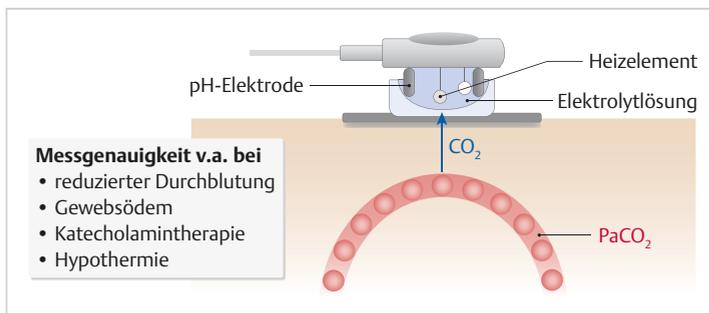


Abb. 6.3 Transkutane CO_2 -Messung. Die transkutane Kapnometrie ist ein sicheres und weit verbreitetes Verfahren zur Bestimmung des arteriellen Kohlenstoffdioxidanteils in der Neonatologie.

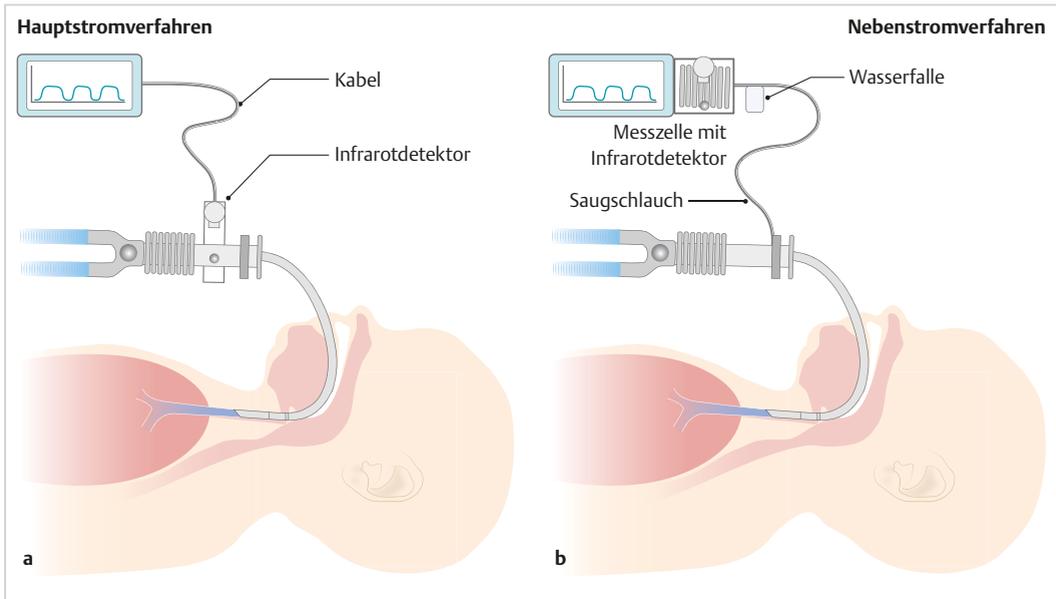


Abb. 6.4 Messung des $p_{Et}CO_2$.
a Hauptstromverfahren.
b Nebenstromverfahren.

Tidale Messung des Kohlendioxidgehalts

Bei mechanisch beatmeten Patienten erfolgen die Messung und die Darstellung des expiratorischen Kohlendioxidgehalts in numerischer (Kapnometrie), grafischer (Kapnografie) oder kolorimetrischer Form (z.B. Pedi-Cap). Die tidale Messung des Kohlendioxidgehalts lässt Rückschlüsse auf den p_aCO_2 zu und kann dem Untersucher eine Hilfestellung bei der Interpretation der Beatmungs- und Kreislaufsituation geben.

