

Chronisches Systemversagen: Warum ein Pfleger mehr als 100 Patienten ermorden konnte

Wolfgang Pabst

Ein umfassendes Systemversagen hat die Mordserien in den Kliniken Oldenburg und Delmenhorst ermöglicht. Zwischen 2000 und 2005 tötete der Krankenpfleger Niels Högel mehr als 100 – vielleicht auch mehr als 200 – Patienten, suchte immer wieder wie ein Süchtiger den Kick der Allmacht über Leben und Tod. Seine KollegInnen und Vorgesetzten schöpften immer wieder konkreten Verdacht, nannten ihn „Todeshögel“, griffen jedoch erst nach viereinhalb Mord-Jahren ein. Die Staatsanwaltschaft reagierte noch zögerlicher; der zuständige Vorsitzende Richter Sebastian Bührmann errechnete eine Ermittlungsverzögerung von mehr als sechs Jahren. Die juristische Aufarbeitung ist erst jetzt im Gang. Bald nach seinem Krankenpflegeexamen wurde Högel 1999 im Klinikum Oldenburg in der Herzchirurgie eingestellt. Er arbeitete überdurchschnittlich engagiert, übernahm zusätzliche Dienste und zeigte ein beeindruckendes medizinisches Wissen. Sein Kollege Frank Lauxtermann erinnert sich: „Niels stand bald oben in der Hierar-

chie.“ „Die Mehrheit auf der Station fand ihn wegen seiner coolen Art, seiner großen Klappe und wegen seiner Fähigkeit zu reanimieren klasse. Damals, da war er schlank und rank und hatte Schnitt bei den Frauen. Also lief alles für ihn gut.“ Lauxtermann sah sich selbst in einer Minderheit, die „sich intensiv um Pflege kümmert; das war Niels völlig egal ... der hätte nicht erkannt, wenn ein Patient Tränen in den Augen hat. Da hab ich gedacht: Der ist ganz schön hart drauf. Er war immer so in der ersten Linie mit am feiern. Wenn die Herzchirurgie feiern ging, dann war immer richtig was los, und das konnte er auch ...“ Lauxtermann stellte sich erste kritische Fragen, als ein Patient, von Högel betreut, mit einem plötzlich massiv erhöhten Kaliumspiegel unerwartet starb. Vergleichbare Ereignisse beobachteten auch KollegInnen immer öfter. Lauxtermann: „Da musste man schon unter Narkose gestanden haben, wenn man das nicht mitbekommen hat. Schließlich konnte man garnicht mehr wegucken. Wenn drei Menschen in einer Nacht

Niels Högel vor Gericht



sterben, kann man nicht einfach zur Tagesordnung übergehen. Aber die oben haben nicht die richtigen Schlüsse gezogen. Oder wollten nicht. Oder wenn sie die richtigen Schlüsse gezogen haben, dann haben die Ärzte und der damalige Verwaltungsleiter gesagt: nein, also Anzeige machen wir auf gar keinen Fall, weil natürlich ist so eine Negativ-Presse für ein Krankenhaus schlecht.“ Auf Station 211 wurde eine Strichliste geführt, die belegte, dass zu Dienstzeiten von Högel regelhaft überdurchschnittlich viele Reanimationen nötig wurden und überdurchschnittlich viele Patienten starben. Der Verbrauch des Antiarrhythmikums Gilurytmal war exorbitant gestiegen. Stationsleiter Bernd N. schaltete die „Führungsspitze des Hauses“ ein und wurde von ihr beschieden: Die Beweislage reiche nicht aus, um die Staatsanwaltschaft zu informieren. „Die Gefährdung der Abteilung, ja des gesamten Klinikums ist nicht zu akzeptieren aufgrund von Verdachtsmomenten und vielen Zufällen.“

Pflegende diskutierten in vertraulichen Gesprächen, ob sie anonym die Staatsanwaltschaft einschalten müssten. Doch letztlich fehlte die Courage – und unterblieben weitere Schritte.

Auf eigene Untersuchungen der fraglichen Todesfälle oder ein gezielt kritisches Personalgespräch mit dem Pfleger verzichtete die Klinikleitung und verschob das Problem in eine andere Abteilung. Insider sprechen von einer „Kultur des Wegschauens und Verschweigens“. In der Anästhesie wurde Högel bald wieder in gleicher Weise auffällig. Auch hier konfrontierte der Chefarzt den Pfleger nicht mit dem Verdacht, sondern beschränkte sich 2002 auf eine ausweichende Offerte: Högel könne in den Hol- und Bringdienst der Klinik wechseln oder das Haus mit Abfindung und vorzüglichem Zeugnis verlassen. Von letzterer Möglichkeit machte er bereitwillig Gebrauch.

Das außergewöhnlich gute Zeugnis öffnete Högel die Türen im Klinikum der Nachbarstadt Delmenhorst. Trotz diverser Verbindungen zwischen beiden Krankenhäusern fand keine kollegiale wirksame Warnung statt. Polizeichef Johann Kühme steht mit seiner Meinung nicht allein: „Die Morde in Delmenhorst hätten verhindert werden können.“ Doch Högel konnte sein Mordwerk ungehemmt fortsetzen. Später wird er behaupten: Er habe Gilurytmal injiziert, um im An-



Die Altenpflegerin Kathrin Lohmann (Foto) war überzeugt, dass Niels Högel ihre Mutter im Klinikum Delmenhorst ermordet hatte. Als die Staatsanwaltschaft über Jahre die Ermittlungen zunächst unterließ und dann verschleppte, intervenierte Kathrin Lohmann immer wieder – schließlich mit Erfolg. Zwölf Jahre nach dem Verbrechen wurden die Leichen betroffener Patienten exhumiert, und der Verdacht ließ sich bestätigen. Die Stadt Delmenhorst zeichnete Kathrin Lohmann mit dem Preis für Zivilcourage aus.

schluss mit einer meisterhaften Reanimation die Bewunderung von KollegInnen auszulösen. Ermittler der Sonderkommission „Kardio“ halten dies für ein gelegentliches Motiv, „doch im Vordergrund stand der Kick, Menschen zu quälen und zu töten“.

Am 22. Juni 2005 war Niels Högel zur Nachtschicht in der Intensivstation eingeteilt. In Zimmer 6 liegt der ehemalige Justizvollzugsbeamte Dieter M. nach der Operation eines Lungenkarzinoms. Högel injiziert ihm 40 Milliliter Gilurytmal (Wirkstoff Ajmalin) in die Vene. Die Überdosis kann einen Blutdruckabfall und lebensbedrohliche Herzrhythmusstörungen verursachen. Neben dem Krankenbett steht eine Infusionspumpe; der Patient erhält darüber stündlich sieben Milliliter Arterenol. Högel dreht die Pumpe auf null. Als der Überwachungsmonitor Alarm auslöst, schaltet Högel den Ton ab. Herzkammerflattern tritt ein, der Blutdruck sackt ab.

Eine Krankenschwester kommt zufällig in den Raum. Högel sagt ihr: „Dein Patient hat keinen Druck mehr.“ Die Schwester ruft einen Kollegen zur Hilfe, gemeinsam können sie den Patienten wieder stabilisieren – vorläufig. Die Schwester und ihr Kollege sind misstrauisch. Letzterer kennt Högel noch aus dem Klinikum Oldenburg. In der Klinikapotheke fehlen fünf Ampullen Gilurytmal, im Abfalleimer der ITS liegen vier leere Ampullen des Medikaments. Die Schwester nimmt eine Blutprobe des Patienten. 29 Stunden nach dem Zwischenfall stirbt er.

Die Beweiskette ist geschlossen und unübersichtlich. Doch die Verantwortlichen sind über das weitere Vorgehen noch immer nicht schlüssig und greifen noch nicht ein. Zwei Tage später, am 24. Juni, injiziert Högel einer Patientin das Antiarrhythmikum Sotalol (Wirkstoff Sotalol) – mit tödlicher Folge.

Die Staatsanwaltschaft wird eingeschaltet und setzt das Systemversagen konsequent fort: Das nachgewiesene Verbrechen vom 22. Juni 2005 wird schlicht als isolierte Einzeltat – und keineswegs als Mord – gewertet. Das Landgericht Oldenburg verurteilt Högel 2006 zu fünf Jahren Haft und fünf Jahren Berufsverbot wegen versuchten Totschlags. Doch Högel wünscht einen Freispruch, bleibt zunächst auf freiem Fuß und arbeitet teils in einem Altenheim, teils im Rettungsdienst. Im Juni 2008 wird er nach einem Revisionsverfahren rechtskräftig zu siebeneinhalb Jahren Haft und lebenslangem Berufsverbot verurteilt. Erst im Mai 2009 tritt er seine Strafe an. In den vorausgegangenen vier Jahren hatte er als Altenpfleger oder Rettungssanitäter genügend Gelegenheiten ... Verdachtsmomente werden diskutiert, jedoch nicht belegt.

Kriminalbeamte sichten 2005 und 2006 Unterlagen im Klinikum Delmenhorst aus der „Arbeitszeit“ von Högel und erhalten aus der Pflege sachdienliche Hinweise – mit dem Ergebnis:

- Die Sterberate der ITS hat sich verdoppelt.
- Der Verbrauch von Gilurytmal ist auf das Siebenfache angestiegen.
- 411 Patienten starben – davon 321 während oder unmittelbar nach einer Högel-Schicht.

Die Kriminalisten sehen in den Daten mehr als nur einen Anfangsverdacht und legen die Dokumentation im Juli 2006 der Staatsanwaltschaft vor. Die zuständigen Herren lassen die Akte vorsätzlich oder fahrlässig auf sich beruhen: ganze zwei Jahre. Insider sprechen von „Ermittlungsblockade“ und „Strafvereitelung im Amt“. Erst 2008 leitet die Staatsanwaltschaft ein Ermittlungsverfahren ein – ausschließlich zum Komplex Delmenhorst – halbherzig und und mit diversen Unterbrechungen. Die Tochter eines Högel-Opfers „nötigt“ die Behörden immer wieder zu weiteren Schritten. Das Ergebnis ist zwar spektakulär, jedoch gemessen am Gesamtproblem mager: Am 28. Februar 2015 verur-

teilt das Landgericht Oldenburg Niels Högel zu lebenslanger Haft wegen zweifachen Mordes, zweifachen Mordversuchs und einer gefährlichen Körperverletzung.

Erst danach führt ein personeller Wechsel in der Staatsanwaltschaft zu weiteren, intensiven Ermittlungen gegen Högel und Verantwortliche der Kliniken Delmenhorst und Oldenburg. Vorläufiges Ergebnis, 2018: Anklage wegen Mordes an 62 Patienten im Klinikum Delmenhorst und 35 Patienten im Klinikum Oldenburg. Die 97 „Fälle“ werden im ersten Halbjahr 2019 vor dem Landgericht Oldenburg verhandelt; Niels Högel ist in einem großen Teil der Fälle geständig. Warum legt er nicht alle Karten auf den Tisch?

