

H. Buscher
M. Sydow
K. Thies
J. Zinserling
J. Hinz
H. Burchardi

Atemarbeit bei Patienten mit und ohne chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung unter druckunterstützter Beatmung mit geringem PEEP

Work of breathing in patients with and without COPD during mechanical ventilation with low-level PEEP and pressure support

Summary The influence of pressure support of 5 and 10 cmH₂O and low-level positive endexpiratory pressure (PEEP) of 5 cm H₂O on work of breathing (WOB) and breathing pattern was studied in 16 mechanically ventilated patients. Eight patients suffered from chronic obstructive lung disease (COPD),

eight patients had no obstructive lung disease. Low-level PEEP as well as pressure support reduced the work of breathing. Combination of both measures was additively effective. PEEP of 5 cmH₂O and pressure support of 10 cmH₂O decreased WOB more than 50% on average. Without any pressure support more than 20% of WOB were done on the ventilator system (e.g. flow delivery, trigger mechanism etc.). By application of 10 cmH₂O of pressure support this part of the work of breathing was negligible. In COPD patients an intrinsic PEEP increased the work of breathing which was counterbalanced by an external PEEP. However, our study revealed high interindividual differences in WOB. Thus, measurement of work of breathing is encouraged to optimize the ventilatory setting by individual adaptation of the PEEP and pressure support level.

Key words Mechanical ventilation – intensive care therapy – assisted spontaneous breathing – work of breathing

Zusammenfassung An 16 druckunterstützt beatmeten Patienten, davon acht mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD) und acht ohne obstruktive Lungenerkrankungen wurde der Einfluß eines PEEP von

5 cmH₂O und einer Druckunterstützung von 5 und 10 cmH₂O auf die mechanische Atemarbeit und andere atemmechanische Meßgrößen untersucht. Sowohl durch PEEP wie auch durch Druckunterstützung konnte die Atemarbeit gesenkt werden. Die Kombination beider Maßnahmen wirkte additiv. Ein PEEP von 5 cm H₂O und eine Druckunterstützung von 10 cmH₂O senkte die Atemarbeit im Durchschnitt um mehr als 50% in beiden Patientengruppen. Ohne Druckunterstützung leistet der Patienten mehr als 20% seiner gesamten Atemarbeit auf Widerstände des Beatmungssystems (z. B. Gasflußanlieferung, Triggermechanismus etc.). Durch 10 cmH₂O Druckunterstützung war dieser Atemarbeitsanteil nahezu kompensiert und zu vernachlässigen. Ein bestehender intrinsischer PEEP bei COPD-Patienten erhöhte die Atemarbeit und wurde durch Applikation eines externen PEEP vermindert. Die Höhe der Atemarbeit war in unserer Untersuchung interindividuell sehr unterschiedlich. Daher erscheint uns eine individuelle Anpassung von PEEP und Druckunterstützung anhand der gemessenen Atemarbeit sinnvoll.

Schlüsselwörter Respiratortherapie – Intensivtherapie – assistierte Beatmung – Atemarbeit

Eingegangen: 28. Januar 1999
Akzeptiert: 4. Februar 1999

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

Dr. H. Buscher (✉) · M. Sydow · K. Thies
J. Hinz · H. Burchardi
Zentrum Anaesthesiologie,
Rettungs- und Intensivmedizin,
Georg-August-Universität Göttingen
Robert-Koch-Straße 40
D-37075 Göttingen
e-mail: hbusche@gwdg.de

J. Zinserling
Klinik für Anästhesiologie
und spezielle Intensivmedizin,
Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn
Sigmund-Freud-Str. 25
D-53105 Bonn

Einleitung

Neben der Zunahme visköser und elastischer Widerstände beim Patienten mit akuter respiratorischer Insuffizienz [20] tritt beim endotracheal intubiertem Patienten ein zusätzlicher Widerstand durch den Beatmungstubus hinzu [1]. Auch zur Triggerung der assistierten Beatmung bei Respiratoren mit demand-valve-System wird präinspiratorisch Atemarbeit auf den Respirator benötigt. Bei bereits bestehender Dyspnoe mit expiratorischer Flußbehinderung kommt es zum Air-trapping und zur Ausbildung eines intrinsischen PEEP. Dieser erhöht die Atemarbeit zusätzlich und verschlechtert durch Verschiebung der Atemmittellage (Zwerchfelltieftand) gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der Inspirationsmuskulatur [19]. Die richtige Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur des Patienten und ihrer Belastung ist ein wichtiger Faktor bei der Entwöhnungsstrategie vom Respirator. Da die Leistungsfähigkeit bei Überlastung sogar noch abnimmt (Atemmuskulerschöpfung, bzw. „respiratory muscle fatigue“), ist die vom Patienten zu erbringende Atemarbeit eine klinisch wichtige Größe um die Ventilationshilfe adäquat anzupassen. Die Atemarbeit wird jedoch in der klinischen Routine kaum bestimmt.

