

Grundlagen der maschinellen Beatmung im Rettungsdienst und interhospitalen Transfer



Version
Januar 2025

Trotz sorgfältiger Überprüfung kann für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben und Abbildungen sowie der therapeutischen Empfehlungen vom Autor keine Gewähr übernommen werden. Dieses Skript ist vielmehr als Hilfestellung und Ergänzung zu weiterführender Literatur gedacht, welche ebenso wie Produktinformationen der aufgeführten medizinischen Geräte, unabdingbar ist.

**Daniel Wisser
Atmungstherapeut (DGP)
Fachkrankenschwester für Anästhesie und Intensiv**

**daniel.wisser@web.de
www.beatmungsfortbildung.de**



PULMONARY
SURVIVAL
TRAINING
NETWORK

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der maschinellen Beatmung.....	4
1.1	Respirationstrakt	4
1.2	Die oberen Atemwege.....	4
1.3	Die unteren Atemwege.....	4
1.3.1	Flimmerepithel.....	5
1.3.2	Alveolen.....	5
1.3.3	Surfactant.....	5
1.4	Lunge und Pleura.....	6
1.4.1	Lungenlappen und Lungensegmente	6
1.5	Atemmechanik	6
1.5.1	Resistance.....	6
1.5.2	Compliance	7
1.6	Die Atemmuskulatur	7
1.7	Lungenvolumina - Ventilation	8
1.8	Pulmonaler Gasaustausch - Oxygenierung	10
1.9	Überwachung der Atmung und Beatmung.....	10
1.9.1	Arterielle Blutgasanalyse (BGA).....	10
1.9.2	Pulsoxymetrie – SpO ₂	11
1.9.3	Kapnometrie – etCO ₂	11
1.10	Indikationen der maschinellen Beatmung.....	12
2	Klassifizierung und Steuerung	13
2.1	Atemtyp.....	13
2.2	Kontrollvariable	13
2.3	Zyklusvariable - Steuerung.....	14
2.4	Unterschiede und Anwendungsindikationen von Respiratoren	15
2.5	Funktionsprinzip der spontanen Beatmungsverfahren.....	16
2.6	Beatmungparameter und Einstellgrößen des Respirators.....	17
3	Nicht - invasive Beatmung (NIV) und CPAP	19
3.1	Sinn und Zweck der NIV.....	19
3.2	Vor- und Nachteile der NIV gegenüber der Endotrachealen Intubation	19
3.3	Indikationen und Kontraindikationen.....	20
3.4	Durchführung der nichtinvasiven Beatmung	20
4	Spontane Beatmungsverfahren	22
4.1	SPN - PSV - Druckunterstützte Spontanatmung.....	22
4.1.1	Inspiratorischer Trigger.....	22
4.1.2	Expiratorischer Trigger	22
4.1.3	Druckanstiegsgeschwindigkeit	23
4.2	Atemwegswiderstand beim Beatmungspatienten	24
4.3	Automatische Tubuskompensation.....	24
5	Kontrollierte / Assistierte Beatmung	25
5.1	Volumenkontrollierte Beatmung - VCV	25
5.2	Druckregulierte Beatmung – PRVC	26
5.2.1	ASV – Adaptive Support Ventilation	26
5.3	Druckkontrollierte Beatmung - PCV.....	27
6	Strategien und Konzepte der maschinellen Beatmung im präklinischen Bereich	28
6.1	Beatmungseinstellung bei Schädel-Hirntrauma und nach CPR	28
6.2	Beatmungseinstellung beim Status Asthmaticus:	29
6.3	Beatmungseinstellung bei kardiogenem Lungenödem	29
6.4	Beatmungseinstellung beim ARDS.....	29
6.5	Auswirkung der maschinellen Beatmung auf die Herzfunktion	30
6.5.1	Auswirkungen der maschinellen Beatmung auf die Linksherzinsuffizienz	31
6.5.2	Auswirkungen forcierter Spontanatmung auf die Herzfunktion	31
	Abkürzungen	32
	Literaturverzeichnis.....	33

1 Grundlagen der maschinellen Beatmung

1.1 Respirationstrakt

Der Respirationstrakt umfasst die gesamten Atemorgane. Die Funktion des Respirationstraktes besteht in der Beförderung der Atemluft in die Alveolen, der Reinigung und Befeuchtung der Atemluft und der Aufnahme von Sauerstoff und Abgabe von Kohlendioxid. Er wird in obere und untere Atemwege unterteilt.

- Obere Atemwege: Nasenhöhle, Pharynx (Rachen), Larynx (Kehlkopf)
- Untere Atemwege: Trachea (Luftröhre), Bronchialsystem der Lunge (Bronchien, Bronchioli und Alveolen)

Zum Respirationstrakt gehören neben den oberen und unteren Atemwegen auch die Medulla oblongata (verlängertes Mark und Sitz des Atemzentrum), Nerven (z.B. N. phrenikus) und Muskeln wie das Zwerchfell (M. phrenikus) als stärkster Muskel des Atemapparates.

1.2 Die oberen Atemwege

Die oberen Atemwege, auch luftleitende Abschnitte genannt, haben die Funktion, die eingeatmete Luft zu reinigen und zu befeuchten. Am Kehlkopfeingang befindet sich die Epiglottis (Kehlideckel). Sie verschließt beim Schluckakt die Luftröhre und trägt dazu bei, dass der Speisebrei in den Ösophagus (Speiseröhre) weitertransportiert wird und nicht in die Trachea gelangt.

Im Larynx liegt der Stimmapparat. Die Öffnung zwischen den Stimmbändern wird als Stimmritze bezeichnet. Durch das Verändern der Stellung und Spannung der Stimmbänder entstehen Töne.

Bei der oro- und nasotrachealen Intubation wird der Endotrachealtubus durch die Stimmritze in die Trachea eingeführt. Der Patient kann dann nicht mehr sprechen. Anders bei der Tracheotomie. Die Tracheotomie wird unterhalb des Kehlkopfes durchgeführt. Der Stimmapparat wird nicht direkt beeinträchtigt. Der tracheotomierte Patient kann mithilfe spezieller Sprechkanülen sprechen. Mit einer Trachealkanüle, die bei der maschinellen Beatmung zum Einsatz kommt, kann der Patient nur sprechen, wenn genügend Luft an der entblockten Kanüle vorbei strömen kann.

Bei Erwachsenen wird zur maschinellen Beatmung immer eine Kanüle mit Cuff verwendet. Bei spontan atmenden Erwachsenen mit vorhandenen Schutzreflexen kann eine Kanüle ohne Cuff zur Anwendung kommen.

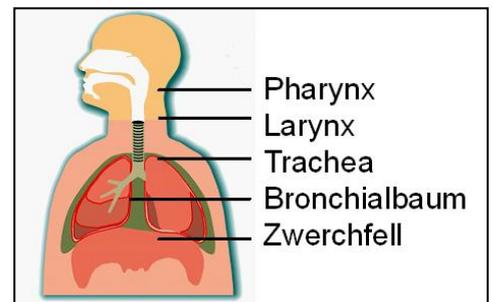


Abb. 1: Der Respirationstrakt

Bei Kindern in der Regel bis zum 8-10. Lebensjahr wird zur maschinellen Beatmung eine Kanüle ohne Cuff verwendet um Druckschäden an der Trachealschleimhaut zu vermeiden. Unter maschineller Beatmung treten dann häufig unvermeidbare Leckagen auf.

1.3 Die unteren Atemwege

Die unteren Atemwege, auch gasaustauschende Abschnitte genannt, beginnen mit der Trachea. Diese ist beim Erwachsenen eine 10–12 cm lange Röhre mit einem Durchmesser von 1,5–2,0 cm. Sie beginnt unterhalb des Larynx und verzweigt sich an Ihrem unteren Ende in den rechten und linken Hauptbronchus. Diese Teilung (Bifurkation) liegt beim Erwachsenen zwischen dem 4. und dem 5. Brustwirbel. Die Trachea und der rechte und linke Hauptbronchus werden durch 16–20 Knorpelspannen offen gehalten. Die letzte Knorpelspanne der Trachea bildet in Mitte der Abzweigung die Carina. Die Carina kann bei der Bronchoskopie gut dargestellt werden. Durch Absaugkatheter verursachte Läsionen der Schleimhaut auf der Carina werden durch die Bronchoskopie gut sichtbar. Abhängig von der Absaughäufigkeit und Sogleistung nehmen die Schleimhautläsionen zu. Atraumatische Absaugkatheter können beim tieferen Einführen des Katheters zum absaugen Schleimhautläsionen vermindern.

Atraumatische Absaugkatheter werden mit Sog in den Tubus eingeführt. Dadurch bildet sich um die speziell konstruierte Spitze ein Luftpolster, welches das Ansaugen an die Schleimhaut verhindern soll.

Die Abzweigung des rechten Hauptbronchus verläuft im Gegensatz zum linken Hauptbronchus in einem steileren Winkel. Nach 1–2,5 cm verzweigt sich der rechte, nach 4–5 cm der linke Hauptbronchus weiter in immer kleinere Bronchien bis hin zu den Bronchioli respiratorii und Alveolen welche den Gasaustausch gewährleisten.