Christian Marbach, Sprecher der Opfer-Angehörigen, diskutiert dazu eine Hypothese: „Högel ist natürlich auch in diesem Prozess weiterhin jemand, der manipuliert und spielt. Bei den Taten, die er zugibt, hat er unheimlich viel Detailwissen und geht damit auch offen um. Neu ist in diesem Prozess, dass er bestimmte Taten von sich gewiesen und abgelehnt hat. Da halte ich ihn für glaubwürdig. Das passt ein bisschen zu den Erfahrungen des vorangegangenen Prozesses, dass die Einzeltäter-Hypothese nicht zwingend sein muss.“

Die Ermittlungsbehörden haben weitere Täter ausgeschlossen. Marbach: „Bereits 2014 gab es mehrere Hinweise von Personen aus dem medizinischen Umfeld, die mir gesagt haben, es könne auch sein, dass sich mehrere Leute ein makabres Rennen geliefert haben. Im Klinikum Delmenhorst sind in der Högel-Zeit insgesamt 210 Patienten mehr gestorben als üblich – jedoch nur 62 werden Högel selbst zugeordnet. Die Frage ist ja nicht nur: Was kann man Högel nachweisen? Sondern: Was ist mit all diesen Menschen passiert? Wie sind sie gestorben – und durch wen? Zeugen haben ausgesagt, dass dort regelmäßig Medikamente illegal auch von anderen Pflegern gespritzt wurden. Das ist schwere Körperverletzung, im schlimmsten Fall mit Todesfolge. Von da aus bis zum Mord ist nur ein kleiner Schritt ...“

Vieles, wohl der größte Teil der Verbrechen wird unaufgeklärt bleiben. Das System, in dem wir leben und arbeiten, hat eine hochgefährliche Abwehrschwäche bewiesen.

Wolfgang Pabst

wp@pabst-publishers.com

Aktuelle Aspekte von Diagnostik und Therapie des akuten Lungenversagens (ARDS)

Christoph Geier, Gunther Hempel, Philipp Simon, Hermann Wrigge

Zusammenfassung

Das akute Lungenversagen stellt ein lebensbedrohliches Krankheitsbild dar, erfordert eine schnelle Diagnostik und eine individuell adaptierte Therapie. Trotz klarer Definition unterliegt das ARDS (Acute Respiratory Distress Syndrome) immer noch einer zu hohen Rate an Unterdiagnostizierung. Neben den etablierten radiologischen Diagnosetechniken existieren mittlerweile auch bettseitig durchführbare, nicht invasive Techniken, die einen hohen Informationsgewinn bieten, wie beispielsweise die Elektroimpedanztomographie. Das Leitsymptom Hyperkapnie weist auf ein primäres Ventilationsversagen hin, weshalb Patienten von einem die Atemmuskulatur unterstützenden, nicht invasiven Ventilationsverfahren profitieren. Bei primärem Vorliegen einer Oxygenierungsstörung mit dem Leitsymptom Hypoxie ist die Rate des Therapieversagens einer nicht invasiven Ventilation hoch, weshalb eine invasive Ventilation nicht unnötig verzögert werden sollte, insbesondere wenn ein schweres ARDS vorliegt. Eine invasive Ventilation sollte immer individualisiert unter Anwendung lungenprotektiver Beatmungstechniken durchgeführt werden. Eine zielgerichtete Lagerungstherapie und Mobilisierung ist ebenso essentiell, wie eine Score-gestützte Analgosedierung und differenzierte Volumentherapie. Hilfestellungen finden sich mittlerweile in Form von aktuellen, praxisorientierten Leitlinien.

Einleitung

Das ARDS stellt ein intensivmedizinisches Krankheitsbild mit großer Bedeutung in der klinischen Versorgung dar. Große Fortschritte bei der Erforschung der dieser Krankheit zu Grunde liegenden Pathophysiologie und seiner Therapie stehen immer noch großen

Defiziten bei Diagnostik und adäquater Therapie in der täglichen klinischen Praxis gegenüber. Der folgende Beitrag fasst aktuelle Aspekte der Diagnostik und Therapie des akuten Lungenversagens zusammen.

Diagnostik

Zur Vermeidung gefährlicher Therapieverzögerungen ist eine frühzeitige Diagnose des respiratorischen Versagens von hoher Bedeutung. Trotz der mittlerweile hohen Bekanntheit dieses Krankheitsbildes zeigen aktuelle Daten aus einer weltweiten, prospektiven Observationsstudie, dass ca. 10% der auf die

Jeder zweite ARDS-Patient wird zunächst nicht zutreffend diagnostiziert. In Diagnostik und Therapie bestehen große Defizite.

an der Studie teilnehmenden Intensivstationen aufgenommenen Patienten und 23% aller beatmeten Intensivpatienten im Verlauf ein ARDS entwickelten, wobei eine Unterdiagnostizierung von 50% angenommen werden kann (1). Zur Diagnose eines ARDS müssen entsprechend der aktuellen Berlin-Definition folgende Kriterien erfüllt sein (2):

- Akute Verschlechterung innerhalb von ≤ 7 Tagen
- Bilaterale pulmonale Infiltrate, die nicht vollständig durch Ergüsse oder einen Lungenkollaps zu erklären sind
- Ausschluss einer reinen Flüssigkeitsüberladung, bzw. eines kardial bedingten Lungenödems
- $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2 < 300\text{mmHg}$ bei einer Beatmung mit $\text{PEEP/CPAP} \geq 5\text{ cmH}_2\text{O}$

Anamnese und körperliche Untersuchung

Orientierend an den Kriterien der Berlin-Definition ist der zeitliche Verlauf der respiratorischen Verschlechterung zu eruieren. Etwaige pulmonale Vorerkrankungen sind ebenso zu erfragen wie die Exposition gegenüber externen Noxen. Bei einer körperlichen Untersuchung sollte nach klinischen Hinweisen auf die Ätiologie der respiratorischen Insuffizienz gesucht werden, wobei differenzialdiagnostisch immer eine kardiale Genese beurteilt werden sollte. Thoraxinstabilitäten bzw. –Deformitäten stellen ebenso wie ein erhöhter intraabdomineller Druck potentielle mechanische Ursachen für eine eingeschränkte pulmonale Funktion und hier im Speziellen eine eingeschränkte Thoraxwandcompliance dar.

Labordiagnostik

Die arterielle Blutgasanalyse stellt den Grundbaustein der Labordiagnostik bei einer akuten respiratorischen Insuffizienz dar. Mit Hilfe des Horowitz-Quotienten ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ Ratio) lässt sich das respiratorische Versagen quantifizieren und, bei Erfüllung der weiteren erforderlichen Diagnosekriterien, der Schweregrad des ARDS gemäß der Berlin-Definition erheben. Darüber hinaus lässt sich

Bezüglich einer Therapiekontrolle von bakteriellen Infektionen gibt die Bestimmung des Procalcitonins (PCT) eine spezifischere Aussage und hilft, die Notwendigkeit einer Einleitung oder Beendigung einer antibiotischen Therapie zu begründen (3). Perspektivisch stellt die Bestimmung von extrazellulären Histonen einen vielversprechenden Ansatz als weiterer Marker zur Beurteilung der Inflammation im Rahmen eines ARDS dar (4). Klinische Studien haben zudem Biomarker identifiziert, die bei einem ARDS eine hohe Korrelation mit der Mortalität zeigen. Hierzu zählen neben IL-8 und dem Neutrophil Chemotactic Factor das Surfactant Protein D, welches von Typ-II Alveolarzellen produziert wird. Vor allem die kombinierte Bestimmung dieser Marker wies eine hohe Aussagekraft auf (5,6).

Mikrobiologische Untersuchungen

Mindestens zwei Paare Blutkulturen sollten idealerweise noch vor Einleitung einer antibiotischen Therapie abgenommen werden, ebenso wird die Gewinnung von Tracheal- bzw. Bronchialsekret empfohlen (7). Die Diagnostik der stationär behandelten ambulanten Pneumonie wird durch eine Suche nach atypischen Erregern komplettiert, was konkret mit einem serologischen Test auf Chlamydien und Mykoplasmen sowie einem Antigen-Test auf Legionellen und Pneumokokken im Urin geschieht.

Technische Diagnostik

Eine adäquate körperliche Untersuchung stellt die Grundlage der Diagnostik eines ARDS dar. Zusätzlich steht mittlerweile eine Vielzahl an technischen Untersuchungsmöglichkeiten zur Verfügung, die wertvolle Hinweise bei der Differenzialdiagnostik geben können.

Sonographie

Die Vorteile der Sonographie bestehen in einer schnellen Verfügbarkeit und Durchführbarkeit, geringer Invasivität und vor allem der fehlenden Exposition gegenüber potentiell schädlicher Röntgenstrahlung. Mit Hilfe einer (orientierenden) transthorakalen Echokardiographie lässt sich in Zusammenschau mit anderen Befunden eine kardiale Genese bei respiratorischer Insuffizienz schnell beurteilen.

Bei einer körperlichen Untersuchung sollte nach klinischen Hinweisen auf die Ätiologie der respiratorischen Insuffizienz gesucht werden, wobei differenzialdiagnostisch immer eine kardiale Genese beurteilt werden sollte.

eine primäre Oxygenierungsstörung von einer primären Dekarboxylierungsstörung als Ausdruck eines Ventilationsversagens differenzieren, worauf an späterer Stelle unter Punkt 3.1 noch eingegangen wird.

Hinweise auf eine akute kardiale Ischämie (Troponin) sollten ebenso wie Parameter zur Verlaufskontrolle einer akut dekompensierten Herzinsuffizienz bestimmt werden, wobei pro-BNP als valider Parameter dienen kann.

Die Leukozytenzahl stellt einen Basiswert im Rahmen der Beurteilung einer Infektion dar.

Pulmonal lassen sich mittlerweile neben der Beurteilung von Pleuraergüssen auch Hinweise auf einen Pneumothorax, ein Lungenödem oder größere pulmonale Infiltrate sonographisch gewinnen (8,9). Voraussetzungen zu einem sinnvollen Einsatz dieser Technik sind jedoch eine entsprechende Ausbildung des Untersuchers sowie die regelmäßige klinische Anwendung.

Konventionelle Röntgendiagnostik

Um eine Diagnose gemäß den Kriterien der Berlin-Definition zu treffen, wird der Einsatz eines bildgebenden Verfahrens in Form eines Röntgen Thorax oder einer Computertomographie gefordert. Der Vorteil der Röntgendiagnostik besteht in der schnellen Durchführbarkeit bettseitig in Form eines anterior-posterioren Röntgen-Thorax, welcher eine Beurteilung von großen Pneumothoraces, Pleuraergüssen, Pathologien der knöchernen Strukturen sowie von Infiltraten zulässt. Nachteile bestehen in der nicht immer eindeutigen Darstellung von Befunden, des nur indirekten Nachweises ventraler Pneumothoraces sowie einer hohen Interobserver-Variabilität bei der Beurteilung der Röntgenbilder.

Computertomographie

Oben genannte diagnostische Nachteile der konventionellen Röntgenaufnahme des Thorax können durch den Einsatz einer Computertomographie kompensiert werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Indikationsstellung aus Strahlenschutzgründen kritisch gestellt werden muss, da eine CT-Untersuchung des Thorax mit einer nicht zu vernachlässigenden, potentiell schädigend wirkenden Strahlungs-dosis für den Patienten einhergeht. Zudem können CT-Untersuchungen nicht bettseitig durchgeführt werden, weshalb ein Transport in die entsprechende Abteilung erforderlich ist, was gerade bei kritisch kranken Patienten ein hohes Risiko darstellen kann.