Die Anwendung von Kapnometern ist in der Beatmung essenziell. Der Nachweis des expiratorischen Kohlendioxidgehalts gilt als Goldstandard zur Verifizierung einer erfolgreichen Intubation und sollte nach Intubation zur leitliniengerechten Kontrolle dringend erfolgen und dokumentiert werden.



Merke

Der Nachweis des expiratorischen Kohlendioxidgehalts ist Goldstandard zum Nachweis einer erfolgreichen Intubation und sollte nach jeder Intubation erfolgen und bestenfalls kontinuierlich abgeleitet werden.

Die Messung des $p_{Et}CO_2$ erfolgt technisch entweder mithilfe des sog. Hauptstromverfahrens oder über das Nebenstromverfahren:

- **Hauptstromverfahren:** Bei diesem Verfahren ist die Messküvette in das Schlauchsystem integriert (► Abb. 6.4a). Der Vorteil des Hauptstromverfahrens ist die minimale Verzögerungszeit, mit der die Kohlendioxidkurve dargestellt wird. Von Nachteil ist der zusätzlich entstehende Totraum, der die Methode bei sehr kleinen Kindern aufgrund der Gefahr der Kohlendioxidrückatmung limitieren kann.
- **Nebenstromverfahren:** Im Nebenstromverfahren wird kontinuierlich eine geringe Luftmenge aus dem System abgesaugt und darin der Kohlen-

dioxidgehalt bestimmt (► Abb. 6.4b). In diesem Verfahren kann die Verzögerungszeit der Darstellung des Kohlendioxidgehalts bei hohen Atemfrequenzen zu hoch sein, sodass dann keine adäquate Messung mehr stattfinden kann.

Außerdem saugen diese Geräte konstant Luft aus dem System ab. Sollte der negative Flow der Messeinheit den expiratorischen Flow übersteigen, kommt es dabei zu Messfehlern durch Ansaugen von externer Luft.

Arterioalveoläre Differenz des Kohlendioxidgehalts

Das Kohlendioxid diffundiert leicht durch biologische Membranen. Aufgrund von technischen Fehlern oder Erkrankungen der Lunge ist unter klinischen Bedingungen oftmals eine Differenz zwischen arteriellem und alveolärem $p\text{CO}_2$ festzustellen. Diese Differenz wird als „arterioalveoläre Kohlendioxiddifferenz“ mit höher messbaren arteriellen Werten bezeichnet:

$$p_{a-et}\text{CO}_2 = p_a\text{CO}_2 - p_{et}\text{CO}_2$$

mit

- $p_{a-et}\text{CO}_2$ = arterioalveoläre Kohlendioxiddifferenz
- $p_a\text{CO}_2$ = arterieller Kohlendioxidpartialdruck
- $p_{et}\text{CO}_2$ = endtidaler Kohlendioxidpartialdruck

Unter seltenen Bedingungen, bei großen Tidalvolumina und kleinem Ventilation-Perfusion-Quotienten kann $p_{et}\text{CO}_2$ größer als $p_a\text{CO}_2$ sein, wodurch die arterioalveoläre Kohlendioxiddifferenz negativ wird. Unter normalen klinischen Bedingungen bewegt sich die Differenz meist zwischen 2 und 5 mmHg (0,3 und 0,7 kPa), kann aber bei Vergrößerung des Totraumvolumens oder signifikanten Störungen des Verhältnisses von Belüftung zu Durchblutung deutlich ansteigen. Die Auswirkung

pulmonaler Erkrankungen auf die arterioalveoläre Kohlendioxiddifferenz lässt sich klinisch schwer abschätzen und sollte im Bedarfsfall durch arterielle Kontrollen abgeglichen werden.

Kapnografie

Die Kapnografie ermöglicht über die kontinuierliche grafische Darstellung der Veränderung des $p\text{CO}_2$ im Ausatemgas die Visualisierung des Atemzyklus. Diese Form der Darstellung erlaubt die Interpretation von Atemfrequenz, Tiefe und Qualität der Beatmung.