Bei Fremdkörperaspiration gelangt dieser durch den flachen Abzweigwinkel überwiegend in den rechten Hauptbronchus. Beim Auskultieren (Abhören) entsteht über der rechten Lunge ein abgeschwächtes Atemgeräusch. Bei maschineller Beatmung hebt sich bei kompletter Verlegung des rechten Hauptbronchus die rechte Thoraxhälfte weniger stark.

Die weitere Abzweigung der Bronchien für den rechten Oberlappen des rechten Hauptbronchus kann schon nach 1 cm erfolgen. Wenn der Endotrachealtubus oder die Trachealkanüle nur knapp über der Carina platziert wird, kann der rechte Oberlappen von der Ventilation abgeschnitten sein. Ein über dem rechten Oberlappen abgeschwächtes Atemgeräusch ist die Folge.

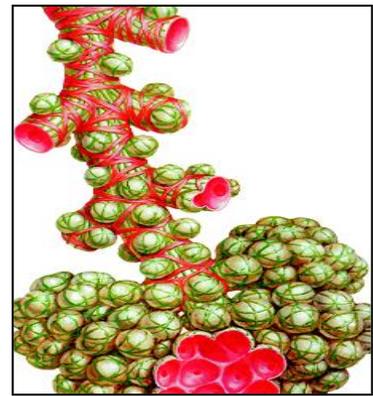


Abb. 2: Der Bronchialbaum und die Alveolen

1.3.1 Flimmerepithel

Die Trachea und die Bronchien sind von einer Schleimhaut und dem darauf sitzendem **Flimmerepithel** ausgekleidet. Diese feinen und hochbeweglichen Zilien (Härchen) bilden ein seromuköses Sekret, welches die Einatemluft reinigt. In rhythmischen Bewegungen wird das Sekret mit den gebundenen Staubpartikeln Richtung Larynx bewegt. Von dort wird das Sekret abgehustet oder geschluckt. Dieser Mechanismus verhindert die Verunreinigung der Alveolen und wird als mukoziliäre Clearance bezeichnet.

1.3.2 Alveolen

Die Alveolen bilden die kleinste und letzte Einheit des Respirationstraktes. Durchschnittlich besitzt der Mensch 300 Millionen dieser sechskantigen bis kugelförmigen Hohlräume. Eine Alveole hat einen Durchmesser von 250–300µm. Die Alveolen sind umgeben von einem dichten Kapillarnetz. Die Alveole dient als Gasaustauschfläche für Sauerstoff und Kohlendioxid. Beide Gase diffundieren durch die sogenannte alveolokapilläre Membran. Sauerstoff diffundiert von der Alveole zur Kapillare und Kohlendioxid von der Kapillare zur Alveole. Die gesamte Gasaustauschoberfläche beträgt beim Erwachsenen ca. 70–140m². Diese ist abhängig von Geschlecht, Konstitution, Alter und Trainingszustand.

1.3.3 Surfactant

Die Alveolarinnenwand ist ausgekleidet mit dem sogenannten Surfactant. Dieser hauchdünne Lipoproteinfilmm setzt die Oberflächenspannung der Alveolen herab. Das Kollabieren einer intakten Alveole in der Expiration wird verhindert.

Im Rahmen einer Entzündungsreaktion in der Lunge wird entweder zuwenig Surfactant produziert, oder der Surfactant ist in seiner Funktion eingeschränkt. In der Folge können Atelektasen (kollabierte Alveolen) auftreten. Es kommt zu einer Oxygenierungsstörung. Unter maschineller Beatmung kann das Einstellen eines PEEP das Kollabieren von Alveolen verhindern. Durch zu häufiges endotracheales Absaugen wird die Atelektasenbildung begünstigt. Die früher propagierte Bronchiallavage begünstigt das Auswaschen des Surfactant. Das gehäufte Entstehen von Atelektasen ist die Folge.

1.4 Lunge und Pleura

1.4.1 Lungenlappen und Lungensegmente

Die rechte Lungenhälfte wird in 3 Lungenlappen (Ober- Mittel- und Unterlappen), die linke Lungenhälfte wird in 2 Lungenlappen unterteilt (Ober- und Unterlappen). Diese werden wiederum in mehrere Segmente unterteilt. Die Lungen füllen den Thorax fast vollständig aus. In der Mitte (Mediastinum) finden sich lediglich das Herz, die großen Gefäße, die Trachea und der Ösophagus. Seitlich wird die Lunge vom knöchernen Thorax begrenzt. Nach oben hin reichen die Lungenspitzen in die Schlüsselbeingrube und nach unten wird die Lunge durch das Zwerchfell (Diaphragma) begrenzt.

1.4.2 Pleura

Die beiden Lungenhälften werden bis auf den Lungenhilus durch die Pleura visceralis (Lungenfell) überzogen. Der Lungenhilus liegt zum Mediastinum hin. In ihm treten die beiden Hauptbronchien, die Vena und Arteria pulmonalis, Gefäße für die Versorgung des Lungengewebes und Lymphgefäße ein bzw. aus. Die Pleura visceralis wird, nur durch einen kleinen Pleuraspalt getrennt, von der Pleura parietalis (Rippenfell) überzogen. Diese ist mit der Thoraxwand verwachsen. Zwischen beiden Pleuren befindet sich eine geringe Menge seröses Sekret. Dieses verhindert das Aneinanderreiben der beiden Pleuren.

1.5 Atemmechanik

Die Atemmechanik beschreibt den Vorgang der In- und Expiration. Voraussetzung hierfür ist ein ständiger kleiner negativer Druck (intrapleuraler Druck) im Pleuraspalt. Dadurch bleiben die beiden Lungen „aufgespannt“. Nur beim Husten und bei Überdruckbeatmung kehrt sich dieser ins Positive. Der negative Druck beträgt bei Spontanatmung endinspiratorisch -8 mbar und endexpiratorisch -4 mbar. Durch diese Differenz strömt bei der Inspiration das Atemgas in die Lunge. In den Bronchien und Alveolen herrscht in dieser Phase ein Druck von -2 mbar (intrapulmonaler Druck). Die Expiration erfolgt passiv. Das Atemgas strömt ohne Zutun der Atemmuskulatur durch die elastischen Kräfte von Thorax und Lunge nach außen. Der Druck in der Alveole beträgt dann +2-5 mbar. Dieser, auch als physiologischer PEEP oder endexpiratorischer Verschlussdruck bezeichnet, entsteht, da die engsten Stellen und damit auch der größte Widerstand am Ende der Ausatemwege liegen (Stimmbänder, Nasen-Rachenraum).

Veränderungen bei maschineller Beatmung

Unter Überdruckbeatmung drehen sich diese Druckverhältnisse um. Der intrapulmonale Druck (Druck in den Alveolen und Bronchien) wird bei Beatmung mit PEEP dauerhaft positiv. Der intrapleurale Druck verschiebt sich Richtung Atmosphärendruck und kann abhängig von Höhe des PEEP, Inspirationsdruck und Compliance der Lunge ebenfalls dauerhaft positiv werden.

1.5.1 Resistance

Die Atemwege setzen dem einströmenden Atemgas in- und expiratorisch einen Widerstand (Resistance) entgegen. Je kleiner der Durchmesser des Atemweges, desto größer wird die Resistance.

Die Resistance wird in mbar/l/s angegeben

$$R = \frac{\Delta P}{\dot{V}} \quad \text{mbar/l/s}$$

Normwert:

Erwachsener: 1-2 mbar/l/s
 unter maschineller Beatmung mit Trachealkanüle 6-10 mbar/l/s
 unter maschineller Beatmung mit Endotrachealtubus ca. 8-14 mbar/l/s

Kleinkind: 20-40 mbar/l/s
 unter maschineller Beatmung mit Trachealkanüle 30-70 mbar/l/s

Der Ort mit der größten Resistance in den Atemwegen eines Erwachsenen ist die Stimmritze. In den kleinen Bronchien ist beim Lungengesunden die Resistance sehr gering, da der gesamte Querschnitt aller kleinen Bronchien sehr groß ist.

Der bedeutendste mitbestimmende Faktor der Resistance ist beim beatmeten Patienten der Beatmungstubus. Halbiert sich der Innendurchmesser des Beatmungstubus so steigt die Resistance um das 16fache. Die Resistance ist nicht nur abhängig vom Innendurchmesser des Beatmungstubus, sondern auch von der Atemgasflussgeschwindigkeit und der Länge des Beatmungstubus. Je größer beispielsweise der Atemgasfluss ist, desto größer ist die Resistance.

Säuglinge sind physiologischerweise Nasenatmer. Verlegungen der Nase z.B. durch Sekret können deshalb schnell zu schweren Ventilationsstörungen führen.

Die physiologisch engste Stelle ist der Ringknorpel. Beim beatmeten Kind mit Beatmungstubus/Kanüle ist diese/r die engste Stelle wie beim Erwachsenen auch.

