

## 4 Beatmungstechnik

Unter maschineller Atemhilfe (*Mechanical Ventilation*) versteht man die vollständige (*Full ventilatory Support*) oder teilweise Übernahme (*Partial ventilatory Support*) der Atemarbeit durch einen Respirator. Der Respirator ersetzt somit entweder vollständig die Atemmuskulatur oder er hat die Funktion eines zusätzlichen Atemmuskels.

### Info



#### Ziele der maschinellen Beatmung

- Sicherstellung des *pulmonalen Gasaustausches* durch teilweise oder komplette Übernahme der Atemarbeit.
- „*Lungenprotektive*“ Beatmung (= Vermeidung einer beatmungsinduzierten Lungenschädigung durch organschonende Beatmung), d. h. Beatmung mit möglichst *niedrigem Inspirationsdruck* ( $P_{insp} < \text{oberer Inflektionspunkt}$ ) und adäquat *hohem PEEP* ( $PEEP > \text{kritischer Alveolarverschlussdruck}$ )  $\Rightarrow$  Beatmung mit der *kleinstmöglichen Druckamplitude* (vgl.  $\blacktriangleright$  Abb. 2.14).
- Vermeidung von Sauerstofftoxizität  $\Rightarrow$  Beatmung mit möglichst *niedriger  $FiO_2$* , d. h.  $FiO_2 < 60\%$ .
- Beatmung mit möglichst geringen hämodynamischen Nebenwirkungen  $\Rightarrow$  Optimierung des Volumenstatus.
- Intubation und Beatmung: *Sicherung der Atemwege* bei unzureichenden Schutzreflexen ( $\Rightarrow$  Schutz vor Aspiration).

### Merke



- Jede Beatmungsstrategie muss individuell auf den Patienten abgestimmt werden und ist wichtiger als der Respirator, mit dem sie umgesetzt wird!
- Der Respirator muss an die ventilatorischen Bedürfnisse des Patienten angepasst werden und nicht umgekehrt!

Maschinelle Atemhilfe erfordert nicht zwangsläufig die Intubation. Die Atemhilfe kann auch nicht-invasiv über eine Maske erfolgen (s. Kap. 4.5).

### 4.1 Atemzyklus

Unter einem *Atemzyklus* (= *Ventilationszyklus*) versteht man die Zeitdauer vom Beginn der Inspiration bis zum Ende der Expiration. Die Dauer eines Atemzyklus (T) ist die Summe von Inspirationszeit (TI) und Expirationszeit (TE).

$$T = T_I + T_E$$

Die *Atemfrequenz* bzw. *Beatmungsfrequenz* (f) gibt die Atemzüge bzw. maschinellen Atemhübe pro Minute an.

$$f = 60/T$$

Bei einer Atemzyklusdauer von  $T = 5\text{ s}$  beträgt die Atemfrequenz 12/min.

Wird die Atemfrequenz (f) mit dem Atemhubvolumen (engl. *Tidal Volume* [VT]) multipliziert, so erhält man das *Atemminutenvolumen* (AMV).

$$AMV = VT \times f$$

Das *Atemzeitverhältnis* oder *I:E-Verhältnis* ist der Quotient aus Inspirations- zu Expirationszeit.

$$I : E\text{-Verhältnis} = T_I : T_E$$

*Beispiel:*

Bei einer Inspirationszeit (TI) von 2 s und einer Expirationszeit (TE) von 4 s beträgt die Atemzykluszeit (T) 6 s, die Atemfrequenz (f) 10/min und das I:E-Verhältnis 1 : 2.

Der Quotient aus Inspirations- zu Expirationszeit (I:E-Verhältnis) beträgt 0,5. Bei einem Quotienten  $> 1$  spricht man von einem inversen Atemzeitverhältnis.

#### 4.1.1 Phasenvariable

Entsprechend der Einteilung der Consensus Conference der American Association for Respiratory Care (AARC-CC) wird ein Atemzyklus in Phasenvariable unterteilt.

Die einzelnen Phasenvariablen werden durch die physikalischen Größen Druck, Volumen, Flow

und Zeit bestimmt. Daher kann jede einzelne Variable durch die Interaktion von Patient und Respirator beeinflusst werden.

Es werden 6 Phasenvariablen definiert:

### 1. Kontrollvariable (= inspiratorische Zielgröße)

Die Kontrollvariable ist jene Variable, mit der der Respirator eine Inspiration aufbaut. Diese Variable wird am Respirator eingestellt und kann der Druck, das Volumen oder der Flow sein sowie deren zeitlicher Verlauf.

#### Beispiele:

Bei volumenkontrollierter Beatmung ist die Kontrollvariable das vorgegebene Atemhubvolumen, bei druckkontrollierter Beatmung der eingestellte Inspirationsdruck.

Bei mikroprozessorgesteuerten Respiratoren steht eine optimale Umsetzung der Begrenzungsvariablen (z. B. Druck) im Vordergrund. Die Kontrollvariable fällt daher meistens mit der Begrenzungsvariablen zusammen.