► Abb. 6.5 zeigt stilisierte Formen des Verlaufs des $p_{et}\text{CO}_2$ bei beatmeten Patienten, wie sie auf Beatmungsgeräten dargestellt sein können. Faktoren, die den $p_{et}\text{CO}_2$ beeinflussen, werden in ► Tab. 6.2 zusammengefasst.

Besonderheiten der Messung des endtidalen Kohlendioxidpartialdrucks in der Neonatologie

Das führende Problem der Kapnografie bei beatmeten Frühgeborenen ergibt sich aus dem geringen Tidalvolumen und den hohen Atemfrequenzen. Daraus resultiert eine schnelle Variation der $p_{et}\text{CO}_2$ -Werte, und der technische Anspruch an die Messsysteme steigt. Technisch begründet erfolgt die Darstellung des Kohlendioxidgehalts mit einer zeitlichen Latenz. Das verursacht bei kurzen Expirationszeiten eine Ungenauigkeit der Messung des expiratorischen Kohlendioxids gegenüber der transkutanen und arteriellen Kohlendioxidbestimmung.

Die Bestimmung des endtidalen Kohlendioxids vor allem bei Frühgeborenen darf zurzeit die arterielle Messung noch nicht ersetzen, auch wenn die Vorteile naheliegend sind, wie z. B. der zeitnahe Nachweis einer Extubation oder Diskonnektion.

Tab. 6.2 Faktoren, die den endtidalen Kohlendioxidpartialdruck $p_{et}\text{CO}_2$ beeinflussen.

Faktoren, die $p_{et}\text{CO}_2$ erhöhen	Faktoren, die $p_{et}\text{CO}_2$ reduzieren
<ul style="list-style-type: none"> • Fieber • Sepsis • erhöhte Kohlendioxidrückatmung (Totraumvolumen) • Hypoventilation • Bicarbonatsubstitution 	<ul style="list-style-type: none"> • Hypothermie • kardiopulmonale Ursachen (Hypoperfusion der Lunge, Embolie, Hypotension, Herzstillstand) • Leckage, Diskonnektion, Fehlintubation • Hyperventilation