1.5.2 Compliance

Die Compliance umschreibt die Dehnbarkeit von Lunge und Thorax. Lunge und Thorax sind elastisch. Sie haben die Eigenschaft sich ausdehnen zu können, wenn eine Kraft auf sie einwirkt. Sobald diese Kraft nachlässt, ziehen sich beide wieder zusammen. Die Compliance gibt an wie viel Volumen die Lunge bei einem bestimmten Druck aufnimmt. Je größer die Compliance, desto mehr Volumen kann verabreicht werden.

Die Compliance wird in ml/mbar angegeben.

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad \text{ml/mbar}$$

Normwert: für **Lunge und Thorax**

Erwachsene:	100 ml/mbar
Unter maschineller Beatmung gemessen am Respiator:	50-70 ml/mbar
Kleinkind:	20-40 ml/mbar
Neugeborene:	5 ml/mbar

Die Compliance verschlechtert sich bei Erkrankungen des Lungenparenchym wie z.B. bei Pneumonie oder ARDS und anderen Zuständen mit Mangel oder Verdünnung von Surfactant, der oberflächenaktiven Substanz an der Alveolarinnenwand, der dafür verantwortlich ist, dass sie aufgespannt und mit Luft gefüllt bleiben und nicht in sich zusammenfallen. Beim Lungenemphysem sind Lunge und Thorax bereits bis zum Anschlag gedehnt, so dass es zur weiteren Dehnung eines besonderen Kraftaufwandes bedarf.

1.6 Die Atemmuskulatur

Die Atemmuskulatur wird auch als Atempumpe bezeichnet. Sie sorgt dafür, dass durch einen Unterdruck Atemgase aktiv über das Bronchialsystem bis in die Alveolen einströmt. Das Zwerchfell ist hierbei der stärkste und zugleich bedeutendste Einatemmuskel.

Unter Atemnot wird eine Anzahl weiterer so genannter Hilfsmuskeln eingesetzt. Auch die Körperhaltung hat hierbei eine bedeutende Stellung. So kann in Oberkörperhochstellung deutlich besser ein- und ausgeatmet werden.

Einatemmuskeln

- Zwerchfell

Einatemhilfsmuskulatur

- äußere Zwischenrippenmuskeln = Musculus intercostalis externus
- Musculus scalenus
- Rippenheber-Muskel = Musculus levator costarum
- Sägemuskeln = Musculi serratus
 - hinterer oberer Sägemuskel = Musculus serratus posterior superior
 - hinterer unterer Sägemuskel = M. serratus posterior inferior
 - vorderer Sägemuskel = Musculus serratus anterior

- Kopfnicker / Kopfwender = Musculus sternocleidomastoideus
- großer und kleiner Brustmuskel:
→ M. pectoralis minor (klein) und major (groß)

Bei Asthma (Erwachsene & Kinder) und COPD (Erwachsene) nennen sich solche atemerleichternden Körperstellungen Kutschersitz oder Torwartstellung. Letztendlich geht es darum durch abstützen der Arme Gewicht vom Thorax weg zu bringen und dass die Hilfsmuskeln für die Ein – und Ausatmung in eine bessere ergonomische Ausgangstellung gebracht werden können. In Kombination mit der Lippenbremse nimmt bei COPD die Überblähung (Lungenemphysem) ab. Die Expiration erfolgt normalerweise passiv. Nur unter Atemnot und chronischer Verengung der Bronchien beteiligen sich diese Muskelpartien aktiv an der Ausatmung.

Ausatemhilfsmuskulatur

- Bauchmuskeln
- innere Zwischenrippenmuskeln = M. intercostalis internus
- M. subcostalis
- horizontaler Brustkorbmuskel = M. transversus thoracis
- großer Rückenmuskel = Musculus latissimus dorsi (auch Hustenmuskel, Arskratzerle)



1.7 Lungenvolumina - Ventilation

Die Lungenvolumina sind unter physiologischen Bedingungen abhängig von Körperbau, Lebensalter und Trainingszustand. Bei diesen Werten handelt es sich um anatomische Messgrößen, die nichts über die Funktion der Lunge aussagen. Allerdings gehen viele Lungenerkrankungen mit Veränderungen der Lungenvolumina einher, sodass die Lungenvolumina zur Beurteilung von Erkrankungen herangezogen werden können. Auch die Körperposition hat Einfluss auf die Messgrößen. Bei einem liegenden Patienten ist beispielsweise die funktionelle Residualkapazität (FRC) um ca. 20% geringer als im Stehen. Dies ist auch oder gerade beim beatmeten Patienten so. Insbesondere dann, wenn ein zu niedriger PEEP eingestellt ist. Die Oxygenierung verschlechtert sich bei Abnahme der FRC.

Die Lungenvolumina umfassen bei einem 70 kg schweren Lungengesunden normalgewichtigen Menschen:

Atemzugvolumen – AZV (Tidal Volumen, kurz V_t)

Luftmenge, die pro Atemzug eingeatmet wird (ca. 400 – 600 ml)

Ist individuellen Schwankungen unterworfen

Inspiratorisches Reservevolumen – IRV

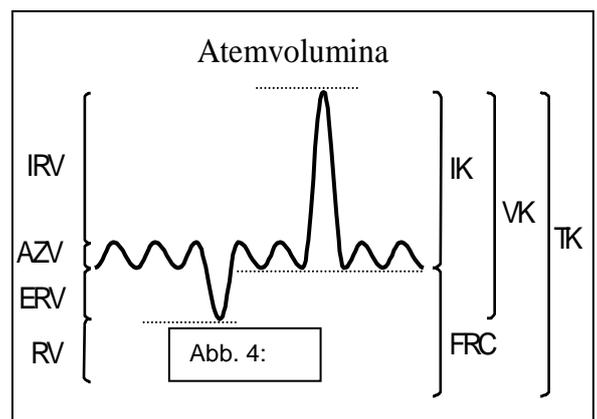
Luftmenge, die nach einer normalen Inspiration zusätzlich eingeatmet werden kann (ca. 2500-3000 ml)

Expiratorisches Reservevolumen – ERV

Luftmenge, die nach normaler Expiration zusätzlich ausgeatmet werden kann (ca. 1100-1500 ml)

Residualvolumen – RV

Luftmenge, die nach maximaler Expiration in der Lunge verbleibt (ca. 1500 ml)



Funktionelle Residualkapazität – FRC = RV + ERV

Luftmenge, die nach einer normalen Ausatmung in der Lunge verbleibt. Durch eine ausreichend hohe FRC wird verhindert, dass die Alveolen am Ende der Expiration kollabieren (Closing volume = FRC, bei der die ersten Alveolen endexpiratorisch kollabieren). Durch die verbleibende Luft in den Alveolen nimmt das Blut während der Expiration annähernd die gleiche Menge Sauerstoff auf wie in der Inspiration. Aus der periodischen Atmung wird ein gleichmäßiger Gasaustausch an das Blut und letztlich an das Gewebe.

Unter **Ventilation** versteht man das Ein- und Ausatmen des Atemgases. Die Ventilation umfasst das gesamte Atemzugvolumen. Durch die Ventilation wird Kohlendioxid abgeatmet. Wenn das PaCO₂ (Partialdruck von Kohlendioxid) steigt, kann dies nur durch verstärkte Ventilation, d.h. erhöhte Atemfrequenz oder größeres Atemzugvolumen abgeatmet werden. Als alveoläre Ventilation wird jenes Atemgas bezeichnet, welches bei Inspiration in die Alveole gelangt. Demzufolge ist die entscheidende Größe, um CO₂ abzuatmen nicht die Ventilation, sondern die alveoläre Ventilation (Tab. 1).

Das **Atemminutenvolumen** ist das gesamte Atemgasvolumen, das in einer Minute ein- und ausgeatmet wird. Es errechnet sich aus Atemfrequenz (AF) und Atemzugvolumen (AZV). Das Atemminutenvolumen (AMV) beträgt bei einem 70 kg schweren normalgewichtigen Erwachsenen unter Ruhe ca. 5–7,5 l/min. Dies entspricht als Faustregel ca. 80–110 ml/kgKG.
 AMV = AF + AZV

Die Atemfrequenz beträgt beim Erwachsenen in Ruhe ca. 8–15 l/min. Unter Belastung kann diese deutlich gesteigert werden. Wenn die Ventilation vom Patienten gesteigert werden soll, (Kohlendioxidabatemung/Decarboxylierung) dann kann dies durch Steigerung von Atemfrequenz und /oder Atemzugtiefe erfolgen.

Parameter der Ventilation unter Spontanatmung (Erwachsener 70 kg normalgewichtig):

Atemfrequenz: f 12 - 20/min
 Atemzug- oder Tidalvolumen: AZV (V_t) 400 - 600ml (ca. 7-8ml/kg KG)
 Totraumvolumen: V_d ca. 150ml (2,2ml/kg KG)
 Atemminutenvolumen (AMV): 15 x 500ml = 7500ml (ca. 90-110 ml/kgKG)
 f x AZV (V_t) = AMV
 Alveoläres Volumen: 15 x (500ml-150ml) = 5250ml
 f x (AZV - V_d) = Alveoläres Minutenvolumen

Volumen das nicht am Gasaustausch teilnimmt nennt man Totraum.