Druckunterstützung ist als assistiertes Beatmungsverfahren dazu konzipiert, dem Patienten Atemarbeit abzunehmen [10]. Ein zusätzlich applizierter externer endexpiratorischer Atemwegsdruck (PEEP) kann die Atemarbeit vermindern [20]. Ziel der vorliegenden Studie war es, einen Einblick in die Wirkungsweise und die Auswirkung der beiden Stellgrößen Druckunterstützung und PEEP auf die Atemarbeit von endotracheal intubierten Patienten mit und ohne chronisch obstruktiver Lungenerkrankungen zu gewinnen.

Methodik

Patienten

Die Studie wurde vom Ethik-Komitee der medizinischen Fakultät der Universität Göttingen geprüft und genehmigt. Es wurden 16 Patienten in die Studie aufgenommen und in zwei Gruppen aufgeteilt (s. Tab. 1). Gruppe 1 umfaßte acht Patienten mit chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung (COPD-Gruppe), die aufgrund von akuter Exazerbation oder nach einem operativen Eingriff ateminsuffizient waren und dann beatmungspflichtig wurden. Die Diagnose COPD wurde anamnestisch, mittels Lungenfunktionstestung sowie durch klinische Untersuchung gesichert. In Gruppe 2 wurden acht Patienten eingeteilt, die eine respiratorische Insuffizienz ohne obstruktive Lungenpathologie hatten (Kontrollgruppe).

Tab. 1 Patienten und Intubationsindikationen

Patienten	Alter	Ge-schlecht	Diagnose
Gruppe 1			
1	84	m	COPD
2	62	m	COPD, Pneumonie
3	79	m	COPD, Larynx-Ca
4	57	w	COPD, Rippenfraktur
5	76	m	COPD
6	57	w	COPD, Bauchtrauma
7	54	m	COPD
8	44	m	COPD
Gruppe 2			
9	25	m	Schädelhirntrauma
10	66	m	perforiertes Duodenalulcus
11	66	m	Sepsis
12	69	w	Polytrauma
13	79	w	Schädelhirntrauma
14	18	w	Schädelhirntrauma
15	46	m	Schädelhirntrauma
16	83	m	Inkarzerierte Leistenhernie

Alle Patienten waren zum Zeitpunkt der Messung länger als 5 Tage beatmet und wurden über einen Bennett 7200a Respirator (Puritan Bennett, Carlsbad; CA; USA) druckunterstützt beatmet. Die Druckunterstützung vor Messung betrug im Mittel 6,25 cmH₂O, der applizierte PEEP 5 cmH₂O und die Triggersensitivität 1 cmH₂O. Oxygenierung und Kreislaufsituation waren stabil (keine Vasopressorentherapie, inspiratorische Sauerstoffkonzentration <0,5). Neun Patienten waren nasal intubiert und sieben Patienten tracheotomiert. Der Tubusinnendurchmesser betrug 7–9 mm.

Messung

Zur Gasflußmessung diente ein beheizter Pneumotachograph (Fleisch Typ 2, Fleisch, Lausanne, Schweiz), der zwischen Endotrachealtubus und Beatmungsschlauchsystem plazierte wurde, und ein Differenzdruckaufnehmer (Dr. Fenyves & Gut, Basel, Schweiz). Der Beatmungsdruck wurde an gleicher Stelle mit einem zweiten Differenzdruckaufnehmer gleichen Typs gemessen. Der Ösophagusdruck wurde mit einer Ösophagusballonsonde (Mallinckrodt, Argyle, NY, USA) und einem weiteren Differenzdruckaufnehmer aufgezeichnet. Alle gemessenen Signale wurden einem Meßverstärker zugeführt, bevor sie durch einen 12 Bit Analog-Digital-Wandler (DT 2801a, Data Translation, Marlborough, Maryland, USA) digitalisiert und durch einem IBM-kompatiblen Rechner gespeichert wurden. Die Aufnahme-frequenz betrug 20 Hz. Die Speicherung und Verarbeitung der Daten erfolgte mittels eines eigens für diesen Zweck erstellten Auswerteprogramms, das mit einem kommerziellen Softwareprogramm