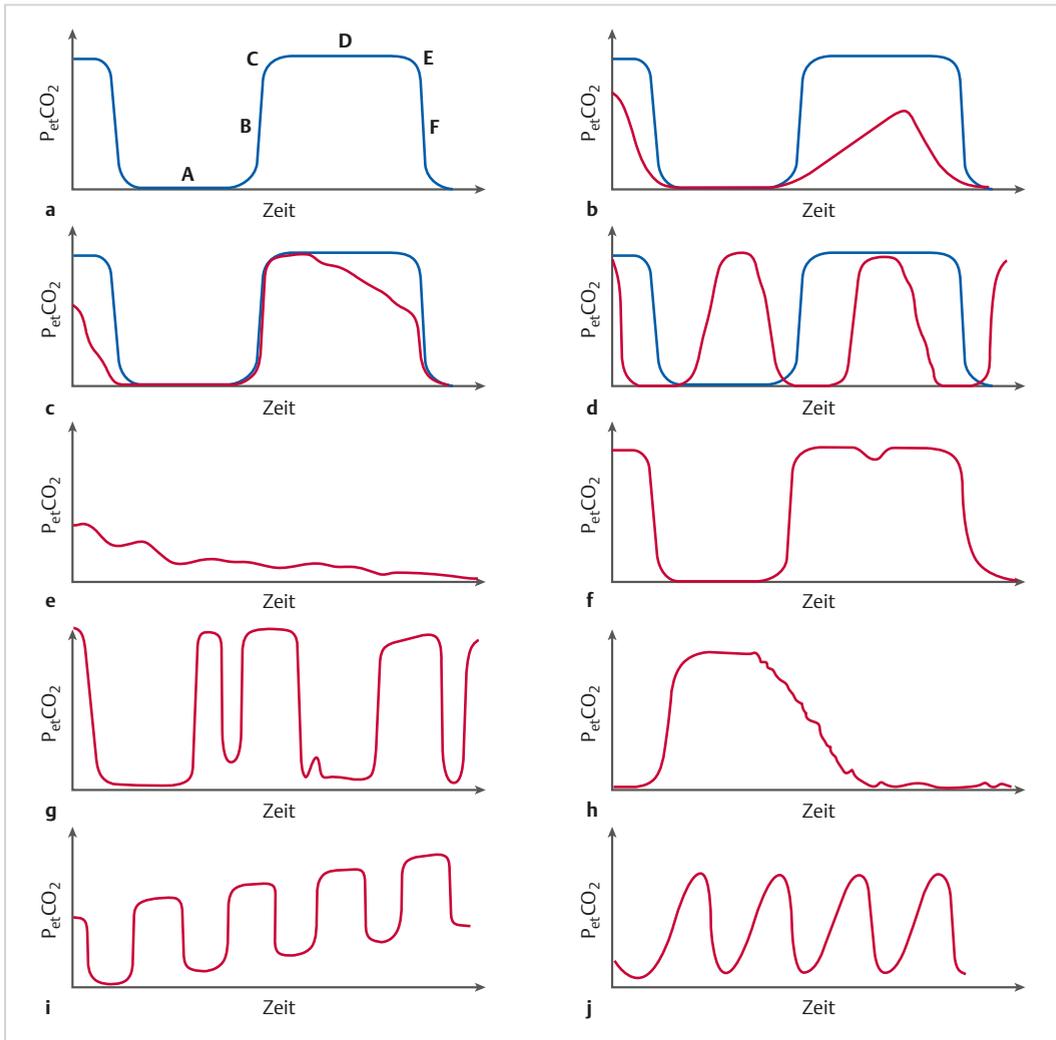


Abb. 6.5 Formen und Interpretationsmöglichkeiten der $p_{et}CO_2$ -Kurve.

a Normales Kapnogramm

A = Grundlinie, Beginn der Expiration, Entleerung des oberen Totraumvolumens (diese Linie sollte bei 0 liegen, andernfalls liegt eine Kohlendioxidrückatmung vor)

B = aufsteigende Schenkel, Vermischung von Gas aus dem Totraum und den Alveolen

C = Wechsel zu reiner Alveolargasexhalation

D = Plateauphase der Expiration von Alveolargas

E = endtidale Kohlendioxidkonzentration, höchste Konzentration von Kohlendioxid während der Expirationsphase (der Winkel repräsentiert den Wechsel in die inspiratorische Phase)

F = Inspiration mit zügigem Abfall der Kohlendioxidkonzentration

b Kapnogramm mit längerer Transitionsphase (z. B. im Rahmen einer chronischen respiratorischen Erkrankung, Fremdkörper im oberen Atemweg, Bronchospasmus); blau: normales Kapnogramm

c Kapnogramm mit Reduktion des alveolären Plateaus während der Expiration (z. B. bei Pneumothorax zu beobachten); blau: normales Kapnogramm

d Kapnogramm mit Abbruch der Expirationsphase (z. B. durch Leck im System); blau: normales Kapnogramm

e Kapnogramm ohne erkennbare Expirationsphasen, Abnahme des Kohlendioxidgehalts (z. B. bei ösophagealer Intubation, Herz-Kreislauf-Stillstand).