Neben der besseren Beurteilbarkeit von Pneumothoraces und Pleuraergüssen kommen vor allem Atelektasen und pneumonische Infiltrate zu einer deutlich besseren Darstellung. Bei letzteren beiden lässt sich neben dem reinen Nachweis zusätzlich auch deren regionales Verteilungsmuster beurteilen. Im Röntgenbild flächig erscheinende Verschattungen können sich so beispielsweise als Ver-

dichtungen im Sinne kollabierter Lungenareale mit gravitationsbedingtem antero-posteriorem Verteilungsgradienten darstellen, was eine Indikation für ein Verbringen des Patienten in Bauchlage sein kann und diese atelektatischen Bereiche wiederzueröffnen (siehe Punkt 3.2.1). Softwaregestützte Analysetools, welche eine automatische quantitative densitometrische Messung durchführen und somit bei der Unterscheidung solcher kollaptischer Lungenareale von kardial oder inflammatorisch bedingten Ödemen helfen, sind in der Entwicklung, haben aber noch

Der Vorteil der Röntgendiagnostik besteht in der schnellen Durchführbarkeit bettseitig in Form eines anterior-posterioren Röntgen-Thorax, welcher eine Beurteilung von großen Pneumothoraces, Pleuraergüssen, Pathologien der knöchernen Strukturen sowie von Infiltraten zulässt.

keinen Einzug in den klinischen Alltag gehalten. Gerade in kleineren Krankenhäusern ohne ständige Präsenz eines entsprechend ausgebildeten Radiologen stellt die Teleradiologie eine Möglichkeit zur Kompensation dieses personellen Defizits dar.

Die Applikation von Röntgenkontrastmittel kann die diagnostische Aussagekraft einer CT-Untersuchung erhöhen, da lokal entzündliche Veränderungen wie eine Mediastinitis, Pleuraempyeme oder Abszesse besser zur Darstellung kommen. Zudem ist der suffiziente Ausschluss einer Lungenarterienembolie als Ursache für die respiratorische Insuffizienz möglich. Vor Applikation eines Röntgenkontrastmittels sollte jedoch eine sorgfältige Abwägung von Nutzen und Risiko getroffen werden, da es die weitere Verschlechterung einer bereits bestehenden Niereninsuffizienz bis hin zur Dialysepflichtigkeit nach sich ziehen kann. Unverträglichkeiten sowie das Vorhandensein einer relevanten Hyperthyreose sind ebenfalls zu beachten.

Elektrische Impedanztomographie

Die elektrische Impedanztomographie (EIT) ist ein diagnostisches Verfahren, welches gerade für den bei einem ARDS vorliegenden Zustand einer inhomogen belüfteten Lunge mit teils gut ventilerten Bereichen geringer Dichte, teils kollaptischen Bereichen hoher Dichte interessant ist, da es bettseitig möglich und nicht invasiv ist und darüber hinaus ohne Röntgenstrahlung auskommt. Das Messprinzip beruht darauf, dass unterschiedliche Gewebe jeweils spezifische elektrische Leitfähigkeiten bzw. Impedanzen besitzen. Zudem ist die Impedanz einiger Gewebe abhängig von dessen funktionellem Zustand. Bezogen auf die Lunge weist kollaptisches Lungengewebe beispielsweise eine andere Impedanz auf, als adäquat belüftetes. Nach Anlegen ei-

dafür aber eine sehr hohe zeitliche Differenzierung von regionalen Be- und Entlüftungsvorgängen ermöglicht. Folglich handelt es sich eher um ein funktionelles denn um ein diagnostisches Monitoring-Tool. Ähnlich der CT-Diagnostik bietet dies Potential für automatische Analyseverfahren zur Diagnostik und Therapieanpassung. Aktuell sind diese Tools jedoch noch nicht ausgereift genug für den Einsatz in der täglichen klinischen Praxis.

Transpulmonale Druckmessung

Ein weiteres Verfahren, das darauf abzielt, die Ventilation durch Reduktion der Atelektasenbildung zu optimieren, ist die Messung des transpulmonalen Druckes. Er berechnet sich aus der Differenz zwischen Atemwegsdruck (Paw) und Pleuradruck (Ppl) und ist Ausdruck der Kraft, welche während der Ventilation tatsächlich auf die Lungenstruktur einwirkt. Durch einen kontinuierlich positiv gehaltenen transpulmonalen Druck soll ein Kollabieren von Lungenstrukturen verhindert und die Compliance sowie letztlich die Oxygenierung verbessert werden (12,13). Der zur Berechnung notwendige Pleuradruck wird hierbei über eine spezielle Ösophagussonde als Surrogat für den Pleuradruck im Oesophagus gemessen, manche Hersteller bieten sogar fest ins Beatmungsgerät integrierte Systeme an. Ein Problem dieser Messmethode stellt die Dislokation der Sonden im laufenden Betrieb dar.

Als intensivmedizinisches Krankheitsbild bedarf das ARDS eines multimodalen Therapieansatzes, bei welchem im Rahmen einer individuell adaptierten Beatmungstherapie beispielsweise auch an eine entsprechende Lagerungstherapie zu denken ist.

nes mit Elektroden versehenen Gurtes um den Brustkorb des Patienten werden zwischen jeweils zwei Elektroden kontinuierlich kleine, höherfrequente Wechselströme mit niedriger Amplitude abgegeben. Über die übrigen Elektroden wird aus den entstehenden Messsignalen mit Hilfe eines Rekonstruktionsalgorithmus die örtliche Verteilung dieser errechnet. Durch ein kontinuierliches Wandern des stimulierenden Elektrodenpaares entlang Gurtes wird letztlich ein Schnittbild erzeugt, welches die lokale Verteilung gut belüfteter und weniger gut belüfteter Lungenareale abbildet. Hierdurch lassen sich unmittelbar und bettseitig die Effekte verschiedener therapeutischer Maßnahmen, wie beispielsweise die Anpassung einzelner Beatmungsparameter, auf die Ventilation der Lunge visualisieren (10,11). Dabei ist zu beachten, dass die EIT eine vergleichsweise schlechte morphologische Auflösung besitzt,

Therapie

Als intensivmedizinisches Krankheitsbild bedarf das ARDS eines multimodalen Therapieansatzes, bei welchem im Rahmen einer individuell adaptierten Beatmungstherapie beispielsweise auch an eine entsprechende Lagerungstherapie zu denken ist. Weitere adjunktive Therapieansätze wie eine resistenzgerechte antiinfektiöse Therapie oder eine differenzierte Volumentherapie sind ebenfalls zu beachten. Trotz alledem geht das ARDS immer noch mit einer sehr hohen 28-Tage-Mortalität von 30-40% einher (14,15).

Beatmung

Im Rahmen der Initiierung einer Beatmungstherapie sollte möglichst frühzeitig eine Klä-

rung der Ätiologie erfolgen, da dies eine zielgerichtete Therapie ermöglicht. Einen nützlicher Ansatz für die Praxis stellt hierbei die Unterscheidung zwischen den Leitsymptomen Hyperkapnie und Hypoxie dar (16).

Leitsymptom Hyperkapnie (Ventilationsversagen)

Das Leitsymptom Hyperkapnie weist auf ein Versagen der Ventilation hin, welches in der Regel durch eine akute Erschöpfung der Atemmuskulatur bzw. eine zentrale Störung des Atemantriebs bedingt ist. Primäres Ziel einer Beatmungstherapie ist hierbei die Unterstützung der Atemtätigkeit, was durch die Applikation eines kontinuierlichen positiven Atemwegsdruckes (CPAP) in Kombination mit einer moderaten bis hohen inspiratorischen Druckunterstützung erreicht wird. Dies wird am einfachsten durch Anwendung einer nicht-invasiven Beatmung (NIV) gewährleistet. Risiken, die mit einer invasiven maschinellen Beatmung mit endotrachealer Intubation einhergehen, können vermieden werden, wie beispielsweise der potentiell komplette Verlust des Atemwegs im Rahmen der Narkoseeinleitung bei Intubation, Nebenwirkungen der vorübergehend notwendigen Narkotika und Sedativa, Atemwegsverletzungen sowie vor allem das Risiko einer ventilatorassoziierten Pneumonie.

Eine nichtinvasive Beatmung mittels Gesichtsmaske sollte aus Gründen des Patientenkomforts nicht dauerhaft durchgeführt werden. Sie ist somit eine Therapieform, die darauf abzielt eine invasive Beatmung durch intermittierende Unterstützung der Atemmuskulatur des Patienten zu vermeiden. Hierzu zählen beispielsweise Patienten mit akutem kardialen Lungenödem, akut exacerbiertes COPD oder immunsupprimierte Patienten (17–19). Der CPAP-Helm stellt eine Möglichkeit der kontinuierlichen Applikation eines positiven Atemwegsdruckes per NIV dar, worauf unter Punkt 3.1.2 genauer eingegangen wird.

Gemäß der S3-Leitlinie „Nicht-invasive Beatmung als Therapie der akuten respiratorischen Insuffizienz“ soll bei Ventilationsversagen mit respiratorischer Azidose von pH-Werten von 7,30–7,35 möglichst frühzeitig eine NIV-Therapie eingesetzt werden. Auch bei niedrigeren pH-Werten kann ein Versuch mit NIV unternommen werden, jedoch mit geringeren Erfolgsaussichten (20). Sollte

dennoch eine invasive Beatmung notwendig sein, sollte primär ein assistierter, Tidalvolumina-unterstützender Beatmungsmodus, wie beispielsweise PSV, zum Einsatz kommen.

Leitsymptom Hypoxie (Oxygenierungsversagen)

Im Gegensatz zum Ventilationsversagen mit einer vorwiegenden Störung der Decarboxylierung führt eine primäre Störung der Oxygenierung, wie beispielsweise bei Vorliegen eines ARDS, zu einer akuten hypoxämischen respiratorischen Insuffizienz. Eine Beatmungstherapie zielt hierbei vor allem darauf ab, die Oxygenierung durch Vergrößerung des endexpiratorischen Lungenvolumens und damit einhergehend einer Verminderung des intrapulmonalen Shuntblutflusses zu verbessern. Dies wird vor allem durch die kontinuierliche Applikation einer hohen PEEPs erreicht, weshalb die Applikation einer NIV per Gesichtsmaske aus oben erwähnten Gründen nicht ausreichend dafür geeignet ist, jedoch theoretisch die Anwendung eines CPAP-Helms zur Verfügung steht. Das Risiko eines Therapieversagens

Eine nichtinvasive Beatmung mittels Gesichtsmaske sollte aus Gründen des Patientenkomforts nicht dauerhaft durchgeführt werden.

mit NIV bei primär hypoxämischem respiratorischem Versagen ist jedoch auch bei Anwendung eines CPAP-Helms hoch. Im Rahmen der LUNG-SAFE-Studien erhobene Daten zeigen, dass NIV-Therapie in 15% der Patienten mit diagnostiziertem ARDS angewendet wurde, unabhängig vom Schweregrad des akuten Lungenversagens. In der Gruppe des schweren ARDS kam es in bis zu 45% der Fälle zu einem Therapieversagen. Patienten mit einem Horovitz-Quotienten ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$) $<150\text{mmHg}$, welche mit einem NIV-Versuch behandelt wurden zeigten gegenüber primär invasiv beatmeten Patienten eine erhöhte Sterblichkeit (14). Gemäß der aktuellen S3-Leitlinie „Invasive Beatmung und Einsatz extrakorporaler Verfahren bei akuter respiratorischer Insuffizienz“ wird empfohlen, den

Einsatz von NIV lediglich bei Patienten mit mildem ARDS ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2=201-300$ mmHg) in spezialisierten Zentren und unter kontinuierlichem Monitoring und ständiger Intubationsbereitschaft zu erwägen (21).

Neben einer Beeinträchtigung der Hämodynamik kann eine invasive Beatmung mit positiven Beatmungsdrücken auch negative Auswirkungen auf die Lunge selbst haben, wodurch der Begriff des Ventilator-induzierten Lungenschadens (VILI) geprägt wurde. Durch ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren kommt es zur Triggerung einer inflammatorischen Reaktion in der Lunge, welche letztlich zur Translokation inflammatorischer Mediatoren, Zellen und Bakterien zwischen Lunge und systemischer Zirkulation führt.

