

H. Mang

Atemarbeit und Atemregulation während assistierender Beatmung

Assistierende Beatmungsverfahren kommen zum Einsatz, wenn eine kontrollierte Beatmung nicht indiziert, eine ausreichende Spontanatmung aber nicht möglich ist. Dies ist häufig der Fall beim Übergang von der kontrollierten Beatmung zur Spontanatmung und wird als Entwöhnung oder Weaning bezeichnet, auch wenn keine echte Abhängigkeit des Patienten von der Beatmung bestand. Prinzipiell befindet sich jeder kontrolliert beatmete Patient, an dessen Respirator die Triggerfunktion aktiv ist, schon in einer assistierenden Beatmungsform, der sog. assist/control ventilation (A/C). Die Hauptziele der maschinellen Beatmung, Ventilation und Oxygenierung, lassen sich auch erreichen, wenn man dem Patienten die Kontrolle über die Umschaltung von Expiration auf Inspiration und ggfs. auch von Inspiration auf Expiration überläßt. Man unterscheidet assistierende Beatmungsverfahren zur gezielten Verbesserung der Oxygenierung (continuous positive airway pressure, CPAP), der Ventilation (Druckunterstützung) und Mischformen aus Atmung und Beatmung (alternierend: synchronized intermittent mandatory ventilation, SIMV; simultan: biphasic positive airway pressure, BIPAP). Die am Respirator einzustellenden Determinanten sind ähnlich wie bei der volumen- bzw. druckkonstanten Beatmung die Frequenz der kontrollierten Atemhübe und das Tidalvolumen bzw. das inspiratorische (obere) Druckniveau für die Ventilation sowie das PEEP- oder CPAP-Niveau für die Oxygenierung. Entsprechend ihrer Verbreitung in Europa und Nordamerika gelten A/C, SIMV, Druckunterstützung und CPAP als Standardverfahren, BIPAP, Proportional assist ventilation und andere Modi bzw. Techniken als alternative Beatmungsverfahren [1].

Die kontrollierte Beatmung mit aktiver Triggerfunktion, also das Assist/Control-Verfahren, erlaubt dem Pa-

tienten, mit jedem eigenen Einatmungsversuch einen maschinellen Atemhub auszulösen. Wird das Tidalvolumen der maschinellen Atemhübe so groß eingestellt, daß sie das Inspirationsbedürfnis des Patienten befriedigen, kommt es häufig zu einer Hyperventilation und schweren respiratorischen Alkalose. Die Wahl eines entsprechend kleineren Atemhubvolumens kann hingegen zu Atemnot und Tachypnoe mit gesteigerter Trigger- und Atemarbeit führen. Dieses Problem löste die Intermittent mandatory ventilation (IMV): Der Patient erhält in jeder Minute nur die eingestellte Zahl kontrollierter Atemhübe (die IMV-Frequenz) und atmet, je nach Atemantrieb, dazwischen spontan über das Beatmungsgerät [5]. Ein weiteres Problem der A/C-Beatmung besteht darin, daß sie die Inspirationsmuskulatur nicht so weitgehend entlastet, wie man es von einem Beatmungsverfahren erwartet, das ausschließlich aus getriggerten oder kontrollierten maschinellen Atemhüben besteht. Die Inspirationsbemühungen des Patienten enden nicht mit dem erfolgreichen Triggern des Beatmungsgerätes, also dem Öffnen des Inspirationsventils und Auslösen des Inspirationsflows, sondern sind mit Hilfe des Zwerchfell-EMGs während der gesamten Inspirationsphase nachweisbar. Dieses Phänomen trifft nicht nur für die Mehrzahl der getriggerten, sondern auch für manche kontrollierten Atemhübe zu. Seine Ausprägung hängt von der Größe des eingestellten Hubvolumens und Inspirationsflows ab [6]. Dies ist auch der Grund dafür, daß Atemhübe, die während A/C-Beatmung mit einem dezelerierenden Flowmuster verabreicht werden, mit einer geringeren Atemanstrengung und Atemarbeit einhergehen können als gleich große Atemhübe mit einem konstanten Inspirationsflow [4].