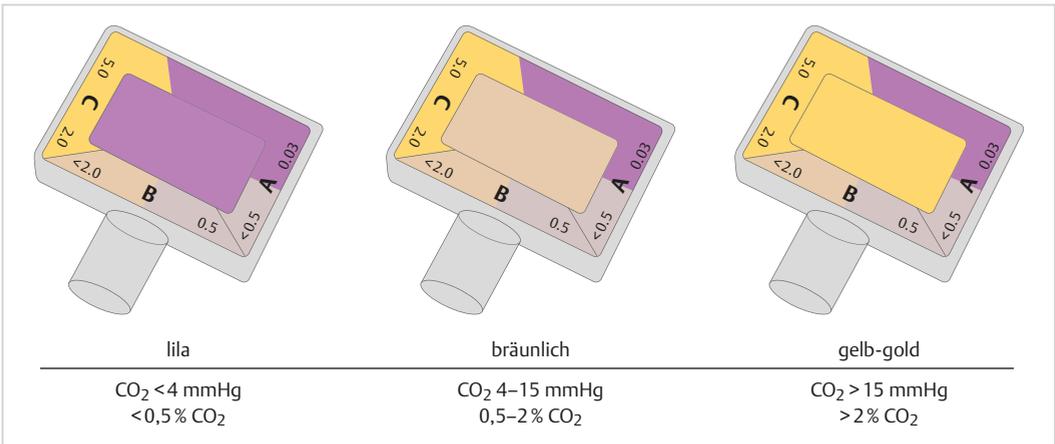


Abb. 6.6 Beispiel eines kolorimetrischen CO₂-Nachweises (Pedi-Cap). Internes Volumen: 3 ml, Haltbarkeit 2 h, Gewicht < 5 g.

Hinweis

Die Messung des expiratorischen Kohlendioxidgehalts bei Frühgeborenen unterliegt aufgrund hoher Atemfrequenzen und geringer Tidalvolumina großen Variationen.

Kolorimetrie

Der kolorimetrische Nachweis von Kohlendioxid erfolgt semiquantitativ anhand eines Farbumschlags im Anzeigefenster. Hauptsächliche Anwendungsgebiete findet diese Methode in der akut- und präklinischen Medizin zum Nachweis einer korrekten Tubuslage (► Abb. 6.6).

Kolorimetrische Detektoren können auch für Frühgeborene schon eingesetzt werden. Auch wenn ab einem $p_{et}CO_2$ von ca. 4 mmHg (0,5 kPa) bereits ein Farbumschlag erreicht werden kann, so ist der maximale Farbumschlag erst ab 15 mmHg (2,0 kPa) sichtbar.

Limitiert ist die Anwendung in klinischen Situationen, in denen aufgrund der pathophysiologischen Situation wenig oder kein Kohlendioxid in der Ausatemluft des Patienten gemessen werden kann. So kann während der Erstversorgung von Neugeborenen ein Farbumschlag bei eingeschränkten Kreislaufverhältnissen ausbleiben. Ähnliche Probleme mit falsch-negativen Ergebnissen bestehen bei Kindern mit Aspiration von Mekonium oder Blut, kardialen Anomalien, pulmonaler Hypoperfusion oder nach Asphyxie.

Abb. 6.5 Fortsetzung

- f Kapnogramm mit spontaner ineffektiver Atemaktivität (z. B. kein ausreichender Trigger, ungenügende Relaxierung).
- g Kapnogramm mit spontaner effektiver Atemaktivität.
- h Kapnogramm mit welligem Abfall aus der Expiration, keine Inspiration (z. B. intubierter Patient ohne Beatmung; Wellen zeigen Oszillationen durch Herzschläge gegen die Lungen an).
- i Kapnogramm mit steigender Grundlinie, Rückatmung von Kohlendioxid [z. B. fehlerhaftes Expirationsventil, inadäquater inspiratorischer Flow, defekter Kohlendioxidabsorber, insuffiziente Expirationszeit].
- j Kapnogramm eines Neonaten (aufgrund der typischen kurzen Expirationszeit ist die Plateauphase meistens nicht darstellbar; hier mit verlängerter Expirationsphase. Abatmung von Kohlendioxid ist verzögert z. B. durch hohe Widerstände in den kleinen Atemwegen [Surfactant-Mangel, mechanische Obstruktion des Tubus]).