Tab. 2 Mittelwerte der Atemmechanikparameter (\pm Standardabweichungen) unter den untersuchten Respiratoreinstellungen (Druckunterstützung/PEEP). (AF = Atemfrequenz, Vt = Atemzugvolumen, dc = duty-cycle)

	W_p [mJ/l]	W_{add} [mJ/l]	PEEP _i [cmH ₂ O]	AF [1/min]	Vt [ml]	dc
Gruppe 1						
0/0	1130 \pm 323 ^a	254 \pm 109	1,7 \pm 0,8 ^a	27 \pm 10	490 \pm 137	0,38 \pm 0,08 ^a
5/0	857 \pm 245 ^{a,c}	61 \pm 47 ^c	1,7 \pm 1,1 ^a	27 \pm 10	511 \pm 173	0,37 \pm 0,07 ^a
10/0	705 \pm 301 ^{a,c}	6 \pm 6 ^c	2,0 \pm 1,5 ^a	25 \pm 10	551 \pm 175	0,37 \pm 0,08 ^a
0/5	906 \pm 259 ^{a,b}	218 \pm 85	1,2 \pm 0,8 ^{a,b}	26 \pm 8	474 \pm 156	0,38 \pm 0,07 ^a
5/5	738 \pm 239 ^{a,b,c}	48 \pm 50 ^c	1,1 \pm 0,6 ^{a,b}	24 \pm 8	535 \pm 170	0,37 \pm 0,06 ^a
10/5	558 \pm 223 ^{a,b,c}	5 \pm 5 ^c	1,3 \pm 1,0 ^{a,b}	24 \pm 9	588 \pm 191	0,35 \pm 0,05 ^a
Gruppe 2						
0/0	825 \pm 319 ^a	235 \pm 51	1,1 \pm 0,5 ^a	28 \pm 6	488 \pm 98	0,46 \pm 0,03 ^a
5/0	582 \pm 337 ^{a,c}	53 \pm 45 ^c	1,0 \pm 0,5 ^a	28 \pm 6	498 \pm 80	0,43 \pm 0,03 ^a
10/0	409 \pm 242 ^{a,c}	3 \pm 6 ^c	1,0 \pm 0,5 ^a	24 \pm 8 ^c	645 \pm 222 ^c	0,42 \pm 0,03 ^{a,c}
0/5	656 \pm 232 ^{a,b}	205 \pm 37	0,8 \pm 0,7 ^a	27 \pm 6	506 \pm 143	0,44 \pm 0,03 ^a
5/5	445 \pm 252 ^{a,b,c}	30 \pm 31 ^c	0,7 \pm 0,4 ^a	27 \pm 5	497 \pm 70	0,43 \pm 0,04 ^a
10/5	323 \pm 188 ^{a,c}	2 \pm 5 ^c	0,7 \pm 0,5 ^a	22 \pm 7 ^c	668 \pm 231 ^c	0,39 \pm 0,03 ^{a,c}

^a Signifikanz zwischen Patientengruppen

^b Signifikant zu ZEEP

^c Signifikant zu DU0

für wissenschaftliche Anwendungen programmiert wurde (Asyst 4.0, Keithley Asyst, Taunton, MA, USA).

Untersuchungsprotokoll

Der Ösophagusballon wurde nach dem von Milic-Emili et al. und Baydur et al. beschriebenen Verfahren im unteren Ösophagusdrittel plaziert und gefüllt [2, 12]. Die Lage wurde durch einen Okklusionstest verifiziert [2].

Allen Patienten wurde in randomisierter Reihenfolge eine inspiratorische Druckunterstützung von 0, 5 und 10 cmH₂O (DU0, DU5 und DU10) jeweils in Kombination mit einem PEEP von 0 (ZEEP) und 5 cmH₂O (PEEP5) appliziert. Vor Beginn jeder Messung konnten sich die Patienten an das jeweils neue Atemschema über mindestens fünf Minuten adaptieren. Danach wurden Meßsignale über fünf Minuten aufgezeichnet und in einem zweiten Arbeitsschritt nach der Untersuchung ausgewertet.

