

C. A. Stahl
J. Fichter

Proportional unterstützende Beatmungsformen: Automatische Tubuskompensation (ATC) und Proportional assistierende Beatmung (PAV)

Assisted made of ventilation: automatic tube compensation (ATC) and proportional assist ventilation (PAV)

Summary Assisted mode of ventilation is often more comfortable for the patient as compared to controlled ventilation not only during weaning but also during the acute phase of ventilation. Aim of mechanical ven-

tilation in assisted mode is to get optimal synchronisation between ventilator and patient and reduction of work of breathing. To optimize assisted mode of ventilation new techniques were developed to reduce or compensate the resistance of the tube (automatic tube compensation (ATC)). Proportional assist ventilation (PAV) allows not only to reduce resistive components of work of breathing but also to reduce elastic properties of airway mechanics of the intubated patient.

nur in der Phase der Entwöhnung von der Beatmung, sondern bereits im akuten Krankheitsverlauf. Ziel assistierender Beatmungsformen ist es möglichst eine optimale Synchronisation zwischen Patient und Maschine und eine Reduzierung der Atemarbeit zu erreichen. Zur Optimierung der bekannten Verfahren wird einerseits eine Technik beschrieben, die den durch den Tubus bedingt erhöhten Atemwiderstand ausgleicht bzw. kompensiert (automatische Tubuskompensation (ATC)). Darüber hinaus stellt die proportional assistierende Beatmung (PAV) eine Beatmungsform dar, bei der nicht nur der Atemwiderstand durch die Beatmungsmaschine in variablem Ausmaß kompensiert wird, sondern auch elastische Widerstandskomponenten der Atemarbeit kompensiert werden.

Eingegangen: 2. Februar 1999
Akzeptiert: 4. Februar 1999

Herrn Prof. Dr. med. H. Fabel
zum 65. Geburtstag gewidmet

C. A. Stahl
Anaesthesiologische Klinik
Universitätsklinikum Freiburg
Hugstetter Str. 55
D-79106 Freiburg i. Br.

Priv. Doz. Dr. med. J. Fichter (✉)
Paracelsus Klinik
Am Natrufer Holz 69
D-49076 Osnabrück

Key words Assisted ventilation – automatic tubus compensation – proportional assist ventilation

Zusammenfassung Kontrollierte mechanische Überdruckbeatmung hat eine Reihe von unerwünschten Nebenwirkungen, die durch den Einsatz unterstützender Spontanatmungsverfahren teilweise vermieden werden können. Deshalb werden heute assistierende Verfahren zur Beatmung eingesetzt, und zwar nicht

Schlüsselwörter Assistierende Beatmungsformen – automatische Tubuskompensation – proportional assistierende Beatmung

Assistierte Beatmung hat gegenüber der konventionellen Volumen- oder druckkontrollierten Beatmung das Potential, die respiratorische Unterstützung für den Patienten wesentlich streßfreier zu verwirklichen und eine Beatmung auch bei geringer Sedierung durchzuführen. Wesentliche Faktoren für eine streßfreie Beatmung sind das Maß der Synchronisation zwischen Beatmung und Patient sowie die Höhe der Reduktion der Atemarbeit für den Patienten. Ziele assistierender Beatmungsformen sind daher neben der Verbesserung des Gasaustausches daher

auch eine möglichst hohe Synchronisation der Beatmung und eine adäquaten Reduzierung der Atemarbeit des Patienten.

Zur Optimierung der assistierenden Beatmungsformen sind in den letzten Jahren technische Verfahren eingeführt worden, die mit dem Begriff „Proportionale Unterstützung“ beschrieben werden können. Proportional unterstützende Verfahren zeichnen sich durch die positive Rückkopplung der Ventilation auf den Beatmungsdruck aus. Proportionalitätsfaktoren regeln dabei das Ausmaß der

Rückkopplung, und damit die Höhe der Entlastung der Atempumpe des Patienten.