Eine mangelnde Entlastung der Inspirationsmuskulatur und schlechte Adaptation an den Atemantrieb treten bei SIMV noch deutlicher zutage. Im Hinblick auf die Atemanstrengung (spezifische Atemarbeit und Druck-Zeit-Produkt der Atmung) bei SIMV fanden Marini und Mitarbeiter [10] keine relevanten Unterschiede zwischen spontanen Atemzügen und getriggerten Atemhüben bei vier verschiedenen Unterstützungsgraden (20, 40, 60 und 80% SIMV, A/C=100% SIMV). Dies bedeutet, daß bei SIMV

PD Dr. H. Mang
Klinik für Anästhesiologie
Klinikum der Universität Erlangen-Nürnberg
Krankenhausstr. 12
D-91054 Erlangen
E-mail: mang@anaesthesiologie.med.uni-erlangen.de

keine atemzugsweise Adaptation des Atemantriebs stattfindet, sondern daß der Atemantrieb für einen bestimmten Unterstützungsgrad praktisch konstant ist. Imsand und Mitarbeiter [8] haben dieses Konzept bestätigt und außerdem gezeigt, daß sich bei SIMV die Entlastung der Inspirationsmuskulatur nicht proportional zum Grad der maschinellen Atemunterstützung (SIMV-Frequenz) verhält. Vielmehr muß man in einem schmalen SIMV-Frequenzbereich, der vom jeweiligen Patienten und der Situation abhängt, mit einem raschen Wechsel von einer überwiegenden Beatmung zu einer überwiegenden Spontanatmung rechnen.

Die inspiratorische Druckunterstützung gewährleistet eine größere Harmonie zwischen Patient und Beatmungsgerät als SIMV, weil der Patient nicht nur die Umschaltung von Expiration auf Inspiration bewirkt, sondern auch von Inspiration auf Expiration und damit eine gewisse Kontrolle über die Inspirationszeit und das Tidalvolumen erhält. Das Unterstützungsniveau ist für alle Atemzüge gleich, so daß es sich dem konstanten Atemantrieb gut anpassen läßt. Außerdem ist die Entlastung der Inspirationsmuskulatur proportional zum Unterstützungsgrad [19]. Bei Patienten mit obstruktiver Lungenerkrankung, die mit Druckunterstützung atmen, ist die Höhe des Inspirationsflusses kritisch: Ist er zu hoch, bricht der Patient die Einatmung vorzeitig ab, ist er zu niedrig, verlängert sich die Inspirationszeit auf Kosten der Expirationszeit, was einer dynamischen Lungenüberblähung mit der Entstehung von Auto-PEEP Vorschub leistet und die Atemarbeit erhöht [17].

CPAP ist die Anwendung von positivem Atemwegsdruck während des gesamten Atemzyklus bei Spontanatmung. Der klinische Zweck entspricht dem von PEEP: Erhöhung des mittleren Atemwegsdruckes und des mittleren Lungenvolumens, dadurch Verbesserung der Gasaustauschfläche und der arteriellen Oxygenierung. Beim Weaning spielt CPAP vor allem dann eine Rolle, wenn der Patient von einer hohen inspiratorischen Sauerstoffkonzentration entwöhnt werden muß. Die Effekte von CPAP auf die Atemmechanik, die Atemregulation und das subjektive Empfinden sind komplex und hängen u. a. von der Reaktion des Patienten ab und davon, ob in seinem Bronchialsystem eine expiratorische Flußlimitierung besteht. Der Patient kann durch aktive Ausatmung gegen den positiven expiratorischen Druck ankämpfen und damit den Expirationsflow und das endexpiratorische Volumen wiederherstellen oder dies nicht tun, was zur Folge hat, daß das endexpiratorische Volumen ansteigt. Im ersten Fall, wenn die Expirationsmuskulatur aktiv wird und einen Teil der elastischen inspiratorischen Atemarbeit übernimmt, vermag CPAP die Inspirationsmuskulatur zu entlasten [7]. Im zweiten Fall wäre CPAP der Wiederherstellung einer z. B. postoperativ verminderten funktionellen Residualkapazität dienlich. Beim Fehlen einer expiratorischen Flußlimitierung ist der Nettoeffekt von CPAP unabhängig von seiner Höhe immer negativ [12]. Bei Patienten mit schwerer Atemwegsobstruktion hat ein CPAP von 5 mbar aus-

