

Persönliche PDF-Datei für Isabel Rosemeier, Gerhard K. Wolf

Mit den besten Grüßen vom Georg Thieme Verlag

www.thieme.de

Individuelle Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie

10.1055/a-0747-9421

Neonatology Scan 2020; 8: 65–77

Dieser elektronische Sonderdruck ist nur für die Nutzung zu nicht-kommerziellen, persönlichen Zwecken bestimmt (z. B. im Rahmen des fachlichen Austauschs mit einzelnen Kollegen und zur Verwendung auf der privaten Homepage des Autors). Diese PDF-Datei ist nicht für die Einstellung in Repositorien vorgesehen, dies gilt auch für soziale und wissenschaftliche Netzwerke und Plattformen.

Verlag und Copyright:

© 2020 by
Georg Thieme Verlag KG
Rüdigerstraße 14
70469 Stuttgart
ISSN 2194-5462

Nachdruck nur
mit Genehmigung
des Verlags



Elektrische Impedanztomografie

Individuelle Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie

Isabel Rosemeier, Gerhard K. Wolf



Früh- und Neugeborene sind gegenüber einer beatmungsinduzierten Lungenschädigung sehr vulnerabel, insbesondere, wenn eine inhomogene Lungentherapie zu einer inhomogenen Beatmungssituation führt. EIT-Messungen ermöglichen hier funktionelle Querschnittsbilder der Lungenbelüftung.

Physiologische Grundlagen

Barotrauma (hohe Beatmungsdrücke) und Volutrauma (hohe Tidalvolumina) führen zur Lungenüberdehnung und zur Disruption der Alveolen, außerdem aktivieren sie die inflammatorische Kaskade im Lungengewebe. Pulmonale Atelektasen verursachen Hypoxie und ebenfalls Lungeninflammation. Sowohl das Bestehen von Atelektasen als auch das wiederholte Öffnen und Schließen atelektatischer Bereiche sowie die Überdehnung tragen wesentlich zur beatmungsbedingten Lungenschädigung (Ventilator induced Lung Injury; VILI) bei.

Die elektrische Impedanztomografie (EIT) ist ein bildgebendes Verfahren, welches Impedanzänderungen des Thorax misst und über den Thoraxquerschnitt darstellt. Die EIT bietet damit die Möglichkeit, regionale Lungenveränderungen wie Atelektasen oder regionale Lungenüberdehnung in Echtzeit zu quantifizieren und die Beatmung entsprechend lungenprotektiv zu steuern.

Merke

Aufgrund der Strahlungsfreiheit hat die Technologie gerade für die pädiatrische und neonatologische Patientenpopulation große Vorteile und kann eine individuell gesteuerte, lungenprotektive Beatmung ermöglichen.

Funktionsprinzip

Das Prinzip der elektrischen (Thorax-) Impedanzmessung wurde vor 35 Jahren von Barber und Brown beschrieben. Die Technologie baut darauf auf, dass sich die Bioimpedanz der Lunge mit dem Luftgehalt, und im geringeren Ausmaß auch mit der Lungenperfusion, verändert. Normal belüftete, atelektatische und über-

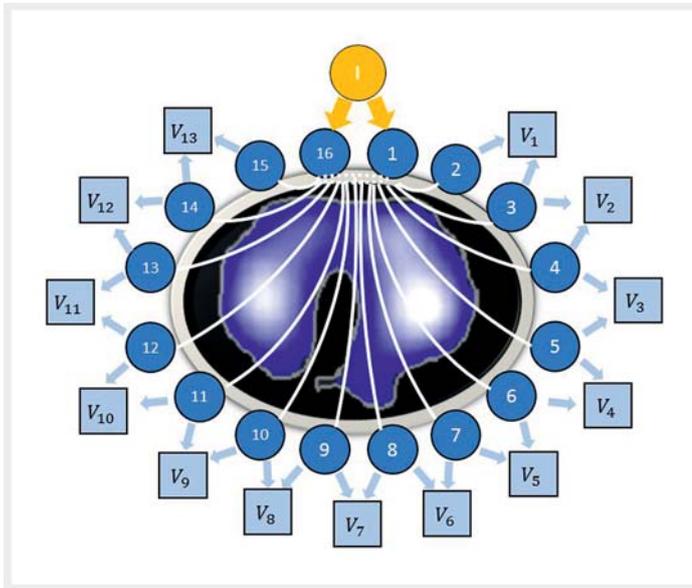
dehnte Lungenareale haben eine unterschiedliche Impedanz und lassen sich so voneinander unterscheiden.

Um den Brustkorb des Patienten werden je nach Gerät 16–32 Impedanzelektroden angebracht. An ein Elektrodenpaar wird ein definierter Wechselstrom angelegt (► **Abb. 1**, „I“), die resultierenden Spannungen (► **Abb. 1**, „V“) werden jeweils paarweise von gegenüberliegenden Elektroden gemessen.

Aus bekannter Stromstärke und gemessener Oberflächenspannung lässt sich die Impedanz ermitteln. Die Impedanz ist u. a. abhängig von Ionenkonzentrationen und der Flüssigkeitsmenge im Gewebe. Der Strom nimmt in der Lunge nicht den direkten Weg durch die

ABKÜRZUNGEN

ALI	acute Lung Injury
ARDS	acute respiratory Distress Syndrome
AVD	Area of Ventilation Delay
CDP	continuous distending Pressure
CL	Collapse
CoV	Center of Ventilation
CPAP	continous positive Airway Pressure
CV	Coefficient of Variation
EIT	elektrische Impedanztomografie
F_iO₂	inspiratorische Sauerstofffraktion
GI	Global Inhomogeneity Index
OD	Overdistension
p_aCO₂	arterieller Sauerstoffpartialdruck
p_aO₂	arterieller Kohlendioxidpartialdruck
PEEP	positive end-expiratory Pressure
PIP	peak inspiratory Pressure
RDS	respiratory Distress Syndrome
RVD	regional Ventilation Delay
VILI	Ventilator induced Lung Injury



► **Abb. 1** Funktionsprinzip der Elektrischen Impedanztomografie.

Luft in den Alveolen, sondern fließt entlang der Alveolarsepten. Durch die Ausdehnung der Alveolen während der Inspiration verlängert sich der Weg des Stromes und die Impedanz nimmt zu.

Da die Position der einspeisenden und messenden Elektroden sehr schnell rotierend wechselt, wird mit jeder Rotation ein Schnittbild erzeugt, welches in der räumlichen Orientierung eines CT-Bildes die regionale Lungenbelüftung darstellt. Früher wurden die Elektroden einfach auf die Haut aufgeklebt und vorher sogar noch einzeln mit der Schere zugeschnitten und angepasst; heute gibt es kommerzielle EIT-Gürtel in verschiedenen Größen, welche einen hohen Tragekomfort haben und in den letzten 5 Jahren eine signifikante Weiterentwicklung erfahren haben.

Eine wesentliche Weiterentwicklung der Technologie besteht darin, mithilfe von differenzierten Rekonstruktionsalgorithmen das Ausmaß der normal belüfteten Lungenareale, aber auch der Atelektasenbildung einerseits und der Lungenüberdehnung andererseits zu quantifizieren. Kardiale und pulmonale Perfusionsänderungen werden ebenfalls abgebildet, aber durch die Software wieder herausgefiltert.