Neben einer Beeinträchtigung der Hämodynamik kann eine invasive Beatmung mit positiven Beatmungsdrücken auch negative Auswirkungen auf die Lunge selbst haben.

Eine der Hauptursachen scheint hierbei das zyklische Öffnen und Schließen von Lungennarealen durch zu niedrigen PEEP darzustellen, was zu Scherkräften zwischen belüfteten und nicht belüfteten Alveolen führt (22). Es ist daher von essentieller Bedeutung, bei jedem Patienten im Rahmen einer sogenannten protektiven Beatmungsstrategie eine individuell adaptierte Beatmung vorzunehmen um sekundäre Beatmungsschäden zu vermeiden. Im Folgenden wird auf die Einstellung der einzelnen Beatmungsparameter eingegangen.

Atemzugvolumen

Der Begriff des Volutraumas ist mittlerweile ein in der Diskussion von Beatmungsstrategien etablierter Begriff, da eine direkte Gewebsschädigung durch Applikation hoher Tidalvolumina sehr plausibel erscheint und mittlerweile auch mit guter Evidenz belegt ist. Die Berechnung des Tidalvolumens sollte anhand des idealen Körpergewichts (IBW) erfolgen, wobei zur Berechnung des IBW folgende Formeln verwendet werden können (23):

- IBW (Frau) = $45.5+0.91$ (Größe in cm – 152.4)
- IBW (Mann) = $50.0+0.91$ (Größe in cm – 152.4)

Generell sollte bei einer invasiven Ventilation das Tidalvolumen 6-8ml/kg IBW betragen, im Falle eines ARDS werden $\leq 6\text{ml/kg}$ IBW empfohlen (24). Dabei sollte nicht vergessen werden, dass die Abschätzung des IBW eigentlich nur dazu dient, das Lungenvolumen anhand dieses biometrischen Parameters abzuschätzen.

Bei genauerer pathophysiologischer Betrachtung ist daher jedoch nicht nur das absolut applizierte Tidalvolumen ausschlaggebend, sondern vor allem welcher Spannung („stress“) sowie welcher Dehnung („strain“) die Lunge unter dem jeweiligen Tidalvolumen ausgesetzt ist, da eine unphysiologische Spannung und Dehnung der Lunge die Ausschüttung von proinflammatorischen Cytokinen und die Rekrutierung von Leukozyten triggern (25–27). Als Spannung wird hierbei die Kraft bezeichnet, welche während der Ventilation tatsächlich auf die Lungenstruktur einwirkt. Entscheidender Parameter hierbei ist die Differenz zwischen Atemwegsdruck (P_{aw}) und Pleuradruck (P_{pl}), der sogenannte transpulmonale Druck, auf welchen unter Punkt 3.1.2.3 näher eingegangen wird. Als Dehnung wird der Quotient aus der Deformierung der Lunge (=Tidalvolumen, VT) zu ihrer Ruheposition, also dem endexpiratorischen Lungenvolumen (EELV) definiert ($\text{strain} = \text{VT}/\text{EELV}$). Dieser Quotient nimmt bei verringertem EELV durch nicht belüftete Lungennareale zu, weshalb die Applikation eines adäquaten PEEPs essentiell ist um oben erwähnte Triggerung einer proinflammatorischen Reaktion im Sinne eines Biotrauma zu reduzieren.

PEEP

Haupteffekt eines ausreichend hohen PEEPs ist die Erhöhung des endexpiratorischen Lungenvolumens, was zu einer Reduktion von Atelektasen und somit von intrapulmonalem Shuntfluss führt und dadurch die Oxygenierung verbessert. Zudem wird durch die Applikation eines kontinuierlichen ausreichend hohen Atemwegsdrucks ein zyklisches Kollabieren der Alveolen am Ende eines Ventilationszyklus verhindert, wodurch die auf die Lunge übertragene Span-

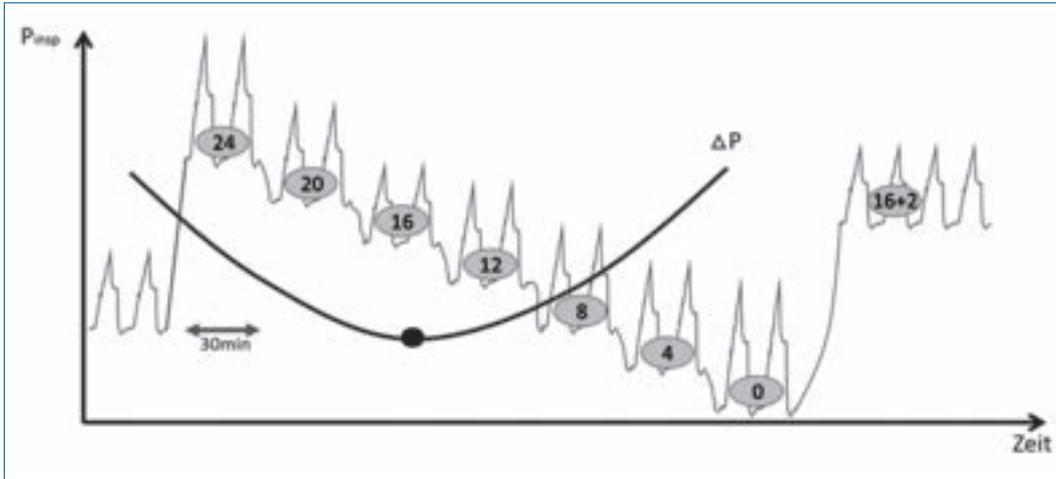


Abbildung 1

Visualisierung eines Schemas zur PEEP-Titration unter volumenkontrollierter Beatmung zur Erzielung eines minimalen driving-pressure (ΔP) als Ausdruck einer maximalen Lungencompliance

F_{iO_2}	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5-0.8	0.8	0.9	1.0
PEEP	12	14	14	16	16	18	20	22	22	22-24

Tabelle

PEEP/ F_{iO_2} -Einstellung nach ARDS-Network (36)

nung („strain“, s.o.) reduziert wird. Ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der Reduktion eines möglichen Biotraumas sollte die Ventilation im Bereich der größten Lungencompliance erfolgen, um möglichst niedrige Druckamplituden anwenden zu müssen. ΔP ist die Differenz zwischen Plateaudruck und PEEP und damit letztendlich die treibende Kraft für die Inflation der Lunge während der Inspiration. Er wird auch als „driving pressure“ bezeichnet, worauf unter Punkt 3.1.2.3 noch genauer eingegangen wird. Ein ausreichend hoher PEEP sollte unter diesem Gesichtspunkt oberhalb des unteren Wendepunkts der Compliance-Kurve des respiratorischen Systems liegen.

Zur invasiven Ventilation von Patienten ohne ARDS wird empfohlen, einen PEEP von minimal 5cmH₂O zu applizieren (28). Bei Vorliegen eines ARDS sollten deutlich höhere Werte eingestellt werden, typischerweise in einem Bereich von 12-15 cmH₂O und höher (29–35). Einen praktischen Ansatz stellt unter Berücksichtigung der einfachen Anwendbarkeit die orientierende Einstellung nach der ARDS-Network Tabelle dar, welche unter diesem Gesichtspunkt auch im Rahmen der S3-Leitlinie Invasive Beatmung und Einsatz extrakorporaler Verfahren bei akuter respiratorischer Insuffizienz empfohlen wird (24). Das Auffinden eines „adäquaten“ PEEPs erscheint in der Theorie logisch, kann sich in der Praxis jedoch komplex darstellen, möchte man nicht auf die oben dargestellte Tabelle zurückgreifen. Viele Beatmungsgeräte bieten

inzwischen Tools zur automatischen Ermittlung einer statischen Compliance-Kurve an, welche beispielsweise eine Ermittlung des PEEPs anhand des unteren Inflektionspunktes ermöglicht. Dies gelingt unter Praxisbedingungen jedoch nicht immer ausreichend und stellt vor allem auch lediglich einen indirekten globalen Parameter dar. Allerdings kann die Compliance pragmatisch auch aus dem ΔP abgeschätzt werden (niedriger ΔP entspricht höchster Compliance), sofern das VT konstant gehalten wird. Einen vielversprechenden Ansatz, welcher eine direkte, bettseitige Darstellung der Effekte einer

Bei Vorliegen eines ARDS sollten deutlich höhere Werte eingestellt werden, typischerweise in einem Bereich von 12-15 cmH₂O und höher.

„PEEP-Titration“ von hohen auf möglichst niedrige Werte darstellt, ist die Elektrische Impedanztomographie (EIT). Ziel ist hierbei ein PEEP-Niveau zu finden, bei dem möglichst viele offene Lungenbereiche (bei auf dem Rücken liegenden Patienten meist dorsal) mit möglichst wenig überdehnten (meist ventralen) Lungenbereichen einhergeht. Neben der Beurteilung regionaler Unterschiede in der Belüftung ist ein weiterer Vorteil der EIT hierbei, dass eine kontinuierliche Mes-

sung möglich ist und somit eine zeitnahe Anpassung bei Verschlechterung der Verhältnisse vorgenommen werden kann, beispielsweise nach Umlagern des Patienten.

Eine ähnlich praxisorientierte Möglichkeit stellt die Messung des transpulmonalen Druckes mittels Ösophagussonde dar. Die Suche

Die kritische Grenze scheint bei der invasiven Beatmung von Patienten mit ARDS bei einem endinspiratorischen Atemwegsdruck $\leq 30\text{cmH}_2\text{O}$ zu liegen.

nach dem adäquaten PEEP orientiert sich hierbei an einem konstant positiven transpulmonalen Druck, bei welchem die Atemwegen inklusive der abhängig dorsal liegenden Bereiche der Lunge offengehalten werden, um einen Alveolarkollaps zu verhindern. Auch bei dieser Messmethode ist eine kontinuierliche bettseitige Messung möglich. Problematisch stellt sich die mögliche Dislokation der Sonden dar, vor allem bei agilen, wachen Patienten.

Abgesehen von der Messmethode zur Ermittlung des adäquaten PEEP-Wertes sollte im Rahmen einer PEEP-Titration die Anwendung eines Rekrutierungsmanövers mit hohen Plateaudrücken kritisch überdacht werden. Eine aktuelle prospektive multizentrische Studie konnte bei Patienten mit moderatem bis schweren ARDS keinen Vorteil eines nach maximaler Compliance titrierten PEEPs bei Anwendung von Rekrutierungsmanövern mit Plateaudrücken bis $60\text{cmH}_2\text{O}$ im Vergleich zu einer Beatmung mit nach PEEP/FiO₂-Tabelle eingestelltem PEEP ohne vorheriges Rekrutierungsmanöver gefunden werden (37).

PaW

Zum Erreichen adäquater Tidalvolumina sind im Rahmen eines ARDS teils hohe Beatmungsdrücke notwendig, welche eine potentielle sekundäre Schädigung der Lunge im Sinne eines Barotraumas verursachen können. Die kritische Grenze scheint bei der invasiven Beatmung von Patienten mit ARDS bei einem endinspiratorischen Atemwegsdruck $\leq 30\text{cmH}_2\text{O}$ zu liegen. Neuere Daten zeigen allerdings, dass der Plateaudruck we-

niger relevant ist als eine Senkung des ΔP (38).

