

Die Beiträge der Rubrik „Weiterbildung“ sollen dem Stand des zur Facharztprüfung für den Anaesthesisten notwendigen Wissens entsprechen und zugleich dem Facharzt als Repetitorium dienen. Die Rubrik beschränkt sich auf gesicherte Aussagen zum Thema.

# Die Entwöhnung von der Beatmung

## Teil 2

**Die Entwöhnung von der Beatmung hat für den Intensivmediziner eine große klinische Bedeutung. Da die genaue Kenntnis der pathophysiologischen Veränderungen während der Entwöhnung Voraussetzung ist, um beim individuellen Patienten die verschiedenen Verfahren zu beurteilen, wurde die Pathophysiologie im ersten Teil dieser Übersichtsarbeit detailliert beschrieben [1]. Hierauf basierend, sollen im vorliegenden zweiten Teil die verschiedenen Kriterien und Strategien der Entwöhnung dargestellt werden.**

Um einen möglichst zügigen und erfolgreichen Verlauf dieser Phase zu gewährleisten, müssen vor allem drei Ziele verfolgt werden:

- Es sollte so zügig wie möglich der Zeitpunkt identifiziert werden, an dem auch der schwierig zu entwöhnende Patient in der Lage ist, spontan zu atmen.
- Es sollten Methoden vermieden werden, die möglicherweise diesen Zeitpunkt verzögern.
- Es sollten Methoden angewendet werden, die möglichst sicher zur Entwöhnung führen, um dem Patienten jegliche gescheiterten Entwöhnungsversuche mit all ihren negativen Begleiterscheinungen zu ersparen.

Auch wenn während der letzten Jahre in großen multizentrischen Studien der Wert der verschiedenen Verfahren zur Entwöhnung wissenschaftlich untersucht worden ist, bleibt heute noch festzustellen, daß es keine konkreten, wissenschaftlich belegten Präferenzen für ein spezifisches Verfahren beim individuellen Patienten gibt [2–5]. Gerade bei schwierig zu entwöhnenden Patienten wird sich das Vorgehen häufig eher am Einzelfall orientieren, als an einem festen Schema.

Zur Entwicklung einer erfolgreichen ▶ **Entwöhnungsstrategie** müssen vor allem drei Fragen beantwortet werden:

- Wann kann mit der Entwöhnung begonnen werden?
- Welche Kriterien werden für Verlauf und Erfolg der Entwöhnung angelegt?
- Welche Entwöhnungstechnik wird gewählt?

**Es gibt keine wissenschaftlich belegte Präferenz für ein spezifisches Verfahren zur Entwöhnung.**

### ▶ Entwöhnungsstrategie

Durch den Einsatz assistierter Beatmungsformen fällt der Beginn der Entwöhnung nicht mehr notwendigerweise mit der Beendigung der Beatmungstherapie zusammen. Hierdurch ist eine genaue Definition des Zeitpunktes der Entwöhnung erschwert.

#### ► Beginn der Entwöhnung

#### ► Anfallende Atemarbeit ► Kriterien

Klassische Entwöhnungskriterien sind nur bedingt für die Abschätzung während assistierter Beatmung zu verwenden.

#### ► Gescheiterte Entwöhnungsversuche

#### ► Ventilatorabhängigkeit

#### ► Extubationsbereitschaft

## Zeitpunkt der Entwöhnung

Generell gilt, daß mit der Entwöhnung dann begonnen werden sollte, wenn die Gründe, die zur Intubation und maschinellen Beatmung geführt haben, überwunden sind. Während dieser Zeitpunkt bei akuten Krankheitsbildern, oder etwa bei postoperativer Nachbeatmung einfach festzulegen ist, gestaltet sich die Entscheidung bei prolongierten Krankheitsverläufen mit länger dauernder Beatmungstherapie oft schwierig, zumal mit dem Einsatz der heute zur Verfügung stehenden assistierten Beatmungsformen der Beginn der Spontanatmung nicht mehr notwendigerweise mit der Beendigung der maschinellen Beatmung zusammenfällt.

In einem weiteren Wortsinn kann man also den ► **Beginn der Entwöhnung** als den Zeitpunkt definieren, ab dem es möglich ist, die Invasivität der maschinellen Beatmung zu reduzieren. In diesem Sinne beginnt die Entwöhnung etwa mit der Reduktion der  $\text{FiO}_2$ , oder des I:E Verhältnisses, wenn es der Gasaustausch erlaubt. Hierzu ist es nicht unbedingt notwendig, daß der Grund der respiratorischen Insuffizienz schon vollständig überwunden ist. Auch die weiteren Schritte, wie Reduktion des PEEP und der maschinellen Ventilation, werden in dem Maße möglich sein, wie sich die respiratorische Leistungsfähigkeit des Patienten bessert. Wie im ersten Teil diese Artikels ausgeführt, ist hierbei grundsätzlich zu beachten, daß die erforderliche Atemarbeit mit der möglichen Atemarbeit im Gleichgewicht stehen sollte, was den Einsatz von maschineller Unterstützung der Atmung solange erforderlich macht, bis der Patient dieses Gleichgewicht selbständig einhalten kann.

In einem engeren Wortsinn kann der Beginn der Entwöhnung als der Zeitpunkt betrachtet werden, ab dem versucht wird jegliche maschinelle Unterstützung der Ventilation soweit zu reduzieren, daß die gesamte Atemarbeit wieder vom Patienten selbst geleistet wird. Für die Wahl eines geeigneten und möglichst frühen Zeitpunktes, der einer solchen Definition der Entwöhnung entspricht, muß vor allem die Frage beantwortet werden, ob ein Patient in der Lage ist, die ► **anfallende Atemarbeit** ohne weitere Hilfe zu verrichten. Zur Beantwortung dieser Frage sind vielfältige ► **Kriterien** untersucht worden, die hier dargestellt werden sollen.

## Kriterien für die erfolgreiche Entwöhnung

Anhand objektiver Kriterien zur Beurteilung des Verlaufes und des Erfolges der Entwöhnung sollte es möglich sein, die Patienten zu identifizieren, die noch nicht zu entwöhnen sind, um ihnen so ► **gescheiterte Entwöhnungsversuche** zu ersparen, die nicht nur schwere kardio-zirkulatorische und respiratorische Nebenwirkungen haben können, sondern auch psychisch sehr belastend sind. Bei diesen Patienten sollte anhand der Entwöhnungskriterien auch die mögliche Ursache der weiteren ► **Ventilatorabhängigkeit** beurteilbar sein, um so eventuelle Änderungen des therapeutischen Management objektivieren zu können. Auf der anderen Seite sollten die Patienten identifiziert werden können, die einfach und schnell zu entwöhnen sind, damit die Beatmungstherapie nicht unnötig prolongiert wird.

