

Beatmungsformen

Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

- 2.1 **Beatmungszyklus – 18**
- 2.2 **Unterscheidung von Beatmungsformen – 18**
- 2.3 **Atemtypen – 22**
- 2.4 **Grundformen der Beatmung – 23**
- 2.5 **Einteilung der Beatmungsformen nach der Eigenleistung des Patienten – 27**

- Literatur – 30**

2.1 Beatmungszyklus

Die Beatmung des Intensivpatienten erfolgt durch **Überdruck**: Bei der Inspiration wird das Atemgas (Atemhubvolumen) vom Respirator mit Überdruck in die Lungen geleitet (■ Abb. 2.1). Die Ausatmung erfolgt dagegen passiv durch die Rückstellkräfte von Lunge und Thorax.

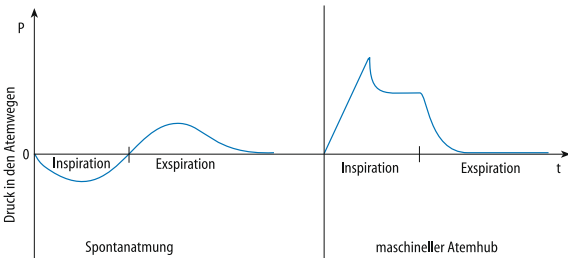
Bei Spontanatmung wird während der Inspiration ein **Unterdruck** erzeugt und die Luft in die Lungen gesaugt. Die Expiration erfolgt ebenfalls passiv (■ Abb. 2.1).

Der Ablauf eines Beatmungszyklus ist schematisch in ■ Abb. 2.2 dargestellt.

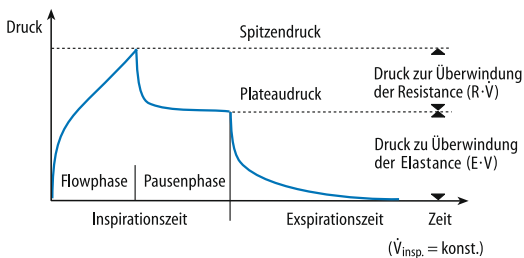
2.2 Unterscheidung von Beatmungsformen

Die Beatmungsform gibt an, welchen Anteil der Atemarbeit das Beatmungsgerät jeweils übernimmt und ob der Patient mit diesem interagiert. Danach werden folgende Beatmungsformen unterschieden:

- **Kontrolliert oder mandatorisch** (= erzwungen): Das Beatmungsgerät übernimmt die gesamte Atemarbeit.



■ **Abb. 2.1** Druckverlauf in den Atemwegen bei Spontanatmung und bei maschineller Beatmung



■ **Abb. 2.2** Terminologie der Phasen des Beatmungszyklus

- **Unterstützt** (augmentiert, assistiert): Das Beatmungsgerät übernimmt nur einen Teil der Atemarbeit, der restliche Anteil wird vom Patienten aufgebracht.
- **Spontan**: Die Atemarbeit wird nahezu vollständig von der Atemmuskulatur des Patienten aufgebracht.

Beatmungsmuster Es beschreibt den Verlauf von Druck, Volumen und Flow und umfasst folgende Parameter: Inspirationsdruck oder Atemhubvolumen, Beatmungsfrequenz, PEEP, Atemzeitverhältnis (I:E) und inspiratorische O_2 -Konzentration (F_iO_2).

2.2.1 Auslösung der Inspiration

Inspirationsbeginn (»Triggerung« der Inspiration) Die Inspiration kann durch das Beatmungsgerät oder durch den Patienten ausgelöst werden:

- **Maschinentriggerung**: Nach Ablauf einer bestimmten Zeit wird die Expiration beendet, und die Inspiration beginnt (Zeittriggerung). Der Patient hat keinen Einfluss auf den Inspirationsbeginn.

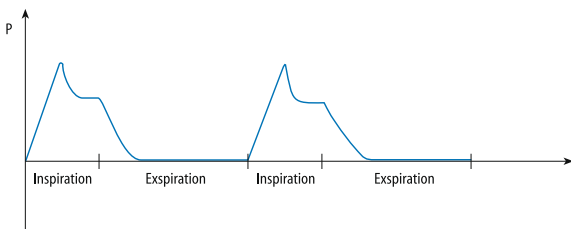
- **Patiententriggerung:** Das Gerät registriert Inspirationsbewegungen des Patienten, durch die dann die maschinelle Inspiration ausgelöst wird. Eine Patiententriggerung ist also nur bei erhaltener Spontanatemaktivität möglich. Die Flowtriggerung gilt als beste Art der Triggerung.