Merke

EIT-Messungen ermöglichen funktionelle Querschnittsbilder der Lungenbelüftung, die auf der Messung von Oberflächenspannungen auf der Haut durch einen Elektrogürtel basieren.

Einsatz in der Neonatologie und Pädiatrie

Früh- und Neugeborene sind gegenüber beatmungsinduzierter Lungenschädigung sehr vulnerabel, besonders, wenn eine inhomogene Lungenpathologie zu einer inhomogenen Beatmungssituation führt. Hierzu sind speziell zu erwähnen:

- Neugeborene mit schwerem Atemnotsyndrom,
- Neugeborene mit Pneumonie,
- Neugeborene mit Mekoniumaspiration und
- Neugeborene mit Respiratory-Syncytial-Virus-Infektion.

Alle modernen Beatmungsgeräte ermöglichen zwar die genaue Messung der globalen Tidalvolumina, selbst während der Hochfrequenzbeatmung, und natürlich gibt die Thoraxröntgenaufnahme eine Übersicht über Zwerchfellposition und Atelektasenbildung; dennoch können regionale Überdehnungen und regionale Atelektasen über Tage bestehen bleiben und zum beatmungsinduzierten Lungenschaden beitragen (Ventilator induced Lung Injury, VILI). Dieser Lungenschaden ähnelt morphologisch stark dem acute Lung Injury (ALI) und hat einen wesentlichen Anteil an der Morbidität und Mortalität der betroffenen Patienten.

Merke

Ein großer Vorteil für die neonatologische Patientengruppe ist die Nichtinvasivität und die Strahlungsfreiheit der Technologie.

Informationen über die Lokalisation oder die Verbesserung der Belüftung von atelektatischen Lungenarealen im Krankheitsverlauf könnten sonst nur über wiederholte Thoraxröntgenaufnahmen oder CT-Bilder gewonnen werden. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass EIT-Geräte tragbar sind: Damit können die Informationen in Echtzeit am Patientenbett gewonnen werden. Insbesondere bei der Behandlung von Frühgeborenen, bei denen auch innerklinische Transporte möglichst vermieden werden sollen, ist dies von Vorteil. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung mit hohen Scan-Raten pro Sekunde ist die EIT auch während der in der Neonatologie angewendeten Hochfrequenzbeatmung nutzbar.

Signifikante Risiken der EIT-Anwendung für den Patienten bestehen nach derzeitigem Wissenstand nicht.

PRAXIS

Praktische Anwendung der elektrischen Impedanztomografie

- Die Strahlungsfreiheit macht EIT insbesondere für die pädiatrische und neonatologische Patienten interessant.
- 24-h-Messungen sind möglich.
- Das Thorax-EIT von vielen Firmen ist CE-zertifiziert.
- Den Gürtel bei beatmeten Patienten sicher zu platzieren erfordert oft zwei Personen.
- Der EIT-Gürtel kann lokale Druckstellen auf der Haut verursachen.

Individuelle Beatmungssteuerung

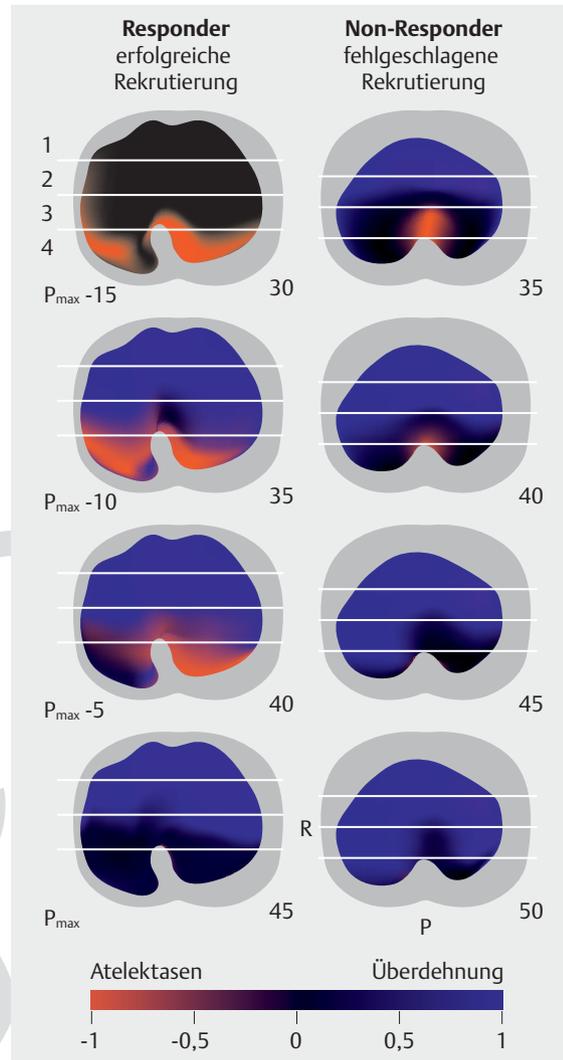
Die Evidenz von zwei Jahrzehnten randomisierter, multizentrischer Beatmungsforschung bei erwachsenen Patienten mit ARDS lässt sich – grob vereinfacht und bewusst etwas pointiert – wie folgt zusammenfassen:

TAKE HOME MESSAGE

Beatmungssteuerung

- 6 ml/kg Tidalvolumen sind lungenprotektiver als 12 ml/kg Tidalvolumen [1].
- Ein hoher Druckunterschied (Driving Pressure, PIP-PEEP) ist mit einem schlechteren Outcome assoziiert [2].
- Flüssigkeitsüberladung erhöht die Mortalität im ARDS [3].
- Variable Ergebnisse zeigten sich beispielsweise hinsichtlich PEEP, Bauchlage und Muskelrelaxierung:
 - Ein hoher PEEP verringert per se nicht die Mortalität, es sei denn in einer ausgewählten Population von besonders schwer kranken Patienten.
 - Bauchlage (Prone Positioning) verbessert das Outcome nur bei einer ausgewählten Population von Patienten mit ARDS.
 - Muskelrelaxanzien sind vermutlich nur bei schwer betroffenen Patienten innerhalb der ersten 24–48 h mit einer Verringerung der Mortalität assoziiert.

Diese Datenlage, verbunden mit der klinischen Beobachtung, dass Patienten mit ARDS sehr unterschiedlich auf eine Veränderung der Beatmungsstrategie ansprechen, gibt einen Hinweis darauf, dass eine individualisierte Beatmungsstrategie mit EIT zum „Benefit“ des Patienten sein könnte. Diese individualisierte Beatmungsstrategie könnte wie folgt aussehen:



► **Abb. 2** Rekrutierungsmanöver, linke Spalte Responder, rechte Spalte Non-Responder (rot = Atelektasen, blau = Überdehnung). Korrespondierender Plateaudruck (p_{plat}) in cmH_2O cmH_2O (Quelle: Wolf GK, Gomez-Laberge C, Kheir JN et al. Reversal of dependent lung collapse predicts response to lung recruitment in children with early acute lung injury. *Pediatr Crit Care Med* 2012; 13: 509–515. doi:10.1097/PCC.0b013e318245579c. https://journals.lww.com/pccjournal/Fulltext/2012/09000/Reversal_of_dependent_lung_collapse_predicts.3.aspx) [rerif]

- Nur Patienten mit einem hohen Anteil von Atelektasen bekommen ein Rekrutierungsmanöver und eine Beatmungsstrategie mit entsprechend hohem PEEP.
- Patienten, welche in Bauchlage eine deutliche Rekrutierung zeigen, bleiben in Bauchlage, ansonsten werden sie wieder in Rückenlage gedreht.
- Nur falls die Sedierung/Relaxierung zur Rekrutierung von Lungenarealen und zur Verringerung von Lungenüberdehnung beiträgt, wird diese beibehalten, ansonsten kann der Patient bei leichter Sedierung spontan mitatmen.