AF	AZV	Totraum	Alveoläre Ventilation	AMV
15	500 ml	150 ml	5,25 l	7,5 l
25	300 ml	150 ml	3,75 l	7,5 l
30	250 ml	150 ml	3,0 l	7,5 l
25	500 ml	150 ml	8,75 l	12,5 l

Tab. 1: Je schneller (AF↑) und flacher(AZV↓) die Atmung, desto geringer wird die alveoläre Ventilation trotz gleich bleibender Gesamtventilation.

Kind (20 kg):

Atemfrequenz: f 20 - 30/min
 Atemzug- oder Tidalvolumen: AZV (V_t) ca. 150ml (ca. 7-8ml/kg KG)
 Totraumvolumen: V_d ca. 45ml (2,2ml/kg KG)
 Atemminutenvolumen (AMV): 20 x 150ml = 3000ml (ca. 90-110 ml/kgKG)
 f x AZV (V_t) = AMV
 Alveoläres Volumen: 20 x (150ml-45ml) = 2100ml
 f x (AZV - V_d) = Alveoläres Minutenvolumen

Volumen das nicht am Gasaustausch teilnimmt nennt man Totraum.

Als anatomischer **Totraum** (V_d) wird die Menge vom Atemzugvolumen definiert, die nicht am Gasaustausch teilnimmt. Es handelt sich um Atemgas, das sich endinspiratorisch im Nasenrachenraum und im Bronchialsystem befindet. Die Größe des anatomischen Totraums berechnet sich mit 2,2 ml/kgKG. Dies entspricht bei einem normalgewichtigen Erwachsenen mit 70 kg ca. 150 ml und 30% des Atemzuges. Der Totraum kann sich beim beatmeten Patienten durch z.B. Tubusverlängerung und HME-Filter erheblich vergrößern.

1.8 Pulmonaler Gasaustausch - Oxygenierung

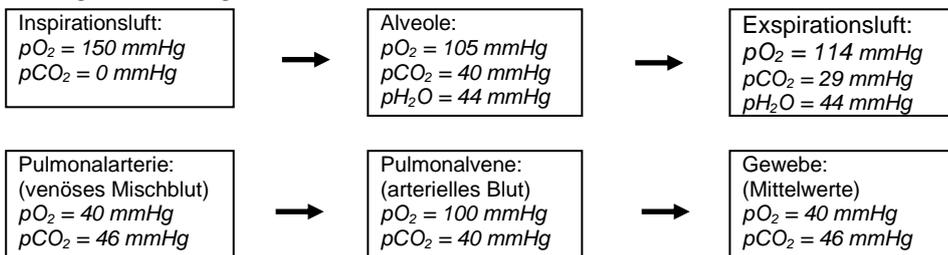
Der pulmonale Gasaustausch findet in den Alveolen statt. Sauerstoff (O₂) aus der eingeatmeten Alveolarluft diffundiert durch das respiratorische Epithel und das direkt benachbarte Gefäßendothel in das Lungenkapillarblut, Kohlendioxid (CO₂) hingegen diffundiert frei durch das Lungengewebe gegenläufig in die Alveolarluft. Somit ist allein die Sauerstoffaufnahme auf eine vollständige Lungendurchblutung und eine vollständige Lungenbelüftung angewiesen. Die Kohlendioxidabgabe ist allein von der Ventilationsmenge abhängig und funktioniert sowohl bei Atelektasen als auch bei Lungenembolie. Lediglich bei sehr schwerem Befund steigt auch CO₂ an. Gase diffundieren vom Ort der höheren Konzentration zum Ort mit der niedrigeren Konzentration. Die Aufnahme von Sauerstoff durch die Alveole wird als **Oxygenierung** bezeichnet. Die Partialdruckdifferenz zwischen Alveole und Pulmonalarterie ist die treibende Kraft der Diffusion. Nach dem Gesetz von Dalton erzeugt jedes Gas in einem Gasgemisch einen spezifischen Druck entsprechend seiner Konzentration. Diesen Druck eines einzelnen Gases nennt man Partialdruck. Die Summe der einzelnen Partialdrücke ist der Gesamtdruck. Bezogen auf die Atmosphäre beträgt der Gesamtdruck aller Gase auf Meereshöhe 760 mmHg.

Unsere Atemluft besteht aus einem Gemisch aus mehreren Gasen:

Stickstoff (79%)	→	pN ₂	600 mmHg
Sauerstoff (20,9%)	→	pO ₂	152 mmHg
Kohlendioxid (0,04%)	→	pCO ₂	0,3 mmHg
Edelgase			

Die angegebenen Werte beziehen sich auf Gasdrücke in Meereshöhe und ohne Luftfeuchtigkeit.

Da sich die Inspirationsluft mit dem Restvolumen (Residualvolumen) in den Bronchien und Alveolen (Totraumvolumen) vermischt, ist der Partialdruck von Sauerstoff in den Alveolen geringer als in der Umgebungsluft. Der Partialdruck von Sauerstoff in der Alveole beträgt ca. 104 mmHg, der von Kohlendioxid ca. 35-40 mmHg. Der Wasserdampf-Partialdruck (37°C, 100% relative Feuchtigkeit) beträgt 44 mmHg.



Tab. 2 Mittlere Partialdrücke von pO₂, pCO₂ und Wasserdampf (pH₂O)

1.9 Überwachung der Atmung und Beatmung

1.9.1 Arterielle Blutgasanalyse (BGA)

Bei der Blutgasanalyse erfolgt die Messung der Partialdrücke der Atemgase im arteriellen oder kapillaren Blutplasma. Gemessen werden nur die im Wasser gelösten Gase. Während der komplette CO₂-Gehalt im Plasma gebunden ist, ist der O₂-Gehalt nur zu einem kleinen Teil (0,3 ml pro 100 ml Plasma) physikalisch im Plasma gebunden. Der weitaus größere Anteil des O₂-Gehalt ist chemisch ans Hämoglobin (im Idealfall 21 ml/100 ml) in den Erythrozyten gebunden und wird nur über die prozentuale Sättigung (Färbeindex des Blutfarbstoffs) erfasst. Zusätzlich werden der pH-Wert und das Standardbikarbonat (HCO₃) des Blutes bestimmt.

SaO₂ von 90% entspricht ca. einem PaO₂ von 60 mmHg
SaO₂ von 95% entspricht ca. einem PaO₂ von 80 mmHg

Ein Kohlendioxid (PaCO₂) > 45 mmHg bei gleichzeitig pH < 7,35 gilt grundsätzlich als Indikation der maschinellen Beatmung insbesondere nichtinvasiv.

Normwerte im arteriellen Blut:	
pH	7,35 – 7,45
PaO ₂	70 – 100 mmHg
PaCO ₂	35 – 45 mmHg
HCO ₃	22 – 26 mmol/l
ABE	0 (+/- 2)

Tab. 3

Die arterielle Blutgasanalyse sollte um Messwert Veränderungen zu vermeiden unmittelbar nach der Abnahme im Blutgasanalysegerät eingegeben werden. Kühl gelagert kann die Probe auch nach 15-20min verwendet werden. Alternativ zur arteriellen BGA kann auch Kapillarblut gewonnen werden. Die Messwerte sind nahezu identisch.

1.9.2 Pulsoxymetrie – SpO₂

Durch den Einsatz des Pulsoxymeters kann ermittelt werden wie viel Prozent des Hämoglobins mit Sauerstoff (O₂) gesättigt ist. Der Normwert beim lungengesunden Erwachsenen beträgt 96 – 98 %. Die SpO₂ ist ein geeigneter Parameter, um die Versorgung des Körpers mit O₂ zu überwachen. Er gibt jedoch keine Auskunft darüber, ob der Patient eine ausreichende Menge an Luft ein- und ausatmet.

Der Einsatz der SpO₂ beim Patienten empfiehlt sich:

- routinemäßig, um punktuell die Sauerstoffsättigung zu ermitteln und zu dokumentieren.
- bei akuter Atemnot, wenn eine Störung der Beatmung nicht eindeutig ausgeschlossen werden kann (Alarmpfeife des Beatmungsgerätes oder fehlende Thoraxhebungen) oder Beatmungsprobleme nicht sofort behoben werden können.

Die Sauerstoffsättigung kann z.B. verbessert werden durch: Sauerstoffgabe, PEEP-Erhöhung, Verlängern der Inspirationszeit, Rekrutierungsmanöver, Lagerung (Bauchlage) und endobr. Absaugen.