### 2. Triggervariable (= Auslösung der Inspiration)

Die Triggervariable definiert den Beginn der Inspiration. Wie jede Phasenvariable kann auch die Triggervariable vom Respirator oder vom Patienten ausgelöst werden.

Bei einer patienteninduzierten Inspiration kann die Inspiration durch Messung eines Flow-, Druck- oder Volumensignals ausgelöst werden (= Flow-, Druck-, Volumentrigger).

Bei einer maschineninduzierten Auslösung der Inspiration (= Maschinensteuerung bei kontrollierter Beatmung) kann von einer Triggerung wie bei einer augmentierenden Beatmungsform nicht gesprochen werden, da der Inspirationsbeginn vom Respirator und nicht vom Patienten ausgelöst wird. In diesem Fall legt der Parameter Zeit den Inspirationsbeginn bzw. das Ende der Expiration fest (= Zeitsteuerung).

#### Beispiel:

Druckunterstützte Spontanatmung (PSV/ASB): Die Triggervariable ist entweder der Flow oder der Druck (= Flow- oder Drucktriggerung).

### 3. Begrenzungsvariable (= Alarm- und Sicherheitsparameter)

Unter Begrenzungsvariable versteht man einen Alarm- und Sicherheitsparameter. Mit der Begrenzungsvariable wird die 1. Phase der Inspiration (= Flowphase) bestimmt. Darunter versteht man eine obere Grenze (Maximalwert) für Druck, Volumen oder Flow, die vom Respirator nicht überschritten wird. Das Erreichen dieser Grenze führt definitionsgemäß jedoch nicht zum Umschalten auf Expiration. Auch kommen mehrere Begrenzungsvariable zur Anwendung.

#### Beispiele:

Volumenkontrollierte Beatmung: Die Begrenzungsvariablen sind Volumen, Flow und Zeit. Ist das vorgegebene Atemhubvolumen appliziert, bleibt das Inspirationsventil offen, es fließt allerdings kein Atemgas vom Respirator zum Patienten (= No-Flow-Phase). Erst nach Ablauf der eingestellten Inspirationszeit öffnet das Expirationsventil (= Zeitsteuerung).

Stenosealarm: Wird ein bestimmter Druck (z. B. 10 mbar über dem eingestellten Inspirationsdruck) im Beatmungssystem überschritten, öffnet der Respirator automatisch das Expirationsventil (= übergeordnete Drucksteuerung).

### 4. Zyklusvariable (= Umschaltung von In- auf Expiration und umgekehrt)

Die Zyklusvariable beendet die Inspiration und schaltet auf Expiration durch Absenken des Atemwegsdrucks auf PEEP-Niveau. Als Umschaltparameter fungiert eine der 4 Zyklusvariablen, nämlich Druck, Flow, Volumen oder Zeit. Wird ein bestimmter vorgegebener Zielwert erreicht, erfolgt die Umschaltung.

Die Zyklusvariable ist bei den meisten Beatmungsformen die Inspirationszeit (= Zeitsteuerung), bei der druckunterstützten Spontanatmung (PSV/ASB) der Flow (= Flowsteuerung).

*Beispiele:*

*Druckkontrollierte Beatmung (BIPAP-Modus):* Die Zyklusvariable ist die Inspirationszeit (T<sub>insp</sub>).

*Druckunterstützte Spontanatmung (PSV/ASB):* Das Unterschreiten eines bestimmten inspiratorischen Flows in Bezug auf den maximalen Flow (z. B. 25 % des Spitzenflows) beendet die Inspiration (vgl. dazu Kap. 4.3.6 unter „Druckunterstützte Spontanatmung“).

In anderen Klassifikationen wird die Zyklusvariable unter dem Begriff „Steuerung“ des Respirators dargestellt, d. h., die Zyklusvariable „Zeit“ entspricht dem Steuerprinzip „zeitgesteuert“, die Zyklusvariable „Flow“ entspricht dem Steuerprinzip „flowgesteuert“ (vgl. Kap. 14.3).

#### 5. GrundlinienvARIABLE (= expiratorische Zielgröße)

Die GrundlinienvARIABLE bestimmt den Ablauf der mandatorischen Expirationsphase. Bei den heute angewendeten Atemhilfen handelt es sich praktisch ausschließlich um den positiven endexpiratorischen Druck (PEEP), entweder bei einem Flow von 0 l/min oder in Kombination mit einem Basisflow (Biasflow) zur Erleichterung der nachfolgenden Inspiration.

*Beispiel:*

Positiver endexpiratorischer Druck (PEEP) mit oder ohne Biasflow.

#### 6. Bedingungsvariable (= Wechsel von einer Ventilationsform zu einer anderen)

Die Bedingungsvariable entscheidet, nach welchen Kriterien der nächste Atemhub erfolgt.

Setzt sich eine Beatmungsform z. B. aus 2 Beatmungsformen zusammen (z. B. BIPAP/BiLevel mit PSV/ASB), wird durch die Steuerung des Respirators anhand des Erreichens eines bestimmten Parameters (Flow oder Zeit) entschieden, welche Beatmungsform zur Anwendung kommt. Bei der Kombination von BIPAP/BiLevel mit PSV/ASB legt die Zeit (⇒ Inspirationsbemühung innerhalb des Erwartungszeitfensters) den mandatorischen Beatmungshub fest (⇒ Zeitsteuerung).