Berechnung

Arbeit als physikalische Größe ist in der Mechanik definiert als das Produkt aus Weg und Kraft in Wegrichtung bzw. als Produkt aus Druck und Volumen. Für die Atmung bedeutet dies, daß die Atemarbeit aus dem Produkt von treibendem Drucks und Atemzugvolumen berechnet wird. Da sich Drücke und Volumina während eines Atemzuges kontinuierlich verändern, muß hier das Integral über die gesamte Inspiration berechnet werden. Die so berechnete Arbeit kann graphisch als Fläche im Druck-Volumen-Diagramm dargestellt werden [6].

Bei dynamischer Überblähung der Lunge beginnen die Atembemühungen des Patienten schon vor der eigent-

lichen Inspiration. Vor Beginn einer effektiven Inspiration (Gaseinfluß in die Lunge) muß zunächst ein positiver Alveolardruck in der geblähten Alveolarregion überwunden werden. Dieser Druck wird als dynamischer intrinsischer PEEP (PEEP_i) bezeichnet. Er wird aus der Differenz des Beginns des Ösophagusdruckabfalles (Beginn der muskulären Inspirationsbemühung) und des tatsächlichen Inspirationsbeginns (Beginn des Gasflusses in die Lunge) berechnet [11]. Der PEEP_i wurde in Bezug zum Atemwegsdruck und nicht zum Umgebungsdruck definiert.

Die Atemarbeit des Patienten (W_p) wurde graphisch nach dem Campbell-Diagramm aus der Ösophagusdruck-Volumen-Kurve berechnet [6]. Von der Annahme ausgehend, daß die Brustwandcompliance unserer Patienten im Normbereich lag, wurde diese in die Berechnung mit einbezogen [20]. Der dynamische intrinsische PEEP wurde bei der Atemarbeitsberechnung berücksichtigt [4, 8], indem die Ruhedehnungsposition der Brustwand um den Betrag eines vorhandenen PEEP_i relativ zum Inspirationsflußbeginn verschoben wurde. Die additive Patientenarbeit gegen Widerstände des Beatmungssystems (W_{add}) wurde aus der Atemwegsdruck-Volumen-Kurve bestimmt. Wird der Atemwegsdruck in der Inspiration nach links über die Verbindungslinie zwischen Anfang und Ende der Inspiration gezogen, so leistet der Patient zusätzliche Arbeit auf das Beatmungssystem [9, 20, 21, 25].

Die statistische Auswertung erfolgte mittels einer multiplen Varianzanalyse für Meßwertwiederholungen (ANOVA) mit post-hoc-Testung (Test of least significant difference). Zwischen den Gruppen wurden die korrespondierenden Beatmungseinstellungen verglichen. Innerhalb einer Gruppe wurde ZEEP gegen PEEP5 bei gleicher Druckunterstützung und DU5 und DU10 gegen DU0 bei gleichem PEEP verglichen. Ein p-Wert <0,05 wurde als signifikant definiert.

Abb. 1 Relative Änderung der Patientenatemarkarbeit (W_p) durch PEEP5 zu ZEEP bei DU0 bei allen untersuchten Patienten