## Klassische Entwöhnungskriterien

Die klassischen Kriterien für die erfolgreiche Entwöhnung wurden vor allem für den direkten Übergang von der kontrollierten Beatmung zur Spontanatmung an einem T-Stück System formuliert (Tabelle 1). Diese Kriterien sind allerdings mehrfach in Zweifel gezogen worden, da sie nur für Kurzzeitbeatmungen evaluiert wurden und für die Entwöhnung nach länger dauernder Beatmung einen nur geringen Vorhersagewert besitzen. Mit den heute zur Verfügung stehenden Verfahren zur ventilatorischen Unterstützung während der Entwöhnung würde bei Anwendung dieser klassischen Kriterien die Phase des Weaning unnötig verlängert, so daß diese Parameter, heute eher zur Abschätzung der ► **Extubationsbereitschaft** benutzt werden sollten.

## ▶ Oxygenierung

▶ PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub>-Verhältnis▶ AaDO<sub>2</sub>

## ▶ „CROP-Index“

## Gasaustauschkriterien

Die Entwöhnungskriterien, die sich auf die ▶ **Oxygenierung** beziehen, sind besonders problematisch, weil sie neben der eingestellten FiO<sub>2</sub> stark vom PEEP- bzw. CPAP-Niveau abhängen. Aus diesem Grunde sollten lediglich Oxygenierungsindizes wie etwa das ▶ **PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub>-Verhältnis**, die alveolo-arterielle Sauerstoffdifferenz (AaDO<sub>2</sub>), oder das arterio-alveoläre Sauerstoffverhältnis (PaO<sub>2</sub>/PAO<sub>2</sub>) benutzt werden.

Die ▶ **AaDO<sub>2</sub>** berechnet sich als alveolärer PO<sub>2</sub> (PAO<sub>2</sub>) minus dem arteriellen PO<sub>2</sub> (PaO<sub>2</sub>):

$$(1) \quad AaDO_2 = PAO_2 - PaO_2$$

Hierzu ist die Kenntnis des PAO<sub>2</sub> notwendig, der sich aus der modifizierten alveolären Gasgleichung wie folgt abschätzen läßt:

$$(2) \quad PAO_2 = (PB - PH_2O) * FiO_2 - PaCO_2 / R$$

Hierbei ist PB der umgebende Luftdruck; PH<sub>2</sub>O der Partialdruck des Wasserdampfes, der sich bei einer Körpertemperatur von 37°C in der Lunge auf 47 mmHg belüftet, und R der respiratorische Quotient, der bei normaler Ernährungszusammensetzung und Stoffwechsellaage bei 0,8 angenommen werden kann.

Generell wird empfohlen, daß zur Entwöhnung bei einer FiO<sub>2</sub> von 0,4 ein PaO<sub>2</sub> >60 mmHg erreicht werden sollte. Der PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> Quotient sollte also mindestens 150 mmHg betragen.

Während das PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> Verhältnis einen nur geringen Vorhersagewert für den Verlauf der Entwöhnung hat [6], wurde das PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> Verhältnis als Bestandteil des relativ präzisen ▶ „CROP-Index“ benutzt. Dieser Index setzt sich zusammen aus der dynamischen Compliance (C) des respiratorischen Systems, der Atemfrequenz (R = rate), der Oxygenierung und dem maximalen inspiratorischen Druck (P = P<sub>imax</sub>):

$$(3) \quad CROP = C * P_{imax} * [PaO_2 / PAO_2] / R$$

Neben dem Atemmuster (s.u.) wurde dieser Index als sensitiver und spezifischer für den Verlauf der Entwöhnung beschrieben [7], als die klassischen Entwöhnungskriterien. Da weder die Berechnung des PaO<sub>2</sub>/PAO<sub>2</sub> Verhältnisses, noch die Messung von P<sub>imax</sub> in der klinischen Routine durchgeführt werden, wird der CROP Index klinisch allerdings nur selten angewendet. Zur Vorhersage des vermutlichen Erfolges wurde hierfür ein Grenzwert von 13 ml \* Atemzug<sup>-1</sup> \* min<sup>-1</sup> angegeben.

Tabelle 1

## Klassische Kriterien für die erfolgreiche Entwöhnung

|   |                              |
|---|------------------------------|
| Atemzugvolumen (T <sub>V</sub> )                | > 5 ml/kg                    |
| Vitalkapazität (VC)                             | > 10–15 ml/kg                |
| Atemfrequenz (f)                                | < 35/min                     |
| Atemminutenvolumen (V <sub>E</sub> )            | < 10 l/min                   |
| Maximales V <sub>E</sub>                        | > 2 x V <sub>E</sub> in Ruhe |
| Maximale Inspirationskraft (P <sub>imax</sub> ) | > 25–30 cm H <sub>2</sub> O  |
| Atemwegsokklusionsdruck (P0.1)                  | < 7 cmH <sub>2</sub> O       |
| PaO <sub>2</sub> (FiO <sub>2</sub> < 0,4)       | > 60 mmHg                    |
| PaCO <sub>2</sub> -Anstieg                      | < 8 mmHg                     |
| pH  | > 7.30                       |

- ▶ Respiratorische Muskelermüdung
- ▶ Atemmuster

- ▶  $f/V_t$ , rapid shallow breathing index

Der Quotient aus Atemfrequenz und Tidalvolumen „rapid shallow breathing index“ kann als guter Vorhersagewert für die Entwöhnung benutzt werden.

- ▶ Atemarbeit

- ▶ Oxygen cost of breathing

- ▶ Atemantrieb

Der  $P_{0.1}$  kann als Parameter zur Abschätzung der neuro-muskulären Aktivierung des respiratorischen Systems benutzt werden.

## Muster der Atmung

Eingedenk der Tatsache, daß eine häufige Ursache der gescheiterten Entwöhnung in der Entwicklung einer ▶ **respiratorischen Muskelermüdung** besteht, die durch typische klinische Veränderungen des ▶ **Atemmusters** gekennzeichnet ist, wurde das Atemmuster als valider und einfach zu bestimmender Parameter für die erfolgreiche Entwöhnung beschrieben. Yang und Tobin zeigten in einer prospektiven Untersuchung [7], daß der Quotient aus Atemfrequenz (ausgedrückt als 1/min) und Atemzugvolumen (ausgedrückt in L) (▶  **$f/V_t$ , rapid shallow breathing index**) den besten Vorhersagewert für den Verlauf der Entwöhnung hatte. Lag dieser Quotient über  $105/\text{min} \cdot \text{L}^{-1}$  war der Entwöhnungsversuch bei 95% der untersuchten Patienten nicht erfolgreich, während die meisten Patienten mit einem  $f/V_t$ -Quotienten  $<100$  erfolgreich zu entwöhnen waren.