## 4.2 Grafische Darstellung des Atemzyklus

Intensiv- und Narkoserespiratoren ermöglichen die grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs von Beatmungsdruck, Atemgasfluss (Flow) und Atemgasvolumen. In Abhängigkeit vom Respiratortyp können mehrere Kurven gleichzeitig am Display abgebildet werden.

Die grafische Darstellung von Druck, Zeit und Volumen ermöglicht die frühzeitige Erkennung von atemmechanischen Veränderungen, sodass eine Optimierung der Respiratoreinstellung anhand der Diagramme durchgeführt werden kann.

Der Kurvenverlauf („Kurvenform“) der Diagramme ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Beatmungsform (volumenkontrolliert – druckkontrolliert/druckunterstützt)
- Beatmungsmuster
- Atemmechanik des Patienten (Resistance – Compliance)

### Merke

Die grafisch dargestellten Beatmungskurven (⇒ Druck-Zeit-Diagramm und Flow-Zeit-Diagramm) sind klinisch bedeutsame Komponenten des Beatmungsmonitorings!

### 4.2.1 Druck-Zeit-Diagramm bei volumenkontrollierter Beatmung

Im Druck-Zeit-Diagramm ist der Atemwegsdruck gegen die Zeit aufgetragen (► Abb. 4.1). Der Druck wird in mbar, die Zeit in s (Sekunden) angegeben. Höhe und Verlauf des Atemwegsdrucks in der Inspirationsphase sind bei vorgegebenem Volumen von den atemmechanischen Eigenschaften der Lunge (Resistance und Compliance) abhängig.

$$\Delta P = R \times \dot{V}$$

Einen geringen Druckanstieg erhält man entweder bei niedrigem Inspirationsflow ( $\dot{V}$ ) oder bei kleiner Resistance bzw. hoher Compliance. Ein großer Druckanstieg resultiert entweder bei hohem Inspi-

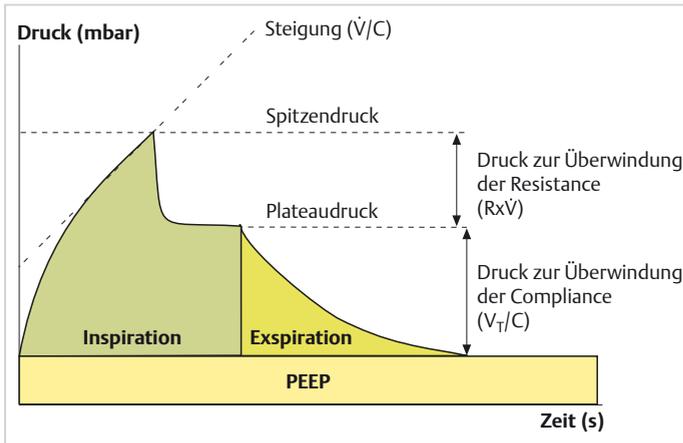


Abb. 4.1 Volumenkontrollierte Beatmung, Druck-Zeit-Diagramm

rationsflow oder bei hoher Resistance bzw. niedriger Compliance.

Die weitere Zunahme des linearen Druckanstiegs wird durch den Quotienten von Flow ( $\dot{V}$ ) zu Compliance (C) bestimmt.

$$\Delta P / \Delta t = \dot{V} / C$$

Je höher der Inspirationsflow und je niedriger die Compliance des respiratorischen Systems sind, desto größer wird der Druckanstieg.

Die Differenz aus *Spitzendruck* und *Plateaudruck* entspricht dem durch die Resistance verursachten Druckanstieg zu Beginn der Inspiration. Die Höhe des inspiratorischen Plateaudrucks wird durch die Compliance und das Tidalvolumen bestimmt. Die Differenz aus Plateaudruck und endexpiratorischem Druck (PEEP) ist ein Maß für die Compliance des respiratorischen Systems.

Während der *Plateauphase* fließt kein Atemgas vom Respirator in die Lungen (= *No-Flow-Phase*). Während dieser Phase kommt es jedoch zu einer *intrapulmonalen Gasumverteilung* (= *Pendelluft*) aufgrund der unterschiedlichen Zeitkonstanten der einzelnen Lungenkompartimente.

Der *Spitzendruck* ( $P_{max}$ ) ist von 4 Faktoren abhängig:

- Resistance
- Compliance
- Inspirationsflow
- Hubvolumen

Der Spitzendruck ( $P_{max} = P_{peak}$ ) ist der maximale Druck vor dem Endotrachealtubus bzw. in den oberen Atemwegen. Er hat nur geringe Auswirkungen auf den Alveolardruck und ist daher für die Entstehung eines Baro-/Volutraumas von untergeordneter Bedeutung.

Der *endinspiratorische Plateaudruck* ( $P_{plat}$ ) ist ein Maß für die Compliance des respiratorischen Systems. Er ist der

- entscheidende Druck zum Öffnen kollabierter Alveolarkompartimente und
- der maßgebende Druck für die Entstehung eines Baro-/Volutraumas.