2.2.2 Durchführung der Inspiration: VCV und PCV

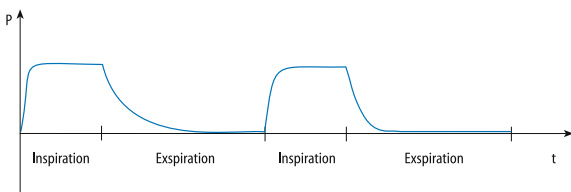
Kontrollvariable Es gibt im Wesentlichen 2 mögliche Variablen, die das Atemgerät während der Inspiration kontrolliert: Volumen oder Druck (niemals beides zugleich!). Ein maschineller Atemhub wird somit entweder volumenkontrolliert oder druckkontrolliert verabreicht.

Volumenkontrollierte (volumenregulierte) Beatmung, »volume-controlled ventilation«, VCV Das Beatmungsgerät erzeugt so lange einen voreingestellten (konstanten) Flow, bis ein vorgewähltes Atemhubvolumen erreicht ist (■ Abb. 2.3). Daraus resultiert – abhängig von Resistance und Compliance – ein bestimmter **Atemwegdruck**.

Druckkontrollierte (druckregulierte) Beatmung, »pressure-controlled ventilation«, PCV Das Beatmungsgerät erzeugt einen Überdruck bis zu einer voreingestellten Höhe (p_{\max} ; ■ Abb. 2.4). Dadurch wird der transpulmonale Druck erhöht, und das Atemgas strömt entlang des Druckgradienten in die Lunge. Dabei werden – abhängig von Resistance und Compliance – ein bestimmter Flow und ein bestimmtes Hubvolumen erzeugt. Der bei PCV erzeugte Flow ist immer dezelerierend (abnehmend).



■ **Abb. 2.3** Druckverlauf bei volumenkontrollierter Beatmung. Nach Erreichen der voreingestellten Inspirationszeit schaltet das Gerät auf Expiration um



■ **Abb. 2.4** Druckverlauf bei druckkontrollierter Beatmung. Bei Erreichen des vorgewählten Drucks wird dieser bis zum Ende der Inspiration konstant gehalten. Nach Ablauf der eingestellten Inspirationszeit schaltet das Gerät von In- auf Expiration um

Flow- und No-Flow-Phase Die Inspiration kann in eine Phase mit und in eine Phase ohne Flow unterteilt werden (■ Abb. 2.2):

- **Flowphase:** Während der Flowphase strömt das Volumen mit der vom Gerät erzeugten Geschwindigkeit entsprechend dem transpulmonalen Druckgradienten in die Lunge ein.
- **No-flow-Phase (Plateauphase):** In der Plateauphase, die noch zur Inspiration gehört, entsteht eine inspiratorische Pause, in der es zum Druckausgleich zwischen

Beatmungsgerät und den Atemwegen sowie zur Umverteilung des Atemhubvolumens in der Lunge kommt. Dabei bildet sich ein inspiratorischer Plateaudruck aus, der sog. »endinspiratory pressure« (EIP).

Im Gegensatz zur Flowphase ist die Phase der inspiratorischen Pause nicht obligat, d. h., es gibt Beatmungsmuster mit und ohne inspiratorische Pause.

2.2.3 Beendigung der Inspiration

Zyklusvariable Die Inspiration kann durch das Beatmungsgerät beendet werden (Maschinensteuerung) oder aber durch den Patienten (Patientensteuerung). Die Zyklusvariable gibt an, wodurch die Inspiration beendet wird. Die Zyklusvariablen sind entweder Zeit, Flow oder (heute unüblich) Druck oder Volumen.

Maschinensteuerung Die Inspiration endet nach Ablauf einer bestimmten, durch den Patienten nicht beeinflussbaren Zeit (= Zeitsteuerung).

Patientensteuerung Hierbei beendet der Patient, flowgesteuert, die Inspiration.