## Atemarbeit und $O_2$ -Verbrauch der Atmung

Von mehreren Arbeitsgruppen wurde ein Zusammenhang zwischen der Höhe der ▶ **Atemarbeit** und dem Erfolg der Entwöhnung beschrieben, so wie es auch dem vorgestellten pathophysiologischen Konzept der Entwöhnung entsprechen würde. Da die Atemarbeit nur schwierig zu messen ist, wurde als indirektes Maß hierfür der gesteigerte  $O_2$ -Verbrauch bei einsetzender Spontanatmung benutzt. Die Differenz des  $VO_2$  zwischen kontrollierter Beatmung und Spontanatmung sollte demnach der Zunahme des  $O_2$ -Verbrauchs der nun arbeitenden Atemmuskulatur entsprechen, und entsprechend mit der Höhe der inspiratorischen Atemarbeit korrelieren (▶ **oxygen cost of breathing**). Die  $VO_2$ -Differenz kann nicht – invasiv mit Hilfe der indirekten Kalorimetrie bestimmt werden. Auch wenn es bezüglich der Grenzwerte für die  $VO_2$ -Differenz während des Weanings unterschiedliche, zum Teil widersprüchliche Ergebnisse gibt, gilt generell, daß ein exzessiver  $VO_2$ -Anstieg bei Spontanatmung eine erfolgreiche Entwöhnung unwahrscheinlich macht [6].

## Atemwegsokklusionsdruck ( $P_{0.1}$ )

Als weiteres Entwöhnungskriterium wurde der sogenannte Atemwegsokklusionsdruck ( $P_{0.1}$ ) untersucht. Der  $P_{0.1}$  ist der negative Druck, der in den ersten 100 msec einer Inspiration gegen ein geschlossenes System generiert wird. Da hierbei kein Gas im respiratorischen System fließt, ist dieser Wert von Größen, wie der Compliance oder der Resistance weitgehend unabhängig. Bei gegebener Muskelkraft ist der generierte negative  $P_{aw}$  direkt proportional zum ▶ **Atemantrieb**, weswegen der  $P_{0.1}$  mit gewissen Einschränkungen als direkter Parameter des zentralen Atemantriebs gelten kann [8]. Während die Normalwerte beim Gesunden bei 1–2 cm  $H_2O$  liegen, ist der  $P_{0.1}$  während der akuten respiratorischen Insuffizienz deutlich erhöht, und sinkt wieder mit Besserung der respiratorischen Leistungsfähigkeit. Dementsprechend wurde ein niedriger  $P_{0.1}$  als guter prädiktiver Wert für die erfolgreiche Entwöhnung angegeben. Auch hier besteht aber hinsichtlich des Grenzwertes für eine erfolgreiche Entwöhnung keine Klarheit, da je nach Studie Grenzwerte zwischen 3–6 cm  $H_2O$  angegeben werden. Desweiteren gilt zu berücksichtigen, daß ein hoher Atemantrieb sowohl auf eine noch unzureichende respiratorische Funktion hinweisen kann, als auch durch das An kämpfen eines Patienten gegen die Beatmung oder den Endotrachealtubus, durch Schmerzen, oder psychische Agitiertheit bedingt sein kann. Deswegen ist weniger der Absolutwert, als mehr der Trend des  $P_{0.1}$  für den Erfolg der Entwöhnung von Bedeutung.

Der  $P_{0.1}$  wurde zwar in vielen wissenschaftlichen Untersuchungen benutzt, nicht aber in der klinischen Praxis, da die Messung mit einem relativ hohen technischen Aufwand verbunden war. Da die  $P_{0.1}$  Messung heute als Standardoption in neueren Respiratoren für die klinische Anwendung zur Verfügung steht, kommt diesem Parameter neben dem ebenfalls einfach zu messenden Atemmuster eine klinische Bedeutung zu [9].

### ► Toleranz

Die Entwöhnung soll schrittweise verlaufen, so daß erst nachdem der Patient einen Schritt gut toleriert hat der nächste Schritt erfolgen soll.

### ► Repiratorische Muskulatur

### ► Erschöpfung während Spontanatmungsversuchen

### ► Akzidentelle Extubation

Häufige, standardisiert durchgeführte Tests der Spontanatmung können helfen, den Entwöhnungsverlauf zu objektivieren und zu verkürzen.

### ► Protokoll

### ► Entwöhnungsprotokolle

### ► Erhöhung der Atemarbeit

All die verschiedenen Ansätze belegen, daß es auch heute nicht möglich ist, die Entwöhnung anhand eines objektiv erfaßbaren Kriteriums beurteilen zu können. Vielmehr sollten im konkreten Fall alle zur Verfügung stehenden klinischen und physiologischen Parameter kombiniert werden, um so zu einer Einschätzung zu gelangen. Von großer Wichtigkeit ist immer die Frage nach der individuellen ► **Toleranz** des Patienten, weswegen generell gilt, daß mit dem nächsten Schritt der Entwöhnung immer erst dann begonnen werden sollte, wenn der Patient die bisherigen Schritte gut toleriert hat. Es sei nochmals betont, daß die Entwicklung einer inspiratorischen Muskulermüdung im Verlaufe der Entwöhnung unbedingt zu verhindern ist, da die ► **respiratorische Muskulatur** einer langen Erholungszeit nach einer solchen Erschöpfungsperiode bedarf, um wieder leistungsfähig zu werden [10]. Deswegen wird jeder gescheiterte Entwöhnungsversuch die Dauer des Weaning erhöhen.

## Techniken der Entwöhnung

### Weaningprotokolle

Bemerkenswert ist, daß in mehreren Untersuchungen ein Prozentsatz von ca. 20% der Patienten, welche die verschiedensten Kriterien zur Entwöhnung erfüllen, Zeichen der ► **Erschöpfung während Spontanatmungsversuchen** zeigen [3, 4, 11], und deswegen als schwierig zu entwöhnen eingestuft (s.o.) und in aller Regel nicht extubiert werden.

Die Tatsache, daß bis zu 50% der Patienten mit ► **akzidenteller Extubation** keine Reintubation benötigten [12] zeigt allerdings, daß offensichtlich ein relevanter Anteil dieser Patienten maschinell beatmet wird, ohne daß dies wirklich nötig wäre. Hieraus kann man schließen, daß es in der klinischen Praxis trotz all der beschriebenen Parameter an einem standardisierten Vorgehen mangelt, um den optimalen Zeitpunkt der definitiven Entwöhnung von der Beatmung festzulegen.