Rekrutierungsmanöver bei pädiatrischen Intensivpatienten – Responder und Non-Responder

Bei beatmeten Kindern mit schwerer ALI zeigte sich während eines Rekrutierungsmanövers, dass nicht alle Kinder auf das Rekrutierungsmanöver ansprechen (► **Abb. 2**) [4].

Das Rekrutierungsmanöver erfolgte schrittweise, indem alle 5 Minuten der PEEP um 5 cmH₂O gesteigert wurde, und zwar so lange, bis sich eine wesentliche Verbesserung des Gasaustausches ergab (kombinierter p_aO₂ + p_aCO₂ > 400 mmHg). Mittels EIT wurden die unterschiedlichen Lungenareale als atelektatisch, normal belüftet oder überdehnt eingeordnet. Während der Rekrutierung durch die schrittweise Anhebung von PEEP und Plateaudruck entstand zunächst immer eine signifikante Überdehnung von ventralen Lungenanteilen,

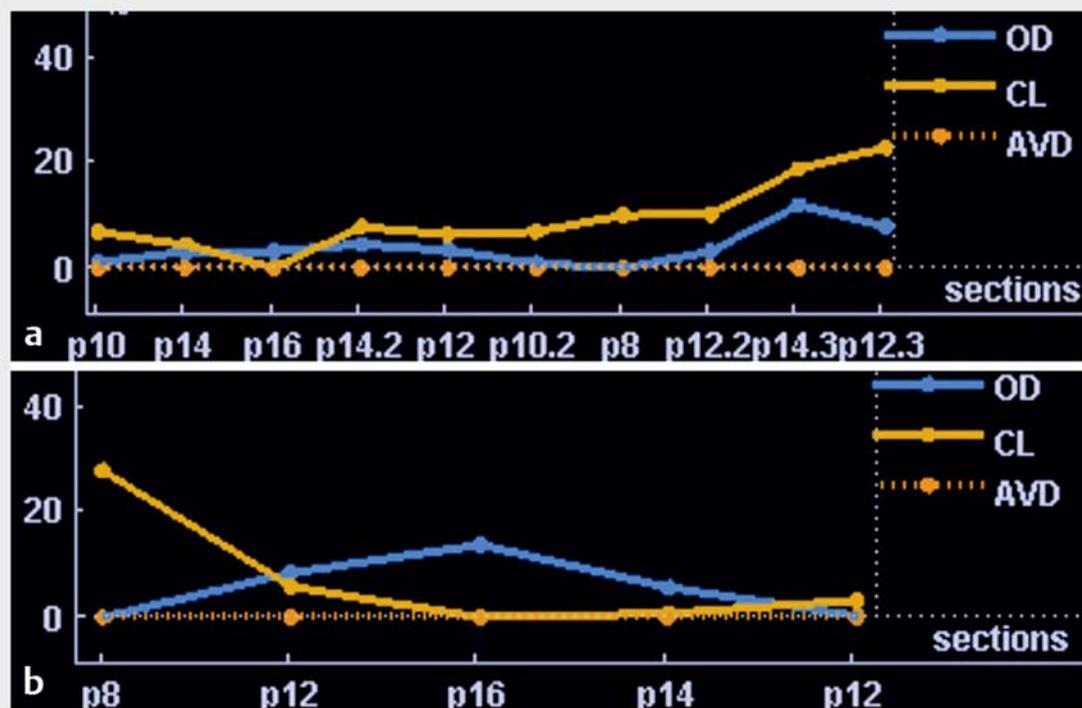
FALLBEISPIEL

Fall 1: Response versus Non-Response

Ein 3 Jahre und 10 Monate alter Patient mit schwerer neurologischer Grunderkrankung wird mit ARDS bei Verdacht auf Pneumonie auf die pädiatrische Intensivstation aufgenommen. Der Horowitz-Quotient beträgt 204 mmHg, der Patient wird druckkontrolliert beatmet mit einem PEEP von 10 mbar, einem Inspirationsdruck von 31 mbar, bei 40% F_iO₂. Bei einem Rekrutierungsversuch mittels EIT kann durch eine PEEP-Erhöhung von 10 über 14 auf 16 mbar keine wesentliche Rekrutierung von atelektatischen Lungenarealen festgestellt werden. Eine schrittweise Reduktion des PEEP-Level auf 8 mbar zeigt eine zunehmende Verschlechterung der Kollapswerte. Auch ein erneuter Rekrutierungsversuch zeigt eine

zunehmende Verschlechterung der regionalen Compliance (Überdehnung und Kollaps). Der Patient wird als Non-Responder (► **Abb. 3a**) eingestuft, es werden an diesem Tag keine weiteren Rekrutierungsversuche unternommen. Als Grund für den Non-Response wird die erhöhte Rigidität der Lunge bei bestehender pulmonaler Hämorrhagie vermutet.

Am nächsten Tag wird ein erneuter Rekrutierungsversuch unternommen. Hierbei zeigt sich eine deutliche Verringerung des kollabierten Lungengewebes um 28%. Die auftretende Überdehnung (maximal 11%) kann durch eine schrittweise PEEP-Reduktion auf 0,4% minimiert werden (► **Abb. 3b**).



► **Abb. 3** PEEP-Titration (OD = Overdistension, CL = Collapse, AVD = Area of Ventilation Delay) **a** Non-Response. **b** Response.

während die Atelektasen in dorsalen Lungenarealen zunächst unberührt blieben. Um alle dorsalen atelektatischen Lungengebiete vollständig zu rekrutieren, waren kurzzeitig hohe Plateaudrücke bis 50 cmH₂O notwendig, während ein Großteil der Lunge signifikant überbläht war.

Responder hatten vor dem Rekrutierungsmanöver insgesamt einen höheren Anteil an Atelektasen, die dann bei dem Manöver geöffnet wurden, wodurch sich ein verbesserter Gasaustausch ergab. Non-Responder wiederum hatten insgesamt weniger dorsale Atelektasen; bei Non-Respondern kam es damit weder zu einer signifikanten Öffnung von atelektatischen Lungenarealen noch zu einem verbesserten Gasaustausch, auch nicht bei Spitzendrücken von 50 cmH₂O. Mehr Atelektasen erhöhten die Wahrscheinlichkeit, auf die Lungenrekrutierung anzusprechen [4].

In Fallbeispiel 1 ist der Unterschied von Response und Non-Response auf ein Rekrutierungsmanöver eines Patienten mit ALI an zwei unterschiedlichen Tagen dargestellt. Der Fall zeigt, dass es nicht nur gilt, Responder von Non-Respondern zu unterscheiden, sondern dass der Nutzen eines Rekrutierungsmanövers auch von Tag zu Tag beim gleichen Patienten mit Lungenschädigung variieren kann.