Zur Behandlung von Patienten mit einem ARDS sind zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Oxygenierung mit entsprechenden Tidalvolumina teilweise hohe Beatmungsdrücke notwendig. Um eine zusätzliche Schädigung der Lunge durch ein Barotrauma zu vermeiden, ist eine Begrenzung der inspiratorischen Beatmungsdrücke notwendig. Die kritische Grenze scheint bei der invasiven Beatmung von Patienten mit ARDS bei einem endinspiratorischen Atemwegsdruck $\leq 30\text{cmH}_2\text{O}$ zu liegen, weshalb auch in der aktuellen S3-Leitlinie zur invasiven Beatmung eine Begrenzung des Spitzendrucks auf diesen Wert mit starkem Empfehlungsgrad aufgeführt wird (24,39–41).

Der Spitzendruck einer Beatmung ist jedoch keinesfalls als isolierter Wert zu betrachten sondern immer im Kontext mit der gesamten Beatmungssituation. So gibt es starke Hinweise darauf, dass der „driving pressure“ ΔP , welcher die Differenz zwischen endinspiratorischem Druck und PEEP beschreibt und somit Ausdruck der Lungencompliance ist, einen empfindlichen Parameter einer lungenprotektiven Beatmung darstellt. Ein erhöhter „driving pressure“ ist bei ARDS-Patienten mit einer erhöhten Sterblichkeit assoziiert. Bei einer invasiven Beatmung sollte die inspiratorische Druckdifferenz $\Delta P \leq 15\text{cmH}_2\text{O}$ betragen (24,42). Erwähnenswert ist allerdings, dass die meisten Daten bzgl. des driving pressure aus Untersuchungen von kontrollierten Beatmungsformen stammen. Inwieweit diese Empfehlung für assistierte Beatmungsformen gilt, ist noch Gegenstand klinischer Forschung.

Darüber hinaus ist der tatsächlich auf das Lungengewebe einwirkende („stressende“) Druck immer abhängig von der Differenz zwischen Atemwegsdruck und Pleuradruck, dem sogenannten transpulmonalen Druck. So kann es bei Vorliegen hoher Pleuradrücke, wie beispielsweise im Rahmen eines abdominalen Kompartmentsyndroms oder bei Adipositas, durchaus notwendig sein mit Spitzendrücken bis $35\text{cmH}_2\text{O}$ zu beatmen (24).

Beatmungsmodus

Aktuell kann keine Empfehlung für oder gegen eine druck- bzw. volumenkontrollierte Beatmung abgegeben werden (24). Eine Cochrane-Analyse fand beim Vergleich einer

druckkontrollierten Beatmung mit einer volumenkontrollierten Beatmung zur Therapie eines ARDS keine signifikanten Unterschiede bezüglich Barotraumata oder Beatmungsdauer (43). Generell ist ein hybrider Beatmungsmodus zu empfehlen, welcher eine frühzeitige Spontanatmung mit einem Atemminutenvolumen-unterstützenden Beatmungsverfahren kombiniert, wie beispielsweise BIPAP oder APRV (44). Durch die aktiven Zwerchfellkontraktionen wird eine Atrophie der Atemmuskulatur verhindert und eine Umverteilung der Ventilation in abhängige Lungenareale erreicht, was zu einer Verbesserung des Ventilations-Perfusions-Verhältnisses führt (45). Im Rahmen eines solchen hybriden Beatmungsmodus scheint insbesondere die Spontanatmung ohne Unterstützung eines jeden Atemzugs, wie beispielsweise bei PSV, für die Verbesserung des Gasaustausches verantwortlich zu sein (46). Mit Ausnahme des schweren ARDS ist daher innerhalb der ersten 48h nach Intubation der Einsatz einer die Spontanatmung ermöglichenden Beatmungsform zu empfehlen (24).

Adjunktive Therapien

Auch wenn die Beatmung den Hauptpfeiler der ARDS-Therapie darstellt, gibt es noch einige weitere therapeutische Maßnahmen, die bei der Therapie helfen können.

Lagerungstherapie

Die vor allem bei schwerem therapierefraktärem ARDS ($\text{PaO}_2/\text{F}_i\text{O}_2 < 150\text{mmHg}$) oftmals erstaunlichen Ergebnisse einer Lagerungstherapie, insbesondere der Bauchlagerung, haben sich in einer entsprechenden Empfehlung mit hohem Evidenzgrad in der S2e-Leitlinie „Lagerungstherapie und Frühmobilisation zur Prophylaxe von pulmonalen Funktionsstörungen“ niedergeschlagen (47). Pathophysiologisch lässt sich dieser Effekt durch eine Veränderung der Atemmechanik, eine Reduktion des Pleuradruck-Gradienten, eine Reduktion der tidalen Hyperinflation sowie der beatmungsassoziierten Schädigung der Lunge durch Homogenisierung der Atemgasverteilung erklären (48–56). Falls die Indikation zur Bauchlagerung besteht, sollte sie auch möglichst frühzeitig durchgeführt werden und für eine Dauer von mindestens 16h beibehalten werden (47).

Analgesiedierung

Unabhängig von der spezifischen Therapie des ARDS sollte bei jedem intensivmedizinischen Patienten eine adäquate Symptomkontrolle von Schmerz, Angst, Agitation und Delir gewährleistet werden, wobei eine Therapiesteuerung durch Anwendung eines objektiven Score-Systems empfohlen wird (57). Speziell im Kontext der Therapie eines ARDS spielt das Vermeiden einer unnötigen Übersiedierung des Patienten unter anderem eine Rolle im Hinblick auf das oben erwähnte frühzeitige Anstreben der Spontanatmung.

Muskelrelaxierung

Das in einer viel beachteten Studie von Papazian et al. vertretene Konzept der Muskelrelaxierung zur Vermeidung von Pneumothoraces und Barotraumata in der Frühphase der Therapie eines schweren ARDS muss kritisch betrachtet werden. Es sollte vielmehr als Hinweis dafür gewertet werden, dass das Hauptaugenmerk auf eine adäquate Adaptierung der Beatmung unter Verwendung moderner Beatmungsformen gelegt werden sollte, um

Pathologisch lässt sich der günstige Effekt der Bauchlagerung durch eine Veränderung der Atemmechanik, eine Reduktion des Pleuradruck-Gradienten, eine Reduktion der tidalen Hyperinflation sowie der beatmungsassoziierten Schädigung der Lunge durch Homogenisierung der Atemgasverteilung erklären.

eine bessere Patient-Ventilator-Interaktion zu erreichen und nicht die potentiell schwerwiegenden Nachteile einer tiefen Analgesiedierung und Relaxierung auf die kognitiven und muskulären Funktionen des Patienten leichtfertig in Kauf zu nehmen. Dies widerspiegelt sich auch in den aktuellen Leitlinienempfehlungen. Derzeit kann keine Empfehlung für oder gegen die Ermöglichung der Spontanatmung in der Frühphase des schweren ARDS gegeben werden (24).

Volumentherapie

Generell sollte eine positive Volumenbilanz im Rahmen einer akuten respiratorischen Insuffizienz vermieden werden. Angepasst an die hämodynamischen Bedürfnisse des Patienten sollte vielmehr ein restriktives Volumenmanagement zur Verbesserung des pulmonalen Gasaustausches angestrebt werden (58).

Selektive pulmonale Vasodilatation

Die Inhalation von niedrig dosiertem NO, Prostacyclin oder seinem Analogon Iloprost führt zu einer selektiven pulmonalen Vasodilatation im Bereich der ventilierten Alveolen. Dies führt zur einer Verbesserung des Ventilations-Perfusions-Verhältnisses und somit der Oxygenierung. Pathophysiologisch stellt dies lediglich eine symptomatische Behandlung dar, weshalb der Wert dieser Therapiemethode vorwiegend in einem Zeitgewinn zur Überbrückung für andere Maßnahmen zu sehen ist. Entsprechend wird auch in der aktuellen Leitlinie kein routinemäßiger Einsatz von inhalativem NO empfohlen. Der Einsatz inhalativer pulmonaler Vasodilatoren kann bei Patienten mit ARDS und Zeichen einer Rechtsherzdekompensation erwogen werden (24).

Antiinfektiöse Therapie

Eine frühzeitige, zunächst kalkulierte und später resistenzgerechte antibiotische Therapie setzt eine entsprechend schnelle Gewinnung entsprechender Proben für die mikrobiologische Untersuchung voraus. Neben der Beachtung individueller Risikofaktoren des Patienten sollten auch lokale mikrobiologische Resistenzsituationen beachtet werden und entsprechende Empfehlungen zur kalkulierten Therapie von Pneumonien erarbeitet werden. Eine entsprechende Supervision von Antibiotikatherapien durch qualifiziertes Personal, beispielsweise in Form von antibiotic stewardship Programmen, stellt eine sinnvolle Maßnahme dar.

Literatur beim Verlag abrufbar unter plexus@pabst-publishers.com

Prof. Dr. Hermann Wrigge

Klinik für Anästhesiologie, Intensiv- und Notfallmedizin, Schmerztherapie
BG Klinik Bergmannstrost
Merseburger Straße 16
506112 Halle (Saale)
hermann.wrigge@bergmannstrost.de

Durchbruch bei schneller Diagnose von multiresistenten Krankenhausern gelungen

Ein wissenschaftlicher Durchbruch ist jetzt einem Forscherteam der Medizinischen Fakultät/Uniklinik Köln in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Infektionsforschung (DZIF) gelungen: Mit einem neuartigen Verfahren konnten die Wissenschaftler so genannte Carbapenem-resistente Bakterien innerhalb von 20 bis 45 Minuten aus Blutkulturen mit einer 100-prozentigen Sicherheit nachweisen.

Um diese Erreger im Blutstrom nachzuweisen, werden bis dato Methoden angewandt, die 16 bis 72 Stunden zum Nachweis der Antibiotikaresistenz beanspruchen. Doch gerade bei Patienten mit Blutstrominfektionen, die durch gram-negative Enterobakterien verur-

sacht werden, nehmen Antibiotikaresistenzen zu – auch gegen Reserveantibiotika der Gruppe Carbapeneme. Die Antibiotika-Therapie bleibt in diesen Fällen unwirksam, die Sterblichkeit ist hoch.

Eine beschleunigte Diagnostik ist ein wesentlicher Schritt, Patienten mit Infektionen durch resistente Bakterien schneller und gezielter behandeln zu können sowie die Ausbreitung der Erreger einzudämmen. Das neu entwickelte Verfahren ist schnell, einfach anzuwenden und mit circa zehn Euro pro Test kostengünstig. Zudem kann die Untersuchung in jedem klinisch-mikrobiologischen Labor durchgeführt werden. „Wir sind mit diesem Verfah-

ren unserem Ziel, mit multiresistenten Enterobakterien infizierte Patienten so schnell wie möglich helfen zu können, einen Riesenschritt näher gekommen“, so Erstautor und DZIF-Professor Axel Hamprecht vom Institut für medizinische Mikrobiologie, Immunologie und Hygiene am Universitätsklinikum Köln. „Bei derartig aggressiven Erregern zählt jede Minute, um eine gezielte Therapie zu starten. Jetzt müssen sich Folgestudien anschließen, um unsere Erkenntnisse so schnell wie möglich in die klinische Praxis zu überführen.“

Die Ergebnisse der aktuellen Studie wurden im renommierten Wissenschaftsjournal PlosOne veröffentlicht.

Aktuelle Aspekte der Beatmung

Jakob Wittenstein, Martin Scharffenberg, Marcelo Gama de Abreu

Zusammenfassung

Mechanische Beatmung ist in der kritischen Krankheitsphase oft unumgänglich und eine wichtige lebenserhaltende Maßnahme. Nichtsdestotrotz kann es während der Beatmung zu einer weiteren Schädigung der Lunge kommen. Der beatmungsassoziierte Lungenschaden kann die Letalität erhöhen und sollte unbedingt vermieden werden.