Entsprechend dieser Überlegung wurde von Ely und Mitarbeitern eine Untersuchung an 300 Patienten während des Weaning durchgeführt, um den Einfluß eines täglichen Tests der Spontanatmung auf die Dauer und den Verlauf der Entwöhnung zu untersuchen. Als Kontrollgruppe wurde ein Kollektiv von Patienten betrachtet, welches mit dem üblichem klinischen Vorgehen, d.h. nach Einschätzung des behandelnden Arztes, entwöhnt wurde. In der Interventionsgruppe wurde das Ergebnis des täglichen Spontanatmungsversuches dem behandelnden Arzt mitgeteilt, der wiederum die Entscheidung über die eventuelle Entwöhnung hierauf basierend traf. Allein durch die Anwendung der täglichen Spontanatmungsversuche konnte die Anzahl der erfolgreich entwöhnten Patienten erhöht und damit die Zeit der Beatmungstherapie verkürzt werden [5].

Auch in einer großen randomisierten Untersuchung von Kollef und Mitarbeitern konnte gezeigt werden, daß die Anwendung eines strikten ► **Protokolls** während der Entwöhnung zu einem erfolgreicherem und zügigerem Verlauf führte, als die Entwöhnung nach Einschätzung der behandelnden Ärzte [2]. Offensichtlich wird also in der klinischen Praxis eine eher konservative Einstellung bevorzugt, die allerdings zur Folge hat, daß ein relevanter Anteil von Patienten beatmet bleiben, obwohl sie eigentlich entwöhnt werden könnten. Diesem Umstand kann durch die Anwendung von ► **Entwöhnungsprotokollen** Abhilfe geschaffen werden, so daß solche Protokolle wesentlicher Bestandteil einer Entwöhnungstechnik sein sollten.

### Das Problem der zusätzlichen Atemarbeit

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde beschrieben, daß vor allem der Endotrachealtubus aber auch die nicht-idealen Eigenschaften von „Demand Flow Ventilatoren“ zu einer ► **Erhöhung der Atemarbeit** führen. Hierdurch müssen intubierte Patienten während eines „T-Stück-Versuches“ eine zusätzliche Atemarbeit leisten, die nach der Extubation wegfällt. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Frage, ob „T-Stück-Versuche“ wirklich geeignet sind, um die Spontanatemkapazität zu testen. Patienten, die

Intubierte Patienten haben aufgrund der Widerstandserhöhung durch den Endotrachealtubus eine zusätzliche Atemarbeit zu leisten, die nach Extubation wegfällt.

► **Inspiratorische Druckunterstützung**

Mit einer geringen inspiratorischen Druckunterstützung kann die zusätzliche Atemarbeit kompensiert werden, wobei die Höhe der Druckunterstützung beim individuellen Patienten variabel und abhängig vom Flußmuster ist.

► **Tubusbedingte zusätzliche Atemarbeit**

► **„Automatische Tubuskompensation (ATC)“**

zwar ihre eigene Atemarbeit leisten könnten, jedoch wegen der zusätzlichen Atemarbeit durch den Tubus zu erschöpfen drohen, würden einen „T-Stück-Versuch“ nicht erfolgreich abschließen. Diese Patienten könnten nach der Extubation – durch den Wegfall der zusätzlichen Atemarbeit – eine ausreichende Atemkapazität aufweisen. Der Anteil der Patienten, die bei einem solchen Verfahren nicht extubiert wird, könnte demnach unnötig hoch sein. Um dieses Problem zu umgehen wurden verschiedene Anstrengungen unternommen, die zusätzliche Atemarbeit maschinell zu kompensieren.

**Kompensation der zusätzlichen Atemarbeit**

In mehreren Studien konnte gezeigt werden, daß eine geringe ► **inspiratorische Druckunterstützung** während der Inspiration zur Kompensation der systembedingten Atemarbeit genutzt werden kann [13]. Die Höhe der hierzu notwendigen Druckunterstützung ist maßgeblich von der Grunderkrankung abhängig. Während bei unproblematischen Krankheitsbildern, etwa bei der postoperativen Nachbeatmung bei sonst lungengesunden Patienten, ein Druckunterstützung von 4–8 mbar ausreicht, sind z.B. nach schwerem ARDS oder bei COPD ca. 10–12 mbar notwendig, um die systembedingte Atemarbeit zu kompensieren. Die Einstellung der Höhe der Druckunterstützung ist allerdings für den individuellen Patienten schwierig, da der Tubuswiderstand und damit die tubusbedingte Mehrarbeit nicht-linear vom Gasfluß abhängig sind, der bei Spontanatmung sehr variabel sein kann. Somit wird auch die ► **tubusbedingte zusätzliche Atemarbeit** zu einer variablen flußabhängigen Größe, die mit einer fixen Druckunterstützung nur unzureichend kompensiert werden kann (Abb. 1). Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die konventionelle Druckunterstützung dahingehend modifiziert, daß sie nicht mehr fix, sondern entsprechend des nicht-linearen Zusammenhangs zwischen Tubuswiderstand und Gasfluß appliziert wird. Da mit einem solchen Verfahren der Tubuswiderstand sehr exakt für jeglichen Gasfluß kompensiert wird, wurde das Verfahren ► **„Automatische Tubuskompensation (ATC)“** genannt.

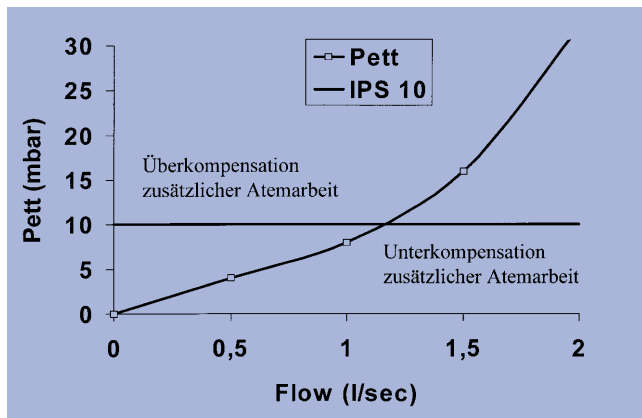


Abb. 1 ▲ Schematische Darstellung des Druckverlustes über den Endotrachealtubus (Pett) in Abhängigkeit vom Gasfluß (Flow). Da der exponentielle Anstieg von Pett bei steigendem Flow die wesentliche Determinante der zusätzlichen Atemarbeit darstellt, wird verständlich, daß mit einer fixen Druckunterstützung von z.B. 10 mbar (IPS 10) die zusätzliche Atemarbeit eigentlich nur bei einem fixen Fluß kompensiert exakt werden kann. Da bei Spontanatmung der Gasfluß aber variable ist, wird sich mit IPS entweder eine Unterkompensation bei hohem Flow (am Beginn der Inspiration) oder Überkompensation bei niedrigem Flow ergeben. Im Gegensatz zur fixen Druckunterstützung wird bei der „Automatischen Tubuskompensation“ der Atemwegsdruck so gesteuert, daß zu jedem Flow der entsprechende Pett vom Beatmungsgerät übernommen wird, so daß der Patient auch bei variablem Gasfluß vollständig von der tubusbedingten Atemarbeit entlastet werden kann