Während bei kontrollierter Beatmung die ganze Atemarbeit von der Maschine geleistet wird, übernimmt das Beatmungsgerät bei der assistierten Spontanatmung lediglich einen mehr oder minder großen Anteil der Gesamtarbeit, während die Restarbeit von der Muskelpumpe des Patienten geleistet werden muß. Der Muskeldruck des Patienten (P_{mus}) und der Beatmungsdruck (P_{aw}) wirken dabei gemeinsam den Atemwiderständen Resistance und Elastance (Kehrwert der Compliance) entgegen (1)

$$P_{\text{mus}} + P_{\text{aw}} = \dot{V} \cdot \text{Resistance} + V \cdot \text{Elastance} \quad (1)$$

Auf diese Weise wird die Atempumpe des Patienten um den Beatmungsdruck entlastet (2).

$$P_{\text{mus}} = \dot{V} \cdot \text{Resistance} + V \cdot \text{Elastance} - P_{\text{aw}} \quad (2)$$

Bei den Proportional unterstützenden Beatmungsmodi wird keine der üblichen Zielgrößen der Beatmung (Tidalvolumen (VT), Atemfrequenz (AF), Inspirationsdruck (P_{aw})) festgelegt, sondern es wird die insgesamt zu leistende Atemarbeit, je nach eingestellten Proportionalitätsfaktoren, in einem festen Verhältnis zwischen Beatmungsgerät und Patient aufgeteilt.

Man kann zwischen flußproportionaler und volumenproportionaler Proportionalunterstützung unterscheiden. In heute kommerziell erhältlichen Beatmungsgeräten werden zwei verschiedene Proportionalbeatmungsformen angeboten: Automatische Tubuskompensation (ATC) und Proportional Assistierende Beatmung (PAV). Während ATC eine reine flußproportionale Unterstützung ist, stellt PAV die Kombination von fluß- mit volumenproportionalem Assist dar.

Automatische Tubuskompensation (automatic tube compensation – ATC)

ATC dient dem Ausgleich des durch den Flußwiderstand des Endotrachealtubus verursachten Druckunterschiedes zwischen proximalem Tubusende (Beatmungsdruck P_{aw}) und distalem Tubusende (Trachealdruck P_{trach}). Der Endotrachealtubus stellt bei beatmeten Patienten meist den größten Atemwegswiderstand dar, und durch diesen zusätzlichen Widerstand wird die Atemarbeit wesentlich erhöht. Der Widerstand des Endotrachealtubus steigt mit zunehmendem Fluß. Der resistive Druckabfall (ΔP_{ctt}) am Tubus wird üblicherweise mit Hilfe der von Rohrer beschriebenen Faktoren, einem linearen Anteil (K_1) und einem nichtlinearem (quadratischem) Anteil (K_2) angegeben (Gleichung (3)) [1].

$$\Delta P_{\text{ctt}} = \dot{V} \cdot K_1 + \dot{V}^2 \cdot K_2 \quad (3)$$

ATC erzeugt unabhängig von der Beatmungsform einen zusätzlichen Druck nach Gleichung (4). Die Wahl von ATC

liefert somit einen nichtlinear flußproportionalen Beatmungsdruck.

$$P_{\text{ATC}} = \Delta P_{\text{ctt}} = \dot{V} \cdot K_1 + \dot{V}^2 \cdot K_2 \quad (4)$$

Um die klinische Anwendung von ATC zu erleichtern, sind experimentell gemessene Tubuskoeffizienten K_1 und K_2 für gängige Tuben im Beatmungsgerät gespeichert, und der Therapeut muß dem Gerät lediglich Tubusart und -größe angeben. Die Verwendung von festen Tubuskoeffizienten hat den Nachteil, daß bei Verschmutzung des Tubus, etwa durch Sekret, nur ein Teil des (dann höheren) Tubuswiderstandes aufgehoben wird; andererseits wird eine nicht erwünschte zu hohe Unterstützung durch den ATC-Modus nahezu ausgeschlossen, da der wahre (in-vivo) Tubuswiderstand nicht kleiner sein wird, als durch die in-vitro Koeffizienten vorausgesagt.

Der gezielte Ausgleich des durch den Tubus verursachten Druckabfalles ermöglicht in gewisser Weise eine virtuelle Extubation des Patienten. Theoretisch kann sowohl der inspiratorische als auch der expiratorische Druckabfall am Tubus kompensiert werden. Expiratorischer Assist bedeutet allerdings eine Absenkung des Beatmungsdruckes unter das PEEP-Niveau. Obwohl auch bei dieser Einstellung der Trachealdruck nicht unter den eingestellten PEEP abfällt, könnte dies dennoch etwa für Patienten mit expiratorischer Flußlimitierung (z. B. COPD) zu einer Verschlechterung führen. Solange keine ausreichenden Daten über die Sicherheit expiratorischer Unterstützung vorliegen, sollte ATC deshalb nur zur inspiratorischen Unterstützung genutzt werden.