Merke

Mittels EIT besteht die Möglichkeit, Response auf Rekrutierungsmanöver von Non-Response zu unterscheiden. So kann ein Patient, der aktuell nicht von einem Rekrutierungsmanöver profitieren würde, vor aggressiveren, potenziell lungenschädigenden Rekrutierungsstrategien bewahrt werden.

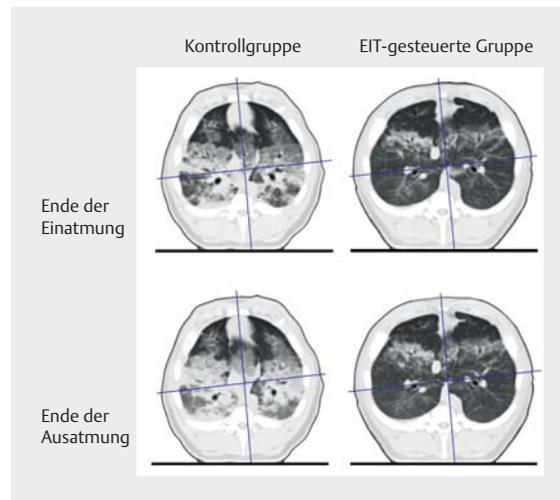
EIT-gesteuerte Beatmung

Merke

Ziel der EIT-gesteuerten Beatmung ist es, die Beatmungsparameter so einzustellen, dass eine minimale Lungenüberdehnung, eine maximale Lungenrekrutierung sowie ein minimales phasisches Öffnen und Schließen atelektatischer Lungenareale vorliegen.

Über Echtzeit-EIT-Messungen können PEEP und PIP jeweils so titriert werden, dass die Atelektasen geöffnet werden, um im Anschluss die Drücke soweit zu reduzieren, dass auch die parallel aufgetretene Lungenüberdehnung wieder minimiert wird, ohne dass neue Atelektasen auftreten.

In einem Tiermodell des pädiatrischen ARDS [5] zeigte sich, dass EIT-gesteuerte Beatmung im Vergleich zum „Standard of Care“ (ARDSnet-Beatmung) zu verbesserter Atemwegsmechanik (Compliance), verbessertem Gasaustausch und verminderter Atelektasenbildung



► **Abb. 4** Tiermodell ARDS, linke Spalte ARDSnet-Beatmung (Kontrollgruppe), rechte Spalte EIT-gesteuerte Beatmung. Atelektasen, besonders in den posterioren (dorsalen) Lungenbereichen im CT zu erkennen, sind durch die EIT-gesteuerte Beatmung deutlich verringert (Quelle: Wolf GK, Gomez-Laberge C, Rettig JS et al. Mechanical ventilation guided by electrical impedance tomography in experimental acute lung injury. *Critical Care Medicine* 2013; 41: 1296–1304. doi:10.1097/CCM.0b013e3182771516. https://journals.lww.com/ccmjournal/Fulltext/2013/05000/Mechanical_Ventilation_Guided_by_Electrical.16.aspx) [rerif]

im direkten Vergleich im CT-Bild (► **Abb. 4**), sowie zu histopathologisch reduziertem Lungenschaden führte.

Diese Tiermodellstudie konnte in einem translationalen Ansatz bei Kindern mit ALI wiederholt werden. In diesem „Bench to Bedside Approach“ wurden im Rahmen einer prospektiven Pilotstudie pädiatrische Intensivpatienten mit ALI mittels EIT-Steuerung beatmet.

Die Studie [6] stellt einen aus der vorangehenden Tierstudie modifizierten PEEP-Titrationsalgorithmus zur EIT-gesteuerten Beatmung vor. Bei acht pädiatrischen ARDS-Patienten wurde an jeweils drei aufeinanderfolgenden Tagen eine PEEP-Titration vorgenommen. Die Patienten wurden druckkontrolliert und lungenprotektiv nach ARDSnet-Kriterien beatmet. Um eine hohe Patientensicherheit zu gewährleisten erhielten Patienten minimal den niedrigsten möglichen PEEP-Wert nach der ARDSnet PEEP-Tabelle, und maximal den höchsten vorgegebenen Wert.

Schrittweise wurde der PEEP-Level zusammen mit dem Inspirationsdruck um 4 mbar angehoben. Mittels EIT wurde in Echtzeit nach jeder PEEP-Änderung die regionale Compliance pro Pixel analysiert. Hieraus lässt sich der prozentuale Anteil von überdehntem und kollabiertem Lungengewebe berechnen. Bei regionalem Compliance-Gewinn wurde der PEEP-Level erneut erhöht,

FALLBEISPIEL

Fall 2: PEEP-Titration bei ARDS

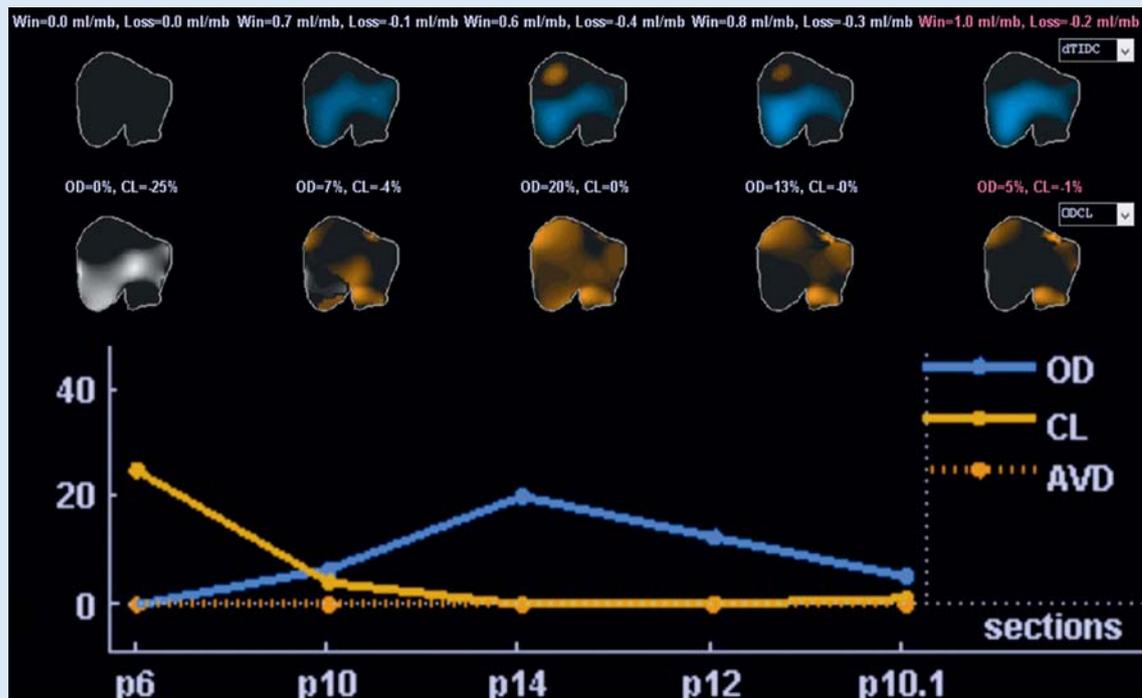
Eine 1 Jahr und 10 Monate alte Patientin mit schwerer neurologischer Grunderkrankung erkrankt akut an einer obstruktiven Bronchitis mit nachfolgendem ARDS. Nach Intubation beträgt der Horowitz-Quotient 165 mmHg, die Patientin wird druckkontrolliert beatmet mit einem PEEP von 6 mbar, einem inspiratorischen Druck von 27 mbar und 40% F_iO₂. Zur Findung des optimalen PEEP-Level und Rekrutierung von atelektatischen Lungenarealen erfolgt eine EIT-gesteuerte PEEP-Titration.