2.3 Atemtypen

Unterschieden werden 2 Atemtypen: der mandatorische und der spontane Atemtyp, weiterhin 2 Arten der Verabreichung des Atemhubs: druck- oder volumenkontrolliert. Diese Parameter können zu unterschiedlichen Beatmungsformen kombiniert werden.

2.3.1 Mandatorischer Atemtyp

- **Atemtyp, bei dem die Inspiration vom Respirator ausgelöst und/oder durch den Respirator beendet wird (engl. »mandatory«: erzwungen).**

Zeigt der Patient keine Eigenatemaktivität, wird die Inspiration – zeitgesteuert – durch das Beatmungsgerät begonnen und auch beendet. Ist Eigenatmung vorhanden, kann der Patient – bei entsprechender Einstellung des Gerätes – einen maschinellen Atemhub auslösen (triggern). Der ausgelöste Atemhub wird dem Patienten dann vom Gerät aufgezwungen und auch – zeitgesteuert – beendet.

2.3.2 Spontaner Atemtyp

- **Atemtyp, bei dem der Patient Beginn und Ende der Inspiration bestimmt.**

Hier wird die Inspiration vom Patienten getriggert **und** beendet. Wenn der Patient einatmet, wird die Inspiration entweder durch das Beatmungsgerät unterstützt (sog. augmentierende Beatmung wie PSV, »pressure support ventilation«), oder aber der Patient atmet ohne maschinelle Unterstützung vollkommen selbstständig spontan (wie bei »continuous positive airway pressure«, CPAP).

2.4 Grundformen der Beatmung

Zusammenfassend kann einerseits unterschieden werden zwischen 2 Atemtypen (mandatorisch und spontan; ■ Tab. 2.1) und andererseits zwischen 2 Kontrollvariablen, mit denen die Atemhübe verabreicht werden (Volumen und

■ **Tab. 2.1** Vereinfachte Klassifikation der Atemtypen (nach Chatburn 2007)

Atemtyp	Beginn der Inspiration	Beendigung der Inspiration
Mandatorisch	Maschine oder Patient	Maschine
Spontan	Patient	Patient

Druck). Aus den 2 Atemtypen lassen sich 3 verschiedene Beatmungsformen kombinieren, die durch die unterschiedlichen Kontrollvariablen weiter spezifiziert werden können und die dann die prinzipiellen Komponenten praktisch aller verfügbaren Atemmodi darstellen (■ Tab. 2.2):

- **Rein mandatorische Beatmungsformen** (»continuous mandatory ventilation«, CMV), entweder volumenkontrolliert (VC-CMV) oder druckkontrolliert (PC-CMV).
- **Synchronisierte intermittierend-mandatorische Formen** (»synchronized intermittent mandatory ventilation«, synchronisierte IMV, SIMV): Abfolge mandatorischer und spontaner Atemtypen. Die mandatorische Komponente kann druck- oder volumenkontrolliert sein.
- **Reine Spontanatmungsformen** (»continuous spontaneous ventilation«, CSV). Sie werden entweder vom Patienten vollkommen selbstständig durchgeführt oder vom Respirator mit Druck unterstützt (»pressure support«).

Alle weiteren Beatmungsformen setzen sich aus diesen Grundformen der Beatmung zusammen.

■ **Tab. 2.2** Grundformen der Beatmung (nach Chatburn 2007)

Atemmodus	Atemtypen	Durchführung der Inspiration
CMV	Mandatorisch	Volumenkontrolliert (VCV) oder druckkontrolliert (PCV)
SIMV	Mandatorisch und spontan	Volumenkontrolliert (VCV) oder druckkontrolliert (PCV)
CSV	Spontan	Druckkontrolliert

2.4.1 Terminologische Erläuterungen zu VCV und PCV

Druckkontrollierte Beatmung (»pressure controlled ventilation«) Die Kontrollvariable ist der Druck (■ Abb. 2.4). Das Beatmungsgerät erzeugt einen Überdruck bis zu einer vor-eingestellten Höhe (p_{\max}). Dadurch wird der transpulmonale Druck erhöht, und das Atemgas strömt entlang dem Druckgradienten in die Lunge.

