

# Aktuelle Konzepte der unterstützten Spontanatmung

## Neue Wege zum differenzierten Weaning

**„Die Entwöhnung beginnt nach der Intubation“. Auf dem Boden der Erkenntnis, dass die maschinelle Beatmung des Patienten mit erheblichen „Kollateralschäden“ einhergeht, kommt der Bemühung, die Beatmungszeit auf das kürzest mögliche Maß zu beschränken, höchste Bedeutung zu. Dieses oft geäußerte Credo ist allerdings häufig schwierig zu realisieren, und das erfolgreiche Weaning erfordert ein über die optimierte Beatmung hinausgehendes Gesamtkonzept, zu dem auch adaptierte Modi der unterstützten Spontanatmung gehören.**

### Hintergrund

Die maschinelle Beatmung ist häufig die einzige therapeutische Option zur Sicherung der Vitalfunktion „Gasaustausch“ bei Störungen des Atemantriebs, bei Versagen der muskulären Atempumpe oder bei Funktionsverlust des Lungenparenchyms. Künstliche Beatmung stellt somit in der Regel eine lebenserhaltende „Rescue“-Maßnahme dar. Allerdings ist in den letzten Jahren zunehmend klar geworden, dass die positive Druckbeatmung zahlreiche unerwünschte und schädliche Aspekte enthält [1]. Zu diesen zählen insbesondere die beatmungsinduzierte Lungenschädigung („ventilator-induced lung injury“, VILI, [2]) und beatmungsinduzierte Pneumonien, Weichteilschäden im Gesicht (Maske),

Irritationen laryngealer und trachealer Strukturen, Folgeschäden der Sediierung (Hypotonie, Entzugssyndrom, Delir) und – „last but not least“ – der Funktionsverlust der muskulären Atempumpe sowie allgemeine Folgen der Immobilisierung [3].

In einer eindrucksvollen Studie an hirntoten Organspendern wurde gezeigt, dass die Dauer einer kontrollierten Beatmung von 24 h zu einem gravierenden Funktionsverlust der Muskelstruktur des Diaphragmas führt [4]. In Anlehnung an VILI wird heute akzeptiert, dass die (kontrollierte) positive Druckbeatmung nicht nur das Lungenparenchym, sondern die muskuläre Atempumpe nachhaltig schädigt („ventilator-induced diaphragmatic dysfunction“, VIDD, [5]).

Die Ausprägung all dieser beschriebenen „Kollateralschäden“ der maschinellen Beatmung ist abhängig vom Grad der Beatmungsinvasivität sowie von Dauer und Schwere der zugrunde liegenden Erkrankung. In einer großen prospektiven Kohortenstudie an über 2000 beatmeten Patienten konnte gezeigt werden, dass die Dauer der Beatmung *per se* – unabhängig von der Grunderkrankung – ein mortalitätserhöhender Faktor ist. Statistisch gesehen ist eine Beatmungszeit von 3 Wochen und länger mit einer 50%igen Mortalität verknüpft – unabhängig von der Schwere der Grunderkrankung [6].

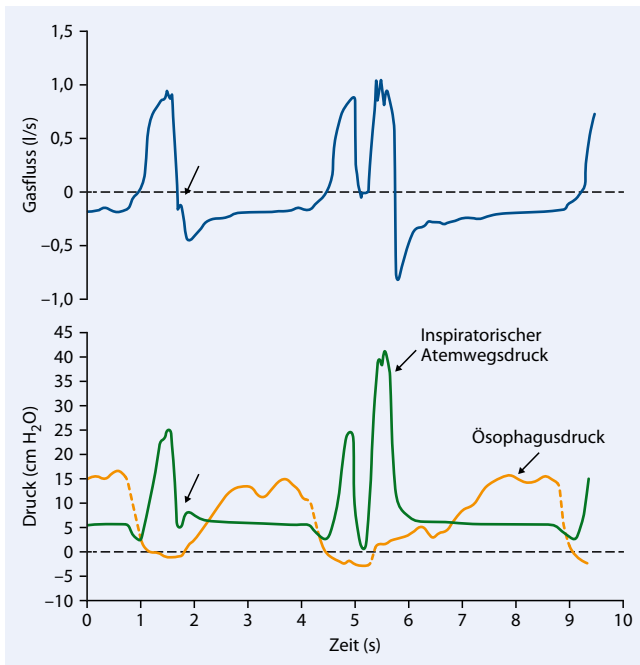
Zahlreiche wissenschaftliche Beiträge zur Entwöhnung von der Beatmung (Weaning) legen nahe, dass dieser As-

pekt der Intensivbehandlung oft eine klinische Hürde darstellt, zumal die Probleme der Entwöhnung vielschichtig sind (Herz-Kreislauf-Instabilität, nichtausreichende Vigilanz, Delir, Fieber, Katabolie) und ein erfolgreiches Weaning ein über die optimierte Beatmung hinausgehendes Gesamtkonzept erfordert. In einer Internationalen Konsensuskonferenz [7] wurde 2005 ein strukturiertes Vorgehen beim Weaning vorgeschlagen; darüber hinaus wurden 3 Formen der Entwöhnung entsprechend des erzielten Erfolgs definiert (einfach, erschwert und prolongiert).