Das Ziel von ATC, die durch den Tubus verursachte Erhöhung der Atemarbeit des Patienten auszugleichen, spielt vor allem bei spontanatmenden intubierten Patienten eine große Rolle. Die Hauptindikation für ATC liegt demnach in der Kombination mit druckkonstanten Spontanatmungsmodi, also mit Druckunterstützender Beatmung (pressure support ventilation – PSV) oder CPAP. Wegen des konstanten Inspirationsdruckes sind diese beiden Beatmungsformen – entgegen früheren Berichten –, nicht in der Lage, dem im Atemzug wechselnden Druckabfall am Tubus zu kompensieren [1]. Deshalb muß bei PSV zur Vermeidung von Dyspnoe insbesondere bei kleinen Tuben oft eine hohe Unterstützung eingestellt werden, die zu einem passiven Aufblasen des Patienten am Ende seiner Inspiration führen wird [1], was nicht nur unphysiologisch ist, sondern auch als unangenehm vom Patienten empfunden werden kann [3]. In der Kombination mit ATC hingegen wird PSV alleine zur Überwindung von patienteneigenen Atemwiderständen gebraucht. Insgesamt kann in der Kombination mit ATC eine niedrigere PSV-Unterstützung gewählt werden. Durch die Möglichkeit der virtuellen Extubation wird gleichzeitig die Entscheidung zu einer tatsächlichen Extubation des Patienten für den Therapeuten wesentlich erleichtert.

Die Kombination von ATC mit kontrollierten Beatmungsformen ist hingegen nur bedingt sinnvoll. Bei der

flußkonstanten Beatmung, bei der dem Patienten ein vorgegebenes Flußprofil appliziert wird, ist der Druck die unabhängige Größe, so daß eine Tubuskompensation nicht notwendig ist. Anders bei der druckkontrollierten Beatmung: Hier wäre eine zusätzliche Tubuskompensation zwar möglich, allerdings würden vor allem die frühinspiratorischen Flußspitzen des dezelerierenden Flußprofils verstärkt. Ob eine zusätzliche Erhöhung des Initialflusses bei diesem Modus sinnvoll wäre, bleibt fraglich.

Da es für ATC notwendig ist, daß die Tubuskoeffizienten im Gerät gespeichert sind, eröffnet sich durch ATC gleichzeitig die Möglichkeit der kontinuierlichen Berechnung und Monitoring des Trachealdruckes. Der Trachealdruck eignet sich unabhängig von der Beatmungsform besser zur Beurteilung der Gefahr von Volutrauma oder Barotrauma der Lunge als der Atemwegsöffnungsdruck (P_{aw}) [1].

Proportional Assistierende Beatmung (proportional assist ventilation PAV)

PAV dient der Reduktion der Atemarbeit, die der Patient zur Überwindung seiner „eigenen“ Widerstände leisten muß. Respiratorische Erkrankungen, die mit Beatmungspflichtigkeit einhergehen, verursachen neben der Störung des Gasaustausches nahezu immer die Zunahme des Atemwegwiderstandes, der Resistance und/oder einer Zunahme der Steifheit der Lunge, der Elastance. Um in einer solchen Situation die Atemarbeit für den Patienten zu reduzieren, kombiniert PAV fluß- und volumenproportionale Druckerzeugung. Die Einstellparameter bei PAV sind der Proportionalitätsfaktor für Atemstrom (Flow-Assist, FA) und der Proportionalitätsfaktor für Atemzugvolumen (Volume-Assist, VA). Gleichung (5) und (6) zeigen die Algorithmen, aus dem sich aus FA und VA der Beatmungsdruck unter PAV ergibt.

$$P_{PAV,FA} = \dot{V} \cdot FA \quad (5)$$

$$P_{PAV,VA} = V \cdot VA \quad (6)$$

FA und VA können angepaßt an die erkrankungsbedingte Störung des Patienten beliebig miteinander kombiniert werden. Die Summe aus $P_{PAV,FA}$ und $P_{PAV,VA}$ ergibt den Beatmungsdruck im PAV-Modus (Gleichung (7)).

$$P_{PAV} = \dot{V} \cdot FA + V \cdot VA \quad (7)$$

Fügt man die Formel für P_{PAV} aus Gleichung (7) in Gleichung (2) ein, so ergibt sich der nötige Muskeldruck bei Beatmung mit PAV nach (8) [4]:

$$P_{mus} = \dot{V} \cdot (\text{Resistance} - FA) + V \cdot (\text{Elastance} - VA) \quad (8)$$