Im Sinne von *primum non nocere* ist eine streng evidenzbasierte patientenzentrierte Auswahl der Beatmungseinstellungen zu empfehlen. Die Hauptkomponenten der lungenprotektiven Beatmung sind nach wie vor das Tidalvolumen ($V_T = 6 - 8 \text{ ml/kg}$ Idealkörpergewicht), der Plateaudruck ($< 30 \text{ cmH}_2\text{O}$), der positive end-expiratorische Druck (PEEP $\geq 5 \text{ cmH}_2\text{O}$), die Atemfrequenz (nach PaCO_2) und der Atemgasfluss. Neuere Parameter wie *Driving Pressure* (Atemwegsdruckamplitude $\leq 15 \text{ cmH}_2\text{O}$) und *Mechanical Power* (mechanische Beatmungsleistung) bzw. *Intensity* (Intensität) versprechen zusätzliche Informationen und neue Konzepte zur Gewährleistung der Lungenprotektion. Deren Stellenwert im klinischen Einsatz muss noch prospektiv evaluiert werden.

In diesem Kapitel werden konkrete Handlungsempfehlungen gegeben, aber auch Altbekanntes aufgegriffen, da aktuelle Beobachtungsstudien (1) gezeigt haben, dass lungenprotektive Beatmungseinstellungen im klinischen Alltag noch eine ungenügende Berücksichtigung finden.

Atemwegsmanagement

Im Rahmen des akuten Atemwegsmanagements von kritisch Kranken spielen vor allem vier Faktoren eine Rolle, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll: Die Vorbereitung, die eigentliche Intubation, die Oxygenierung und menschliche Faktoren (2).

Eine gute Vorbereitung ist unumgänglich. Da das Risiko für eine hämodynamische Dekompensation nach Intubation sehr hoch ist, sollten vorher bestmöglich stabile hämodynamische Verhältnisse geschaffen werden (Volumengabe, Vasopressoren). Bei Patienten mit einer verminderten funktionellen Residualkapazität (FRC) kann die Präoxygenierung aufgrund eines hohen intrapulmonalen Shunts unzureichend sein. Sollten insbesondere bei absehbar schwieriger Intubation die Verwendung weiterer neuer Hilfsmittel erwogen werden wie z. B. die Hochflusssauerstofftherapie mittels High-Flow Nasal Canula (HFNC) (2). Die HFNC muss zur orotrachealen Intubation nicht entfernt werden und kann so die Oxygenierung während der apnoeischen Phase verbessern und eine Desatu-

Lungenprotektive Beatmungseinstellungen werden in der klinischen Praxis ungenügend berücksichtigt.

rierung verhindern. Mittels Ultraschall kann die gastrale Füllung abgeschätzt und zur Minimierung des Aspirationsrisikos eine Entlastung mittels Magensonde vorgenommen werden.

Die Intubation stellt bereits mit dem ersten Intubationsversuch ein hohes Risiko für den kritisch Kranken dar, das mit jedem weiteren Intubationsversuch weiter steigt. Mittels Videolaryngoskopie konnte keine höhere Erfolgsrate gegenüber der direkten Laryngoskopie erzielt werden. Viel mehr traten unter Videolaryngoskopie mehr schwere lebensbedrohliche Komplikationen auf. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass zwar mittels Videolaryngoskopie eine bessere Visualisierung möglich, die eigentliche tracheale Intubation aber schwieriger ist. Eine apnoeische Oxygenierung z. B. mittels HFNC während der Laryngoskopie ist einfach umzusetzen, kosten-

günstig und kann deshalb immer erwogen werden. In Fällen, in denen weder Beatmung noch Intubation möglich sind, sollten feste Algorithmen bekannt und ein schneller offener chirurgischer Atemweg geschaffen werden.

Schließlich tragen menschliche Faktoren maßgeblich zum Gelingen der Atemwegssicherung bei. Ein Training des Personals sowie ein standardisiertes Vorgehen, am besten anhand von Algorithmen, sind daher zu empfehlen.

Bei der Wahl des Atemwegs sollten bei einer zu erwartenden längeren Beatmung (> 48 h) Tuben mit subglotischer Absaugmöglichkeit zur Reduktion von tracheobronchialen Aspirationen verwendet werden.

Der Erhalt der Spontanatmung – zumindest zu einem gewissen Grad – sollte erwogen werden, da es schon ab 18 Stunden invasiver Beatmung zur Atrophie des Zwerchfells kommt.

Trotz Untersuchungen, die eine frühe Tracheotomie innerhalb der ersten 7 Tage nach Beginn der invasiven Beatmung als vorteilhaft erscheinen lassen (klinische Vorteile, geringere Kosten), kann eine frühe Tracheotomie bei invasiv beatmeten Patienten aktuell nicht empfohlen werden. Denn eine Tracheotomie ist mit einem prozeduralen Risiko verbunden, welches Patienten, die im Verlauf erfolgreich vom Respirator entwöhnt werden können, erspart und eine Übertherapie vermieden werden kann (2). Ein individueller Ansatz, der im gesamten Behandlungsteam besprochen wird, ist damit unumgänglich.

Beatmungsmodi

Nach wie vor kann keine Empfehlung für oder gegen einen bestimmten Beatmungsmodus gegeben werden. Insbesondere im schweren akuten Lungenversagen (ARDS) sollte allerdings eine kontrollierte Beatmung gewählt werden. Ansonsten sollte der Erhalt der Spontanatmung (zumindest zu einem geringen Grad) erwogen werden, da es schon ab 18 Stunden invasiver Beatmung zur Atro-

phie des Zwerchfells kommt. Vorteilhaft sind dabei die Aufrechterhaltung der Zwerchfellaktivität, die Möglichkeit die Sedierungstiefe zu reduzieren, ein geringerer Rechts-links-Shunt und niedrigere Beatmungsdrücke. Allerdings besteht die Gefahr eines erhöhten transpulmonalen Drucks (siehe Abschnitt 7). Neue Untersuchungen konnten zeigen, dass ein hoher Atemantrieb während assistierter Spontanatmung zu einer Zwerchfell Hypertrophie mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit eines Weaningversagens führen kann. Aktuell kann auch keine Empfehlung für einen der vielen assistierten Beatmungsmodi gegeben werden. In großen klinischen Studien mit klinisch relevanten Endpunkten muss der Stellenwert der einzelnen Verfahren noch geprüft werden.

Computerbasierte Closed-Loop-Systeme könnten zukünftig eine Einstellung streng nach den Patientenbedürfnissen ermöglichen, die klinische Implementierung scheint aber problembehaftet zu sein. Computerbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme (Open-Loop Systeme) können einerseits Probleme erkennen und das Behandlungsteam darauf aufmerksam machen und andererseits eine Lösung anbieten und somit gleichzeitig zu einem Lerneffekt des Behandlungsteams führen. Ein solches System kann zur schnelleren Anpassung der Beatmungseinstellungen und insbesondere zur patienten- und zeitgerechten Reduktion der Beatmungsinvasivität führen. Eine Evaluation, ob der Einsatz von Closed- bzw. Open-Loop-Systemen auch zu einer Verbesserung des Patienten-Outcomes führen kann, ist aktuell noch ausstehend.

Inspiratorische Sauerstofffraktion

Während Hypoxämie und Gewebehypoxie vor allem bei kritisch Kranken vermieden werden sollen, stellt eine generalisierte Hypoxie in den meisten Fällen nicht das führende Problem dar. Dennoch ist eine Hyperoxämie bzw. Hyperoxie aufgrund einer hohen inspiratorischen Sauerstoffkonzentration (F_{iO_2}) während der perioperativen bzw. intensivmedizinischen maschinellen Beatmung nicht selten.

Die physiologischen Effekte einer hohen F_{iO_2} bzw. Hyperoxie sind komplex. Während einheitliche Definitionen fehlen, zeigten einige

methodisch uneinheitliche Studien und Metaanalysen positive wie negative Effekte (3). Einerseits gibt es Grund zur Annahme, dass eine hohe perioperative $F_{I}O_2$ die Inzidenz chirurgischer Wundinfektionen reduzieren kann, da Sauerstoff ein wichtiges Substrat bei nahezu allen Vorgängen der Infektabwehr ist. Andererseits kann die hohe $F_{I}O_2$ bzw. ein konsekutiver supranormaler arterieller Sauerstoffpartialdruck (z.B. paO_2 100–150 mmHg) den oxidativen Stress sowie die Wahrscheinlichkeit für pulmonale (Atelektasen, interstitielle Fibrose, Tracheobronchitis, Pneumonitis) und kardiale (koronare Vasokonstriktion, reduziertes HZV) Komplikationen erhöhen. Ein in der Folge gesteigertes Letalitätsrisiko für Intensivpatienten wurde in verschiedenen retro- und prospektiven Studien bestätigt (4). Darüber hinaus ist für den antiinfektiösen Mechanismus neben der einfachen Steigerung des paO_2 die tatsächliche Gewebe-Oxygenierung ausschlaggebend, die von der arteriellen Oxygenierung, der Perfusion und der Sauerstoffaufnahme im Zielgebiet abhängig ist. Vor dem Hintergrund dieser widersprüchlichen Studienlage wird die liberale Anwendung einer hohen $F_{I}O_2$ nach wie vor kontrovers diskutiert (3).

Für die intra- und direkte postoperative Phase wurde von der Weltgesundheitsorganisation für alle erwachsenen, intubierten Patienten unter Allgemeinanästhesie eine $F_{I}O_2$ von 0,8 empfohlen. Dem widersprach die World Federation of Societies of Anaesthesiologists und empfiehlt hingegen weiterhin die niedrigste $F_{I}O_2$, mit der eine periphere Sauerstoffsättigung von $> 93\%$ aufrechterhalten werden kann.

Die Studienlage für die Wahl der $F_{I}O_2$ bei Intensivbeatmung ist etwas einheitlicher. Bei Intensivpatienten sollte sich die $F_{I}O_2$ am aktuellen Sauerstoffbedarf des individuellen Patienten orientieren und eine Normoxie zum Ziel haben („Case-by-case approach“ (3)). Dementsprechend sind Bedingungen, die eine hohe $F_{I}O_2$ rechtfertigen, u.a. Schock, Sepsis, schweres Trauma, Anaphylaxie und Kohlenstoffmonoxidintoxikation. Kann ein normwertiger paO_2 mittels $F_{I}O_2$ allein nicht erreicht werden, sind weitere Maßnahmen zu ergreifen (Lungenrekruitierungsmanöver, adäquater PEEP, Lagerungstherapie, extrakorporale Membranoxygenierung). Außerhalb kritischer Zustände kann eine niedrige $F_{I}O_2$ angestrebt werden. Dieses Vorgehen

wird auch von der S3-Leitlinie Invasive Beatmung 2017 gestützt: Bei invasiver Beatmung ist die $F_{I}O_2$ so einzustellen, dass eine arterielle Sauerstoffsättigung (SaO_2) von 90–94%

Bei Intensivpatienten sollte sich die $F_{I}O_2$ am aktuellen Sauerstoffbedarf des individuellen Patienten orientieren und eine Normoxie zum Ziel haben („Case-by-case approach“).

bzw. ein paO_2 von 60–80 mmHg (8,0–11,7 kPa) erreicht wird. Eine SaO_2 von 90 % soll nicht unterschritten werden. Ausnahmen stellen Patienten mit chronischer Hyperkapnie dar (bspw. schwere chronische obstruktive Lungenerkrankung etc.), bei denen die Ziel-Sättigung 88–92 % beträgt.