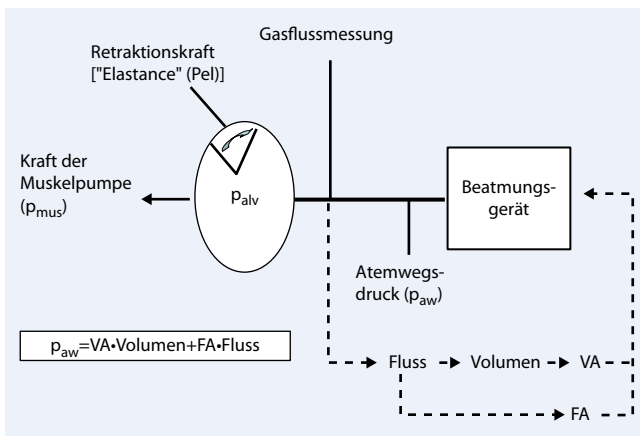
### Erfolgreiche Entwöhnung von der (Langzeit-)Beatmung

Penuelas et al. [8] haben kürzlich in einer umfangreichen prospektiven Untersuchung an 2714 Patienten, die mindestens 12 h beatmet waren, eine Kategorisierung der Entwöhnungsbedingungen vorgenommen:

- **Einfache Entwöhnung:** Es ließen sich 50% der Patienten unterschiedlicher Intensivstationen problemlos nach dem ersten Spontanatmungsversuch extubieren. [Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung („chronic obstructive pulmonary disease“, COPD) waren ausgeschlossen.]
- **Erschwerte Entwöhnung:** Bei 39% der Patienten waren bis zu 3 Spontanatmungsversuche an aufeinanderfolgenden Tagen notwendig.



**Abb. 1** ◀ Gasfluss, Beatmungs- und Ösophagusdruck bei akutem Lungenversagen, der kontrolliert beatmet wird („assist/control“). Beim ersten Atemzug beginnt der Patient während der vom Ventilator gesteuerten Ausatemphase frühzeitig mit der Inspiration (Pfeile) und löst eine Asynchronie aus. Beim zweiten Atemzug findet eine „doppelte“ Inspiration statt, die die „Atemarchitektur“ massiv stört. (Aus [18])



**Abb. 2** ◀ Schematische Darstellung von „proportional assist ventilation“ als Konzept, durch modulierte Fluss- (FA, „flow assist“) und Volumenunterstützung (VA, „volume assist“) eine bedarfsadaptierte unterstützende Beatmung zu ermöglichen. (Modifiziert nach [24])

■ **Prolongierte Entwöhnung:** Bei 154 Patienten (6%) waren mehr als 3 Spontanatmungsversuche erfolglos.

Überschritt die Entwöhnungsphase die Zeitdauer von 7 Tagen, stieg die Mortalität von 6 auf 12% an. In der Multivarianzanalyse wurden als Risikofaktoren einer prolongierten Entwöhnung das hohe Patientenalter, die erhöhte Erkrankungsschwere (Simplified Acute Physiology Score, SAPS-II), ein hoher positiver endexpiratorischer Druck („positive end-expiratory pressure“, PEEP) und die Dauer der Beatmung vor Weaning-Beginn identifiziert. Da die Dauer der Beatmung mit den entsprechenden nachteiligen Effekten auf die Atemmuskulatur als Risikofaktor für erschwertes oder erfolgloses Weaning gilt [9], kommt der effizienten unterstützten

Spontanatmung eine supportive Bedeutung zu. Xirouchaki et al. [10] konnten in einer randomisierten Studie an 208 Patienten belegen, dass die unterstützte Spontanatmung mithilfe eines bedarfsadaptierten Modus („proportional assist ventilation“, PAV) bezüglich der Schnelligkeit der Entwöhnung der „klassischen“ druckunterstützten Beatmung überlegen war. Der frühzeitige Einsatz solcher Verfahren sollte daher in einem „Weaning-Bündel“ Platz finden ([11, 12]; ■ Tab. 1).

Die Frage, welches unterstützte Spontanatmungsverfahren (uSpA) bzw. welche Entwöhnungsprozedur am günstigsten für das Training der muskulären Atempumpe und die erfolgreiche Extubation ist, ist in den letzten Jahrzehnten Gegenstand zahlreicher klinischer Untersuchungen gewesen (Übersicht in [9]).

Die durchgehende Anwendung der klassischen druckunterstützten Beatmung („pressure support ventilation“, PSV) mit gradueller Reduktion und die intermittierende Anwendung von beatmungsfreien Intervallen mit Sauerstoffsufflation („T-Stück“) wurden in ähnlicher Weise als Weaning-Methode der Wahl angesehen, während die „historischen“ gemischten kontrolliert-spontanen Beatmungsmodi („synchronized intermittent mandatory ventilation“, SIMV) nicht mehr angewendet werden sollen. Entscheidende Steigerungen der Rate erfolgreicher Entwöhnungen wurden erst durch Maßnahmen geschaffen, die nicht unmittelbar mit dem Beatmungsmodus assoziiert waren: Die tägliche Unterbrechung der Sedierung [11, 12] mit Aufwachversuch [13] und die Einführung von Entwöhnungsprotokollen oder „Weaning-Algorithmen“ [14] haben erheblich zur Verbesserung der Entwöhnung beigetragen und das praktische Vorgehen beeinflusst.

Die Rolle von PSV als der „klassischen“ uSpA wird derzeit unter neueren atemphysiologischen Erkenntnissen kritischer gesehen, da man annimmt, dass eine gleichförmige, voreingestellte Druckunterstützung einem variablen „Breath-by-breath“-Atemmuster des „trainierenden“ Patienten nicht ausreichend gerecht wird. Außerdem ist in den letzten Jahren deutlich geworden, dass die Synchronisierung zwischen Beatmungsgerät und Patient ein hohes Qualitätskriterium der uSpA darstellt, da die eingeschränkte Abstimmung („Dyssynchronie“) oder gar die komplette Ingruenz („Asynchronie“) der Aktivitäten von Ventilator und Patient die Atemarbeit deutlich erhöhen [15] und den beatmungsinduzierten Lungenschäden steigern [16].