Hinweis

Werden diese Einschränkungen beachtet, ist der kolorimetrische Nachweis von Kohlendioxid eine leitliniengerechte Ergänzung zum Nachweis einer gelungenen Intubation.

6.2 Bildgebende Verfahren, elektrische Impedanztomografie

Christoph Rügger

Die elektrische Impedanztomografie (EIT) stellt ein kontinuierliches bildgebendes Verfahren dar, mit dem nicht-invasiv und ohne ionisierende Strahlung die regionale Lungenfunktion Atemzug für Atemzug dargestellt werden kann (► Tab. 6.3). Der Einsatz der EIT ist nicht nur auf invasiv beatmete Patientinnen und Patienten beschränkt, sondern kann auch bei nicht-invasiv atemunterstützten Kindern und Neugeborenen angewendet werden. Damit bietet sie gerade während hochadaptiver Situationen wie der neonatalen Transition, der In- oder Extubation, des Rekrutierens von kollabierten Lungenabschnitten oder als kontinuierliches Überwachungsverfahren von krankheits- oder behandlungsbedingten Lungenveränderung entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Möglichkeiten der funktionellen Lungenbeurteilung [127]. Die wichtigsten Merkmale der EIT sind in ► Tab. 6.3 zusammengefasst.

Tab. 6.3 Merkmale der elektrischen Impedanztomografie.

Funktionsprinzip	Regionale Impedanzmessung
Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> • bettseitiges Überwachungsverfahren • kontinuierlich • Atemzug für Atemzug
Information	<ul style="list-style-type: none"> • dynamisches Lungenfunktionsmonitoring • regionale Ventilations- und Belüftungsverteilung

6.2.1 Funktionsprinzip

Mit der EIT wird die elektrische Leitfähigkeit des Gewebes im menschlichen Körper gemessen. Entsprechend dem Ohmschen Gesetz $R=U/I$ wählt elektrischer Strom stets den Weg des geringsten Widerstandes. Der elektrische Widerstand im Gewebe wird auch als bioelektrischer Widerstand oder Impedanz bezeichnet.



Merke

Elektrischer Strom wählt stets den Weg des geringsten Widerstands.

Die Bilderzeugung bei der EIT basiert auf der Einspeisung von kleinen, hochfrequenten Wechselströmen durch zirkulär auf der Körperoberfläche angebrachte Elektroden (► Abb. 6.7). Die aus diesen Stromflüssen resultierenden elektrischen Felder werden in Form von Spannungswerten an

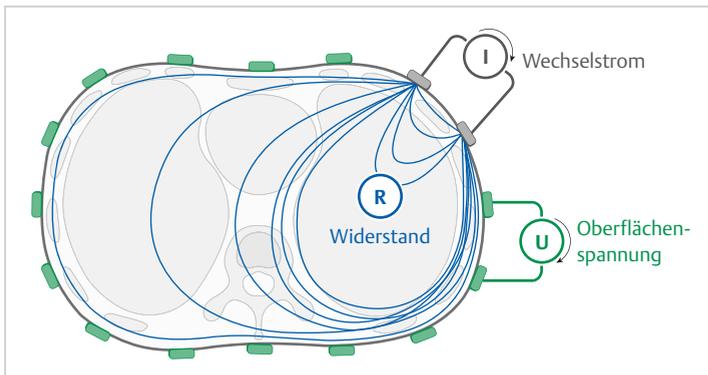


Abb. 6.7 Methodik der thorakalen elektrischen Impedanztomografie. Über ein Elektrodenpaar (grau) an der Körperoberfläche wird ein elektrischer Wechselstrom (I) eingespeist. Dieser fließt im Gewebe (blaue Linien) entlang des geringsten Widerstandes (R). Das resultierende elektrische Feld wird in Form einer Spannung (U) an allen anderen Elektrodenpaaren (grün) gemessen.

allen anderen Elektrodenpaaren sequenziell gemessen. Ist bei der In- bzw. Expiration mehr oder weniger Atemgas im Brustkorb, so verändern sich dadurch die Impedanz im Gewebe und damit auch die gemessenen Spannungen.