Druckbegrenzte Beatmung (»pressure limited ventilation«) Dieser Begriff kann zwei Bedeutungen haben: Er wird oft synonym mit dem Begriff »druckkontrollierte Beatmung« verwendet. Er bezeichnet aber auch volumenkontrolliert begonnene Atemhübe, die bei Erreichen einer oberen Druckbegrenzung druckkontrolliert weitergeführt werden: Die inspiratorische Druckspitze wird dadurch gewissermaßen »gekappt«.

Druckgesteuerte Beatmung (»pressure cycled ventilation«) Fälschlicherweise wird dieser Begriff oft ebenfalls gleichbedeutend mit dem Begriff »druckkontrollierte Beatmung« verwendet. Tatsächlich handelt es sich jedoch um eine alte, heute nicht mehr übliche Beatmungsform, bei der der Druck als Zyklusvariable fungiert: Die Inspiration wird bei Erreichen eines voreingestellten Druckniveaus sofort beendet, und der Respirator schaltet dann sofort auf »Expiration« um. Eine druckgesteuerte Beatmung kann somit prinzipiell nie druckkontrolliert sein.

Druckunterstützende Beatmung bzw. druckunterstützte Atmung (»pressure supported ventilation«) Dies ist die Spontanatmungsform der druckkontrollierten Beatmung.

Druckorientierte Beatmung (»pressure targeted ventilation« oder »pressure preset ventilation«) Diese Bezeichnung ist nicht genau definiert. Gemeint ist meist eine druckkontrollierte Beatmung.

Volumenkontrollierte Beatmung (»volume controlled ventilation«) Die Kontrollvariable ist das Volumen (■ Abb. 2.3). Das Beatmungsgerät erzeugt so lange einen voreingestellten Flow, bis ein vorgewähltes Atemhubvolumen erreicht ist.

Volumengesteuerte Beatmung (»volume cycled ventilation«) Hier ist die Zyklusvariable das Volumen: Bei Erreichen des eingestellten Volumens schaltet das Beatmungsgerät – ohne inspiratorische Pause! – auf Expiration um. Diese Art der Beatmung wird heute praktisch nicht mehr verwendet. Beatmungsformen mit inspiratorischer Pause sind per definitionem nie volumen-, sondern immer zeitgesteuert.

Volumenkonstante Beatmung (»constant volume ventilation«) Hierbei wird vom Beatmungsgerät mit jedem Beat-

mungszyklus ein konstantes Hubvolumen abgegeben, unabhängig davon, ob volumenkontrolliert oder -gesteuert beatmet wird. Hieraus darf aber nicht geschlossen werden, dass dieses Volumen den Patienten auch immer erreicht, vielmehr kann durch Leckagen ein Teil, bei Diskonnektion sogar das gesamte Volumen »verloren gehen«.

Druckregulierte volumenkonstante Beatmung Hierbei handelt sich um eine computergesteuerte Variante der druckkontrollierten Beatmung, bei der aber am Gerät ein Hubvolumen eingestellt wird: Das druckkontrolliert verabreichte Atemhubvolumen V_T wird vom Respirator gemessen und über einen Regelkreis mit dem eingestellten V_T verglichen – das Gerät wählt dann automatisch für den nächsten (weiterhin druckkontrollierten) Atemzug p_{\max} so aus, dass das gewünschte V_T verabreicht wird (was sonst der Therapeut machen müsste). Der p_{\max} ist immer in etwa so hoch wie der Plateaudruck bei gleichem volumenkontrolliert verabreichtem V_T .

2.5 Einteilung der Beatmungsformen nach der Eigenleistung des Patienten

Nach der Eigenleistung des Patienten lassen sich 3 Grundformen der Beatmung unterscheiden:

- **CMV:** Atemmodus, bei dem praktisch die gesamte Atemarbeit und der Atemrhythmus vom Respirator übernommen werden. Für CMV ohne Triggerung gilt: »Das Beatmungsgerät macht alles, der Patient macht nichts.«
- **SIMV:** kombinierter Modus, bei dem Atemrhythmus und Atemarbeit teilweise (synchronisiert) vom Respirator und teilweise vom Patienten geleistet werden.
- **CSV:** Modus, bei dem der **Atemrhythmus** vom Patienten bestimmt wird. Die **Atemarbeit** wird ent-

weder ebenfalls vom Patienten allein geleistet, oder er wird dabei vom Respirator unterstützt.