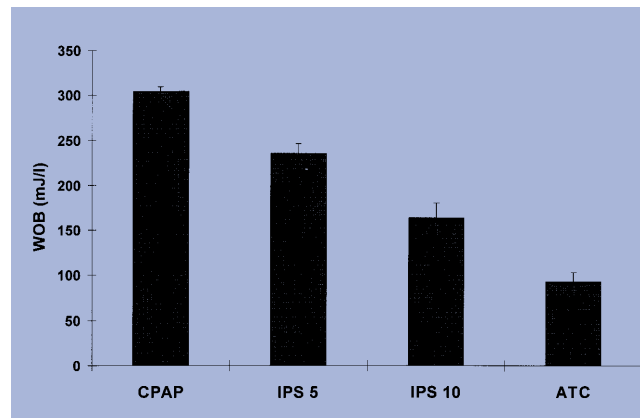


Abb. 2 ▲ Zusätzliche Atemarbeit (WOB) bei verschiedenen Verfahren zur assistierten Spontanatmung. Während unter CPAP die Atemarbeit am höchsten ist, kann sie bei druckunterstützter Beatmung mit 5, bzw. 10 mbar (IPS 5, IPS 10) progressiv kompensiert werden. Die beste Kompensation der zusätzlichen Atemarbeit läßt sich aber mit automatischer Tubuskompensation (ATC) erreichen. Die gezeigten Werte wurden in einem mechanischen Lungenmodell bei einem Gasfluß von 1 l/sec, einem Atemzugvolumen von 500 ml, einer Atemfrequenz von 30/min erhoben. Das Lungenmodell war über einen 8,0 mm Tubus und Standardschläuche mit dem Beatmungsgerät (Evita 2, Dräger AG, Lübeck) verbunden

Mit der „Automatischen Tubuskompensation (ATC)“ wird bei jedem Fluß genau der Druck appliziert, der notwendig ist, die zusätzliche Atemarbeit zu kompensieren. Der Patient kann atmen als sei er „elektronisch extubiert“.

► „T-Stück-Versuchen“  
► Druckunterstützung

► Reintubation

► Beatmungsregime

Es wurde in experimentellen und klinischen Untersuchungen gezeigt, daß mit diesem Verfahren die beste Kompensation der zusätzlichen Atemarbeit bei verschiedensten Atemmustern erreicht wird [13], (Abb. 2). Da hierdurch der Hauptanteil der gesamten zusätzlichen Atemarbeit kompensiert wird, kann der Patient so atmen als sei er tatsächlich extubiert, weswegen sich dieses Verfahren gut eignet, einen Patienten daraufhin zu untersuchen, ob er erfolgreich extubiert werden kann. Auch wenn all diese Befunde vielversprechend erscheinen, liegen noch keine ausreichenden Untersuchungen darüber vor, ob im Vergleich zu anderen Verfahren ein klinisch meßbarer Vorteil für die Phase der Entwöhnung resultiert, so daß dieser Ansatz zur Zeit noch nicht endgültig einzuschätzen ist.

#### T-Stück versus Druckunterstützung bei Spontanatmungsversuchen

Esteban und Mitarbeiter untersuchten den Aussagewert von ► „T-Stück-Versuchen“ verglichen mit Spontanatmungsversuchen unter 7 mbar ► **Druckunterstützung** in einer großen, randomisierten Studie [11]. Diese Autoren fanden, daß die Häufigkeit der ► **Reintubation** nach erfolgreichen Spontanatmungsversuchen für beide Verfahren gleich waren. Der Spontanatmungsversuch wurde allerdings von mehr Patienten in der Gruppe mit druckunterstützter Beatmung erfolgreich abgeschlossen. Dieser Befund steht im Einklang mit der obigen These, daß „T-Stück-Versuche“ gegebenenfalls nur deswegen nicht erfolgreich sind, da die Patienten die zusätzliche Atemarbeit zur Überwindung des Tubus nicht aufbringen können. Diese Patienten werden einen Spontanatmungsversuch mit maschineller Kompensation der zusätzlichen Atemarbeit erfolgreich bestehen, so daß sie bei einem solchen Vorgehen extubiert werden können, ohne daß es hierdurch zu einer Zunahme der Reintubationsrate verglichen zum „T-Stück-Versuch“ kommt. Hierauf basierend können beide Verfahren für den Spontanatmungsversuch empfohlen werden, wobei vor dem dargestellten pathophysiologischen Hintergrund die Argumente für die Anwendung einer geringen Druckunterstützung überwiegen.

#### Beatmungstechniken bei schwierig zu entwöhnenden Patienten

Die Frage, welches ► **Beatmungsregime** beim schwierig zu entwöhnenden Patienten zu wählen ist, wird nach wie vor kontrovers diskutiert. Da aber die verschiedenen Verfahren zur partiellen Unterstützung der Spontanatmung, wie auch die intermittierende Anwendung des „T-Stücks“ bei ansonsten assistiert-kontrollierter Beatmung weite Verbreitung gefunden haben, sollen die verschiedenen Techniken hier kurz rekapituliert werden.

#### Vollständige Unterstützung der Ventilation mit intermittierenden „T-Stück-Versuchen“

Das wohl traditionellste Verfahren zur Entwöhnung von der Beatmung besteht darin, den Patienten intermittierend von der maschinellen Beatmung zu diskonnektieren und über ein „T-Stück“ gänzlich spontan atmen zu lassen. In der Praxis finden hierfür die sogenannten „feuchten Nase“ häufige Verwendung, die lediglich eine gewisse Anreicherung der Atemluft mit O<sub>2</sub> ermöglichen. Alternativ hierzu werden auch Schlauchsysteme verwendet, die neben der O<sub>2</sub>-Anreicherung eine Befeuchtung und Erwärmung des Inspirationsgases oder die Anwendung eines geringen kontinuierlichen Atemwegsdruckes (CPAP) ermöglichen. Die Dauer dieser „T-Stück-Versuche“ ist variable und wird sich maßgeblich an der individuellen Toleranz des Patienten orientieren. Vielerorts wird die Dauer progressiv erhöht oder es werden mehrmals täglich solche Versuche durchgeführt, ohne daß es hierfür aber eine gut dokumentierte Grundlage gibt. In der Multizenterstudie von Esteban und Mitarbeitern wurde kein Vorteil der mehrmaligen Anwendung dieser „T-Stück-Versuche“ verglichen mit einmal täglicher Durchführung für den Verlauf der Entwöhnung gefunden [3]. Zwischen

▶ **Kontrollierte oder assistiert-kontrollierte Beatmung**

▶ **Erholung der Muskulatur**

▶ **Erschöpfung der Atemmuskulatur**

▶ **Assistierte Spontanatmungsverfahren**

▶ **Triggermechanismus**

▶ **SIMV**

den Phasen der reinen Spontanatmung wird bei diesem Vorgehen der Patient in aller Regel **▶ kontrolliert oder ▶ assistiert – kontrolliert beatmet**.