### Eingeschränkte oder fehlende Synchronie von Beatmungsgerät und Patient

Die Interaktion von Patient und Beatmungsgerät stand in den letzten Jahrzehnten immer wieder im Fokus wissenschaftlicher Studien und technischer Entwicklungen. In letzter Zeit wird diesem speziellen Aspekt der Beatmung allerdings erheblich mehr Interesse gewidmet, seit die Begriffe „beatmungsinduzierter Lun-

genschaden“, „Dysfunktion und Atrophie der muskulären Atempumpe“ sowie „frühe unterstützte Spontanatmung“ die Diskussion beherrschen. Auf der einen Seite besteht die Forderung, in (nahezu) jeder Phase der Beatmung eine aktive Beteiligung der Atemmuskeln zu gewährleisten. Auf der anderen Seite wurde deutlich, dass eine unzureichende oder fehlende Abstimmung solcher Aktivität mit derjenigen des Beatmungsgeräts („patient-ventilator asynchron“) zur ineffektiven Beatmung führt, die eine Verschlechterung des Gasaustausches, eine Überblähung der Lungen, eine erhöhte Atemarbeit sowie Dyskomfort des Patienten mit Unruhe und Stress induzieren kann [17]. In klinischer Konsequenz und ohne Kenntnis des zugrunde liegenden Mechanismus ist das Behandlungsteam häufig geneigt, die Sedierung zu vertiefen, den kontrollierten Beatmungsanteil zu erhöhen und somit die Beatmungszeit mit allen unerwünschten „Kollateralschäden“ zu verlängern. Als Elemente einer gestörten Interaktion zwischen Patient und Ventilator wurden identifiziert (■ **Abb. 1**; [18]):

- aktiver Abbruch der Inspiration (ungenügender Atemhub),
- aktive Expiration („Pressen“ gegen den Respirator),
- ineffektives Triggering (zeitliche Verzögerung, „trigger delay“),
- Überbeatmung („overflow“) und
- unzureichende Unterstützung („underflow“).

Der gesamte Beatmungsdruck während künstlicher Beatmung kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden [16]:

Gleichung 1:

$$p_{\text{total}} = V \cdot E + \tilde{V} \cdot R$$

wobei „ $p_{\text{total}}$ “ den gesamten Beatmungsdruck darstellt, der sich aus dem Produkt des Lungenvolumens („ $V$ “) und der „elastance“ des respiratorischen Systems („ $E$ “) plus dem Produkt aus Gasfluss („ $\tilde{V}$ “) und Atemwegswiderstand („ $R$ “) ergibt.

Wenn Patienten zusätzlich zur Aktivität des Beatmungsgeräts an der Atmung teilnehmen, besteht  $p_{\text{total}}$  aus 2 Komponenten [Druck des Beatmungsgeräts („ $p_{\text{vent}}$ “) und Druck der Patientenatmung

Anaesthesist 2014 · 63:279–286 DOI 10.1007/s00101-013-2272-9  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

T. Bein

## Aktuelle Konzepte der unterstützten Spontanatmung. Neue Wege zum differenzierten Weaning

### Zusammenfassung

Die unterstützte Spontanatmung ist ein wichtiger Teil im Konzept der Entwöhnung von der Beatmung (Weaning), und zahlreiche Studien legen die besondere Bedeutung der frühzeitigen aktiven Beteiligung der muskulären Atempumpe an der erfolgreichen Extubation des (Langzeit-)beatmeten Patienten nahe. Auf der anderen Seite wurde durch atemphysiologische Untersuchungen auf das Problem „patient-ventilator interaction“ hingewiesen und aufgezeigt, dass es unter Anwendung der „klassischen“ kontrollierten und unterstützenden Beatmungsmodi häufig – klinisch unbemerkt – zu Asynchronien zwischen Patient und Ventilator kommt. Solche Asynchronien (ineffektives „triggering“, aktiver Abbruch der Inspiration, Überbeatmung und unzureichende Unterstützung) verschlechtern – in Abhängigkeit von Häufigkeit und Schweregrad – den pulmonalen Gasaustausch, verstärken den schädlichen Aspekt der Beatmung und können den erfolgreichen Verlauf beeinträchtigen. Unterstützende Beatmungstechniken [„proportional assist ven-

tilation“ (PAV), „adaptive support ventilation“ (ASV), „neurally adjusted ventilatory support“ (NAVA)], die den Anspruch haben, durch elektronische oder physiologische Rückkopplungssysteme mit der Atemaktivität des Patienten eine bedarfsadaptierte Unterstützung anzubieten, wurden vor über 20 Jahren entwickelt und erfahren derzeit eine Wiederentdeckung. In kleineren Studien ist teilweise überzeugend gezeigt worden, dass solche innovativen Verfahren die Häufigkeit von Asynchronien reduzieren und die adaptierte Atemarbeit des Patienten verbessern. Obwohl große, randomisierte Studien mit Nachweis einer Outcome-Beeinflussung noch fehlen, ist anzunehmen, dass sich die Anwendung solcher adaptierter Beatmungsmodi im Weaning-Prozess durchsetzen wird.

### Schlüsselwörter

Mechanische Beatmung · „Proportional assist ventilation“ · „Neurally adjusted ventilatory assist“ · Mortalität · Atemarbeit

## Current concepts of augmented spontaneous breathing. New modes of effort-adapted weaning

### Abstract

The use of augmented spontaneous breathing is an important component in a bundle concept of weaning from mechanical ventilation as it was demonstrated that controlled ventilation with diaphragmatic underuse induces rapid muscle atrophy and impairs successful weaning. On the other hand spontaneous breathing is often associated with disturbed patient-ventilator interaction resulting in asynchrony (e.g. ineffective triggering, early termination of inspiration and overflow or underflow). It was shown that asynchrony can impair gas exchange, increase work of breathing and enhance deleterious aspects of mechanical ventilation. Concepts of assisted breathing, such as proportional assist ventilation (PAV), adaptive support ventilation (ASV) and neurally adjusted ventilatory support (NAVA), which are intended to increase effort-adapted spontaneous breath-

ing by an electronic or physiological closed loop feedback system with the patient's work of breathing were developed more than 20 years ago and are currently experiencing a renaissance. It was shown in some smaller clinical investigations that these newer modes are able to improve patient-ventilator interaction, to reduce the burden on respiratory muscles and to increase ventilation comfort. Although large randomized controlled studies are lacking, effort-adapted modes of augmented breathing will become a routine part in the management of weaning from mechanical ventilation.