Mögliche Ursachen einer schlechten SpO₂

- Sekretansammlung im Bronchialsystem
- längere Atempause z.B. beim Absaugen oder Transfer aus dem Bett in den Sessel
- pulmonale Erkrankungen wie z. B. Pneumonie, Lungenödem, Pleuraergüsse, Atelektasen, Pneumothorax usw.
- stark kompromittierter arterieller Blutdruck
- Fehlmessung

1.9.3 Kapnometrie – etCO₂

Die Kapnometriemessung zeigt, ob die Menge an eingeatmeter Luft pro Minute ausreichend ist. Das gemessene Produkt ist das Gas Kohlendioxid (CO₂) Durch die speziell vorhandene Messküvette wird das Kohlendioxid in der Ausatmung gemessen. Die Küvette wird zwischen Gänsegurgel und Ausatemventil in das Beatmungssystem eingefügt. Kohlendioxid ist ein Abbauprodukt, das durch den Verbrauch von Sauerstoff im Stoffwechsel anfällt und durch die Atmung ausgeschieden wird. Wenn das Atemminutenvolumen des Patienten absinkt, erhöht sich der in der Ausatmung gemessene Kohlendioxidwert (etCO₂). Demzufolge muss dann die Atemfrequenz oder das Atemzugvolumen gesteigert werden. Wenn das Atemzugvolumen der Normeinstellung entspricht, sollte die Erhöhung der Atemfrequenz bevorzugt werden. Der Normwert des gemessenen etCO₂ beträgt 30-35 mmHg. Nach einer Korrektur der Einstellung dauert es ca. 10-20 Minuten bis der etCO₂ Wert auf die Veränderung reagiert. Nach dieser Zeit kann eine weitere Korrektur vorgenommen werden. Bei leichten Abweichungen vom Normwert (z.B. von 3-5 mmHg) reicht i. d. R. eine Veränderung der Atemfrequenz von 1-2 /min aus. Die Messküvette muss in regelmäßigen Abständen entsprechend der Gebrauchsanweisung abgeglichen (Nullabgleich oder Kalibration) werden. Das etCO₂ kann nur mittels der Kapnometriemessung und nicht mit der Oxymetrie (SpO₂) ermittelt werden. Es kann durchaus vorkommen, dass die Sauerstoffsättigung im Normbereich ist, der etCO₂ aber nicht.

Vorteile der endtidalen CO₂-Messung:

- Kontrolle der Tubuslage
- Kontrolle der Beatmung
- Kontrolle der Kreislaufsituation

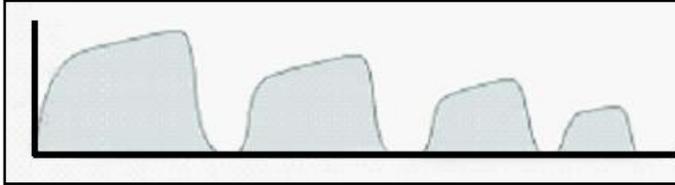
Ursachen für ein zu hohes etCO₂

- zu niedrig eingestellte Atemfrequenz oder Atemzugvolumen
- bei körperlicher Anstrengung
- erhöhte Körpertemperatur
- Fehlmessung

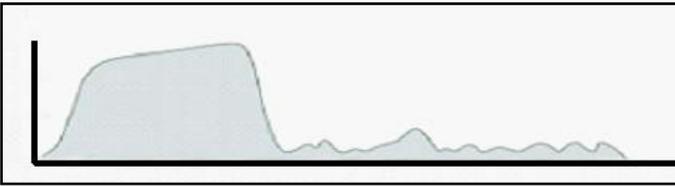
Ursache für ein zu niedriges etCO₂

- Atemfrequenz oder Atemzugvolumen ist zu groß eingestellt
- langsames sinken bei Abfall des Herzzeitvolumens
- abrupter Abfall bei Lungenembolie
- Messwert nahe Null bei Fehllage (Fehl-Intubation) des Endotrachealtubus
- Fehlmessung

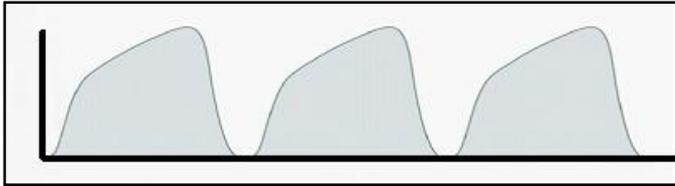
Kurveninterpretation von etCO₂ – Diagrammen



- Exponentieller Abfall des etCO₂
- Herzstillstand; schneller Abfall
 - Lungenembolie
 - Abfall des Herzzeitvolumens



- Plötzlicher Abfall des etCO₂
- Akzidentelle Extubation
 - Ösophagus Fehl-Intubation
 - Diskonnektion



- Schrägstellung des etCO₂ Plateaus
- Bronchospasmus
 - Asthmaanfall

Abb.5:

1.10 Indikationen der maschinellen Beatmung

Grundsätzlich spielt bei der Entscheidungsfindung für eine maschinelle Beatmung (invasiv oder nichtinvasiv) die gesamte Krankheitssituation und der objektive Eindruck bzw. die Krankenbeobachtung des Patienten eine besondere Rolle. Trotzdem gibt es eine Vielzahl an Parametern, die z. T. in folgender Tabelle dargestellt sind. Sie können die Entscheidung erleichtern bzw. untermauern.

Atemmechanik:	Normwert	Indikation zur maschinellen Beatmung
Atemfrequenz	12 – 20 /min	> 35 /min
maximale insp. Kraft	- 75 – 100 cmH ₂ O	> - 25 cmH ₂ O
Oxygenierung:		
PaO₂	70 -100 mmHg	< 60 mmHg
Ventilation:		
pH	7,35 – 7,45	< 7,35
PaCO₂	35 – 45 mmHg	> 45 mmHg*

Tab. 4

* Ausnahme: COPD und chronische Hyperkapnie

Kohlendioxid (PaCO₂) > 45 mmHg bei gleichzeitig pH < 7,35 gilt grundsätzlich als Indikation für die maschinelle Beatmung insbesondere der nichtinvasiven Beatmung. Sättigungswerte ≤ 90 % gelten grundsätzlich als therapiebedürftig, insbesondere mit Sauerstoff oder CPAP-Therapie. Ausnahmen können chronisch pulmonale Erkrankungen darstellen. Je kränker und instabiler der Patient desto mehr besteht die Indikation für eine invasive Beatmung.

2 Klassifizierung und Steuerung

Nach wie vor hat sich bis heute keine einheitliche Klassifizierung der unterschiedlichen Steuerung von Respiratoren und Beatmungsformen durchgesetzt. Erschwerend kommt hinzu, dass für nahezu identische Beatmungsverfahren immer neue firmenspezifischen Begrifflichkeiten verwendet werden. So wurde die Zahl der verschiedenen Beatmungsformen nahezu unüberschaubar.

Die folgende Einteilung der Beatmungsformen orientiert sich am Atemtyp der Beatmungsformen und der Steuerung der Respiratoren.

2.1 Atemtyp

Der Atemtyp unterscheidet, nach welchem Kriterium die Inspiration ausgelöst wird. Die Inspiration kann durch den Respirator, den Patienten oder abwechselnd von beiden ausgelöst werden.

1. mandatorische Beatmung (kontrollierte Beatmung)

Die Inspiration wird durch den Respirator ausgelöst. Der Patient wird maschinell beatmet und erbringt keine Atemarbeit.

Bekannte Beatmungsformen sind:

- A/C** – Assist controlled
- CMV** - controlled mandatory ventilation
- IPPV** - intermittent positiv pressure ventilation
- CPPV** - continuous positiv pressure ventilation

In der Regel bieten mandatorische (kontrollierte) Beatmungsformen die Möglichkeit des „Triggern“, so dass der Patient zusätzliche kontrollierte Maschinenhübe auslösen kann.

2. assistierte Beatmung (augmentierte Beatmung)

Die Atemarbeit wird zum Teil vom Respirator und vom Patienten erbracht.

Bekannte Beatmungsformen sind:

- SIMV** - synchronized intermittent mandatory ventilation (maschineller Anteil garantiert Mindestfrequenz und Atemhubvolumen (VCV) oder Inspirationsdruck (PCV))
- BIPAP/ BiLevel** - druckkontrollierte Beatmung auf zwei unterschiedlichen Druckniveaus mit „freier Spontanatmung“
- MMV** - mandatory minute ventilation (MMV garantiert eine Mindestfrequenz/Ventilation)

3. druckunterstützte Beatmung

Hierbei werden die Einatembemühungen des Patienten durch den Respirator unterstützt.

Bekannte Beatmungsformen sind:

- ASB** - assisted spontaneous breathing
- PSV** - pressure support ventilation

4. Spontanatmung

Bei reiner Spontanatmung wird die Atemarbeit nahezu alleine vom Patienten erbracht. Der Respirator hält nur noch ein CPAP/PEEP-Niveau aufrecht.

Bekannte Spontanatemformen sind:

- CPAP** - continuous positiv airway pressure

2.2 Kontrollvariable

Kontrolle der Inspiration (volumenkontrollierte und druckkontrollierte Beatmung)

Die Kontrolle der Inspiration beschreibt, nach welchem Kriterium die Inspiration gestartet und gehalten wird. Die Variable kann Druck, Volumen, Flow oder Zeit sein. Bei der druckkontrollierten Beatmung ist die Kontrollvariable der Druck. Bei der Volumenkontrollierten Beatmung ist die Kontrollvariable Volumen und Flow. Die mandatorischen und assistierten Beatmungsformen sind als druckkontrollierte oder volumen- kontrollierte Beatmungsformen verfügbar. Die Volumenkontrollierte Beatmung kann auch druckreguliert sein.