Nach einer Erhöhung des PEEP von 6 auf 10 mbar zeigt sich ein regionaler Compliance-Gewinn (blau markiert) in den dorsalen Lungenarealen (► Abb. 5, Reihe 1). Dies impliziert Rekrutment in den betreffenden Arealen. Bei einer weiteren PEEP-Erhöhung auf 14 mbar zeigt sich zudem ein Compliance-Verlust (orange-farben markiert) in den ventralen Lun-

genbereichen, hinweisend auf eine Überdehnung dieser Bereiche. Bei einer schrittweisen PEEP-Reduktion erweist sich der PEEP-Level von 10 mbar als optimal.

Der initial auftretende Kollaps (► Abb. 5, Reihe 2: CL, weiß markiert; ► Abb. 5: orange-farbene Linie) kann durch die Titration von 25% auf 1% reduziert werden. Währenddessen steigt die Überdehnung (► Abb. 5, Reihe 2: Overdistension=OD, orange-farben markiert; ► Abb. 5: blaue Linie) auf 20% bei maximalem PEEP-Level an. Mit der PEEP-Reduktion lässt sich die Überdehnung auf 5% reduzieren.

Nach erfolgreicher Titration steigen die globale Compliance sowie der Horowitz-Quotient, der Oxygenierungsindex sinkt, und der effektive Inspirationsdruck lässt sich reduzieren.



► Abb. 5 PEEP-Titration mittels EIT bei einem pädiatrischen ARDS-Patienten (OD = Overdistension, CL = Collapse, AVD = Area of Ventilation Delay).

bis ein Abbruchkriterium erreicht war, der höchste vorgegebene PEEP-Level erreicht war, oder keine weitere Rekrutierung bei ausschließlicher Überdehnung verzeichnet wurde. Im Anschluss wurde der PEEP-Level in 2 mbar-Schritten verringert, um die entstandene Überdehnung zu reduzieren.

Bei ersten Anzeichen des Kollapses von Lungengewebe wurde der aktuelle PEEP-Level beibehalten und die re-

gionale Compliance stündlich überprüft. Bei zunehmendem Kollaps wurde eine erneute Rekrutierung vorgenommen. Die mittels EIT als kollabiert quantifizierten Lungenareale ließen sich durch die Titration deutlich reduzieren (-9,9%), während die Überdehnung am Ende der Titration nicht signifikant anstieg. Im Mittel war der mittels EIT festgelegte PEEP-Level höher als der zuvor klinisch bestimmte PEEP. Durch die Titration ließen sich die Atemmechanik (erhöhte globale Com-

pliance und erniedrigter effektiver Inspirationsdruck) und der Gasaustausch (p_aO_2 und Horowitz-Quotient [p_aO_2/F_iO_2]) verbessern.

Dies zeigt einen möglichen Ansatz zur individuellen Beatmung in der Pädiatrie mittels EIT. Fallbeispiel 2 zeigt eine entsprechende PEEP-Titration.

Studienergebnisse zu weiteren Einsatzmöglichkeiten in der Neonatologie

Die aktuelle Datenlage zum Einsatz von EIT in der Neonatologie wurde von Frerichs et al. [7] 2017 in einer Übersichtsarbeit ausführlich dargestellt.

Observationsstudien

Bisher wurde die elektrische Impedanztomografie häufig im Rahmen von Studien angewendet. In den letzten Jahren erschienen auch vermehrt Publikationen zum Einsatz in der Neonatologie. Viele dieser Studien waren Observationsstudien, die es ermöglichten, verschiedene existierende Hypothesen zur Beatmung von Neugeborenen zu bestätigen oder neue Konzepte zu entwickeln. So konnte bei Frühgeborenen mit RDS beispielsweise das Phänomen der regionalen Lungenhysterese während Hochfrequenzbeatmung gezeigt werden [8].

Untersuchungen zur Ventilationsverteilung bei Frühgeborenen zeigten eine hohe Variabilität der Verteilung des Tidalvolumens in der Lunge. Dies änderte sich z. T. von Atemzug zu Atemzug und war abhängig vom Alter der Frühgeborenen [9]. Im aktuellen Bedside-Monitoring schien diese Variabilität unterschätzt zu werden.

Auswirkungen auf das endexpiratorische Lungenvolumen durch unterschiedlichste Maßnahmen wie Bauchlage [10], endotracheale Absaugung [11] oder Extubation [10] können mittels EIT sichtbar gemacht werden.

Auch die Wirkung von therapeutischen Maßnahmen, wie der Surfactant-Gabe bei Frühgeborenen mit RDS, konnte mittels EIT gezeigt werden. In einer Studie an 15 Frühgeborenen, die mittels Hochfrequenzbeatmung beatmet wurden, kam es nach Surfactant-Gabe zu einer raschen Erhöhung und nachfolgenden Stabilisierung des endexpiratorischen Lungenvolumens. Dieser Effekt war regional unterschiedlich stark und zeigte sich am stärksten in den abhängigen Lungenaerealen. Es kam zu einem Compliance-Anstieg bei niedrigeren Atemwegsdrücken [12].

Nicht nur unter invasiver Beatmung ließen sich Atemwegsdrücke mittels EIT optimieren. Eine Studie an 14 Frühgeborenen mit sehr geringem Geburtsgewicht bewies die Möglichkeit, den Drucklevel der nichtinvasiven Beatmung nach Extubation mittels EIT zu optimieren [13].

An 20 Frühgeborenen unter der 32. Schwangerschaftswoche mit mildem RDS am 1. Lebenstag konnten Bhatia et al. mittels EIT Rekrutierungseffekte bei nichtinvasiver Beatmung zeigen. Bei einer an- bzw. absteigenden Titration des CDP bei nasalem CPAP konnten atelektatische Lungenaereale rekrutiert werden. Die Rekrutierbarkeit zeigte sich von Kind zu Kind variabel, so gab es auch in dieser Studie Non-Responder. Die Ergebnisse legen nahe, dass auch bei nichtinvasiver Beatmung nicht alle Neugeborenen vom gleichen als optimal definierten CDP profitieren, sondern auch bei nichtinvasiver Beatmung eine individuelle Titration ratsam scheint. EIT kann bei der Findung des optimalen CDP helfen, auch hier mögliche Responder von Non-Respondern der Rekrutierung unterscheiden [14].