Bei allen Verfahren zur kontrollierten Beatmung leistet der Patient keinerlei Atemarbeit, sondern die gesamte Ventilation wird maschinell bewältigt. Hierdurch kann die Atemmuskulatur vollständig entlastet werden, was gerade im Verlauf der schwierigen Entwöhnung oder nach gescheiterten Entwöhnungsversuchen zur **▶ Erholung der Muskulatur** sinnvoll sein kann.

Bei der assistiert-kontrollierten Beatmung bleibt dem Patienten die Möglichkeit das Beatmungsgerät zu triggern, worauf nach jedem Triggerimpuls ein maschinell festgelegter Atemhub erfolgt. Im Unterschied zur vollständig kontrollierten Beatmung leistet der Patient bei dieser Form der Beatmung einen gewissen Anteil der Atemarbeit selbst, und auch das Atemmuster ist zumindest teilweise vom Patienten bestimmt.

### **Partielle Unterstützung der Ventilation**

Im Gegensatz zur kontrollierten Beatmung, bei der die gesamte Atemarbeit vom Beatmungsgerät geleistet wird, ist allen Verfahren zur partiellen Unterstützung der Ventilation gemeinsam, daß lediglich ein variabler Teil der Atemarbeit maschinell übernommen wird, so daß der Patient um diesen Anteil entlastet werden kann. Der Hauptvorteil liegt darin, daß so einer **▶ Erschöpfung der Atemmuskulatur** vorgebeugt werden kann, und daß die Invasivität der maschinellen Ventilation minimiert wird, indem bei diesen Verfahren die negativen Rückwirkungen der Beatmung auf die Hämodynamik, die Nierenfunktion oder auch die Funktion des Gastrointestinaltraktes verringert werden. Außerdem entfällt die Notwendigkeit zur tiefen Sedierung oder Muskelrelaxation. Aus diesen Gründen werden die **▶ assistierten Spontanatmungsverfahren** heute nicht nur für die schwierige Entwöhnung, sondern schon relativ früh im Verlauf eines respiratorischen Versagens angestrebt [14, 15].

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten die Spontanatmung maschinell zu unterstützen: Die maschinellen Atemhübe können intermittierend zwischen den Spontanatemzügen verabreicht werden (z.B. intermittend mechanical ventilation, IMV), oder jede einzelne Atembemühung kann maschinell unterstützt werden (z.B. druckunterstützte Beatmung, IPS).

### **Intermittierende maschinelle Ventilation (IMV)**

IMV wurde erstmals 1973 in die Klinik eingeführt, indem an einem Gerät zur kontrollierten Beatmung ein zusätzliches kontinuierliches Flow-System an das Inspirationsventil angeschlossen wurde, so daß der Patient zwischen den maschinellen Atemhüben ohne Abfall des vorgegebenen PEEP einatmen konnte. Durch Reduktion der maschinellen Atemfrequenz konnte der Patient so schrittweise von der Beatmung entwöhnt werden. Während anfangs die maschinellen Atemhübe asynchron erfolgten, werden diese heute über einen **▶ Triggermechanismus** an die Spontanatmung synchronisiert (**▶ SIMV**). In den heute zur Verfügung stehenden Respiratoren wird der Gasfluß für die Spontanatmung nicht mehr kontinuierlich, sondern durch ein Demand Flow System zur Verfügung gestellt. Hierdurch wird die zusätzliche Atemarbeit für die Spontanatemzüge bei SIMV höher als mit kontinuierlichen Flow-Systemen. Außerdem bleibt die Atemmuskulatur auch während der maschinell applizierten Atemhübe aktiv, so daß die Atemarbeit bei ungünstiger Einstellung der Frequenz, des Atemzugvolumens oder der Flowcharakteristik sogar deutlich erhöht sein kann. Mit SIMV ist also eine graduelle Reduktion der maschinellen Ventilation während der Entwöhnung möglich, wobei aber nicht notwendigerweise die gewünschte Entlastung des Patienten erreicht wird. Zur Vermeidung der systembedingten zusätzlichen Atemarbeit wird SIMV häufig mit einer geringen Druckunterstützung für die spontanen Atemzüge kombiniert.



## Inspiratorische Druckunterstützung (IPS)

Die inspiratorische Druckunterstützung wurde erstmals 1981 in die Klinik eingeführt. Hierbei handelt es sich um eine Form der druckgesteuerten Beatmung, bei der jeder Spontanatemzug nach Überwindung einer Triggerschwelle solange mit einer Gasströmung unterstützt wird, bis ein vorgewählter Atemwegsdruck erreicht ist. Sobald die Gasströmung um einen bestimmten Wert unterschritten wird oder der Atemwegsdruck über das gewählte Maß ansteigt, wird die Inspiration beendet, und die Expiration wird freigegeben. Bei ausreichendem **▶ inspiratorischen Hilfsdruck** wird hiermit eine gute Reduktion der Atemarbeit erreicht, während der Patient die Kontrolle über das Atemmuster weitgehend behält. Die alleinige Anwendung von IPS erfordert einen ausreichenden **▶ Atemantrieb** des Patienten, da im Gegensatz zu SIMV keine festen maschinellen Atemhübe erfolgen. Mit IPS kann in aller Regel eine gute Entlastung des Patienten und meist auch eine gute Adaptation zwischen Patient und Ventilator erreicht werden. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Höhe der Druckunterstützung optimalerweise eingestellt werden sollte. Theoretisch wird die Spontanatmung dann optimal unterstützt, wenn die Aktivität der Inspirationsmuskulatur nicht zur Erschöpfung führt. Als einfacher klinischer Anhalt hierfür kann die Aktivierung der **▶ Atemhilfsmuskulatur** dienen, die bei ausreichender Druckunterstützung möglichst gering sein sollte. Außerdem sollte sich die Höhe der Druckunterstützung am Atemmuster ( $f$ ,  $V_t$ ,  $f/V_t$ ), sowie am Atemantrieb ( $P_{0.1}$ ) orientieren. Die graduelle Reduktion der maschinellen Ventilation kann durch die Reduktion des **▶ inspiratorischen Unterstützungsdrucks** gesteuert werden. Ist bei zufriedenstellendem Atemmuster das Druckniveau erreicht, mit dem lediglich die zusätzliche Atemarbeit kompensiert wird (s.o.), kann der Patient in aller Regel erfolgreich extubiert werden.