2.5.1 Augmentierende (unterstützende) Atemhilfen

Partielle oder augmentierende Atemhilfen unterstützen eine insuffiziente Spontanatmung. Hierbei werden maschinelle Atemhilfe und Spontanatmung miteinander kombiniert. Eine partielle Beatmung im eigentlichen Sinne liegt nur dann vor, wenn ein wesentlicher Anteil der Atemarbeit oder der Atemregulation vom Patienten selbst erbracht wird.

Zu den partiellen Beatmungsformen gehören alle Modi, die nicht ausschließlich aus mandatorischen oder spontanen, nicht unterstützten Atemtypen bestehen, sondern beide Formen vereinen:

- CAPAP: kontinuierlicher positiver Atemwegdruck
- BIPAP/APRV, Bi-Vent, Bi-Level, DuoPAP: biphasischer positiver Atemwegdruck
- PSV/ASB, IHS, BiPAP: druckunterstützte Spontanatmung
- VS: druckunterstützte, volumenkonstante Spontanatmung
- PAV/PPS, NAVA: druckunterstützte proportionale Spontanatmung
- SIMV: synchronisierte intermittierende maschinelle Beatmung

■ Einteilung der partiellen Beatmungsformen

Die partiellen Beatmungsformen lassen sich nach dem Mechanismus der Ventilationsunterstützung und der Beatmungsgerät-Patienten-Interaktion in hubvolumen- und minutenvolumenorientierte Modi unterteilen:

- **Hubvolumenorientierte Beatmungsformen:** Hierbei wird jeder Atemzug des Patienten unterstützt. Beispiele: PSV, PAV (»proportional assist ventilation«) und ATC (»automatic tube compensation«).
- **Minutenvolumenorientierte Beatmungsformen:** Hierbei wird der nicht unterstützten Spontanatmung ein bestimmtes Minutenvolumen durch mandatorische Beatmung hinzugefügt. Beispiele: synchronisierte IMV/SIMV sowie MMV (»mandatory minute ventilation«; bei MMV erfolgt die mandatorische Zusatzbeatmung nur bei Unterschreiten eines Mindestminutenvolumens).
- Beide Prinzipien können miteinander kombiniert werden, z. B. SIMV + PSV. Wie stark die Atemarbeit unterstützt werden muss, kann individuell erheblich variieren.

■ Vorteile der partiellen Beatmung

Die partiellen Beatmungsformen weisen gegenüber der kontrollierten Beatmung zahlreiche Vorteile auf:

- Geringerer intrathorakaler Druck
- Besseres Ventilations-/Perfusionsverhältnis
- Geringere Beeinträchtigung der Hämodynamik und der Organfunktionen (Niere, Leber), geringerer Bedarf an Katecholaminen
- Bessere Anpassung zwischen Patient und Beatmungsgerät
- Geringerer Bedarf an Sedativa
- Keine oder geringere Atrophie der Atemmuskulatur als nach Langzeitbeatmung
- Keine Diskoordination der Atmung, wie häufig nach Langzeitbeatmung
- Bessere pulmonale Zirkulation und Lymphdrainage
- Geringeres Risiko bei versehentlicher Diskonnektion vom Beatmungsgerät

2.5.2 Unkonventionelle Verfahren

Dies sind Beatmungsverfahren, die sich erheblich von der »normalen« Beatmung unterscheiden. Sie werden üblicherweise nicht zur »Routinebeatmung« eingesetzt, sondern nur – wenn überhaupt – unter ganz bestimmten Bedingungen. Beispiele sind die HFV (»high frequency ventilation«, Hochfrequenzbeatmung), CFT (»constant flow techniques«, Techniken mit hohem Flow) und ALA (»artificial lung assist«, künstliche Lungenunterstützung).

Literatur

- Chatburn RL (2007) Classification of ventilator modes: update and proposal for implementation. *Respir Care* 52: 301–323
- Tobin MJ (2012) *Principles and practice of mechanical ventilation*. 3rd ed. McGraw-Hill, New York



<http://www.springer.com/978-3-662-46218-8>

Pocket Guide Beatmung

Larsen, R.; Ziegenfuß, Th.

2015, XX, 346 S. 25 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-46218-8