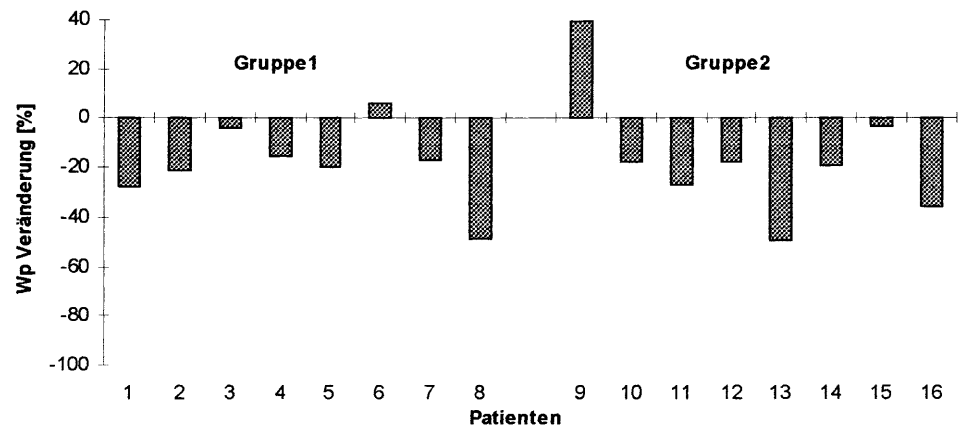
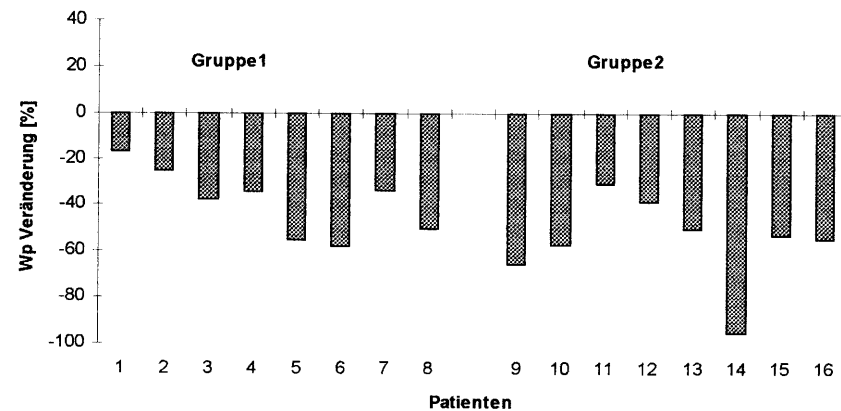


Abb. 2 Relative Änderung der Patientenatemarkarbeit (W_p) durch DU10 zu DU0 bei ZEEP bei allen untersuchten Patienten



Ergebnisse

Alter, Geschlechterverteilung, Gewicht, Größe, Beatmungstage, Tubusgröße und Intubationsweg waren in beiden Patientengruppen vergleichbar. Patienten der Gruppe 1 waren im Durchschnitt um acht Jahre älter. Die berechneten Atemmechanikparameter sind in Tab. 2 dargestellt. Der Abfall der Atemfrequenz und Anstieg des Tidalvolumens durch Erhöhung der Druckunterstützung war nur in der Kontrollgruppe bei DU10 signifikant. Der Anteil der Inspirationszeit am gesamten Atemzug (duty-cycle, dc) war in allen Respiratoreinstellungen bei COPD-Patienten signifikant geringer als bei Patienten der Gruppe 2.

W_p war in allen Respiratoreinstellungen bei COPD-Patienten höher als bei den Patienten der Kontrollgruppe. Durch Applikation von Druckunterstützung und PEEP5 fiel W_p in beiden Gruppen signifikant ab. Die erzielten Effekte durch PEEP bzw. Druckunterstützung unterschieden sich allerdings interindividuell deutlich (Abb. 1 und 2).

W_{add} ist bei gleicher Respiratoreinstellung in beiden Patientengruppen gleich groß und beträgt ohne Druckunterstützung 23% (Gruppe 1) bzw. 30% (Gruppe 2) der gesamten Atemarbeit. Durch Applikation von Druckunter-

stützung von 10 cmH₂O fällt W_{add} auf Werte nahe null ab.

PEEP_i ist bei allen Respiratoreinstellungen in der COPD-Gruppe signifikant höher als in der Kontrollgruppe. Durch Applikation eines externen PEEP von 5 cmH₂O verringert sich der PEEP_i nur in Gruppe 1 signifikant.

Diskussion

Unsere Ergebnisse zeigen, daß durch Applikation eines niedrigen PEEP von 5 cmH₂O die Atemarbeit vermindert wird. Diese Verringerung fiel aber bei den einzelnen Patienten sehr unterschiedlich aus. Sowohl Patienten ohne obstruktive Lungenerkrankung als auch langzeitbeatmete COPD-Patienten profitierten hiervon. Die Wirkung eines externen PEEP wird in der Literatur allerdings unterschiedlich beurteilt. Sassoon et al. (1989) konnten diesen Effekt bei sechs gesunden, nicht intubierten Probanden nicht nachweisen [17]. Bei einem PEEP von 10 cmH₂O stieg hier die Atemarbeit sogar etwas an. Petrof et al. (1990), die sieben COPD-Patienten untersuchten, konnten dagegen einen deutlichen Abfall ermitteln [14]. Diese Ten-