nahmslos einen günstigen Effekt auf das subjektive Befinden und die körperliche Belastbarkeit [13]. Bei diesen Patienten vermindert CPAP die inspiratorische Atemarbeit und Dyspnoe während der Entwöhnung von der Beatmung, ohne die Ventilation zu verschlechtern [14]. Für die klinische Anwendung ist wichtig, daß die Druckunterstützung die inspiratorische Zwerchfellfunktion während CPAP-Atmung verbessert [18] und daß der CPAP-Modus mancher Beatmungsgeräte automatisch mit einer geringen Druckunterstützung gekoppelt ist [3].

Ist der Patient schließlich bezüglich Ventilation und Oxygenierung vom Respirator entwöhnt, ist der letzte Aspekt seiner Abhängigkeit die vom Trachealtubus. Selbst bei kompetenten Schutz-, Schluck- und Hustenreflexen bleibt die Frage nach der Resistance der oberen Luftwege nach Extubation im Vergleich zum Widerstand des Trachealtubus vor der Extubation. Häufig lassen sich Patienten von 5 mbar Druckunterstützung (Kompensation des Tubuswiderstandes) und 5 mbar CPAP (Kompensation des fehlenden Glottisschlusses während Intubation) problemlos extubieren, weil ihre Atemarbeit mit Trachealtubus und dieser minimalen Assistenz gleich der unter Spontanatmung ohne Tubus ist [2]. Diese Erfahrung hat dazu geführt, daß heute den meisten Patienten die früher übliche Phase am T-Stück erspart bleibt. Mindestens eine klinische Studie weist jedoch darauf hin, daß die Atemarbeit nach der Extubation sogar noch höher sein kann als bei der Atmung über das T-Stück [11]. Von den seltenen Fällen eines negativen Cuff-leakage-Tests abgesehen, wird man nicht vorhersagen können, bei welchen Patienten dieser Fall eintritt, der eine bis dahin erfolgreiche Entwöhnung wieder in Frage stellt.

Schlußfolgerungen

1. Die Standardverfahren der assistierenden Beatmung sind in aller Regel mangelhaft mit den Spontanatmungsbemühungen der Patienten koordiniert und verlangen ihnen eine relevante Atemarbeit ab. Sie sind deshalb nicht für Patienten mit Atemmuskulermüdung oder Patienten im Schock geeignet [6, 16]. Bei einem schwierigen Entwöhnungsverlauf ist einerseits eine umfassende spezifische Diagnostik (z. B. atemmechanische und neurologische Untersuchungen) angezeigt und andererseits auch immer die prinzipielle Eignung des gewählten Entwöhnungsverfahrens zu hinterfragen.
2. Patienten sollen durch erfahrenes Personal nach klinischen Kriterien von der Beatmung entwöhnt werden. Dieses Vorgehen hat sich als erfolgreich erwiesen, ist wissenschaftlich begründet und einem Weaning nach Algorithmen und Indices nicht unterlegen [9].
3. Die Diskussion der letzten 10 Jahre von „A“ wie automatische Beatmung und Entwöhnung mittels closed-loop

Steuerung bis „Z“ wie zusätzliche Atemarbeit durch Ventile und Trachealtuben hat zur Entwicklung moderner Respiratoren geführt, die die maschinelle Beatmung für den Patienten etwas weniger unangenehm gemacht haben. Vom Ideal einer automatischen Optimierung der Interaktionen zwischen Patient und Beatmungsgerät sind wir aber leider noch weit entfernt [15]. Warum dies so ist, zeigt der Beitrag von Xirouhaki und Georgopoulos in diesem Heft [20]. Die Gruppe um Magdy Younes, den „Erfinder“ der Pro-

portional assist ventilation, hat in einer Vielzahl origineller Versuche an lungengesunden, lungenkranken, wachen und schlafenden Individuen die Wechselwirkungen zwischen Atemmechanik, Atemregulation, pulmonalen Reflexen und menschlichen Verhalten auf der einen Seite und der assistierenden Beatmung auf der anderen Seite beschrieben. Ihre Ergebnisse lassen den modernsten Respirator als primitive Krücke erscheinen.