### Keywords

Mechanical ventilation · Proportional assist ventilation · Neurally adjusted ventilatory assist · Mortality · Work of breathing

(„ $p_{\text{pat}}$ “)]. Diese addieren sich, sodass die Bedeutung der Dyssynchronie zwischen Beatmungsgerät und Patient folgendermaßen gefasst werden kann:

Gleichung 2:

$$p_{\text{total}} = p_{\text{vent}} + p_{\text{pat}}$$

mit der Folge, dass sich die Beatmungs-

**Tab. 1** „Weaning bundle“ zur erfolgreichen Entwöhnung von der Beatmung. (Modifiziert nach [11, 12])

Element	Rationale
Tägliche Überprüfung der Notwendigkeit zur maschinellen Beatmung	Die Dauer der Beatmung <i>per se</i> beeinflusst die Mortalität. Die Beatmungsdauer soll so kurz wie möglich gehalten werden
Frühzeitiger Einsatz unterstützter Spontanatmung	Vermeidung/Reduktion der diaphragmalen Insuffizienz durch Training der Muskelpumpe. Vermeidung von Übersiedierung, Delir, „Critical-illness“-Neuro-/Myopathie
Tägliche Durchführung eines Weaning-Protokolls mit Spontanatmungsversuch	Vermeidung von prolongiertem Weaning oder Selbstextubation
Korrektur von Fehlernährung, Elektrolytbalancen, hämodynamischer Instabilität oder metabolischen Krisen (z. B. Fieber)	Kachexie, schwere Anämie, erhöhte CO <sub>2</sub> -Produktion, Hypotension begünstigen das Weaning-Versagen
Einsatz der nichtinvasiven Beatmung nach Extubation	Vermeidung der Reintubation bei bestimmten Risikokonstellationen
CO <sub>2</sub> Kohlenstoffdioxid.	

drücke durch Asynchronie summieren und eine schädliche Dimension erreichen können.

Wie häufig sind Asynchronien/Dysynchronien im klinischen Alltag, und wie sind sie zu bewerten [19]? In einer Analyse der Inzidenz von Asynchronien, erfasst durch Ableitung der diaphragmalen elektrischen Aktivität konnten Nava et al. [20] ein gehäuftes Auftreten ineffektiver Atemanstrengungen als Ausdruck der Asynchronie bei 100% der beatmeten Patienten mit COPD und Überblähung feststellen. Die Häufigkeit solcher asynchroner Ereignisse war bei „Acute-respiratory-distress-syndrom“ (ARDS)-Patienten (30%) und bei postoperativ beatmeten Patienten (42%) insgesamt niedriger, aber von klinischer Relevanz. Bezüglich der Art der Asynchronie wurden am häufigsten die verzögerte Beendigung der Inspiration („delayed cycling“, 23%), gefolgt von doppelter Triggerung (15%), Auto-triggerung (13%), ineffektiver Unterstützung (12%) und zu früher Beendigung der Inspiration (12%) gefunden. Die Bedeutung von häufigen Asynchronieepisodes für das Patienten-Outcome ist derzeit noch nicht ausreichend untersucht. In einer prospektiven Beobachtungsstudie [21] an einer kleinen Patientenzahl wurden Hinweise gefunden, dass eine Häufigkeit ineffektiver Atemanstrengungen mit Dyssynchronie („ineffective-effort index“) von mehr als 10% mit einem schlechteren Überleben verknüpft war: Patienten mit einem Dyssynchronieein-

dex >10% hatten eine längere Beatmungszeit (6 vs. 2 Tage,  $p < 0,05$ ), einen längeren Intensivstationsaufenthalt (8 vs. 4 Tage,  $p < 0,05$ ) und einen Trend zur höheren Hospitalmortalität (30% vs. 20%) im Vergleich zu Patienten mit geringerem Index. Obwohl hier noch große Studien mit eindeutig interpretierbaren Daten fehlen, ist dieser Hinweis von klinischer Bedeutung. Als Fazit ist die Forderung abzuleiten, dass besonders die Beatmungsformen mit Spontanatmungsteil kritisch auf die Kompetenz zu überprüfen sind, ob und in welchem Ausmaß das Kriterium „Synchronizität zwischen Patient und Beatmungsgerät“ eingehalten wird.

### Druckunterstützte Spontanatmung

Das PSV-Konzept mit den Synonymen „assisted spontaneous breathing“ (ASB), „inspiratory pressure support“ (IPS) oder „inspiratory flow assistance“ (IFA) besteht darin, dass jede Einatembemühung des Patienten einen Gasstrom auslöst, der bis zum Erreichen eines vorgewählten inspiratorischen Druckniveaus beibehalten wird, wobei anschließend eine „flow“- oder druckgesteuerte Umschaltung in die Expiration erfolgt. Diese Methode ist nur bei intaktem Atemtrieb anwendbar. Sie gilt bisher als die „klassische“ Weaning-Methode, da ein Training der muskulären Atempumpe durch dieses Verfahren angenommen wird, und theoretisch die schrittweise Reduktion des inspiratori-

schen Unterstützungsdrucks eine „graduelle“ Übertragung der Ventilation auf den Patienten ermöglicht, bis die Extubation vorgenommen werden kann. Eine adäquate Entwöhnung mithilfe der PSV setzt also die engmaschige Überwachung und Titrierung des Unterstützungsdrucks voraus, um den Trainingseffekt beim Patienten sowie die verbesserte Atemmechanik zu erkennen und im Beatmungsmodus umzusetzen.

Als Nachteil von PSV wird seit Längerem erkannt, dass die Höhe der Druckunterstützung im klinischen Alltag willkürlich und subjektiv eingestellt oder nach dem erzielten Tidalvolumen „getriggert“ wird [22]. Hierbei bleibt allerdings unklar, ob die gewählte uniforme Druckunterstützung den aktuellen und adäquaten Trainingsbedarf der muskulären Pumpe des Patienten überhaupt trifft, oder ob nicht bei einem Großteil der Atemexkursionen entweder ein Überangebot („overflow“) ohne Trainingseffekt oder eine Unterversorgung („underflow“) mit erhöhter Atemanstrengung vorliegt. Beide Phänomene sind in der Entwöhnungsphase unerwünscht und kontraproduktiv, da sie entweder einer kontrollierten Beatmung gleichen (Overflow) oder „Luft-hunger“ und Stress induzieren (Underflow).