Erkennung von unerwünschten Ereignissen

Ein weiteres zukünftiges Einsatzfeld einer kontinuierlichen Impedanzmessung könnte das Erkennen von unerwünschten Ereignissen während der Beatmung von Neugeborenen sein. Einzelne Fallberichte beschreiben die frühzeitige Erkennung eines Pneumothorax (s. Fallbeispiel 3) [15]. Auch bei Frühgeborenen mit extrem geringem Geburtsgewicht war die Erkennung einer unilateralen Atelektase möglich [16]. Bei einem moderaten Frühgeborenen mit pränataler Thrombose der linken Pulmonalarterie und Infarzierung des linken Lungenflügels konnten die resultierenden Ventilations- und Perfusionsdefekte durch EIT dargestellt werden. Auch kleine Bereiche mit minimaler Ventilation konnten noch dargestellt werden. Dies könnte in Zukunft eine dynamische Beurteilung von Ventilations-Perfusions-Mismatching am Patientenbett ermöglichen [17].

Bei Kindern jenseits der Neugeborenenperiode konnte während einer geplanten Intubation gezeigt werden, dass mittels EIT eine Tubusfehlage bestimmt werden kann. Einseitige Ventilation bei Tubuslage in einem Hauptbronchus, sowie eine ösophageale Tubuslage wurden erkannt [18]. Die Möglichkeit, rezidivierend strahlungsfrei die korrekte Tubuslage zu kontrollieren, könnte gerade bei den Neugeborenen von großem Vorteil sein, bei denen wenige Zentimeter Verschiebung zu einer Extubation oder einer Fehllage führen können.

Eine Forschungsgruppe konnte in einem Fallbericht das Potenzial der Impedanztomografie zur Bronchospasmerkennung bei einem beatmeten 16 Monate alten Kind zeigen [19].

EIT-Parameter zur Beurteilung der Beatmungssituation

Aktuell werden von unterschiedlichen Forschungsgruppen und Geräteherstellern viele verschiedene EIT-Parameter zur Darstellung der Beatmungssituation eingesetzt. Im Idealfall sollte ein derartiger Parameter oder eine bildliche Darstellung in der Praxis auf einen

Blick anzeigen, ob die Lunge überdehnt, atelektatisch oder ideal belüftet ist.

Für die Darstellung der regionalen Compliance werden zusätzlich zur Impedanzänderung auch die vom Beatmungsgerät übertragenen Atemwegsdrücke benötigt:

„Win/Loss“

Der Index „win/loss“ zeigt beispielsweise farblich und numerisch die Areale an, welche sich seit der letzten Referenzmessung verändert haben. „Win“ sind Areale, welche an Compliance gewonnen haben, „Loss“ sind Areale, welche an Compliance verloren haben.

„Overdistension/Collapse“

Beim Index „overdistension/collapse“ (OD/CL) werden nach einigen PEEP-Veränderungen retrospektiv überdehnte und kollabierte Lungenareale angezeigt. Dies geschieht vereinfacht nach folgendem Prinzip: Für jedes Pixel im Bild wird die PEEP-Stufe mit der besten Compliance ermittelt. Areale, welche gut rekrutiert waren und bei höheren PEEP-Stufen dann eine geringere regionale Compliance aufweisen, sind überdehnt. Areale, welche bei niedrigeren PEEP-Stufen eine geringere regionale Compliance zeigen, sind kollabiert.

„Center of Ventilation“

Beim sogenannten „Center of Ventilation“ (CoV) wird entlang der ventrodorsalen Achse die waagerechte Linie ermittelt, bei der ebenso viele regionale Tidalvolumina ventral wie dorsal vorkommen. Ist die Lunge perfekt homogen belüftet, liegt diese Linie genau in der Mitte des EIT-Bildes. Ist die untere Hälfte der Lunge komplett atelektatisch, liegt die Linie in der Mitte der oberen Hälfte.

„Regional Ventilation Delay“

Beim „regional Ventilation Delay Index“ (RVD) werden in der Inspiration die Phasenverschiebungen beschrieben; so sollten sich atelektatische Lungenareale in der Inspiration später öffnen als bereits rekrutierte.

Sonstige Parameter

Weitere eingesetzte EIT-Parameter die z. B. die Inhomogenität der Ventilation beschreiben sind

- der „Global Inhomogeneity Index“ (GI) oder
- der „Coefficient of Variation“ (CV).

Verfügbare Geräte

Derzeit sind verschiedene EIT-Geräte auf dem Markt. Die Technologie der Impedanzmessung ist im Prinzip vergleichbar. Dennoch haben die Geräte unterschiedliche Rekonstruktionsalgorithmen und z. T. auch schon Softwarefunktionen, welche eine aktive Beatmungssteuerung, wie z. B. eine PEEP-Titration ermöglichen.



► **Abb. 6** EIT-Gürtel Größe S von Firma Dräger am Patienten.

Verfügbare EIT-Geräte sind

- Pulmovista 500 (Dräger Medical, Lübeck, Deutschland),
- Enlight (Dixtal, Sao Paulo, Brasilien),
- Goe MF-II (Carefusion, Hochberg, Germany) sowie
- Swisstom BB2 (Swisstom Landquart, Schweiz).

Limitationen bei der Anwendung in der Neonatologie waren bislang die verfügbaren EIT-Gürtel, welche zu groß und sperrig waren. Verschiedene Firmen haben mittlerweile auch EIT-Gürtel auf den Markt gebracht, welche einen Einsatz in der Neonatologie zulassen. In der CRADL-Studie kommt beispielsweise ein textiler Gürtel (Swisstom) zum Einsatz, in den 32 Elektroden eingearbeitet sind und welcher sich mittels Klettverschluss relativ einfach am Neugeborenen befestigen lässt. Die Firma Dräger bietet bislang Gürtel in den Größen von 36 cm bis 150 cm Thoraxumfang an (► **Abb. 6**). Das Unternehmen Dixtal stellt ebenfalls Gürtel für neonatale Patienten zur Verfügung.

Limitationen und Ausblick

Aktuelle Limitationen der elektrischen Impedanztomografie, speziell in der Pädiatrie und Neonatologie, sind nach wie vor fehlende kommerziell erhältliche neonatale EIT-Gürtel. Auch die Bildrekonstruktionsalgorithmen sollten speziell auf diese Patientenpopulation angepasst werden. Zudem werden derzeit diverse EIT-Parameter in Studien für die Beurteilung der Ventilation herangezogen.

Merke

Um die Technologie im praktischen klinischen Einsatz breiter zugänglich zu machen, werden für die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten standardisierte Interpretationsschemata benötigt.

FALLBEISPIEL

Fall 3: Pneumothorax beim Frühgeborenen

Aufgrund eines Atemnotsyndroms (RDS) wird ein weibliches Frühgeborenes der 34. Schwangerschaftswoche auf eine neonatologische Intensivstation aufgenommen. Die benötigte Atemunterstützung erfolgt nichtinvasiv, mittels continous positive Airway Pressure (CPAP). Im Alter von 18 Stunden wird das Mädchen in eine EIT-Observationsstudie eingeschlossen, und eine kontinuierliche EIT-Messung wird gestartet. Nach einer klinischen Verschlechterung im Tagesverlauf wird mittels Röntgenthorax die Diagnose eines linksseitigen Pneumothorax gestellt.

Bereits 3 Stunden vor Diagnosestellung und 1,5 Stunden vor der deutlichen klinischen Verschlechterung zeigen sich erste Veränderungen der EIT-Parameter. Die linksseitig erhöhte endexpiratorische

Lungenimpedanz zeigt den erhöhten Luftgehalt des linken Hemithorax, während die sich verschlechternde Ventilation zu linksseitig niedrigeren tidalen Impedanzänderungen führt. Vermutlich aufgrund des mediastinalen Shifts ist die end-expiratorische Lungenimpedanz auf der Gegenseite verringert.