Die Präoxygenierung mit 100 % Sauerstoff vor endotrachealer Intubation gewährleistet eine ausreichende Apnoetoleranzzeit, trägt aber auch maßgeblich zur Entstehung von Resorptionsatelektasen bei. Während die Präoxygenierung mit $F_{I}O_2$ 0,8 die Toleranzzeit zumindest bei Lungengesunden, nicht wesentlich reduziert, wird die Atelektasenbildung reduziert.

Tidalvolumen

Obwohl in mehreren klinischen Studien gezeigt wurde, dass die Beatmung mit niedrigen Tidalvolumina die Letalität von Beatmeten senken kann, werden nach wie vor viele Patienten mit zu hohen Tidalvolumina beatmet (1). Insbesondere im ARDS sollte ein $V_T \leq 6$ ml/kg verwendet werden, bei allen anderen beatmeten Patienten ist ein V_T von 6–8 ml/kg anzustreben. Dabei sollte eine Berechnung nach idealem und nicht nach tatsächlichem Körpergewicht erfolgen. So kann gewährleistet werden, dass adipöse oder auch kachektische Patienten mit einem adäquaten Tidalvolumen beatmet werden. Zur Berechnung des Idealkörpergewichts können folgende Gleichungen verwendet werden:

- Idealkörpergewicht (männlich) = $50 + 0,91 \times (\text{Höhe in cm} - 152,4)$
- Idealkörpergewicht (weiblich) = $45,5 + 0,91 \times (\text{Höhe in cm} - 152,4)$

Insbesondere bei Verwendung druckkontrollierter Beatmungsmodi können elektronische Warn- bzw. Meldesysteme (siehe Abschnitt 3) und Trainingseinheiten des Personals zu einer Verbesserung der Einhaltung eines protektiven Beatmungsregimes mit kleinen V_T beitragen.

Im Rahmen der Beatmung mit kleinen V_T kann eine permissive Hyperkapnie toleriert werden. Es sollte allerdings bedacht werden, dass eine Hyperkapnie eine pulmonale Hypertension verstärken und somit eine rechtsventrikulärer Dysfunktion aggravieren kann. Weitere Folgen können eine myokardiale Depression und ein reduzierter renaler Blutfluss sein. Schließlich sollte bei einem bereits erhöhten intrazerebralen Druck eine Hyperkapnie vermieden werden.

I:E-Verhältnis

Die Einstellung des Verhältnisses von Inspirations- zur Expirationszeit (I:E-Verhältnis) spielt insbesondere bei ARDS-Patienten und Patienten mit einem hyperkapnischen Lungenversagen eine Rolle. Während eines hyperkapnischen Lungenversagens sollte die

Ösophagusdruckmessung bietet Vorteile – u.a. Untersuchung des transpulmonalen Druckes, der patienteneigenen Atemanstrengung und der Patienten-Ventilator-Asynchronität.

Einstellung des I:E-Verhältnisses entsprechend der Druck- und Flusskurven mit einer möglichst langen Expirationszeit erfolgen. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass es zu keiner klinisch relevanten Reduktion des V_T kommt. Bei ARDS-Patienten hingegen kann aufgrund der verminderten Compliance des respiratorischen Systems ein I:E von 1:1 bis 1:1,5 empfohlen werden. Eine sog. Inverse-Ratio Beatmung sollte hingegen vermieden werden.

Ösophagusdruckmonitoring und transpulmonaler Druck

Der Atemwegsplateaudruck sollte im Rahmen der protektiven maschinellen Beatmung begrenzt werden, vernachlässigt aber den Einfluss des Thorax auf das respiratorische System und ist daher kein guter Parameter für die alveoläre Dehnung. Letzteres wird durch den transpulmonalen Druck gewährleistet, der als Druckdifferenz zwischen Atemwegsöffnung und Pleuraspalt definiert ist. Hierbei stellt der mittels Ösophagusmanometrie erfasste Ösophagusdruck (P_{ESO}) ein einfach messbares Surrogat für den Pleuradruck dar und erlaubt die Bestimmung des Beitrages von Thorax und Lunge zur Lungenmechanik (5). Der mittels P_{ESO} berechnete transpulmonale Druck reflektiert dabei vor allem den Pleuradruck in mittleren und dorsalen Lungenarealen, die end-expiratorisch am ehesten kollabieren. Theoretisch wird dieser end-expiratorische Kollaps durch einen positiven end-expiratorischen transpulmonalen Druck verhindert, sodass die Höhe des PEEP anhand des transpulmonalen Drucks titriert werden kann.

Trotz dieser physiologischen Rationale und obwohl dieses Vorgehen in einer kleinen klinischen Studie die Lungenfunktion und -mechanik bei ARDS-Patienten verbesserte, wird die Ösophagusdruckmessung bei Intensivpatienten aktuell nur sehr selten angewendet (< 1 %). Neben der Bestimmung des transpulmonalen Druckes können auch die patienteneigene Atemanstrengung und die Patient-Ventilator-Asynchronität untersucht werden. Unter Beachtung der technischen Besonderheiten, bspw. der Herstellerangaben zum Füllungsvolumen des Ballonkatheters, und korrekter Katheterlage ist eine sichere und valide Anwendung ohne großen Aufwand möglich und birgt ein großes Potenzial zur Verbesserung des Outcomes. Vor allem bei erhaltener Spontanatmung im ARDS sollte der P_{ESO} gemessen und der inspiratorische transpulmonale Druck auf 20–25 cmH₂O begrenzt werden, um exzessive, potentiell schädliche Atemanstrengungen verhindern zu können. Das Konzept wird aktuell in einer prospektiven, randomisierten, klinischen Studie („EPVent2“) überprüft.

Driving Pressure und transpulmonaler Driving Pressure

Der sogenannte *Driving Pressure* (ΔP), der das Verhältnis von Tidalvolumen und Compliance des respiratorischen Systems repräsentiert und aus der Differenz von Plateau- und end-expiratorischem Druck berechnet werden kann, fand in den letzten Jahren als potentieller Prädiktor der beatmungsassoziierten Lungenschädigung zunehmend Beachtung. Die physiologische Rationale des ΔP bildet die Tatsache, dass im ARDS ein am idealen Körpergewicht orientiertes V_T im Verhältnis zum u.U. stark reduzierten funktionellen Lungenvolumen zu groß sein und zur Lungenschädigung beitragen kann („Baby Lung“-Konzept). Dies soll reduziert bzw. verhindert werden, indem das V_T auf die Compliance, die maßgeblich vom ventilierbaren Volumen abhängt, normalisiert wird. Hierbei könnte der *Driving Pressure* als Index für das funktionelle Lungenvolumen einen verlässlicheren Parameter zur Risikoabschätzung darstellen, da er von Variablen abhängig ist, die im ARDS mit der Letalität assoziiert sind. Der ΔP vernachlässigt jedoch den Einfluss der Thoraxwand, weshalb seine Aussagekraft bei erhaltener Spontanatmung eingeschränkt ist. Die hierbei möglichen starken Auslenkungen des transpulmonalen Druckes können zur Lungenschädigung führen, ohne den ΔP zu beeinflussen. Analog zur Berechnung des transpulmonalen Druckes mittels Ösophagusmanometrie (siehe Abschnitt 7) kann auch der transpulmonale *Driving Pressure* ermittelt werden. Dieser ist unter Umständen ein genauere Parameter für den lungendehnenden Druck als der konventionelle *Driving Pressure*.

In einer Metaanalyse mit 2250 intraoperativ maschinell beatmeten Patienten war ein erhöhter *Driving Pressure* mit einem gesteigerten Risiko für postoperative pulmonale Komplikationen verbunden. In observationellen Studien stellte sich der ΔP darüber hinaus als unabhängiger Risikofaktor für eine erhöhte Letalität von Intensivpatienten mit und ohne ARDS heraus. Es handelt sich somit potentiell um eine Variable, über deren Modifikation eine beatmungsassoziierte Lungenschädigung reduziert bzw. verhindert und das Überleben kritisch Kranker verbessert werden könnte (6). Entgegen dieser positiven Ergebnisse gibt es Hinweise, dass eine ΔP -Sen-

kung mittels erhöhtem end-expiratorischem Druck und Lungenrekrutierungsmanövern die Letalität sogar steigert, wenn diese Maßnahmen zu einer Beeinträchtigung der Hämodynamik führen (7).

Der prognostische Nutzen sowie der zusätzliche Informationsgewinn des ΔP gegenüber dem Plateaudruck oder der Compliance werden kontrovers diskutiert. Zumindest bei Nicht-ARDS-Patienten scheinen ΔP und Plateaudruck redundante Informationen zu transportieren. Weil prospektive, randomisierte klinische Studien noch fehlen, sind Schwellenwerte zur „sicheren Beatmung“ und die aktuell Rolle des ΔP bzw. des transpulmonalen ΔP für den klinischen Alltag noch nicht evaluiert. Vor dem aktuellen

Driving pressure ist ein Risikofaktor für eine erhöhte Letalität von Intensivpatienten mit und ohne ARDS.

Kenntnisstand sollte der *Driving Pressure* bei ARDS-Patienten unter Beachtung der assoziierten Auswirkungen (Hämodynamik etc.) aber begrenzt werden ($\Delta P < 15 \text{ cmH}_2\text{O}$).

Mechanische Beatmungsleistung und -Intensität

Während sich die Beatmungsforschung in den letzten Dekaden vor allem auf die Begrenzung einzelner respiratorischer Parameter fokussiert hat, wird im Konzept der mechanischen Beatmungsleistung (Engl. *Mechanical Power*) die Kombination verschiedener Variablen als Auslöser der beatmungsassoziierten Lungenschädigung gesehen (8). Während ein Teil der applizierten Beatmungsleistung von kinetischer in potentielle Energie umgewandelt und bei Ausatmung wieder abgegeben wird, wird ein anderer Teil auf das respiratorische System übertragen und kann dieses somit schädigen. In Anlehnung an die Bewegungsgleichung kann die Beatmungsleistung wie in Formel 1 dargestellt berechnet werden (8).

Vereinfacht gilt unter Vernachlässigung der resistiven Widerstände und der statischen Komponente des PEEP auch Formel 2.

Formel 1 (oben)
und Formel 2 (unten)

$$\text{Beatmungsleistung} = RR \times \left\{ V_T^2 \times \left(\frac{1}{2} \times ERS + RR \times \frac{(1+I:E)}{60 \times I:E} \times RAW \right) + V_T \times PEEP \right\}$$

$$\text{Beatmungsleistung} = \Delta P \times V_T \times RR$$

Dabei steht RR für Atemfrequenz, VT für Tidalvolumen; ERS für Elastance des respiratorischen Systems, I:E für Inspirations-Expirationszeit-Verhältnis, RAW für Atemwegswiderstand und ΔP für *Driving Pressure*.

Eine beatmungsassoziierte Lungenschädigung trat im Großtiermodell bei ca. 12 J/min und im Kleintier bei ca. 0,160 J/min auf. In einer retrospektiven Studie betrug die mittlere Beatmungsleistung bei verstorbenen ARDS-Patienten ca. 14 J/min. Es zeigte sich ein signifikanter, linearer Zusammenhang zwischen Beatmungsleistung und nicht-adjustierter Letalität. Bei Intensivpatienten ohne ARDS war die Beatmungsleistung mit dem Risiko ein ARDS zu entwickeln assoziiert. Die Patienten, die ein ARDS entwickelten, zeigten eine signifikant höhere Beatmungsleistung, ca. 17 J/min (6).