### „Proportional assist ventilation“

Bei der unterstützenden Beatmungsform PAV (Synonym „proportional pressure support“, PPS) handelt es sich um die Modifikation einer augmentierenden Spontanventilation, die 1992 erstmalig durch Younes [23] vorgestellt wurde. Mithilfe einer ausgefeilten Mikroprozessortechnik wird die „Ad-hoc“-Analyse der aktuellen Dehnbarkeit (dynamische „compliance“) und des Atemwegwiderstands („resistance“) auf einer Breath-by-breath-Ebene vorgenommen und diese Analyse unmittelbar in die Beatmung umgesetzt. Die Rationale hierbei ist die Etablierung einer rasch reagierenden und besser auf die individuelle aktuelle Atemarbeit des Patienten eingestellten Unterstützung durch den Respirator. Ziele sind die Reduktion der Atemarbeit und die Verbesserung der Synchronizität zwischen Patient und Beatmungsgerät.

Hier steht eine Anzeige.



**Tab. 2** Neuere Modi unterstützter Spontanatmung

Modus unterstützter Spontanatmung	Asynchronieindex, Synchronieeffekt	Effekt des pulmonalen Gasaustausches	Anwendung	Weaning-Outcome
PSV „Pressure support ventilation“	Asynchronie häufig, Index >10%	–	Einfach	Weaning-Versagen ca. 10%
PAV „Proportional assist ventilation“	Asynchronie ↓ ↓ Reduktion des „trigger delay“, Vermeidung von Über- und Unterbeatmung Vermeidung aktiver Expiration („Pressen“)	Verbesserte Oxygenierung	Einfach	Weaning verbessert
ASV „Adaptive support ventilation“	Asynchronie ↓ Reduktion des Trigger delay	–	Einfach	Weaning verbessert
NA-VA „Neurally adjusted ventilatory assist“	Asynchronie ↓ ↓ Reduktion des Trigger delay, Vermeidung von Über- und Unterbeatmung Vermeidung aktiver Expiration („Pressen“)	Verbesserte Oxygenierung	Aufwendigere Vorbereitung und Überwachung Routine erforderlich	Weaning verbessert

Die Übersicht bezieht sich auf die aktuelle Datenlage (meist kleinere Observationsstudien).

Als physiologische Grundlage für diesen Beatmungsmodus dient folgende Gleichung, die die Atemmechanik unter Spontanatmung beschreibt [24]:

Gleichung 3:

$$p_{mus} = \tilde{V} \cdot Rrs + V \cdot Ers + Pel_{EE}$$

Den durch die muskuläre Atempumpe in Summe generierten Druck drückt „ $p_{mus}$ “ aus. „ $\tilde{V}$ “ entspricht dem inspiratorischen Gasfluss und „ $Rrs$ “ sowie „ $Ers$ “ der Resistance und Elastance des respiratorischen Systems. „ $V$ “ bezeichnet das Gasvolumen oberhalb des endexpiratorischen Volumens (näherungsweise: endexpiratorischer PEEP) und „ $Pel_{EE}$ “ den elastischen Rückstelldruck am Ende der Expiration. Bei beatmeten Patienten wird die Gleichung 3 nun in die Druckverhältnisse des gesamten Beatmungssystems („ $p_{tot}$ “) eingefügt:

Gleichung 4:

$$p_{tot} = p_{mus} + p_{aw} = \tilde{V} \cdot Rrs + V \cdot Ers + Pel_{EE}$$

Dies bedeutet, dass der mechanisch erzeugte inspiratorische Druck sich zu „ $p_{mus}$ “ addiert. Mit PAV wird „ $p_{aw}$ “ durch

elektronische Rückkopplung zu einer Funktion des inspiratorischen Gasflusses („ $\tilde{V}$ “) und des endexpiratorisch verbleibenden Volumens („ $V$ “) nach Gleichung 5 und 2:

Gleichung 5:

$$p_{aw} = VA \cdot V + FA \cdot \tilde{V}$$

wobei „ $VA$ “ einem durch PAV applizierten „volume assist“ (cm H<sub>2</sub>O/l) und  $FA$  einem „flow assist“ (cm H<sub>2</sub>O/l/s) entspricht.

In die praktische Anwendung umgesetzt bedeutet dies, dass PAV durch die ständige Messung der Compliance und Resistance die aktuelle graduelle Atemanstrengung des Patienten ( $p_{mus}$ ) näherungsweise nach einem hinterlegten mathematischen Modell erfasst und Breath-by-breath eine graduelle Unterstützung mithilfe von flow assist und volume assist anbietet. Vereinfacht kann man PAV auch als eingebaute „Servolenkung“ der unterstützten Spontanatmung bezeichnen: Eine starke Atemanstrengung ( $p_{mus} \uparrow$ ) wird mit hoher Fluss-/Volumenunterstützung beantwortet, während eine geringe Atemanstrengung ( $p_{mus} \downarrow$ ) von einem geringen Assist gefolgt wird. Hiermit sollen Over- und Underflow reduziert oder vermieden

werden. Die „Härte“ der Servolenkung kann graduell durch prozentualen Support eingestellt werden. Auf dem Display des Beatmungsgeräts (Bennett 840, Fa. Covidien, Deutschland) ist visuell das aktuelle „work of breathing“ (WOB) dynamisch ablesbar. Hiermit kann der für den individuellen Patienten optimale generelle Unterstützungsgrad von PAV ermittelt werden. Proportional assist ventilation ist allerdings nicht erfolgreich einsetzbar bei hohem intrinsischem PEEP mit Überblähung, bei klinisch wirksamen Leckagen (z. B. Parenchymfisteln), bei ausgeprägter Muskelschwäche der Atempumpe (z. B. „Critical-illness“-Poly-/Myopathie) sowie bei schwerer COPD, da unter diesen Bedingungen der mathematische PAV-Algorithmus versagt. Die differenzierte Einstellung der PAV-Unterstützung erfordert ein sorgfältiges Vorgehen, da eine über die Patientenbedürfnisse hinausgehende zu hohe Einstellung der Unterstützung ein „Runaway-Phänomen“ produzieren kann, das sich in der Fortführung der Gasfluss- und Druckapplikation äußert, obwohl der Patient bereit zur Ausatmung ist.