Kommentar

Der Fall beleuchtet die Möglichkeit, bei Frühgeborenen mittels EIT Komplikationen wie einen Pneumothorax zu erkennen. Dies könnte bei kontinuierlichen Messungen und regelmäßigen Auswertungen der Daten zu einer schnelleren Diagnose führen und somit helfen, solche potenziell lebensbedrohlichen Komplikationen bereits vor erheblicher klinischer Verschlechterung zu behandeln [15].

Diese sollten in der klinischen Anwendung auch außerhalb von Forschungsgruppen einfach anwendbar sein. So werden z.B. Algorithmen für eine PEEP-Titration oder eine Beurteilung von Lageveränderungen mittels EIT benötigt. Diese müssen dann in größeren klinischen Studien validiert werden. Das Weiteren muss sich zeigen, ob diese Methoden einer individuelleren Beatmung das Patienten-Outcome verbessern können.

FAZIT

Die aktuelle Studienlage weist darauf hin, dass individuelle Beatmung lungenprotektiver sein könnte und dass gerade bei Erkrankungen mit inhomogener Belüftung wie dem (A)RDS durch regionale Bildgebung wichtige Informationen gewonnen werden können.

KERNAUSSAGEN

- Die elektrische Impedanztomografie (EIT) ermittelt durch die Einspeisung von Wechselströmen und die Messung der Oberflächspannungen auf der Haut mithilfe eines Elektodengürtels die Bioimpedanz und kann durch Rekonstruktionsalgorithmen ein funktionelles Querschnittsbild der Lunge erzeugen.
- Dadurch lassen sich nichtinvasiv, strahlungsfrei und in Echtzeit die Belüftungsveränderungen in der Lunge während der Beatmung darstellen.
- Atelektatische und überdehnte Bereiche können erkannt werden.
- Besonders Neu- und Frühgeborene könnten von dieser Technologie profitieren.
- Ziel einer EIT-gesteuerten Beatmung sollte eine kontinuierliche Anpassung der Beatmungsdrücke sein, die eine Rekrutierung von atelektatischen Lungenarealen erlaubt, ohne dauerhaft eine Überdehnung hervorzurufen.
- Mittels EIT können Responder auf verschiedene therapeutische Maßnahmen von Non-Respondern unterschieden werden und so die Beatmung individueller gestaltet werden.
- Derzeit werden noch Interpretationsstandards für die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten und die EIT-Parameter benötigt. Diese sollten in größeren Studien mit dem Endpunkt Patienten-Outcome validiert werden.

Schlüsselwörter

Elektrische Impedanztomografie, ARDS, ALI, lungenprotektive Beatmung

Interessenkonflikt

Erklärung zu finanziellen Interessen

Forschungsförderung erhalten: nein; Honorar/geldwerten Vorteil für Referententätigkeit erhalten: nein; Bezahlter Berater/interner Schulungsreferent/Gehaltsempfänger: nein; Patent/Geschäftsanteile/Aktien (Autor/Partner, Ehepartner, Kinder) an Firma (Nicht-Sponsor der Veranstaltung): nein; Patent/Geschäftsanteile/Aktien (Autor/Partner, Ehepartner, Kinder) an Firma (Sponsor der Veranstaltung): nein.

Erklärung zu nichtfinanziellen Interessen

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Autorinnen/Autoren



Isabel Rosemeier

Jahrgang 1990. 2010–2017 Studium der Humanmedizin an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 2017 Assistenzärztin in Weiterbildung in der Abteilung für Kinder- und Jugendmedizin am Klinikum Traunstein. Seit 2013 Promotion zum Thema EIT-gesteuerte Beatmung an der LMU München.



Gerhard K. Wolf

PD Dr. med. Jahrgang 1970. Studium LMU München, Fellowship für Pediatric Critical Care Medicine am Boston Children's Hospital 2003–2005, Oberarzt Division of Critical Care Medicine Boston 2006–2012, Assistant Professor der Harvard Medical School 2009–2012, Habilitation 2014 an der LMU München. Seit 2013 Chefarzt der Klinik für Kinder- und Jugendmedizin, Klinikum Traunstein. Schwerpunkte: Neonatologie und pädiatrische Intensivmedizin.

Korrespondenzadresse

PD Dr. med. Gerhard Wolf
Kinderklinik Traunstein
Akad. Lehrkrankenhaus der LMU München
Kliniken Südostbayern AG
Cuno-Niggel-Straße 3
83278 Traunstein
E-Mail: Gerhard.Wolf@kliniken-sob.de

Wissenschaftlich verantwortlich gemäß Zertifizierungsbestimmungen

Wissenschaftlich verantwortlich gemäß Zertifizierungsbestimmungen für diesen Beitrag ist PD Dr. med. Gerhard Wolf, Traunstein.

Literatur

- [1] The Acute Respiratory Distress Syndrome Network. Brower RG, Matthay MA et al. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2000; 342: 1301–1308
- [2] Amato MB, Meade MO, Slutsky AS et al. Driving pressure and survival in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2015; 372: 747–755
- [3] National Heart L, Blood Institute, The Acute Respiratory Distress Syndrome Clinical Trials Network. Wiedemann HP et al. Comparison of two fluid-management strategies in acute lung injury. *N Engl J Med* 2006; 354: 2564–2575
- [4] Wolf GK, Gomez-Laberge C, Kheir JN et al. Reversal of dependent lung collapse predicts response to lung recruitment in children with early acute lung injury. *Pediatr Crit Care Med* 2012; 13: 509–515
- [5] Wolf GK, Gomez-Laberge C, Rettig JS et al. Mechanical ventilation guided by electrical impedance tomography in experimental acute lung injury. *Crit Care Med* 2013; 41: 1296–1304
- [6] Rosemeier I, Reiter K, Obermeier V et al. Mechanical ventilation guided by electrical impedance tomography in children with acute lung injury. *Crit Care Explor* 2019; 1: e0020
- [7] Frerichs I, Amato MB, van Kaam AH et al. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDy group. *Thorax* 2017; 72: 83–93
- [8] Miedema M, de Jongh FH, Frerichs I et al. Changes in lung volume and ventilation during lung recruitment in high-frequency ventilated preterm infants with respiratory distress syndrome. *J Pediatr* 2011; 159: 199–205 e192
- [9] Armstrong RK, Carlisle HR, Davis PG et al. Distribution of tidal ventilation during volume-targeted ventilation is variable and influenced by age in the preterm lung. *Intensive Care Med* 2011; 37: 839–846
- [10] van der Burg PS, Miedema M, de Jongh FH et al. Changes in lung volume and ventilation following transition from invasive to noninvasive respiratory support and prone positioning in preterm infants. *Pediatr Res* 2015; 77: 484–488
- [11] Hough JL, Shearman AD, Liley H et al. Lung recruitment and endotracheal suction in ventilated preterm infants measured with electrical impedance tomography. *J Paediatr Child Health* 2014; 50: 884–889
- [12] Miedema M, de Jongh FH, Frerichs I et al. Changes in lung volume and ventilation during surfactant treatment in ventilated preterm infants. *Am J Respir Crit Care Med* 2011; 184: 100–105
- [13] Rossi FdeS, Yagui AC, Haddad LB et al. Electrical impedance tomography to evaluate air distribution prior to extubation in very-low-birth-weight infants: a feasibility study. *Clinics (Sao Paulo)* 2013; 68: 345–350
- [14] Bhatia R, Davis PG, Tingay DG. Regional volume characteristics of the preterm infant receiving first intention continuous positive airway pressure. *J Pediatr* 2017; 187: 80–88 e82
- [15] Rahtu M, Frerichs I, Waldmann AD et al. Early recognition of pneumothorax in neonatal RDS with electrical impedance tomography. *Am J Respir Crit Care Med* 2019; doi:10.1164/rccm.201810-1999IM