### Merke

- Differenz aus Spitzendruck und Plateaudruck  $\Rightarrow$  Maß für die Resistance des respiratorischen Systems
- Differenz aus Plateaudruck und PEEP  $\Rightarrow$  Maß für die Compliance des respiratorischen Systems

Der *Beatmungsmitteldruck* ( $MAP = \text{Mean Airway Pressure}$ ) ist das zeitliche Mittel des Beatmungsdruks über einen ganzen Atemzyklus und resultiert aus folgenden Parametern:

- Inspirationsdruck ( $P_{insp}$ )
- Inspirationsdauer ( $T_{insp}$ ) bzw. Atemzeitverhältnis I:E
- PEEP

Näherungsweise kann der MAP nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{MAP} = \frac{[(\text{Pinsp} \times \text{TI}) + (\text{PEEP} \times \text{TE})]}{\text{TI} + \text{TE}}$$

Der MAP ist der entscheidende Parameter für

- die Oxygenierung und
- die hämodynamischen Nebenwirkungen.

### Merke

M!

- Je höher der Beatmungsmitteldruck, desto höher der intrathorakale Druck.
- Je höher der intrathorakale Druck, desto ausgeprägter die hämodynamischen Nebenwirkungen der Beatmung.

## Druck-Zeit-Diagramm bei Variation des Inspirationsflows

Bei volumenkontrollierter Beatmung wird die Höhe des Inspirationsflows am Respiратор entweder direkt oder indirekt über die endinspiratorische Pausenzeit (je nach Gerätetyp angegeben in % der Inspirationszeit oder der Atemzykluszeit) eingestellt.

Der Inspirationsflow ist ein Maß für die Geschwindigkeit (= applizierte Atemgasmenge pro Zeiteinheit), mit der das Atemgas verabreicht wird. Der Inspirationsflow wird in l/min angegeben.

Bei geringem Inspirationsflow erfolgt der Druckanstieg flach. Die Ausbildung einer Druckspitze ist bei einem konstanten Flow von etwa 30 l/min und einem I:E-Verhältnis von 1 : 2 kaum noch erkennbar. Das endinspiratorische Plateau ist gerade noch sichtbar. Es würde bei noch niedrigerem Inspirationsflow völlig verschwinden. Bei zunehmendem Inspirationsflow nimmt die Steilheit des Druckanstiegs zu, gleichzeitig wird die inspiratorische Druckspitze (Atemwegsspitzenndruck) höher und die endinspiratorische Pausenzeit (Plateauphase) länger (► Abb. 4.2).

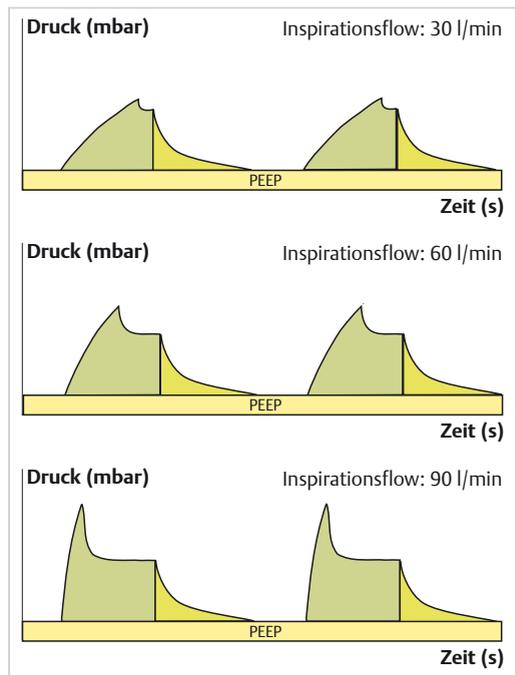


Abb. 4.2 Druck-Zeit-Diagramm, Inspirationsflow. Änderung des Beatmungsspitzenndrucks in Abhängigkeit vom Inspirationsflow bei volumenkontrollierter Beatmung.

## Interpretation typischer Druck-Zeit-Diagramme bei volumenkontrollierter Beatmung

### Druck-Zeit-Diagramm bei Zunahme der Resistance

Bei Zunahme der Resistance des respiratorischen Systems steigt der Spitzenndruck und der Plateaudruck bleibt gleich, d. h., die Differenz aus Spitzenndruck minus Plateaudruck nimmt zu (► Abb. 4.3) [1].

### Info

- Zunahme der Resistance ↑  
⇒ Zunahme des Spitzenndrucks ↑, Plateaudruck =
- Abnahme der Resistance ↓  
⇒ Abnahme des Spitzenndrucks ↓, Plateaudruck =

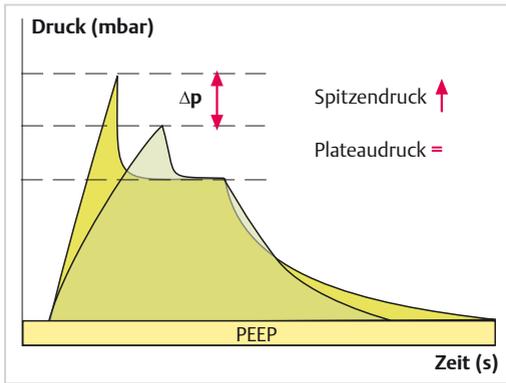


Abb. 4.3 Druck-Zeit-Diagramm. Zunahme der Resistance.