Neben der Atemaktivität tragen auch der pulsatile Blutfluss sowie intrathorakale Flüssigkeitsverschiebungen (beispielsweise während der Resorption von Lungenflüssigkeit unmittelbar nach der Geburt) zu Veränderungen des bioelektrischen Widerstandes bei. Da der elektrische Strom dem Weg des geringsten Widerstandes und nicht zwingend dem kürzesten Weg zwischen 2 Elektrodenpaaren folgt, erfasst die thorakale EIT nicht nur lokale, sondern dreidimensionale Veränderungen der Ventilation. Diese regionalen Lungenvolumenveränderungen sind gerade beim Neugeborenen aufgrund seines kleinen Lungenvolumens repräsentativ für die gesamte Lunge.

Hinweis

Beim *Neugeborenen* korrelieren die mit EIT in einer Querschnittebene gemessenen Lungenvolumenveränderungen stark mit Volumenveränderungen in der gesamten Lunge.

6.2.2 Bilderzeugung

Ein Messzyklus für die Information eines EIT-Schnittbildes ist dann abgeschlossen, wenn sequenziell alle um den Brustkorb angebrachten Elektrodenpaare einmal für die Stromspeisung verwendet wurden. Heutige EIT-Geräte mit 32 Elektroden erlauben 50 Messzyklen/s und machen es möglich, die Impedanzverteilung und damit die Information für ein EIT-Rohbild $50 \times /s$ zu berechnen. Durch die Anwendung komplexer Rekonstruktionsalgorithmen kann die Atmung in Form von dynamisch bewegten Bildern oder in Echtzeit als Video dargestellt werden. Aus diesen zeitlichen Veränderungen der Impedanz lassen sich Lungenfunktionsparameter global über beide Lungen, nur über eine Lunge, nur über eine bestimmte Region (Region of Interest, ROI) oder sogar nur bezogen

auf einen einzelnen Pixel ermitteln und als Kurve darstellen (► Abb. 6.8).

6.2.3 Messgrößen

Im Gegensatz zu anderen Methoden der funktionellen Lungenbeurteilung wird bei der EIT in willkürlichen oder arbiträren Einheiten (sog. arbitrary Units, AU) gemessen. Während in heutigen EIT-Geräten eine automatisierte grafische Datenaufbereitung die klinische Interpretation vereinfacht, sind für die Forschung relative Einheiten allein stehend nicht aussagekräftig und müssen über die Zeit im Sinne eines Trends interpretiert werden. Sollen mehrere Messungen zu unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten oder verschiedene Patientinnen und Patienten miteinander verglichen werden, so sind die Daten in Bezug auf eine Referenzmessung respektive als Quotienten zu interpretieren.

Ventilation

Ventilationsbezogene EIT-Parameter werden für jeden einzelnen Atemzug berechnet und grafisch dargestellt.

Das Tidalvolumen gilt als wichtigster Parameter der Ventilation. Seine regionale Verteilung innerhalb der Lunge lässt sich mit der EIT mit hoher zeitlicher Auflösung verfolgen.

Merke

Mittels EIT kann nicht nur die Ventilationsamplitude, sondern vor allem auch deren zeitlicher Verlauf untersucht werden.

Eine weiterführende Interpretation gelingt durch Unterteilung des Tidalvolumens in beliebig viele ROI entlang der Gravitationsachse von dorsal nach ventral oder von links nach rechts (► Abb. 6.9 a).

Veränderungen der regionalen Ventilation infolge von Interventionen, z. B. durch das Anpassen von Beatmungseinstellungen, durch die Gabe von Surfactant oder durch eine optimierte Lagerung lassen sich so über die Zeit mitverfolgen.