Der eingestellte Flow-Assist hebt also unmittelbar Teile der Resistance, der eingestellte Volume-Assist Teile der Elastance auf. Die Höhe der jeweiligen Entlastung be-

rechnet sich aus dem Verhältnis FA/Resistance bzw. VA/Elastance. Wenn gleiche Teile der Resistance und Elastance aufgehoben werden (FA/Resistance = VA/Elastance), so ist der Beatmungsdruck direkt proportional zu P_{mus} . Das Verhältnis $P_{PAV}/(P_{mus} + P_{PAV})$ beschreibt dann die relative Gesamtentlastung der Atempumpe. Ähnlich wie die Servolenkung im Auto zu einer Erhöhung der Effektivität der Lenkbewegungen führt, führt P_{PAV} zu einer Erhöhung der Effektivität der Atempumpe. Die Steuerung des Atemmusters bleibt dabei dem Patienten erhalten, solange die Unterstützung hoch genug ist, um eine Erschöpfung der Atemmuskulatur zu vermeiden [1]. Der Patient kann bei Beatmung mit PAV auf zusätzliche Atemstimuli durch eine physiologische Änderung des Atemmusters reagieren. In gleicher Weise wie langfristige Atemstimuli werden kurzfristige Änderungen des Atemmusters unmittelbar vom Beatmungsgerät unterstützt. Eine tiefe Inspiration für einen Hustenstoß oder einen Seufzer wird dem Patienten etwas erleichtert. Da das Beatmungsgerät jeder Vorgabe des Patienten folge leistet, wird ein Kämpfen des Patienten gegen den Ventilator weitgehend vermieden. Die größere Freiheit bezüglich des Atemmusters kann das Gefühl der Abhängigkeit vom Beatmungsgerät reduzieren und so dazu beitragen daß der Bedarf an Sedativa bei Beatmung mit PAV gering bleibt. Die Freiheit bezüglich des Atemmusters erfordert vom Patienten im Gegenzug während der gesamten Inspirationsphase eine Atemaktivität. Da PAV dadurch während der Phase der Beatmungspflichtigkeit den Atemantrieb des Patienten konditioniert und die Atemmuskulatur dosiert trainiert, wird die Entwöhnung des Patienten vom Beatmungsgerät erleichtert.

Das Prinzip der positiven Rückkopplung des Atemmusters auf die Ventilation birgt aber auch Gefahren. Solange die eingestellten Proportionalitätsfaktoren kleiner sind als die tatsächlichen Widerstände arbeitet die Rückkopplung in der oben geschilderten Weise. Werden jedoch die Proportionalitätsfaktoren größer gewählt als Resistance und Elastance, so kann es zu ungedämpftem Anstieg des Beatmungsdruckes kommen. Dieses Phänomen wird „run-away“ genannt [4]. Die genaue Kenntnis der Atemmechanik ist somit eine wichtige Voraussetzung für die klinische Anwendung von PAV. Das Dilemma dabei ist, daß es für die Messung von Resistance und Elastance zwar Bestimmungsmethoden unter kontrollierten Beatmungsmodi gibt, jedoch unter Spontanatmung derzeit die Bestimmung nicht verlässlich möglich ist.

PAV geht davon aus, daß der bronchiale Strömungswiderstand des Patienten nicht flußabhängig ist. Folglich liefert FA unter PAV eine lineare Proportionalität des Druckes zum Fluß (Gleichung (5)). Ein nichtlinearer Widerstand, wie er etwa durch den Tubus verursacht wird, kann daher mit FA ohne zusätzliche Kompensation mit Hilfe von ATC nur unzureichend ausgeglichen werden. Die Kombination FA+ATC löst zwar diese Einschränkung, gleichzeitig wird aber die Gefahr des Entstehens eines Runaways erhöht.

Die Einzigartigkeit von PAV liegt in der Realisierung volumenproportionaler Unterstützung. Sie macht den Einsatz von PAV als eigenständige Beatmungsform möglich. Aus der Volumenproportionalen Unterstützung folgt aber auch eine wichtige Kontraindikation zum Einsatz von PAV: bei Vorliegen einer bronchopleuralen Fistel wird das Atemzugvolumen vom Respirator fälschlich zu hoch gemessen. Aufgrund des VA führt dies bei PAV zu einer nicht beabsichtigten Zunahme des Beatmungsdruckes über das erwünschte Maß hinaus. PAV darf deshalb bei diesem Krankheitsbild nicht eingesetzt werden.