denz setzte sich auch durch Applikation eines PEEP von 10 cmH₂O und 15 cmH₂O weiter fort. Dieses Phänomen kann über eine Verminderung von sowohl elastischen als auch viskösen Widerständen erklärt werden. Bei Überblähung der Lunge in Folge von Airtrapping besteht am Ende der Expiration ein intrinsischer PEEP mit einem Druckgefälle von Alveole zum Respirator. Bei Beginn der nun folgenden Inspiration muß der Patient zunächst diesen positiven Druck überwinden, bevor er einen negativen Druck im Beatmungsschlauchsystem und am Triggerventil des Respirators erzeugen kann. Durch Applikation eines externen PEEP, der kleiner als der bereits bestehende intrinsische PEEP ist, kommt es zu keiner nennenswerten weiteren Erhöhung des endexpiratorischen Lungenvolumens. Da das Druckgefälle zwischen Alveole und Triggerventil durch die Erhöhung dieses „äußeren“ Drucks aber abnimmt, wird die Arbeit auf elastische Widerstände durch einen niedrigen externen PEEP vermindert [14, 19, 20]. Ein externer PEEP könnte aber auch zur Verminderung von viskösen Widerständen beitragen, indem Atemwege mit dynamischer Kompression stabilisiert und eventuell sogar dilatiert werden [18].

Eine Druckunterstützung von 10 cmH₂O konnte bei allen Patienten die Atemarbeit senken. Die erzielten Veränderungen fielen bei den einzelnen Patienten sehr unterschiedlich aus. Eine Abnahme der Patientenatemarbeit durch Übernahme der Arbeit durch den Respirator durch zunehmende Druckunterstützung konnte schon in früheren Studien nachgewiesen werden [4, 20, 24]. Selbst durch 30 cmH₂O Druckunterstützung war noch ein weiterer Abfall der Atemarbeit zu erzielen [24]. Bei derart hohen Druckunterstützungen ist jedoch der Vorteil der Reduktion der Atemarbeit gegen mögliche Nebenwirkungen abzuwägen. Neben der Gefahr einer weiteren Lungenüberblähung ist hier in erster Linie an eine Diskoordination von Patient und Respirator durch zu hohe Tidalvolumina zu denken [7].

Normalwerte für die Atemarbeit variieren in der Literatur zwischen 500 mJ/l [17] bei nicht intubierten Probanden und 933 mJ/l [24] bei intubierten postoperativen Patienten. In diesem Bereich liegt auch die in unserer Kontrollgruppe gemessene Atemarbeit von 825 mJ/l bei intubierten Patienten. Diese „Normalwerte“ sind allerdings nicht immer automatisch als Zielgröße bei langzeitbeatmeten Intensivpatienten anzustreben, da bei verschiedenen Erkrankungen die Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur durch neuromuskuläre Störungen (z. B. „critical illness polyneuropathy“ oder „respiratory muscle fatigue“) vermindert sein kann. Hier sollte dann der Patientenanteil der Atemarbeit durch höhere Unterstützung deutlich niedriger ausfallen.

Der visköse Widerstand von Beatmungstubus und Respirator macht einen wesentlichen Anteil der gesamten Atemwegswiderstände aus. Eine Aufgabe druckunterstützter Beatmung ist die Übernahme dieser durch Beatmungstubus und Respirator entstandenen zusätzlichen Atemarbeitsanteile. Die Höhe der hierfür notwendigen