2.3 Zyklusvariable - Steuerung

Die Zyklusvariable bzw. Steuerung bestimmt, nach welchem Kriterium die Inspiration beendet wird und die Expiration eingeleitet wird. Ein Beatmungszyklus umfasst den Beginn einer Inspiration bis zum Ende der darauf folgenden Expiration.

Folgende Steuerungen sind möglich:

1. Zyklusvariable Druck - Drucksteuerung

Bei der Drucksteuerung wird die Inspiration bei Erreichen eines vorgewählten Drucks beendet. Früher wurde die Drucksteuerung häufiger verwendet, um eine maschinelle Inspiration zu beenden. Heute wird die druckgesteuerte Beatmung fast nur noch für die Atemtherapie (Druckinhalation) eingesetzt.

2. Zyklusvariable Flow - Flowsteuerung

Die Umschaltung von Inspiration auf Expiration erfolgt bei Erreichen bzw. Über- oder Unterschreiten eines bestimmten Gasflusses. Diese Steuerungsform findet bei druckunterstützten spontanen Beatmungsformen (PSV) Anwendung. Die Umschaltung auf Expiration erfolgt, wenn der Atemgasfluss nur noch 25 % des inspiratorischen Spitzenflusses beträgt. Die Grundeinstellung ist beim Erwachsenen in der Regel auf 25 % eingestellt.

3. Zyklusvariable Volumen - Volumensteuerung

Bei der Volumensteuerung schaltet der Respirator ohne inspiratorische Pause auf Expiration um, wenn ein vorgewähltes Volumen verabreicht worden ist. Früher wurde diese Steuerungsform bei vielen volumenkontrollierten Beatmungsformen angewendet. Die Inspiration kann nur durch folgende Einstellungen verlängert werden:

- Erhöhung des Atemzugvolumens
- Reduzierung der Atemgasflusses
- dezelerierender Flow einstellen
- Einstellen einer Plateauzeit

4. Zyklusvariable Zeit - Zeitsteuerung

Die Umschaltung von Inspiration zu Expiration erfolgt in festen Zeitabständen. Bei der kontrollierten oder assistierten Beatmung wird die Inspirationszeit entweder direkt eingestellt oder sie ergibt sich aus der Atemfrequenz und dem Inspirations- Expirations- Verhältnis. Die Zeitsteuerung wird derzeit bei den meisten neueren Respiratoren angewendet. Die Inspirationsphase enthält je nach Höhe des maximalen Atemgasflusses einen mehr bzw. weniger langen Anteil ohne Atemgasfluss, in der der Druck gehalten wird (= Plateau) bevor er nach Umschaltung auf Ausatmung wieder abfällt.

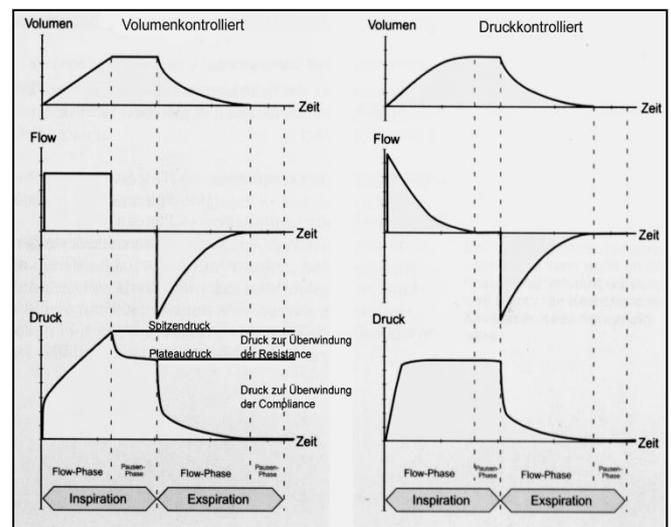


Abb. 6 Volumen-, Flow- und Druckdiagramm bei volumen- und druckkontrollierter Beatmung

2.4 Unterschiede und Anwendungsindikationen von Respiratoren

Intensivrespiratoren

Dies sind modernste mikroprozessorgesteuerte Respiratoren, welche über eine Vielzahl von Beatmungsformen verfügen. Die Respiratoren verfügen über eine Vielzahl von Messparametern, versch. Diagrammen, Optionen zur automatischen Tubuskompensation, darstellen von P/V Loop und vieles mehr. Ihre Stärken liegen in der differenzierten invasiven Beatmung bei schweren Oxygenierungs- und Ventilationsstörungen.

Respiratoren zur nichtinvasiven Beatmung

Diese Respiratoren (z.B. V60, Trilogy Evolution, Carina und Vivo) sind meist kleiner und handlicher als Intensivrespiratoren. Sie verfügen über Beatmungsformen zur Spontanatmung (CPAP, PSV) und druckkontrollierter Beatmung (PCV, BiLevel). Neuere Generationen verfügen auch über Beatmungsmodi, um einen Patienten optional invasiv zu beatmen. Die Sauerstoffkonzentration kann demzufolge am Respirator oft nicht direkt erhöht werden und beträgt dann immer 21 %. Lediglich über einen Adapter oder einen separaten Anschluss für O₂ kann bei diesen Respiratoren die Sauerstoffkonzentration zum Teil auch sehr differenziert (z.B. V60 und Carina) erhöht werden. Die Stärken dieser Respiratoren liegen in der nichtinvasiven Beatmung und verfügen über eine sehr gute Triggertechnik und können hohe Atemgasflüsse generieren und somit Patienten mit geschwächter Atemmuskulatur und Dyspnoe sehr gut zu unterstützen und Leckagen zu kompensieren.

Respiratoren für die außerklinische Beatmung

Respiratoren für die außerklinische Beatmung (z.B. Astral, Stellar, Luisa, PrismaVent und Vivo) sind meist langjährig erprobte zuverlässige Respiratoren, die keinen Sauerstoff- und Druckluftanschluss brauchen. Sie verfügen nur über wenige Beatmungsformen, meist ohne modernste Zusatzoptionen, welche auch seltenst benötigt werden. Die Atemgase werden über eine leistungsstarke Turbine aus der Umgebungsluft generiert. Anwendung finden sie bei Patienten mit chronisch erschöpfter Atempumpe (Chronisch obstruktive Lungenerkrankung, Thorax-Deformität, Erkrankungen mit Muskelschwäche) oder chronischer Atemlähmung (Undine-Syndrom, hohe Querschnittslähmung, ALS (Amyotrophische Lateralsklerose)). Diese Patienten werden oft über ein angelegtes Tracheostoma beatmet, zunehmend auch über Maske.

Respiratoren für den präklinischen Einsatz im Rettungsdienst

Die Anforderungen für den präklinischen Einsatz im Rettungsdienst weichen zum Teil sehr stark von denen der Intensivrespiratoren ab. Diese Notfallbeatmungsgeräte müssen robust gebaut sein und stark wechselnden Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten standhalten. Sie verfügen über einen Sauerstoffanschluss und mischen diesen nach Einstellung Umgebungsluft bei. Moderne Respiratoren für den Transport verfügen ähnlich den Intensivrespiratoren über mehrere Beatmungsformen. Patienten welche mit schweren Oxygenierungsstörungen (ARDS) von einer Intensivstation zur anderen verlegt werden, müssen beim Transport mit einem dafür geeigneten präklinischen Respirator oder einem Intensivrespirator beatmet werden.

Respiratoren mit Schwerpunkt Transport-, Notfall- und präklinische Beatmung: (Beispiele)

Fa Dräger

Oxylog 3000 PSV (CPAP/ASB, PCV (BIPAP), SIMV/IPPV (VCV) AutoFlow (druckreg.) & NIV

Fa Hamilton

T1 spont (PSV), PCV(DuoPAP), APV/SIMV/CMV (druckreg.), ASV & NIV

Fa Weinmann

Medumat Transport &

Medumat Standard 2 CPAP/ASB(PS), PCV, IPPV und PRVC (druckreguliert) & NIV

MeduVent

CPAP/PS, PCV, IPPV, PRVC (druckregulier) und NIV

Fa Zoll

EMV Serie

CPAP/PS, Bilevel, A/C (PC/VC) & NIV

2.5 Funktionsprinzip der spontanen Beatmungsverfahren

Der spontane Atemgasspitzenfluss bei ruhiger Atmung beträgt ca. 40 - 60 l/min. Bei angestrenzter Atmung oder Belastung kann die Flussgeschwindigkeit weit über 100 l/min ansteigen. Die Flowform entspricht einem sinusförmigen Verlauf. Die Spontanatmung ohne jegliche Druckunterstützung ist in jedem Fall sehr variabel. Atemfrequenz, Atemtiefe, Einatmungsdauer und Flussgeschwindigkeit des Atemgases bestimmt alleine der Patient.