- [16] van der Burg PS, Miedema M, de Jongh FH et al. Unilateral atelectasis in a preterm infant monitored with electrical impedance tomography: a case report. *Eur J Pediatr* 2014; 173: 1715–1717
- [17] Tingay DG, Waldmann AD, Frerichs I et al. Electrical impedance tomography can identify ventilation and perfusion defects: a neonatal case. *Am J Respir Crit Care Med* 2019; 199: 384–386
- [18] Steinmann D, Engehausen M, Stiller B et al. Electrical impedance tomography for verification of correct endotracheal tube placement in paediatric patients: a feasibility study. *Acta Anaesthesiol Scand* 2013; 57: 881–887

- [19] de la Oliva P, Waldmann AD, Bohm SH et al. Bedside breathwise visualization of bronchospasm by electrical impedance tomography could improve perioperative patient safety: a case report. *A&A Case Rep* 2017; 8: 316–319

Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/a-0747-9421>
Neonatalogie Scan 2020; 09: 65–77
© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 2194-5462



Punkte sammeln auf CME.thieme.de



Diese Fortbildungseinheit ist in der Regel 12 Monate online für die Teilnahme verfügbar.

Den genauen Einsendeschluss finden Sie unter <https://cme.thieme.de>.

Sollten Sie Fragen zur Online-Teilnahme haben, finden Sie unter <https://cme.thieme.de/hilfe>

eine ausführliche Anleitung. Wir wünschen viel Erfolg beim Beantworten

der Fragen!

Unter <https://eref.thieme.de/CXBVC53> oder über den QR-Code kommen Sie direkt zur Startseite des Wissenstests.

VNR 2760512020158722070



Frage 1

Auf welchem Prinzip beruht die elektrische Thorax-Impedanztomografie zur Anwendung bei beatmeten Neugeborenen?

- A Bioimpedanzmessungen der Haut
- B Änderungen der Hounsfield-Einheiten im Thorax
- C Bioimpedanzmessungen der Lunge
- D Röntgenimpedanzmessungen des Thorax
- E Widerstandmessungen im Beatmungskreislauf

Frage 2

Wie viele Elektroden werden bei der elektrischen Impedanztomografie in der Regel um den Brustkorb angebracht?

- A 3
- B 6
- C 12–14
- D 16–32
- E 64

Frage 3

Welches der folgenden Thoraxphänomene lässt sich *nicht* mittels elektrischer Impedanztomografie (EIT) abbilden?

- A Atelektasen
- B Überdehnung
- C kardiale und pulmonale Perfusionsänderungen
- D normal belüftete Lungenareale
- E Knochenfrakturen

Frage 4

Eine der folgenden Aussagen zur evidenzbasierten Beatmungsforschung ist *falsch*. Welche?

- A 6 ml/kgKG Tidalvolumina sind lungenprotektiver als 12 ml/kgKG Tidalvolumina.
- B Hoher PEEP ist in jedem Fall lungenprotektiv gegenüber niedrigem PEEP.
- C Liberales Flüssigkeitsregime verschlechtert das Outcome.
- D Prone Positioning ist nur in ausgewählten Patienten lungenprotektiv.
- E Hohe Δp (hohe Differenzdrücke = Driving Pressures) verschlechtern das Outcome im ARDS (= acute respiratory Distress Syndrome).

Frage 5

Wodurch ist die Technologie der elektrischen Impedanztomografie (EIT) gekennzeichnet?

- A Bildrekonstruktionsalgorithmen sind unabhängig vom Alter bzw. der Größe der Patienten universell gültig.
- B Die auf dem Markt verfügbaren Geräte arbeiten mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien.
- C Die EIT-Beatmung hat durch die Methoden einer individuellen Beatmung das Patienten-Outcome signifikant verbessern können.
- D Aufgrund der Strahlungsfreiheit bietet die EIT-Technologie gerade für die pädiatrische und neonatologische Patienten große Vorteile.
- E Die Geräte wurden ursprünglich für neonatologische Patienten entwickelt, so dass erst nach und nach eine Größenanpassung für pädiatrische und erwachsene Patienten erfolgte.

Frage 6

Welche Aussage über Studien zu EIT-gesteuerter Beatmung bei Kindern ist falsch?

- A EIT-gesteuerte Beatmung ist prospektiv anwendbar.
- B Sie verbessert den Gasaustausch.
- C Sie verbessert die Lungenmechanik.
- D Sie führt zur Rekrutierung von Atelektasen.
- E Sie führt zu anhaltender Lungenüberdehnung aufgrund hohen PEEP.

Frage 7

Welche Aussage ist falsch? EIT-Parameter zur Beatmungssteuerung sind ...

- A Overdistension and Collapse (OD/CL)
- B "Win/Loss"
- C Center of Ventilation (Cov)
- D regional Ventilation Delay (RVD)
- E overall Ventilation Collapse

Frage 8

Welche Aussage über Studien zu regionalen Lungenveränderungen in der EIT bei der schrittweisen Rekrutierung der Lunge von beatmeten Kindern mit ARDS ist falsch?

- A Recruitment ging immer mit vorübergehender Lungenüberdehnung einher.
- B Es gab Responder und Non-Responder.
- C Spitzendrücke von bis zu 50 cmH₂O waren notwendig.
- D Ventrale Lungenabschnitte (im Querschnitt bei Patienten in Rückenlage) öffneten sich vor dorsalen Lungenabschnitten.
- E Hoher PEEP führte bei allen Patienten zur vollständigen Rekrutierung.

Frage 9

Welche Aussage über regionale Lungen-Compliance bei Kindern ist falsch?

- A Regionale Lungen-Compliance verhält sich wie die globale Lungen-Compliance.
- B Atelektasen finden sich in Rückenlage oft in dorsalen Lungenbereichen.
- C Lungenüberdehnung findet sich in Rückenlage oft in ventralen Lungenbereichen.
- D Thoraxröntgenaufnahmen vermitteln oft einen ungenauen Eindruck von Atelektasen.
- E Lungenüberdehnung und Atelektasen können bei inhomogener Lungenschädigung nebeneinander vorkommen.

Frage 10

Welche Aussage über das Thorax-EIT ist falsch?

- A Das Thorax-EIT kann zu lokalen Verbrennungen der Haut führen.
- B Der EIT-Gürtel kann lokale Druckstellen auf der Haut verursachen.
- C Bei beatmeten Patienten sind oft zwei Personen notwendig, um den Gürtel sicher zu platzieren.
- D Messungen über 24 Stunden sind möglich.
- E Das Thorax-EIT von vielen Firmen ist CE-zertifiziert.