Druckunterstützung wird in der Literatur unterschiedlich eingeschätzt. Die additive Atemarbeit gegen Widerstände des Beatmungssystems ist in unserer Studie bei DU0 mit durchschnittlich 236 mJ/l (Gruppe 1) bzw. 220 mJ/l (Gruppe 2) relevant, fällt aber schon durch DU5 auf Werte unter zehn Prozent der gesamten Atemarbeit ab. Bei DU10 ist sie praktisch nicht mehr nachweisbar. Diese Ergebnisse decken sich mit Aussagen anderer Untersuchungen [5, 16, 20, 22]. Durch Bestimmung des Atemarbeitsanteils aus der Atemwegsdruck-Volumen-Kurve kann die zusätzliche Arbeit, die durch Widerstände des Beatmungssystems entsteht, erfaßt werden, während der zusätzliche Widerstand des Endotrachealtubus so nicht gemessen werden kann. Banner et al. (1993) versuchten diese Komponente mit zu berücksichtigen, indem sie den Atemwegsdruck am trachealen Ende des Tubus bestimmten [1], wodurch der Tubuswiderstand ein Teil des Beatmungssystemwiderstandes wird. Die so berechnete zusätzliche Arbeit auf Beatmungssystem inklusive Tubus betrug hier im Durchschnitt bei elf Erwachsenen und vier Kindern 600 mJ/l und fiel durch durchschnittlich 13,5 cmH₂O Druckunterstützung auf nahe null ab. Ausgehend von diesen Werten bedeutet das, daß beim intubierten Patienten durchschnittlich eine Druckunterstützung von etwa 10 cmH₂O allein notwendig ist, um zusätzliche Widerstände (Beatmungssystem, Endotrachealtubus) zu kompensieren.

Der dynamische intrinsische PEEP ist in unserem Patientenkollektiv mit 1,7 (Gruppe 1) bzw. 1,1 cmH₂O (Gruppe 2) im Vergleich zu den in anderen Studien bestimmten Werten gering [3, 4, 13, 14, 18]. Der hier bestimmte dynamische intrinsische PEEP gibt allerdings nur den Druck in den sich schnell entleerenden Lungenkompartimenten wieder [20]. Langsamere Kompartimente (mit höherem Druck) werden bei dieser Art der Messung nicht erfaßt. Der dynamische intrinsische PEEP ist deshalb immer geringer, als der durch Atemwegsokklusion ermittelte, da er unter laufender Beatmung bestimmt wird. Der intrinsische PEEP läßt sich durch externen PEEP in Höhe von 5 cmH₂O bei COPD-Patienten vermindern [14, 18]. In unserer Kontrollgruppe ohne obstruktive Lungenfunktionsstörung waren die Ausgangswerte allerdings so gering, da signifikante Änderungen hier nicht zu erwarten waren. Die Applikation von externem PEEP führt zur Angleichung zwischen intrapulmonalem Druck und Atemwegsdruck, was dazu führt, daß die Differenz beider abnimmt und das Triggern des Respirators erleichtert wird. Wie oben bereits besprochen, führt auch dies zu einer Verminderung der Atemarbeit.

Zusammenfassend möchten wir festhalten, daß eine individuelle Optimierung von externem PEEP und Druckunterstützung anhand der Atemarbeit unter Berücksichtigung von FRC-Veränderungen für bestimmte schwer vom Respirator zu entwöhnende Patienten sinnvoll erscheint und Gegenstand weiterer Studien sein sollte. Auch sind inzwischen Atemmechanikmonitore mit online-Registrie-

fung der Atemarbeit erhältlich [15], so daß die klinische Steuerung der Entwöhnung vom Respirator über die Atemarbeit möglich wird. Da der wirkliche Aufwand, der für die Atmung insgesamt aufgebracht werden muß bei gleicher Atemarbeit wesentlich von der Effizienz des respiratorischen Systems abhängt [23] und die Leistungs-

fähigkeit der Atemmuskulatur (z. B. infolge von „critical-illness-polyneuropathy“) bei langzeitbeatmeten Intensivpatienten eingeschränkt sein kann, spielt die klinische Einschätzung und adäquate Anpassung der Ventilationsunterstützung durch den Intensivmediziner weiterhin die entscheidende Rolle.