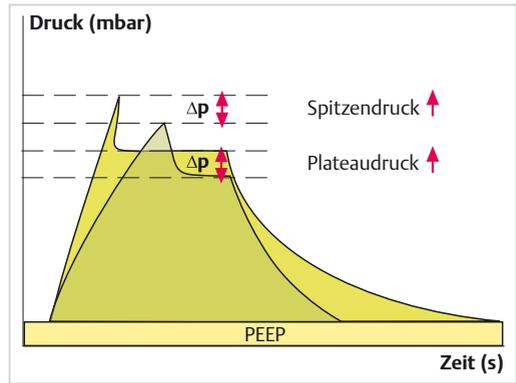


Abb. 4.4 Druck-Zeit-Diagramm. Abnahme der Compliance.

### Druck-Zeit-Diagramm bei Abnahme der Compliance

Bei Abnahme der Compliance des respiratorischen Systems steigen der Spitzendruck und der Plateaudruck um den gleichen Wert der Druckdifferenz  $\Delta p$ , da der Plateaudruck ein Maß für die Compliance darstellt (► Abb. 4.4) [1].

#### Info



- Abnahme der Compliance  $\Downarrow$   
 ⇒ Zunahme von Spitzendruck und Plateaudruck  $\Uparrow$
- Zunahme der Compliance  $\Uparrow$   
 ⇒ Abnahme von Spitzendruck und Plateaudruck  $\Downarrow$

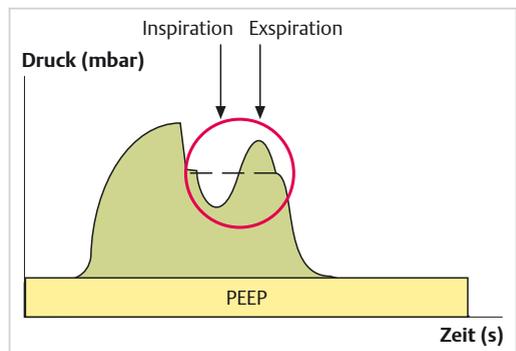


Abb. 4.5 Druck-Zeit-Diagramm. Druck-Zeit-Diagramm bei zusätzlicher Spontanatmung unter kontrollierter Beatmung.

den, um den Respiator an die Ventilationsbedürfnisse des Patienten anzupassen (► Abb. 4.5).

### Druck-Zeit-Diagramm bei zusätzlicher Spontanatmung

Der Patient versucht, während eines mandatorischen Beatmungshubs spontan zu atmen. Er „presst“ gegen den Respiator („Fighting the Respiator“), da bei kontrollierten Beatmungsformen aufgrund des geschlossenen Expirationsventils keine spontanen Expirationsbemühungen des Patienten möglich sind. In diesem Fall sollte auf eine augmentierende Beatmungsform gewechselt (z.B. BIPAP, PSV/ASB) bzw. die Analgosedierung adaptiert wer-

### 4.2.2 Druck-Zeit-Diagramm bei druckkontrollierter Beatmung

Bei druckkontrollierter Beatmung wird ein bestimmter Inspirationsdruck (Pinsp) am Respiator eingestellt. Das Druck-Zeit-Diagramm zeigt einen annähernd rechteckigen Kurvenverlauf, d.h., der Druck steigt vom unteren Druckniveau (PEEP) rasch auf den Wert des oberen Druckniveaus an (⇒ abhängig von der Druckanstiegsgeschwindigkeit) und bleibt über die am Respiator eingestellte Inspirationszeit (Tinsp) konstant. Der Druckabfall

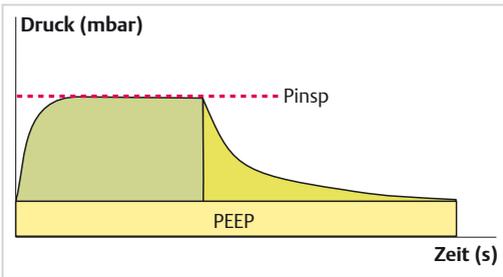


Abb. 4.6 Druck-Zeit-Diagramm. Druckkontrollierte Beatmung.

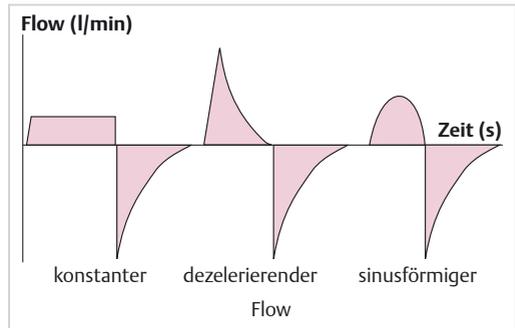


Abb. 4.7 Flow-Zeit-Diagramme.

in der Expirationsphase entspricht dem Verlauf der volumenkontrollierten Beatmung, da die Expiration ein passiver Vorgang ist und von den atemmechanischen Eigenschaften der Lunge abhängt (► Abb. 4.6).