Literatur

1. American College of Chest Physicians' Consensus Conference (1993) Mechanical ventilation. *Chest* 104: 1833–1859
2. 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
3. Calzia E, Lindner KH, Stahl W, Martin A, Radermacher P, Georgieff M (1998) Work of breathing, inspiratory flow response, and expiratory resistance during continuous positive airway pressure with the ventilators EVITA-2, EVITA-4 and SV 300. *Intensive Care Med* 24: 931–938
4. Cinnella G, Conti G, Lofaso F, Lorino H, Harf A, Lemaire F, Brochard L (1996) Effects of assisted ventilation on the work of breathing: Volume-controlled versus pressure-controlled ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 153: 1025–1033
5. Downs JB, Klein EF Jr, Desautels D, Modell JH, Kirby RR (1973) Intermittent mandatory ventilation: a new approach to weaning patients from mechanical ventilators. *Chest* 64: 331–335
6. Flick GR, Bellamy PE, Simmons DH (1989) Diaphragmatic contraction during assisted mechanical ventilation. *Chest* 96: 130–135
7. Hubmayr RD, Abel MD, Rehder K (1990) Physiologic approach to mechanical ventilation. *Crit Care Med* 18: 103–113
8. Imsand C, Feihl F, Perret C, Fitting JW (1994) Regulation of inspiratory neuromuscular output during synchronized intermittent mechanical ventilation. *Anesthesiology* 80: 13–22
9. Leitch EA, Moran JL, Grealby B (1996) Weaning and extubation in the intensive care unit. Clinical or index-driven approach? *Intensive Care Med* 22: 752–759
10. Marini JJ, Smith TC, Lamb VJ (1988) External work output and force generation during synchronized intermittent mechanical ventilation. Effect of machine assistance on breathing effort. *Am Rev Respir Dis* 138: 1169–1179
11. Nathan SD, Ishaaya AM, Koerner SK, Belman MJ (1993) Prediction of minimal pressure support during weaning from mechanical ventilation. *Chest* 103: 1215–1219
12. O'Donnell DE, Sanii R, Giesbrecht G, Younes M (1988) Effect of continuous positive airway pressure on respiratory sensation in patients with chronic obstructive pulmonary disease during submaximal exercise. *Am Rev Respir Dis* 138: 1185–1191
13. O'Donnell DE, Sanii R, Younes M (1988) Improvement in exercise endurance in patients with chronic airflow limitation using continuous positive airway pressure. *Am Rev Resp Dis* 138: 1510–1514
14. Petrof BJ, Legaré 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
15. Ranieri VM (1997) Optimization of patient-ventilator interactions: closed-loop technology to turn the century. *Intensive Care Med* 23: 936–939
16. Schönhofer B, Mang H, Köhler D (1995) Entwöhnung vom Respirator nach Langzeitbeatmung – Das Konzept eines regionalen Entwöhnungszentrums. *Anästhesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 30: 403–411
17. 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
18. Torres A, Kacmarek RM, Kimball WR, Qvist J, Stanek K, Whyte R, Zapoli WM (1993) Regional diaphragmatic length and EMG activity during inspiratory pressure support and CPAP in awake sheep. *J Appl Physiol* 74: 695–703
19. Uchiyama A, Imanaka H, Nobuyuki T, Nakano S, Fujino Y, Yoshiya I (1994) Comparative evaluation of diaphragmatic activity during pressure support ventilation and intermittent mandatory ventilation in animal model. *Am J Respir Crit Care Med* 150: 1564–1568
20. Xirouhaki N, Georgopoulos D (1999) Effects of assisted mechanical ventilation on control of breathing. *Intensivmed* 36: 163–173