### „Neurally adjusted ventilatory assist“

Neurally adjusted ventilatory assist (NAVA) stellt einen innovativen Ansatz zur unterstützten Beatmung dar, der sich dadurch auszeichnet, dass die elektrische Aktivität des Zwerchfells („electrical activity of diaphragm“, Edi) mithilfe der Sensoren einer speziellen Sonde, die nasogastral platziert wird, erfasst und die unterstützende Aktivität des Beatmungsgeräts hierüber gesteuert wird [25]. Über NAVA wurde von Moerer et al. [26] in einer umfassenden Übersicht berichtet. Die direkte Kopplung zwischen der diaphragmalen Aktivität des Patienten und der angepassten Applikation einer entsprechenden Unterstützung durch den Respirator dient dem Erhalt der Biovariabilität des Atemmusters. Die erfolgreiche Anwendung von NAVA erfordert die korrekte Platzierung der mit Ringelektroden versehenen Sonde; diese sollte auch bei zunehmend mobilen und im Weaning-Prozess befindlichen Patienten nicht dislozieren, um eine gute Funktionsfähigkeit aufrechtzuerhalten. Der für den NAVA-

Betrieb ausgestattete Respirator (Servo i, Fa. Maquet, Schweden) verfügt über eine elektronische Platzierungshilfe.

In mehreren Studien (zusammengefasst in [27]) wurde gezeigt, dass die unterstützende Beatmung mit NAVA günstige Effekte auf die „Ökonomisierung“ der Atemarbeit im Sinne der Reduktion ineffektiver Atemaktionen zeigt, und die Synchronisation zwischen Patient und Beatmung deutlich verbessert wird. Neurally adjusted ventilatory assist stellt ein attraktives und „physiologisches“ Konzept zur unterstützten Spontanatmung dar, allerdings weist dieses Verfahren auch Limitationen auf: Der kontinuierliche und störungsfreie NAVA-Betrieb setzt die Platzierung und den „In-situ“-Verbleib der speziellen Sonde voraus. Hierfür sind ein gewisses Training sowie erhöhte pflegende und ärztliche Zuwendung zum Patienten notwendig. Darüber hinaus gibt es Patientengruppen, die möglicherweise von NAVA nicht profitieren: In Situationen mit gesteigertem Atemantrieb (neurologische Erkrankungen, ausgeprägtes Delir) kann durch NAVA eine inadäquate Hyperventilation provoziert werden. Patienten mit schwerwiegender Schädigung der muskulären Atempumpe, z. B. bei Langzeitbeatmung, können zunächst mit der NAVA-Beatmung überfordert sein. Auf der anderen Seite erwies sich NAVA im Einsatz bei postoperativen Patienten, z. B. nach kardiochirurgischen Eingriffen, oder bei akuter respiratorischer Insuffizienz bei COPD („acute-on-chronic“) als überlegen und patientenverträglicher im Vergleich zu anderen unterstützenden Spontanatmungsformen [28].

### „Adaptive support ventilation“

Das Konzept der Adaptive support ventilation (ASV) beinhaltet ein computergestütztes „Closed-loop“-Modell, das auf der Basis vorgegebener Variablen (ideales Körpergewicht, minimal gewünschtes Atemminutenvolumen, Druckbegrenzung) innerhalb eines gesetzten Rahmens kontrollierte und unterstützte Atemhübe abgibt. Hierbei wird – ähnlich wie bei PAV – engmaschig automatisiert die Atemmechanik des Patienten näherungsweise bestimmt (dynamische Complian-

ce, expiratorischer Gasfluss, [29]). Ein mathematischer Algorithmus gibt ständig das Tidalvolumen und die Atemfrequenz entsprechend der aktuellen Atemmechanik vor, mit dem Ziel, innerhalb der gesetzten Grenzen die Atemarbeit („work of breathing“) zu optimieren.

Im Vergleich zu PAV muss der Anwender von ASV zunächst „Sicherheitsgrenzen“ (z. B. minimales Atemminutenvolumen, maximale Atemfrequenz) vorgeben und Beatmungsziele definieren. Vom theoretischen Anspruch ist ASV sowohl bei kompletter Inaktivität des Patienten im kontrollierten Modus als auch beim wachen Patienten mit uneingeschränkter Spontanatmung einsetzbar, da ASV – im Gegensatz zu PAV oder NAVA – bei Apnoe das „Kommando“ übernimmt. Adaptive support ventilation soll somit einen fließenden kontinuierlichen Übergang ermöglichen – ohne die Notwendigkeit der Änderung des Beatmungsmodus. Da auch bei dieser Beatmungstechnik rasch erkannt wurde, dass ein solches einfaches Closed-loop-System nicht für alle Patienten zuverlässig anwendbar ist und unter bestimmten Bedingungen (z. B. erhöhter Totraum bei hohem PEEP) dieses System fehlgesteuert wird, wurden zusätzliche Stellgrößen integriert (Kapnographie, Pulsoxymetrie). Adaptive support ventilation ist allerdings nach wie vor nicht zuverlässig einsetzbar bei Patienten mit komplexen Formen des Lungenversagens oder mit Störungen des Atemantriebs (z. B. neurologische Erkrankungen, Delir), denn auch bei diesem Verfahren ist ein Runaway-Phänomen möglich. Im Weaning-Prozess wurde im Vergleich zur PSV-Beatmung in kleineren Studien die Überlegenheit von ASV bezüglich Weaning-Dauer und -Erfolg gezeigt [30, 31, 32].