### Merke



- Es muss ausdrücklich betont werden, dass die gemessenen und grafisch dargestellten „Atemwegsdrücke“ vor dem Endotrachealtubus bzw. der Trachealkanüle gemessen werden und daher nicht die in der Lunge tatsächlich wirksamen Alveolardrücke widerspiegeln!
- Der für die Patientenlunge atemmechanisch wirksame Druck ist der transpulmonale Druck!

### 4.2.3 Flow-Zeit-Diagramm

Im Flow-Zeit-Diagramm ist der inspiratorische und expiratorische Atemgasfluss (Flow;  $\dot{V}$ ) gegen die Zeit aufgetragen (► Abb. 4.7). Der Atemgasfluss (Flow) ist definiert als das *pro Zeiteinheit strömende Atemgasvolumen* und wird in l/min oder l/s, die Zeit in s angegeben.

Vereinfacht kann der Inspirationsflow auch als *Maß für die Geschwindigkeit*, mit der das Atemgas verabreicht wird, definiert werden. Das applizierte Atemhubvolumen ergibt sich aus dem Flächeninhalt (Flächenintegral) unter der inspiratorischen Flowkurve.

### Inspiratorische Flowkurven

Je nach der am Respirator eingestellten Beatmungsform unterscheidet man zwischen verschiedenen Flowformen (s. ► Abb. 4.7):

- konstanter Flow: volumenkontrollierte Beatmung (VCV)
- dezelerierender Flow:
  - druckkontrollierte Beatmung (PCV, BIPAP/APRV)
  - druckunterstützte Spontanatmungsformen (PSV/ASB, VS, PPS-Vol<sub>Assist</sub>, NAVA)
  - druckregulierte, volumenkonstante Beatmungsformen (PRVC, Autoflow, BiLevel VG)
- sinusförmiger Flow:
  - druckunterstützte flowproportionale Spontanatmung (PPS-Flow<sub>Assist</sub>)
  - Spontanatmung mit und ohne CPAP

Bei *volumenkontrollierter Beatmung* wird das Atemgas mit konstantem Flow appliziert, d. h., die Strömungsgeschwindigkeit ist im Verlauf der Inspiration gleich. Die Höhe des inspiratorischen Flows wird am Respirator direkt oder indirekt über die endinspiratorische Pausenzeit eingestellt (angegeben – je nach Gerätetyp – in % entweder der Inspirationszeit oder der Atemzykluszeit).

- Intensivrespiratoren: direkte Einstellung des Inspirationsflows
- Narkoserespiratoren: indirekte Einstellung des Inspirationsflows (es wird eine endinspiratorische Pausenzeit eingestellt)

*Druckkontrollierte und druckunterstützte Spontanatmungsformen* zeigen einen dezelerierenden

Flow, der durch einen initialen hohen und dann rasch abnehmenden Kurvenverlauf gekennzeichnet ist. Im Normalfall geht der Flow im Laufe der Inspirationszeit bis auf null zurück. Dies bedeutet, dass der Druck in den Lungen gleich dem am Respi­rator eingestellten Druck ist, es fließt kein Atemgas mehr zum Patienten (⇔ Druckausgleich).

Bei druckkontrollierten oder druckunterstützten Spontanatmungsformen kann nur die *Druckanstiegsgeschwindigkeit*, d. h. die Steilheit des Druckanstiegs, bis zum Erreichen des vorgegebenen Inspira­tionsdrucks eingestellt werden (= „Rampe“).

4

### Merke



Die Höhe des maximalen inspiratorischen und expiratorischen Flows ( $\dot{V}_{max}$ ) ist bei druckkontrollierter bzw. druckunterstützter Spontanatmung von den atemmechanischen Eigenschaften der Lunge (Resistance und Compliance) abhängig.

*Druckunterstützte flowproportionale Spontanatmung* sowie *Spontanatmung* ohne Druckunterstützung sind durch einen sinusförmigen Flow charakterisiert, bei welchem der inspiratorische Atemgasfluss in der Mitte der inspiratorischen Flowphase sein Maximum erreicht.

## Expiratorische Flowkurven

Die expiratorische Flowkurve ermöglicht unabhängig von der Beatmungsform (volumenkontrolliert oder druckkontrolliert/druckunterstützt) Rückschlüsse auf die *atemmechanischen Eigenschaften* (Resistance und Compliance) der Lunge und des Thorax, da der Expirationsflow nur von den resistiven und elastischen Widerständen der Lunge und des Beatmungssystems bestimmt wird.