Eine ausreichende alveoläre Ventilation kann bei PAV nur dann zustandekommen, wenn ein Atemantrieb des Patienten vorhanden ist. Falls eine Neigung des Patienten zur Ausbildung periodischer Atmung besteht, muß man damit rechnen, daß diese durch PAV verstärkt wird [6]. Glücklicherweise ist bei den meisten beatmeten Patienten der Atemantrieb intakt, solange er nicht iatrogen deprimiert wird. Atemdepressiv wirkende Medikamente müssen deshalb bei Einsatz von PAV noch sorgsamer dosiert werden als bei anderen Beatmungsformen.

Diskussion

Die neuen Formen der Proportionalunterstützung können heute kommerziell erworben werden, so daß damit zu rechnen ist, daß ATC und PAV in den nächsten Jahren auf vielen Intensivstationen als Ergänzung oder Alternative zur druckunterstützten Beatmung zur Verfügung stehen wird. Da zum jetzigen Zeitpunkt umfangreiche klinische Daten zu beiden Beatmungsformen nicht vorliegen, kann keine Beurteilung des Potentials der beiden Beatmungsformen nur vorläufig sein.

ATC erlaubt eine gezielte Reduktion der durch den Endotrachealtubus hervorgerufenen Atemarbeit assistiert

beatmeter Patienten. Diese Einstellung ist insbesondere bei Wahl eines kleinen Tubus und bei (gleichzeitig) hohem inspiratorischen Flußbedarf des Patienten wichtig. Die Einstellung von ATC am Beatmungsgerät ist einfach, da der Anwender lediglich die passende Tubusgröße anwählen muß. Der Einsatz von inspiratorischer ATC ist für den Patienten, da die zusätzlich generierten Beatmungsdrucke bereits am Tubus wieder abfallen, und somit nicht zu einer Lungenschädigung führen können. Der Einsatz expiratorischer ATC birgt potentielle Risiken und sollte bis zur Verbesserung der Datenlage vorsichtig gehandhabt werden. Da ATC die Atemmechanik des Patienten unberücksichtigt läßt, muß ATC in der Regel mit einer weiteren Beatmungsform (z.B. PSV) kombiniert werden.

Mit PAV können die resistiven und elastischen Widerstände des Patienten aufgehoben, und außerdem der lineare Anteil des Tubuswiderstandes kompensiert werden. PAV verspricht als eigenständige Beatmungsform eine individuelle Anpassung der Beatmung an den jeweiligen Bedarf des Patienten und somit eine weitgehende Vermeidung von Dyssynchronisation zwischen Ventilator und Patient. PAV kann sowohl bei intubierten Intensivpatienten als auch als Verfahren zur Maskenbeatmung etwa bei akutem respiratorischem Versagen eingesetzt werden.

Das mit PAV konsequent verwirklichte Prinzip der positiven Rückkopplung birgt jedoch die Gefahr einer zu hohen und dann möglicherweise unkontrollierten Unterstützung bei falscher Einstellung der Parameter FA und VA. Da die Messung der Atemmechanik des assistiert beatmeten Patienten derzeit noch große Schwierigkeiten bereitet, sollte PAV nicht zur Routinebeatmung eingesetzt werden. Wenn PAV eingesetzt werden soll, so muß regelmäßig wenigstens eine Abschätzung der Atemmechanik vorgenommen werden, und das betreuende Personal muß ausreichend geschult sein um das Auftreten von Runaways sicher zu erkennen.

Literatur

1. Fabry B, Haberthür C, Zappe D, Guttman J, Kuhlen R, Stocker R (1997) Breathing pattern and additional work of breathing in spontaneously breathing patients with different ventilatory demands during inspiratory pressure support and automatic tube compensation. *Intensive Care Med* 23: 545–552
2. Guttman J, Eberhard L, Fabry B, Bertschmann W, Wolff G (1993) Continuous calculation of intratracheal pressure in tracheally intubated patients. *Anesthesiology* 73: 503–513
3. Guttman J, Bernhard H, Mols G, Benzinger A, Hofmann P, Haberthür C, Zappe D, Fabry B, Geiger K (1997) Respiratory comfort of automatic tube compensation and inspiratory pressure support in conscious humans. *Intensive Care Med* 23: 1119–1124
4. Marantz S, Patrick W, Webster K, Roberts D, Oppenheimer L, Younes M (1996) Response of ventilator-dependent patients to different levels of proportional assist. *J Appl Physiol* 80: 397–403
5. Younes M (1992) Proportional assist ventilation, a new approach to ventilatory support. *Theory. Am Rev Respir Dis* 145: 114–120
6. Younes M (1994) Proportional assist ventilation. In: Tobin MJ: *Principles and practice of mechanical ventilation*. McGraw-Hill, NY