### Wissenschaftliche und klinische Bewertung

Für die dargestellten neueren Verfahren werden verschiedene Vorteile propagiert (verbesserte Synchronizität, Lungenprotektion, Steigerung von Atemmechanik und Gasaustausch sowie verbesserte Entwöhnung), die im Folgenden anhand der klinisch-wissenschaftlichen Daten kritisch bewertet werden (■ Tab. 2).

Die Bedeutung der eingeschränkten Synchronizität oder fehlenden Patient-Ventilator-Interaktion wurde oben dargestellt. Verschiedene klinische Studien haben Quantität und Qualität von Dyssynchronien bei beatmeten Intensivpatienten untersucht, indem die Untersucher die über Elektroden abgeleitete Zwerchfellaktivität mit der Aktivität des Beatmungsgeräts zeitsynchron verglichen. Als „Kontrollgruppe“ für neuere uSpA-Modi wurde meist die „klassische“ PSV-Beatmung herangezogen. In einer Untersuchung von Grasso et al. [22] an beatmeten Patienten mit akuter respiratorischer Insuffizienz wurde während PAV-Beatmung nicht nur eine verbesserte Atemmechanik, sondern auch eine gesteigerte Synchronizität im Vergleich zu PSV beobachtet. Bosma et al. [33] zeigten mit ähnlichem Ergebnis einen niedrigeren Asynchronieindex während PAV, verbunden mit einer gesteigerten Qualität des Schlafs von Intensivpatienten. In mehreren Studien (zusammengefasst in [27]) wurden eine höhere Biovariabilität, ein physiologischeres Atemmuster und ein größerer Patientenkomfort bei PAV im Vergleich zu PSV gefunden. In einer weiteren Studie an Patienten mit erschwertem Weaning wurde während PAV+-Beatmung (Weiterentwicklung von PAV) nahezu kein Auftreten einer wirksamen Asynchronie festgestellt, während unter PSV der Asynchronieindex >10% betrug [34].

Für ASV ist die Studienlage eingeschränkt: In einer randomisierten Studie wurde eine verbesserte Patient-Ventilator-Interaktion mit ASV im Vergleich mit SIMV festgestellt, das bei vielen Anwendern bereits als „historisches“ Weaning-Verfahren gilt [35]. In einer weiteren Studie an Patienten nach kardio- oder thoraxchirurgischen Operationen wurde ASV als geeignet zum „automatisierten Weaning“ befunden [30], allerdings wurde keine Verkürzung der Beatmungszeit im Vergleich zu PSV nachgewiesen.

Ebenfalls noch wenige, aber durchaus überzeugende Ergebnisse klinischer Studien liegen für den Einsatz von NAVA vor: Im Vergleich zu PSV wurden in mehreren Studien [36, 37, 38] während NAVA-Anwendung eine deutlich gesteigerte Synchronizität und Harmonisierung der Interaktion von Patient und Beatmungs-

gerät sowie eine bessere Schlafqualität beatmeter Patienten erreicht. In letzter Zeit werden zunehmend positive Ergebnisse des NAVA im nichtinvasiven Modus mit Maskenapplikation berichtet [39]. Allerdings fehlen für NAVA noch überzeugende prospektive randomisierte Outcome-Studien mit dem Nachweis eines effizienteren Weanings in Form einer Verkürzung der Beatmungsdauer.

### Fazit für die Praxis

- Beatmungsformen mit Spontanatmungsteil sind kritisch auf die Kompetenz zu überprüfen, ob und in welchem Ausmaß das Kriterium „Synchronizität zwischen Patient und Beatmungsgerät“ eingehalten wird.
- Obwohl für die beschriebenen, aktuell diskutierten uSpA-Verfahren noch kein Nachweis einer qualitativen Verbesserung (Verkürzung der Beatmungszeit, Senkung der Mortalität) im Vergleich zum „klassischen“ PSV erbracht wurde, bieten diese Beatmungsmodi einen physiologisch überzeugenden und klinisch attraktiven Weg in Richtung eines differenziert unterstützenden Weanings an.
- Angesichts einer zunehmend älteren und komplexer erkrankten Patientenpopulation in der Intensivmedizin ist dieser Weg wichtig im Zusammenhang mit einer auf den individuellen Patienten zugeschnittenen Behandlung (frühe Mobilisation, Physiotherapie, Förderung der zielgerichteten Vigilanz). Er sollte mit klinisch-wissenschaftlichem Nachdruck fortgeführt werden.

### Korrespondenzadresse

#### Prof. Dr. T. Bein

Klinik für Anästhesiologie, Universitätsklinikum Regensburg  
93042 Regensburg  
thomas.bein@klinik.uni-regensburg.de

### Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** T. Bein gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Das vorliegende Manuskript enthält keine Studien an Menschen oder Tieren.