## Interpretation typischer Flow-Zeit-Diagramme bei volumenkontrollierter Beatmung

### Flow-Zeit-Diagramm bei erniedrigter Compliance

Eine Abnahme der Compliance (⇔ Zunahme der Elastance) des respiratorischen Systems führt zu einer Erhöhung des expiratorischen Spitzenflows sowie zu einer steiler verlaufenden expiratorischen Flowkurve infolge des erhöhten elastischen Retraktionsdrucks am Beginn der Expiration (► Abb. 4.8a) [2].

Die Höhe des inspiratorischen Flows ist bei volumenkontrollierter Beatmung konstant und wird am Respi­rator eingestellt. Eine Änderung der Atemmechanik ist daher an der inspiratorischen Flowkurve nicht erkennbar.

### Info



#### Abnahme der Compliance ↓

- Zunahme des elastischen Retraktionsdrucks ↑
- Zunahme des expiratorischen Spitzenflows ↑
- steiler verlaufende expiratorische Flowkurve (dezelerierender Schenkel)

### Flow-Zeit-Diagramm bei erhöhter Resistance

Eine Zunahme der Resistance des respiratorischen Systems führt zu einer Erniedrigung des expiratorischen Spitzenflows sowie zu einer flacher verlaufenden expiratorischen Flowkurve infolge Limitierung des expiratorischen Atemgasflusses (► Abb. 4.8b). Im Extremfall zeigt die expiratorische Flowkurve einen fast rechtwinkligen Verlauf als Ausdruck eines endexpiratorischen Bronchiolenkollapses mit konsekutivem „Air Trapping“. Ein eventuell auftretender endexpiratorischer Restflow infolge zu kurzer Expirationszeit bewirkt die Generierung eines intrinsischen PEEP (PEEPi) (vgl. ► Abb. 4.11) [2].

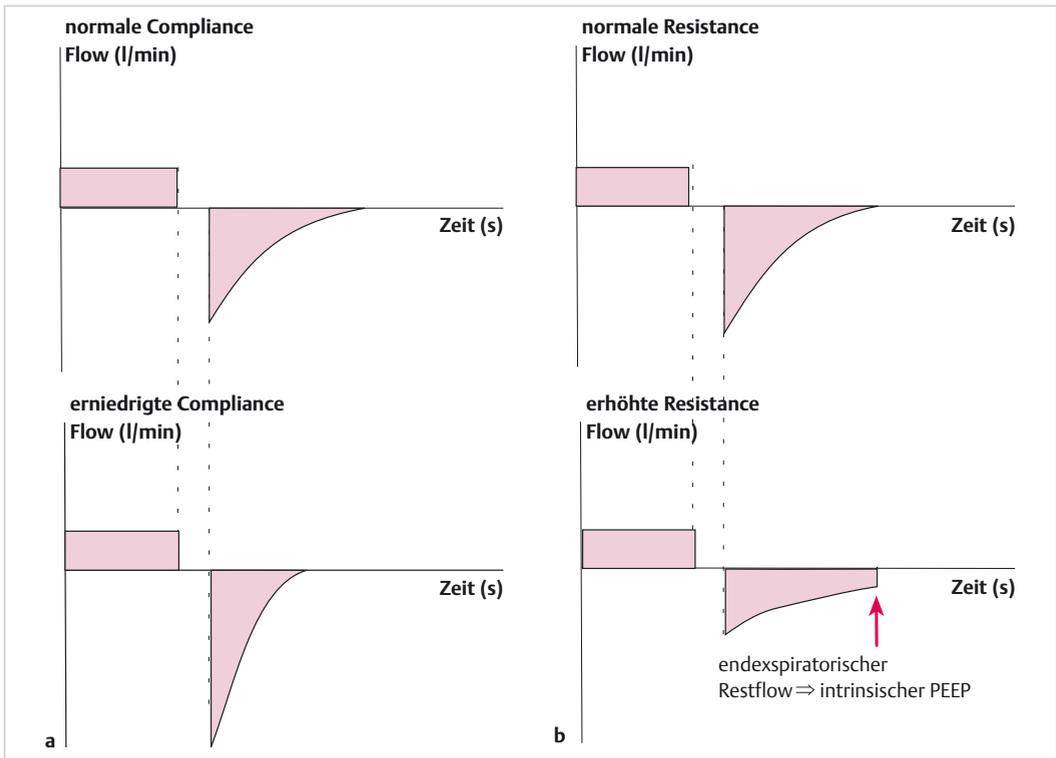


Abb. 4.8 Flow-Zeit-Diagramm. Volumenkontrollierte Beatmung.  
 a Bei erniedrigter Compliance.  
 b Bei erhöhter Resistance.

### Info



#### Zunahme der Resistance ↑

- große Zeitkonstante ⇒ langsame Entleerung der obstruktiven Lungenkompartimente
- Abnahme des expiratorischen Spitzenflows
- flacher verlaufende expiratorische Flowkurve (dezellierender Schenkel)
- endexpiratorischer Restflow (⇒ PEEP<sub>i</sub>)

genschaften der Lunge abhängt, lassen sich Veränderungen von Compliance und Resistance sowohl an der inspiratorischen als auch an der expiratorischen Flowkurve nachweisen.