Durch das spontane Atmen mit Atemhilfen sollte die physiologische Atmung unterstützt und die Atemarbeit verringert, aber nicht durch z.B. träge reagierende Ventile beeinträchtigt werden.

Bei der maschinellen Unterstützung der Spontanatmung unterscheidet man zwei Systeme:

Demand-flow System

Beim Demand-flow System fließt das Atemgas nur während der Inspiration zum Patienten. In der Expiration kommt das Gasgemisch im Inspirationsschenkel zum Stehen und fließt über den Expirationsschenkel ab. Demand-flow Systeme werden bei einigen Geräten für die spontanen Beatmungsformen (PSV) eingesetzt. Das Problem von großer Triggerlatenzzeit (Reaktionszeit des Respirators zwischen Beginn der Einatmungsaktivität des Patienten und dem Öffnen des Inspirationsventils des Respirators) besteht bei modernsten Respiratoren i.d.R. immer weniger.

Zunehmend werden elektronisch gesteuerte Demand-flow Systeme (auch Basisflow oder Flow-by genannt) in Respiratoren eingesetzt. Diese vereinen die Vorteile der beiden Verfahren (Demand- und Continuous-Flow) und erreichen hierdurch sehr kurze Triggerlatenzzeiten.

Continuous-flow System – High-Flow System

Bei Continuous-flow Systemen fließt kontinuierlich das Atemgas gegen Widerstand vom Inspirationsschenkel zum Expirationsschenkel oder über das Whisper-Swivel nach außen ab. Atemgas ist immer in Bewegung. Ventile, welche die In- und Expiration steuern fehlen. Als Puffer für die Inspiration dient häufig ein elastischer Reservoirbeutel im Nebenschluss, aus dem sich der Patient ohne Druckabfall auch mit einem raschen, tiefen Atemzug bedienen kann.

Continuous-flow Systeme wie z.B. das CPAP CF 800 von Dräger oder High-Flow Blender (Flowmeter) mit Sauerstoff- und eventuell mit Druckluftanschluss welche einen ausreichend hohen Atemgasfluss generieren. Diese Systeme eignen sich zur CPAP-Therapie mit Mundstück, Nasen- oder Vollgesichtsmaske. Eine inspiratorische Druckunterstützung kann nicht eingestellt werden.

Systeme ohne Druckluftanschluss generieren basierend auf dem Venturi-Prinzip ein Gasgemisch aus Sauerstoff und angesaugter Raumluft.

Zunehmend kommen High-Flow Systeme mit transnasaler Applikation eines Gasgemisches zum Einsatz. Diese erleichtern in einem geringen Maße die Einatmung durch den hohen Flow, halten während der Ausatmung abhängig vom Flow einen kleinen PEEP von 2-5 mbar bzw. PEP (Positiv Expiratory Pressure) und verflüssigt durch das 37° C warm-feuchtes Atemgas das Bronchialsekret.

Hierbei wird das Atemgas über eine spezielle Nasenbrille befeuchtet und erwärmt mit einem Gesamtfluss von 10-60l/min verabreicht.

Produkte:

- OptiFlow (MaxVenturi) und Airvo 2 - Fa Fisher & Paykel
- TNI Softflow 50 – Fa TNI medical
- Precision Flow – Fa VapoTherm
- LM Flow – Fa Löwenstein medical

Für den präklinischen Einsatz eignen sich oben genannte Systeme nicht, da diese einen hohen Atemgasverbrauch benötigen.

- Bousignac-System

Dieses System, welches über das Venturi-Prinzip einen meist ausreichend hohen Atemgasflow generiert, kann über eine CPAP-Maske einen CPAP-Druck aufbauen. Es kann beim kardiogenen Lungenödem zum Einsatz kommen.

2.6 Beatmungsparameter und Einstellgrößen des Respirators

Atemzeitverhältnis und Atemzyklus

In- und Expiration zusammen werden als ein Atemzyklus bezeichnet. Das Atemzeitverhältnis (I:E Verhältnis) beschreibt den zeitlichen Zusammenhang von In- und Expirationszeit (T_{insp}:T_{exp}). Bei einer Atemfrequenz (AF) von 12–15/min gilt ein I:E Verhältnis von 1:1,5 bis 1:2 als physiologisch.

Beispiel:

AF 10/min $\frac{60\text{sek}}{AF} = 1 \text{ Atemzyklus}$ $\frac{60}{10} = 6 \text{ Sekunden}$
 I:E Verhältnis 1:2

Bei einem I:E Verhältnis von 1:2 beträgt die Inspiration 2 Sekunden, die Expirationszeit 4 Sekunden.

Atemfrequenz und Atemzugvolumen

Als Grundeinstellung am Respirator gilt:

- Atemfrequenz (AF): 12–15/Min
- Atemzugvolumen (AZV): 7–8 ml/kgKG
- Atemminutenvolumen (AMV): ergibt sich aus AF x AZV

Als Rechengrundlage wird außer bei lungenprotektiver Beatmung beim ARDS das normale Körpergewicht (nicht das tatsächliche KG) herangezogen. Um das PaCO₂ im Normbereich zu halten, gilt ein Atemminutenvolumen von 90–120 ml/kgKG als ausreichend. Bei der präklinischen Notfallbeatmung wird eine leichte Hyperventilation angestrebt.

Inspiratorischer Trigger

Mithilfe des Triggers erkennt der Respirator eine Inspirationsbemühung des Patienten. Mit Erreichen der Triggerschwelle öffnet das Inspirationsventil, über das dem Patienten Atemgas zur Verfügung gestellt wird (siehe auch Spontanatmung und inspiratorische Druckunterstützung).

Man unterscheidet einen Flow- und einen Drucktrigger.

Flowtrigger

Der Flowtrigger reagiert auf kleinste Flussbewegungen des Atemgases. Der Patient bringt durch seine Inspirationsbemühung das Atemgas in Bewegung und ab einer bestimmten Triggerschwelle wird das Inspirationsventil des Respirators geöffnet. Der Flowtrigger ist sensibler als der Drucktrigger.

Eine Einstellung zw. 2-3l/min erleichtert das Einatmen. Zu niedrige Werte erhöhen die Gefahr einer Selbsttriggerung.

Standarteinstellung: 5l/min

Drucktrigger

Der Drucktrigger reagiert auf Druckveränderungen im Atemsystem. Die Schwelle beim Drucktrigger wird in der Regel zwischen -1 bis -2 mbar (ausgehend vom PEEP-Niveau) eingestellt. Bei Unterschreiten dieser Triggerschwelle wird die Inspiration eingeleitet.

Standarteinstellung: -1mbar

Unter Triggerlatenzzeit versteht man die zeitliche Verzögerung zwischen dem Beginn der Einatembemühung und dem Öffnen des Inspirationsventils. Durch eine geringe Triggerlatenzzeit wird die Atemarbeit verringert.

Expiratorischer Trigger

Esens Expiratory sensivity, ETS (Expiratorische Trigger Sensitivität), Insp. Zyklusende

Als Abschaltkriterium der Druckunterstützung (Pressure Support) ist die Flussgeschwindigkeit des Atemgases (Flowsteuerung) gegen Ende der Inspiration maßgeblich. Wenn der Atemgasfluss nur noch 25% des inspiratorischen Spitzenwertes beträgt, wird die Druckunterstützung abgeschaltet. Bezeichnungen für diesen Parameter können z.B. ETS, Esens oder expiratorischer Trigger sein. Eine Einstellung von 25% kann als Standarteinstellung betrachtet werden. Vereinzelt kann durch Veränderung des expiratorischen Triggers die maschinelle Druckunterstützung besser an die Spontanatmung des Patienten angepasst werden. Dadurch sinkt u. U. die Atemarbeit. Eine Einstellung von 40-60% verkürzt z.B. bei COPD die Inspiration, dadurch bleibt mehr Zeit für die Expiration. In der Folge sinkt bei verlängertem Expirium der Intrinsic-PEEP.

Beatmungsdrücke

Spitzendruck, P_{max} ; P_{peak}

Der Spitzendruck ist der am höchsten gemessene Druck innerhalb der Inspiration. Charakteristischerweise tritt der Spitzendruck bei einer volumenkontrollierten Beatmung ohne Drucklimitierung oder Druckregulation auf. Durch die Strömungswiderstände des Atemgases liegt der Spitzendruck oberhalb der Inspirationsdrücke, die entstehen wenn das Atemgas nicht mehr fließt (Plateaudruck). Hierbei sind Inspirations- und Expirationsventil geschlossen.

Plateaudruck

P_{plat}

Ein Plateau entsteht, wenn die Inspirationszeit länger andauert, als der Respirator braucht, um das Atemzugvolumen zu verabreichen. Der dann vom Respirator gehaltene Druck wird als Plateaudruck bezeichnet. Er ist abhängig von der Höhe des Atemzugvolumens und der Compliance der Lunge. Bei manchen Respiratoren kann statt der Inspirationszeit bzw. des I:E Verhältnisses die Plateauzeit direkt eingegeben werden.