Literatur

- Banner MJ, Kirby RR, Blanch PB, Layon JL (1993) Decreasing imposed work of the breathing apparatus to zero using pressure-support ventilation. *Crit Care Med* 21:1333–1338
- Baydur A, Behrakis PK, Zin WA, Jaeger M, Milic-Emili J (1982) A simple method for assessing the validity of the esophageal balloon pressure. *Am Rev Respir Dis* 126:788–791
- Beydon L, Chasse M, Harf A, Lemaire F (1988) Inspiratory work of breathing during spontaneous ventilation using demand valves and continuous flow systems. *Am Rev Respir Dis* 138:300–304
- Brochard L, Harf A, Lorino H, Lemaire F (1989) Inspiratory pressure support prevents diaphragmatic fatigue during weaning from mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 139:513–521
- Brochard L, Rua F, Lorino H, Lemaire F, Harf A (1991) Inspiratory pressure support compensates for the additional work of breathing caused by the endotracheal tube. *Anesthesiology* 75:739–745
- Campbell EJM, Agostini E, Newsom Davis J (1970) The respiratory muscles mechanics and neural control. 2. Auflage, Lloyd-Luke LTD, London
- Fabry B, Gudmann J, Eberhard L, Bauer T, Haberthür C, Wolff G (1995) An analysis of desynchronization between the spontaneously breathing patient and the ventilator during inspiratory pressure support. *Chest* 107:1387–1394
- Fleury B, Murciano D, Aubier M, Pariente R, Milic-Emili J (1985) Work of breathing in patients with chronic obstructive disease in acute respiratory failure. *Am Rev Respir Dis* 131:822–827
- Kacmarek RM (1988) The role of pressure support ventilation in reducing work of breathing. *Respir Care* 33:99–120
- MacIntyre NR, Nishimura N, Usada Y, Tokioka H, Takezawa J, Shimada Y (1990) The Nagoya conference on system design and patient-ventilator interactions during pressure support ventilation. *Chest* 97:1463–1466
- Maltai F, Reissmann H, Navalesi P, Hernandez P, Gursahaney A, Ranieri VM, Sovilj M, Gottfried SB (1994) Comparison of static and dynamic measurements of intrinsic PEEP in mechanically ventilated patients. *Am L Respir Crit Care Med* 150:1318–1324
- Milic-Emili J, Mead J, Turner JM, Glauser EA (1964) Improved technique for estimating pleural pressure from esophageal balloons. *J Appl Physiol* 19:207–211
- Nathan SD, Ishaaya AM, Koerner SK, Belman MJ (1993) Prediction of minimal pressure support during weaning from mechanical ventilation. *Chest* 103:1215–1219
- Petrof BJ, Legare M, Goldberg P, Milic-Emili J, Gottfried SB (1990) Continuous positive airway pressure reduces work of breathing and dyspnea during weaning from mechanical ventilation in severe chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 141:281–289
- Petros AJ, Lamond CT, Bennett HD (1993) The Bicore pulmonary monitor. A device to assess the work of breathing while weaning from mechanical ventilation. *Anaesthesia* 48(11):985–988
- Saito S, Tokioka H, Kosaka F (1990) Efficacy of flow-by during continuous positive airway pressure ventilation. *Crit Care Med* 18:654–656
- Sassoon CSH, Giron AE, Ely EA, Light RW (1989) Inspiratory work of breathing on flow-by and demand-flow continuous positive airway pressure. *Crit Care Med* 17:1108–1114
- Sassoon CSH, Light RW, Lodia R, Sieck GC, Mahutte CK (1991) Pressure-time-product during continuous positive airway pressure, pressure support ventilation, and T-piece during weaning from Mechanical Ventilation. *Am Rev Respir Dis* 143:469–475
- Smith TC, Marini JJ (1988) Impact of PEEP on lung mechanics and work of breathing in severe airflow obstruction. *J Appl Physiol* 65:1488–1499
- Sydow M, Golisch W, Buscher H, Zinserling J, Crozier TA, Burchardi H (1995) Effect of low-level PEEP on inspiratory work of breathing in intubated patients, both with healthy lungs and with COPD. *Intensive Care Medicine* 21:887–895
- Sydow M, Thies K, Engel J, Golisch W, Buscher H, Zinserling J, Burchardi H (1996) Variation des inspiratorischen Gasflusses unter druckunterstützter Spontanatmung. *Anaesthesist* 45:1051–1058
- Tokioka H, Saito S, Kosaka F (1989) Effect of pressure support ventilation on breathing patterns and respiratory work. *Intensive Care Medicine* 15:491–494
- Truwit JP, Marini JJ (1988) Evaluation of thoracic mechanics in the ventilated patient Part II: Applied mechanics. *J Crit Care* 3:199
- Van de Graaff WB, Gordey K, Dornseif SE, Dries DJ, Kleinman BS, Kumar P, Mathru M (1991) Pressure support changes in ventilatory pattern and components of the work of breathing. *Chest* 100:1082–1089
- Viale JP, Annat G, Bertrand O, Godard J, Motin J (1985) Additional inspiratory work in intubated patients breathing with continuous positive airway pressure systems. *Anesthesiology* 63:536–539