#### Flow-Zeit-Diagramm bei erniedrigter Compliance

Eine Abnahme der Compliance (= Zunahme der Elastance) des respiratorischen Systems führt aufgrund der kleinen Zeitkonstante wenig dehnbarer Lungenkompartimente zu einem steileren Anstieg des ascendierenden Schenkels und zu einem steileren Abfall des descendierenden Schenkels der inspiratorischen und expiratorischen Flowkurve mit konsekutivem Auftreten einer endinspiratorischen und endexpiratorischen Pause. Aufgrund des hohen elastischen Retraktionsdrucks zu Beginn der Expiration erhöht sich der expiratorische Spitzenflow (► Abb. 4.9a) [2].

### Interpretation typischer Flow-Zeit-Diagramme bei druckkontrollierter Beatmung

Da bei druckkontrollierter Beatmung die Höhe des inspiratorischen Flows eine variable Größe (Freiheitsgrad) ist und von den atemmechanischen Ei-

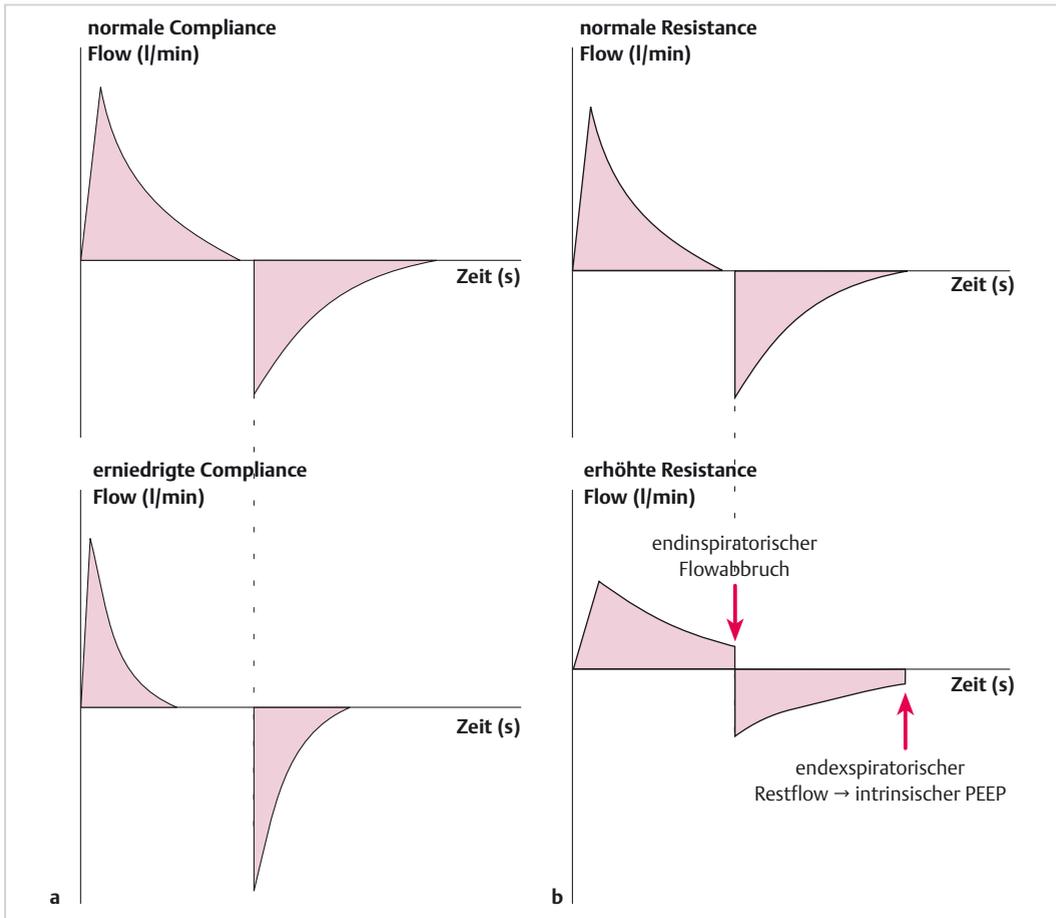


Abb. 4.9 Flow-Zeit-Diagramm. Druckkontrollierte Beatmung.  
 a Bei erniedrigter Compliance.  
 b Bei erhöhter Resistance.

**Info**



**Abnahme der Compliance** ↓

- Zunahme des elastischen Retraktionsdrucks ↑
- kleine Zeitkonstante ⇒ schnelle Füllung und Entleerung der Lungenkompartimente
- steilerer Anstieg des ascendierenden und steilerer Abfall des descendierenden Schenkels der inspiratorischen und expiratorischen Flowkurve
- Zunahme des expiratorischen Spitzenflows, da zu Beginn der Expiration ein hoher elasti-

scher Retraktionsdruck (⇒ hoher Druckgradient) vorliegt

- endinspiratorische und endexpiratorische Pause

**Flow-Zeit-Diagramm bei Erhöhung der Resistance**

Eine Zunahme der Resistance des respiratorischen Systems führt aufgrund der großen Zeitkonstante zu einer flacher verlaufenden inspiratorischen und expiratorischen Flowkurve (verzögerter Anstieg