## Neuere Ansätze der partiellen Unterstützung der Spontanatmung

Neben SIMV und IPS wurden in den letzten Jahren mehrere Formen der assistierten Spontanatmung entwickelt und auch in modernen Respiratoren technisch umgesetzt. Da der klinische Stellenwert dieser Beatmungsformen für die Phase der Entwöhnung noch nicht so ausführlich untersucht ist, sollen sie hier nur kurz dargestellt werden.

## Biphasic positive airway pressure (BIPAP)

Die zugrundeliegende Idee des BIPAP ist es, ein System zu schaffen, mit dem die Ventilation maschinell unterstützt werden kann, aber in jeder Phase des Respiratorzyklus eine völlig **▶ freie Durchatembarkeit** für den Patienten gewährleistet bleibt. Am ehesten lässt sich BIPAP als die Kombination einer drucklimitierten, zeitgesteuerten Beatmung mit erhaltener Spontanatmung beschreiben. In einem solchen System werden zwei verschiedene Druckniveaus vorgewählt, zwischen denen nach einer einstellbaren Zeitspanne umgestellt wird. Auf beiden Druckniveaus hat der Patient über ein Demand Flow System die Möglichkeit spontan zu atmen. Der Anteil der maschinellen Ventilation ergibt sich aus den Volumenverschiebungen beim Umschalten zwischen dem unteren und dem oberen Druckniveau, die vor allem von den Dehnungseigenschaften der Lunge abhängig sind. Bei fehlender Spontanatmung gleicht BIPAP der druckkontrollierten Beatmung. Bei einsetzender Spontanatmung wird der Patient zunächst auf dem unteren Druckniveau atmen, woraus sich ein ähnliches Bild wie bei druckkontrollierter SIMV Beatmung ergibt. Originäres BIPAP ist erst dann erreicht, wenn der Patient auf beiden Druckniveaus spontan atmet. Der Anteil der maschinellen Ventilation kann über eine Verringerung der Druckamplitude zwischen oberem und unterem BIPAP-Druck und über eine Verkürzung der Zeit für das obere Druckniveau erreicht werden. Hieraus ergibt sich, daß BIPAP einen fließenden Übergang von kontrollierter Beatmung zur Spontanatmung ermöglicht, ohne den eigentlichen Modus verändern zu müssen (vgl. [14]).

▶ Inspiratorischen Hilfsdruck

▶ Atemantrieb

▶ Atemhilfsmuskulatur

▶ Inspiratorischen Unterstützungsdruck

▶ Freie Durchatembarkeit

- ▶ **Volumen-proportionale Applikation**
- ▶ **Flußproportionale Applikation**

- ▶ **PAV = zusätzlicher Atemmuskel**

**Große multizentrische Studien zeigen, daß es durch die standardisierte Anwendung verschiedener Beatmungsmodalitäten möglich ist, die Entwöhnung positiv zu beeinflussen, ohne daß aber eine klare Präferenz für ein Verfahren gezeigt werden konnte.**

## Proportional assist ventilation (PAV)

Bei allen klassischen Beatmungsverfahren kommt es zu einer Diskrepanz zwischen der Inspirationsbemühung des Patienten und der tatsächlich erreichten Ventilation. Es kann zwar mit einem höheren inspiratorischen Kraftaufwand ein größeres Atemzugvolumen generiert werden, jedoch bleibt die Höhe der maschinellen Unterstützung hiervon unbeeinflusst, so daß die notwendige Mehrarbeit vollständig vom Patienten aufgebracht werden muß. Die Grundidee von PAV ist es, diese Diskrepanz dahingehend zu vermeiden, daß die maschinelle Unterstützung nicht fest ist, sondern proportional zur Inspirationsbemühung verabreicht wird.

Während eines Atemzuges wird bei PAV die maschinelle Druckunterstützung proportional zum generierten Atemzugvolumen (▶ **volumen-proportional**) oder zum generierten Gasfluß (▶ **flußproportional**) appliziert. Bei gesteigerter Inspirationsbemühung mit höherem Volumen oder Gasfluß wird also eine proportional höhere Druckunterstützung vom Respirator verabreicht, so daß die Mehrarbeit für eine tiefere Inspiration nicht nur vom Patienten aufgebracht werden muß, sondern auch durch eine größere maschinellen Unterstützung mitgetragen wird. In diesem Sinne kann das Beatmungsgerät während ▶ PAV als ein **zusätzlicher Atemmuskel** betrachtet werden, der vollständig der Steuerung durch den Patienten unterliegt, wodurch eine optimale Adaptation zwischen Patient und Respirator ermöglicht wird. Auch zu diesem Verfahren liegen nur wenige Untersuchungen vor, so daß der Stellenwert dieses Ansatzes heute noch nicht beurteilt werden kann [13].

## Wahl des Beatmungsverfahrens für die Entwöhnung

Nachdem die Verfahren der assistierten Spontanatmung, und hier vor allem SIMV und IPS, weite klinische Verbreitung gefunden haben, wurde in den letzten Jahren in großen, multizentrischen Studien versucht, die verschiedenen Verfahren miteinander zu vergleichen, um so ihren Stellenwert gerade für die schwierige Entwöhnung einordnen zu können. Brochard und Mitarbeiter fanden in einer in Frankreich durchgeführten Multizenterstudie, daß die Entwöhnung bei Anwendung druckunterstützter Beatmung mit Extubation bei einer Druckunterstützung von 8 mbar und befriedigendem Atemmuster schneller verlief und auch erfolgreicher war als die Anwendung von täglichen „T-Stück-Versuchen“ oder von SIMV [4]. Im Gegensatz hierzu fanden Esteban und Mitarbeiter in einer ähnlich umfangreichen Untersuchung in Spanien, daß die Anwendung täglicher oder mehrfach täglich durchgeführter „T-Stück-Versuche“ ein erfolgreicherer und auch zügigeres Weaning ermöglichte als die Anwendung von IPS oder SIMV [3]. Die Unterschiede, die in diesen Untersuchungen gefunden wurden, sind angesichts der unterschiedlichen Kriterien, die für die verschiedenen Verfahren angewendet worden sind, durchaus erklärlich; in der Brochard Studie wurde eine Atemfrequenz von 35/min für alle untersuchten Verfahren toleriert, und es konnte bei einer Druckunterstützung von 8 mbar extubiert werden. Demgegenüber mußte in der Esteban Studie die Atemfrequenz für eine Reduktion der Druckunterstützung oder zur Extubation lediglich bei IPS kleiner als 25/min sein, während bei den anderen Verfahren 35/min akzeptiert wurde. Zusätzlich konnte in dieser Studie erst bei einer Druckunterstützung von 5 mbar extubiert werden.