Eine wesentliche Limitation dieses Konzeptes ist die Abhängigkeit des schädigenden Effektes der Beatmungsleistung von der anatomischen oder funktionellen Größe der Lunge, was vor allem durch die unterschiedlichen Grenzwerte im Groß- und Kleintiermodell verdeutlicht wird. Hieraus leitet sich das Konzept der Beatmungsintensität (Engl. Intensity) ab, bei dem die Leistung auf das funktionelle Lungenvolumen bezogen wird.

Inzwischen bahnt sich ein Paradigmenwechsel vom Open-Lung-Konzept hin zu einem Konzept der partiell geschlossenen Lunge (permissive Atelektasen) an.

Darüber hinaus zeigten tierexperimentelle Studien, dass es trotz niedriger Beatmungsleistung zur Lungenschädigung kommen kann, wenn einzelne Variablen, z.B. V_T , außerhalb bestimmter Grenzen liegen. Die vielversprechenden Konzepte der Beatmungsleistung /-intensität bedürfen intensiver experimenteller und klinisch-prospektiver

Überprüfung, um Grenzwerte und die Bedeutung für die lungenprotektive perioperative Beatmung zu evaluieren.

Positiver endexpiratorischer Druck und Lungenrekrutierungsmanöver

Galten höhere PEEP-Werte teils in Kombination mit Rekrutierungsmanövern (RM) insbesondere im schweren ARDS als empfehlenswert, kann diese Empfehlung spätestens mit Veröffentlichung der Ergebnisse der ART-Studie nicht mehr uneingeschränkt aufrechterhalten werden (7). Die Interventionsgruppe, bei welcher RM mit einem an der Compliance titrierten PEEP kombiniert wurden, zeigte gegenüber der Kontrollgruppe (Beatmung nach ARDS-Netzwerk Protokoll) eine höhere Letalität. Damit bahnt sich ein Paradigmenwechsel vom Open-Lung-Konzept hin zu einem Konzept der partiell geschlossenen Lunge (permissive Atelektasen) an. Zyklisches Öffnen und Schließen von kollabierten Atemwegen (Atelektrauma) soll möglichst verhindert und belüftete Lungenanteile möglichst schonend beatmet werden (9). Auch im Sinne einer Zwerchfellprotektion sollten zu hohe PEEP-Werte vermieden werden, da ein hoher PEEP zu einer Atrophie der longitudinalen Muskelfasern im Zwerchfell führt. Entsprechend der bereits zitierten aktuellen deutschen Leitlinie zur invasiven Beatmung sollte ein PEEP von mindestens 5 cmH₂O angestrebt werden. Eine PEEP-Titration z.B. nach ARDS-Netzwerk-Tabelle sollte eingesetzt werden. Eine weitere, neue Möglichkeit zur einfachen bettseitigen PEEP-Titration stellt die Elektroimpedanztomographie (EIT) dar. Im ARDS und unter assistierter Spontanatmung gibt es Hinweise, dass eher höhere PEEP-Werte (>5 cmH₂O) verwendet werden sollten. Einerseits kann so der Atemantrieb reduziert und andererseits eine homogenere Verteilung des transpulmonalen Drucks erzielt werden. Dadurch kann die beatmungsassoziierte Lungenschädigung in den schwer-

kraftabhängigen Lungenbereichen reduziert werden.

RM sollten nur noch als Rescue-Verfahren im Rahmen einer Hypoxämie eingesetzt und dann möglichst standardisiert durchgeführt werden. Dazu kann z. B. bei konstanter Atemwegsdruckamplitude (ΔP) und niedriger Atemfrequenz ($\sim 6/\text{min}$) der PEEP schrittweise bis zu einem oberen Druckniveau von über $40 \text{ cmH}_2\text{O}$ erhöht werden. In jedem Fall sollten aber vor Beginn des RM stabile hämodynamische Bedingungen vorliegen, da während des RM mit einem Abfall von Blutdruck und Herzfrequenz zu rechnen ist.

Patient-Respirator-Asynchronität

Eine optimale Synchronität von Patient und Respirator kann eine Reduktion der Sedierung ermöglichen. Weiterhin können Angst, Diskomfort, diaphragmatische Dysfunktion und kognitive Beeinträchtigung vermindern sowie die Dauer der mechanischer Beatmung und der beatmungsassoziierten Lungenschädigung reduziert werden. Insbesondere eine Beatmung mit kleinen V_T und kurzen inspiratorischen Zeiten kann zu einer Zunahme von Asynchronität führen. Asynchronität kann mit einer erhöhten Letalität, einem vermindertem Beatmungskomfort und einer erhöhter Atemarbeit assoziiert sein. Allerdings war dieses Ergebnis in der Vergangenheit nicht sicher reproduzierbar. Weiterhin wurde gezeigt dass weniger die sporadisch auftretende Asynchronität als vielmehr die Häufigkeit von Episoden, mit einer hohen Anzahl an nicht synchronen Atemzügen, mit einer erhöhten Letalität assoziiert sind, weshalb ein kontinuierliches Monitoring mit Möglichkeit zur Erkennung der Asynchronität zukünftig vorteilhaft sein könnte. Nach dem Grundsatz einer Anpassung der Beatmungseinstellungen an die Patientenbedürfnisse und nicht anders herum, kann somit eine Muskelrelaxierung bzw. eine Vertiefung der Sedierung vermieden werden.

Nichtinvasive Beatmung

Mittels HFNC kann angewärmter und angefeuchteter Sauerstoff mit einem Flow von bis zu 70 l/min einfach appliziert werden. Die $F_i\text{O}_2$ entspricht dabei nahezu dem eingestell-

ten Wert und kann auf bis zu 100% gesteigert werden. Aufgrund des hohen Flusses kommt es zur Generierung eines PEEP und einem Anstieg des endexpiratorischen Lungenvolumens. Weiterhin kommt es zu einer verringerten Atemarbeit, Auswaschung des Kohlendioxids aus dem anatomischen Totraum

Eine optimale Synchronität von Patient und Respirator kann eine Reduktion der Sedierung ermöglichen. Weiterhin können Angst, Diskomfort, diaphragmatische Dysfunktion und kognitive Beeinträchtigung vermindern sowie die Dauer der mechanischer Beatmung und der beatmungsassoziierten Lungenschädigung reduziert werden.

und einer Reduktion des funktionellen Totraums. Weitere Vorteile der HFNC sind ein hoher Patientenkomfort und ein vergleichsweise geringer Pflegeaufwand. Wenn auch die Studienlage nicht ganz eindeutig ist, so mehrten sich die Hinweise, dass HFNC die (Re)intubationsrate senken, die ITS-Verweildauer reduzieren und die Letalität gegenüber der nichtinvasiven Beatmung (NIV) reduzieren kann (2, 10). Anwendungsbereiche der HFNC sind das hypoxische und hyperkapnische respiratorische Versagen, das akute kardiogene Lungenödem und die unmittelbare postoperative Phase. Noch ist nicht abschließend geklärt welche Patienten am meisten profitieren, wie Therapieversager schnell erkannt und ohne Verzögerung einer Intubation zugeführt werden können.

Bei Patienten mit obstruktiven Lungenerkrankungen und respiratorischer Insuffizienz stellt die NIV das Mittel der Wahl dar. Eine invasive Beatmung sollte erst bei NIV-Versagen erfolgen. Ein externer PEEP (PEEP_{ex}) zur Überwindung des intrinsischen PEEP (PEEP_{intr.}) ($\text{PEEP}_{\text{ex}} = 0,85 \text{ PEEP}_{\text{intr.}}$) kann die Atemarbeit reduzieren. Des Weiteren kann NIV nach langer invasiver Beatmung post extubationem angewendet werden. Für das Gelingen der NIV ist ein gut ge-

schultes Team unumgänglich, da eine engmaschige Patientenüberwachung notwendig ist. Ein NIV-Versagen sollte umgehend erkannt werden können und eine notwendige Intubation nicht herauszögern.

Weaning

Die aktuelle S3-Leitlinie zur invasiven Beatmung empfiehlt, dass ein automatisiertes Weaning zumindest erwogen werden sollte, in jedem Fall aber ein Weaning-Protokoll, das auch die Sedierungstiefe berücksichtigt, Anwendung finden sollte. Weiterhin kann eine Einteilung gemäß Budapester Konsensus-Konferenz (2005) in einfaches, schwieriges und prolongiertes Weaning empfohlen wer-

ger Lungenentzündung ist eine Seitenlagerung auf der Seite der gesunden Lunge zu empfehlen. Neben der bedarfsgerechten Lagerung sollte eine frühe Mobilisierung (spätestens 72 h nach Aufnahme) angestrebt werden.

Auch die Sedierungstiefe hat einen Einfluss auf Letalität, Delirrate und Beatmungsdauer. Deshalb sollte eine Titrierung der Sedierung anhand eines Scores, z. B. der Richmond Agitation Sedation Scale (RASS) mit einem Wert von 0 angestrebt werden. Ein RASS < 0 war in einer kürzlich publizierten Studie mit einer höheren Letalität (180 Tage), einer erhöhten Delirrate und einer späteren Extubation verbunden.

Trotzdem kann eine Muskelrelaxierung aktuell auch im schweren ARDS innerhalb der ersten 48 h nicht empfohlen werden.

Das Flüssigkeitsmanagement sollte eher restriktiv erfolgen und eine enterale Ernährung frühzeitig angestrebt werden.

Inhalatives Stickstoffmonoxid (NO) und inhalative Prostaglandine sowie der Einsatz extrakorporaler Oxygenierungsverfahren (ECMO) sind ausschließlich als Rescue-Verfahren anzusehen. ECMO (veno-venös) kann bei Patienten mit schwerem ARDS und therapierefraktärer Hypoxämie sowie akuter respiratorischer Insuffizienz mit therapierefraktärer Hyperkapnie und respiratorischer Azidose erwogen werden bei Versagen aller anderen Maßnahmen, sollte aber in jedem Fall nur in einem spezialisierten Zentrum durchgeführt werden.

Literatur beim Verlag abrufbar unter plexus@pabst-publishers.com

Bei ARDS Patienten mit einem $\text{PaO}_2/\text{F}_1\text{O}_2 < 150$ mmHg sollte in der initialen Phase eine Bauchlagerung für mindestens 16 h täglich probiert werden.

den. Eine frühe Einteilung ermöglicht eine leitliniengerechte Therapie und kann eine Progression zu einem höheren Schweregrad verhindern. Aufgrund einer zunehmenden Zahl älterer Patienten mit vermehrt schwierigem Weaning sind neue innovative Konzepte in Zukunft dringend notwendig.

Supportive Behandlung und Rescue-Verfahren

Bei ARDS Patienten mit einem $\text{PaO}_2/\text{F}_1\text{O}_2 < 150$ mmHg sollte in der initialen Phase eine Bauchlagerung für mindestens 16 h täglich probiert werden. Trotz eindeutiger Evidenz für einen Outcome relevanten Nutzen der Bauchlagerung, wird sie in der Praxis viel zu selten angewendet (1). Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass das Risiko für Druckulzera und Nervenläsionen erhöht ist und bei abdominalen Adipositas ein erhöhtes Risiko für ein Nieren- und Leberversagen besteht, weshalb die Organfunktion engmaschig überwacht werden sollte. Bei einseiti-

Univ.-Prof. Dr. Marcelo Gama de Abreu

Universitätsklinikum Carl Gustav Carus
Klinik und Poliklinik für Anästhesie und Intensivmedizin
Fetscherstraße 74
01307 Dresden
mgabreu@uniklinikum-dresden.de