### Literatur

1. Rouby JJ, Lu Q (2005) Bench-to-bedside review: adjuncts to mechanical ventilation in patients with acute lung injury. *Crit Care* 9:465–471
2. Tremblay LN, Slutsky AS (2006) Ventilator induced lung injury: from bench to bedside. *Intensive Care Med* 32:24–33
3. Puthuchery Z, Montgomery H, Moxham J et al (2010) Structure to function: muscle failure in critically ill patients. *J Physiol* 588:4641–4648
4. Levien S, Nguyen T, Taylor N et al (2008) Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. *N Engl J Med* 358:1327–1335
5. Jaber S, Jung B, Matecki S, Petrof BJ (2011) Clinical review: ventilator-induced diaphragmatic dysfunction – human studies confirm animal model findings! *Crit Care* 12:R116
6. Esteban A, Anzueto A, Frutos F et al (2002) Characteristics and outcomes in adult patients receiving mechanical ventilation: a 28-day International study. *JAMA* 287:345–355
7. Boles JM, Bion J, Connors A et al (2007) Weaning from mechanical ventilation. *Eur Respir J* 29:1033–1056
8. Peñuelas O, Frutos-Vivar F, Fernandez C et al (2011) Characteristics and outcome of ventilated patients according to time of liberation from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 184:430–437
9. Epstein SK (2009) Weaning from ventilatory support. *Curr Opin Crit Care* 15:36–42
10. Xirouchaki N, Kondili E, Vaporidi K et al (2008) Proportional assist ventilation with load-adjustable gain factors in critically ill patients: comparison with pressure support. *Intensive Care Med* 34:2026–2034
11. Crocker C, Kinnear W (2008) Weaning from ventilation: does a care bundle approach work? *Intensive Crit Care Nurs* 24:180–186
12. Kress JP, Pohlman AS, O'Connor MF, Hall JB (2000) Daily interruption of sedative infusions in critically ill patients undergoing mechanical ventilation. *N Engl J Med* 342:1471–1477
13. Girard TD, Kress JP, Fuchs BD et al (2008) Efficacy and safety of a paired sedation and ventilator weaning protocol for mechanically ventilated patients in intensive care (Awakening and Breathing Controlled Trial): a randomised controlled trial. *Lancet* 371:126–134
14. Blackwood B, Alderdice F, Burns K et al (2011) Use of weaning protocols for reducing duration of mechanical ventilation in critically ill adult patients: Cochrane systematic review and meta-analysis. *BMJ* 342:c7237
15. Branson RD (2011) Patient-ventilator interaction: the last 40 years. *Respir Care* 56:15–22
16. Pierson D (2011) Patient-ventilator interaction. *Respir Care* 56:214–228
17. Unrou M, MacIntyre N (2010) Evolving approaches to assessing and monitoring patient-ventilator interactions. *Curr Opin Crit Care* 16:261–268
18. Georgopoulos D, Priniakakis G, Kondili E (2006) Bedside waveforms interpretation as a tool to identify patient-ventilator asynchronies. *Intensive Care Med* 32:34–47
19. Epstein SK (2011) How often does patient-ventilator asynchrony occur and what are the consequences? *Respir Care* 56:25–35
20. Nava S, Bruschi C, Fracchia C et al (1997) Patient-ventilator interaction and inspiratory effort during pressure support ventilation in patients with different pathologies. *Eur Resp J* 10:177–183
21. Wit M de, Miller KB, Green DA et al (2009) Ineffective triggering predicts increased duration of mechanical ventilation. *Crit Care Med* 37:2740–2745
22. Grasso S, Puntillo F, Mascia L et al (2000) Compensation for increase in respiratory workload during mechanical ventilation: pressure-support versus proportional-assist ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 161:819–826
23. Younes M (1992) Proportional assist ventilation, a new approach to ventilatory support: theory. *Am Rev Respir Dis* 145:114–120
24. Georgopoulos D, Platakis M, Priniakakis G et al (2007) Current status of proportional assist ventilation. *Int J Intensive Care* (August):19–26
25. Sinderby C, Navalesi P, Beck J et al (1999) Neural control of mechanical ventilation in respiratory failure. *Nat Med* 5:1433–1436
26. Moerer O, Barwing J, Quintel M (2008) „Neurally adjusted ventilatory assist“ (NAVA) – ein neuartiges assistiertes Spontanatmungsverfahren. *Anaesthesist* 57:998–1005
27. Moerer O (2012) Effort-adapted modes of assisted breathing. *Curr Opin Crit Care* 18:61–69
28. Spahija J, Marchie M de, Albert M et al (2010) Patient-ventilator interaction during pressure support ventilation and neurally adjusted ventilatory assist. *Crit Care Med* 38:518–526
29. Campbell RS, Branson RD, Johannigman JA (2001) Adaptive support ventilation. *Respir Care Clin N Am* 7:425–440
30. Dongelmans DA, Veelo DP, Paulus F et al (2009) Weaning automation with with adaptive support ventilation: a randomized controlled trial in cardiothoracic surgery patients. *Anesth Analg* 108:565–571
31. Kirakli C, Ozdemir I, Ucar ZZ et al (2011) Adaptive support ventilation for faster weaning in COPD: a randomised controlled trial. *Eur Respir J* 38:774–780
32. Petter AH, Chioloro RL, Cassina T et al (2003) Automatic „respirator/weaning“ with adaptive support ventilation: the effect on duration of endotracheal intubation and patient management. *Anesth Analg* 97:1743–1750
33. Bosma K, Ferreyra G, Ambrogio C et al (2007) Patient-ventilator interaction and sleep in mechanically ventilated patients: pressure support versus proportional assist ventilation. *Crit Care Med* 36:1048–1054
34. Costa R, Spinazzola G, Cipriani F et al (2011) A physiologic comparison of proportional assist ventilation with load-adjustable gain factors (PAV+) versus pressure support ventilation (PSV). *Intensive Care Med* 37:1494–1500
35. Jaber S, Sebbane M, Verzilli D et al (2009) Adaptive support and pressure support ventilation behaviour in response to increased ventilatory demand. *Anesthesiology* 110:620–627
36. Ranieri VM, Giuliani M, Mascia L et al (1996) Patient-ventilator interaction during acute hypercapnia: pressure-support vs. proportional-assist ventilation. *J Appl Physiol* 81:426–436
37. Kacmarek R (2011) Proportional assist ventilation and neurally adjusted ventilatory assist. *Resp Care* 56:140–148
38. Piquilloud L, Vigneaux L, Bialais E et al (2011) Neurally adjusted ventilatory assist improves patient-ventilator interaction. *Intensive Care Med* 37:263–271
39. Cammarota G, Olivieri C, Costa R et al (2011) Non-invasive ventilation through a helmet in postextubation hypoxemic patients: physiologic comparison between neurally adjusted ventilatory assist and pressure support ventilation. *Intensive Care Med* 37:1943–1950