Aufgrund der widersprüchlichen Ergebnisse dieser beiden Untersuchungen kann man also keinem Verfahren eine eindeutige Präferenz bei der schwierigen Entwöhnung einräumen. Dennoch aber zeigen diese Untersuchungen, daß mit Hilfe einer geeigneten Strategie der Entwöhnung tatsächlich der Verlauf und auch die Dauer der Entwöhnung positiv zu beeinflussen ist. Darüber hinaus läßt sich schließen, daß weniger der eigentliche Beatmungsmodus, sondern eher die Art und Weise seiner Anwendung einen Einfluß auf die Entwöhnung haben. Drittens läßt sich mit aller Vorsicht aus diesen Studien schließen, daß SIMV im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren nachteilige Auswirkungen auf den Verlauf und Erfolg der Entwöhnung bietet.

## Fazit

Die genaue Kenntnis der pathophysiologischen Zusammenhänge der Entwöhnung von der Beatmung erleichtert vor allem bei der schwierigen Entwöhnung die Auswahl der geeigneten Weaning-Strategie für den individuellen Patienten. Um den geeigneten Zeitpunkt der definitiven Entwöhnung von der Beatmung festzulegen, erscheint es sinnvoll, regelmäßige Spontanattempts vorzunehmen. Hierfür können sowohl der „T-Stück-Versuch“ wie auch Atmung mit einer geringeren Druckunterstützung Verwendung finden, wobei wir aus pathophysiologischen Überlegungen eine Präferenz der Druckunterstützung einräumen. Es wäre wünschenswert, möglichst objektive Parameter für den Verlauf und den Erfolg der Entwöhnung zur Verfügung zu haben. Obwohl in den letzten Jahren viele Kriterien untersucht worden sind, gibt es auch heute noch keinen einzelnen Parameter, anhand dessen man den Verlauf der Entwöhnung ausreichend genau beurteilen kann. Es gilt vielmehr das klinische Bild und die zur Verfügung stehenden physiologischen Parameter zu kombinieren, und anhand des Gesamtbildes die Entwöhnung zu beurteilen. Hieraus wird klar, daß auch heute der Entwöhnungsprozeß häufig noch einem „trial and error“-Vorgehen entspricht.

Mit den heute zur Verfügung stehenden Methoden der teilweisen Unterstützung der Spontanatmung ist es möglich, den Anteil der maschinellen Ventilation an der Gesamtventilation graduell zu reduzieren. Hierdurch kann das Weaning als schrittweiser Prozeß gestaltet werden, und muß nicht mehr die im Grunde abrupte Beendigung der maschinellen Beatmung zugunsten der nicht-assistierten Spontanatmung an einem T-Stück bedeuten. Auch wenn IPS und SIMV eine weit verbreitete klinische Anwendung gefunden haben, und in vielen Untersuchungen die Vorteile der assistierten Beatmung während der Entwöhnung gezeigt wurden, konnte auch mit kontrollierten, multizentrischen Studien nicht wirklich bewiesen werden, ob die schrittweise Entwöhnung tatsächlich erfolgreicher ist als die „T-Stück-Versuche“.

Aus diesen Untersuchungen kann aber abgelesen werden, daß ein definiertes Konzept im Sinne eines Weaning-Protokolls tatsächlich zu einem zügigeren und erfolgreicherem Verlauf der Entwöhnung führen kann. Neben „T-Stück-Versuchen“, IPS und SIMV wurden in den letzten Jahren neuere Ansätze der assistierten Spontanatmung entwickelt und auch technisch realisiert, wie z. B. PAV oder BIPAP. Der Stellenwert dieser Verfahren für die Entwöhnung von der Beatmung wird erst bei Vorliegen größerer klinischer Erfahrung abzuschätzen sein.

## Literatur

- Kuhlen R, Reyle-Hahn M (1998) **Die Entwöhnung von der Beatmung.** Anaesthesist 47:614-626
- Kollef MH, Shapiro SD, Silver P, St, Prentice D, Sauer S, Ahrens TS, Shannon W, Baker C (1997) **A randomized, controlled trial of protocol-directed versus physician-directed weaning from mechanical ventilation.** Crit Care Med 25:567-574
- Esteban A, Frutos F, Tobin MJ, Alia I, Solsona JF, Valverde I, Fernandez R, de la Cal MA, Benito S, Tomas R, et al. (1995) **A comparison of four methods of weaning patients from mechanical ventilation.** Spanish Lung Failure Collaborative Group. N Engl J Med 332:345-350
- Brochard L, Rauss A, Benito S, Conti G, Mancebo J, Rekić N, Gasparetto A, Lemaire F (1996) **Comparison of three methods of gradual withdrawal from ventilatory support during weaning from mechanical ventilation.** Am J Respir Crit Care Med 150:896-903
- Ely EW, Baker AM, Dunagan DP, Burke HL, Smith AC, Kelly PT, Johnson MM, Browder RW, Bowton DL, Haponik EF (1996) **Effect on the duration of mechanical ventilation of identifying patients capable of breathing spontaneously.** N Engl J Med 335:1864-1869
- Tobin MJ (1991) **Weaning assessment.** In: Marini JJ, Roussos C (eds) Ventilatory failure. Berlin Heidelberg New York, Springer, S 347-360
- Yang KL, Tobin MJ (1991) **A prospective study of indexes predicting the outcome of trials of weaning from mechanical ventilation.** N Engl J Med 324:1445-1450
- Whitelaw WA, Derenne JP (1993) **Airway occlusion pressure.** J Appl Physiol 74:1475-1483
- Kuhlen R, Hausmann S, Pappert D, Slama K, Rossaint R, Falke K (1995) **A new method for P0.1 measurement using standard respiratory equipment.** Intensive Care Med 21:554-560
- Laghi F, D'Alfonso G, Tobin MJ (1995) **Pattern of recovery from diaphragmatic fatigue over 24 hours.** J Appl Physiol 79:539
- Esteban A, Alia I, Gordo F, Fernandez R, Solsona JF, Vallverdu I, Macias S, Allegue JM, Blanco J, Carriedo D, et al (1997) **Extubation outcome after spontaneous breathing trials with T-tube or pressure support ventilation.** The Spanish Lung Failure Collaborative Group. Am J Respir Crit Care Med 156:459-465
- Listello D, Sessler CN (1994) **Unplanned extubation: clinical predictors for reintubation.** Chest 105:1496-1503
- Kuhlen R, Guttman J, Nibbe L, Max M, Reyle-Hahn M, Rossaint R, Falke K (1997) **Proportional pressure support and automatic tube compensation: new options for assisted spontaneous breathing.** Acta Anaesth Scand [Suppl] 41:155-159
- Weiler N, Heinrichs W (1993) **Modern forms of artificial respiration.** Anaesthesist 42:813-832
- Burchardi H (1996) **New strategies in mechanical ventilation.** Eur Respir J 9:1063-1072