Oberes Druckniveau

Inspirationsdruck (P_{insp}); P_{hoch} ; $P_{kontroll}$; $PEEP_{hoch}$

Das obere Druckniveau (Inspirationsdruck) ist der Druck, der bei druckkontrollierter und druckunterstützter Beatmung vom Anwender eingestellt wird. Bei der druckregulierten Beatmung wird das obere Druckniveau automatisch den Beatmungsverhältnissen angepasst.

Merke:

Die obere Druckgrenze muss als Alarmgrenze bzw. Sicherheitsgrenze eingestellt werden um die Lunge vor zu hohem Beatmungsdruck zu schützen. Wenn diese Druckgrenze erreicht wird, öffnet das Expirationsventil und der Beatmungshub wird abgebrochen.

PEEP, CPAP und EPAP

PEEP (Positive Endexpiratory Pressure), CPAP (Continuous Positive Airway Pressure)

EPAP (Expiratory Positive Airway Pressure)

Als PEEP (positiv endexpiratorischer Druck) bezeichnet man den Druck, der unter maschineller Beatmung während der Expiration in der Lunge aufrechterhalten wird. Dieser PEEP wird auch extrinsischer oder externer PEEP genannt.

CPAP ist der Druck, der unter Spontanatmung am Respirator während der In- und Expiration gehalten wird. PEEP und CPAP können praktisch miteinander gleichgesetzt werden.

Beim PEEP wird zwischen extrinsischem und intrinsischem PEEP unterschieden.

Extrinsischer PEEP

Der extrinsische oder externe PEEP wird am Respirator eingestellt. Durch die Einstellung eines PEEP erhöht sich die funktionelle Residualkapazität (FRC; siehe Abb.:4). Dadurch nehmen das endexpiratorische Lungenvolumen und die Gasaustauschfläche zu. Alveolen können durch den PEEP während der Expiration offengehalten werden. PEEP verbessert die Oxygenierung.

Intrinsischer PEEP

Ein intrinsischer PEEP tritt dann auf, wenn das zuvor eingeatmete Volumen in der Expiration nicht vollständig ausgeatmet werden kann. Dies wird durch erhöhte Widerstände und einer kurzen Expirationszeit verursacht. Der Expirationsflow fällt nicht auf null ab, bevor die nächste Inspiration beginnt. Dies kann am Flow/Zeitdiagramm erkannt werden. Ein Teil des Atemzugvolumens wird zurückgehalten (air trapping). Der gesamte PEEP (PEEP total) liegt bei Auftreten eines intrinsischen PEEP höher als der am Respirator eingestellte externe PEEP.

Druckanstiegsgeschwindigkeit

Flowanstieg, Flowakzeleration, Insp. Anstiegszeit, P-Rampe

Die Druckanstiegsgeschwindigkeit ist bei präklinischen Notfallrespiratoren nicht immer einstellbar.

Die meisten Intensivrespiratoren verfügen über die Möglichkeit den Druckanstieg zu regulieren, d.h. über einen Druckanstiegsregler kann bestimmt werden, wie schnell die Druckunterstützung und das obere Druckniveau bei druckregulierter und druckkontrollierter Beatmung vom PEEP-Niveau auf den jeweils eingestellten Druck ansteigen sollen. Durch eine geringe Verzögerung von 0,05–0,2 Sekunden kommt

es zu keinem abrupten Druckanstieg und Strömungswiderstände (Luftverwirbelungen) können reduziert werden. Ein leicht verzögerter Druckanstieg ermöglicht dem Patienten unter Spontanatmung ein angenehmeres Atmen, weil die Druckunterstützung nicht ruckartig aktiviert wird.

Ein Druckanstieg von mehr als 0,2 Sekunden bringt i.d.R. keine Vorteile. Im Gegenteil, bei Spontanatmung wird die eingestellte Druckunterstützung zu langsam aktiviert, was eine erhöhte Atemarbeit zur Folge hätte. Allenfalls unter NIV kann im Einzelfall 0,3 sec erwogen werden.

Inspiratorische Flussgeschwindigkeit

Inspiratorischer Flow, Peakflow

Die inspiratorische Flussgeschwindigkeit ist bei präklinischen Notfallrespiratoren nicht immer einstellbar. Die vom Anwender vorzugebende inspiratorische Flussgeschwindigkeit bestimmt wie schnell das inspiratorische Atemgas unter volumenkontrollierter Beatmung vom Respirator verabreicht wird.

Mittlere Einstellung: 30–50 l/min. Je schneller das Atemgas verabreicht wird, desto kürzer kann die Inspirationszeit gewählt werden. Auch der Spitzendruck nimmt mit Zunahme der Flussrate zu.

Mit schnelleren Flussraten und den damit erreichten kürzeren Inspirationszeiten kann die Herzleistung positiv beeinflusst werden. Der erhöhte intrathorakale Druck während der Inspiration wird kürzer aufrechterhalten. Bei modernen Respiratoren auch für die Präklinik wird der Flow automatisiert. Diese Option wird druckregulierte Beatmung genannt.

3 Nicht - invasive Beatmung (NIV) und CPAP

3.1 Sinn und Zweck der NIV

CPAP bzw. die Nicht - invasive Beatmung (NIV) über Nasen- oder Gesichtsmasken gewinnt in den letzten Jahren nicht nur im häuslichen Bereich bei der Schlafapnoe oder chronisch muskulär bedingter Ateminsuffizienz, sondern auch im intensivtherapeutischen und außerklinischen Bereich zunehmend an Bedeutung. Im Intensivtherapeutischen Bereich wird der NIV besonders beim kardiogenen Lungenödem, beginnender respiratorischer Insuffizienz und akut erschöpfter Atempumpe infolge von infektexazerbierter COPD große Bedeutung beigemessen. Durch die NIV kann eine Intubation vermieden werden und nicht selten werden bessere Therapieerfolge erzielt.

Im präklinischen Bereich werden der CPAP-Therapie bzw. NIV insbesondere beim kardiogenen Lungenödem immer größere Bedeutung beigemessen. Hierfür stehen mittlerweile auch für den präklinischen Bereich die ersten Beatmungsgeräte zur Verfügung, welche dafür geeignet sind.

Die Beatmungsformen PSV (CPAP/ASB) und eingeschränkt PCV (BIPAP/Bilevel) mit einem PEEP von 5- max. 10mbar und einem Inspirationsdruck von 3 - 15mbar über PEEP eignen sich am besten.

Bei Linksherzinsuffizienz bzw. kardiogenem Lungenödem kann auch durch einen CPAP –Druck von 5-8mbar (ohne Inspirationsdruck) die linksventrikuläre Funktion durch Senkung der Vorlast und dem Druck auf das Perikard mit Ausnutzung des Starling Effektes (ein vorgespannter Muskel ist kräftiger als ein gedehnter oder ausgeleierter) verbessert werden. Der CPAP – Druck kommt einem Nitroeffekt gleich. Die Nachlast wird ebenso reduziert.

3.2 Vor- und Nachteile der NIV gegenüber der Endotrachealen Intubation

Vorteile:

- deutlich geringerer Atemwegswiderstand
- keine oder kaum Analgosedierung nötig (Morphin ist Mittel der Wahl)
- mukoziliäre Reinigung bleibt erhalten
- die Beatmung kann rasch beendet werden; kein Entwöhnen nötig
- bei geschultem Personal und kooperativen Patienten kann die NIV auch außerhalb der Intensivstation auf einer IMC-Station erfolgen
 - z.B. bei der intermittierenden Selbstbeatmung aufgrund chronisch muskulärer Insuffizienz
- Komplikationen infolge einer Intubation und des endotrachealen Tubus entfallen

Nachteile:

- kein sicherer Atemwegszugang
- unsicheres Monitoring, Problem von Leckagen
- Druckstellen der Maske
- Konjunktivitis durch Undichtigkeit der Maske
- Probleme bei starker Sekretproduktion; endotracheales Absaugen erschwert
- Patient muss wach und kooperativ sein; Schutzreflexe müssen vorhanden sein

3.3 Indikationen und Kontraindikationen

Indikationen:

- Allgemein: pH zw. 7,25–7,35 einhergehend mit $\text{PaCO}_2 > 45 \text{ mmHg}$
- Kardiogenes Lungenödem
- Akute exazerbierte Ateminsuffizienz bei COPD
- Gasaustauschstörungen durch minderbelüftete bzw. atelektatische Areale, z.B. nach kardiochirurgischer Intervention, Thorax- und Oberbaucheingriffen oder Thoraxtrauma
- Gasaustauschstörungen bei Pneumonie
- Entwöhnung; Hierbei wird bei noch geschwächter Atemmuskulatur und einem PEEP von ca. 8 mbar extubiert und mit NIV vom PEEP und vom noch nötigen Pressure Support weiter entwöhnt.
- Schlafapnoe und chronische Ateminsuffizienz

Kontraindikationen:

absolut

- Fehlende Spontanatmung, Schnappatmung
- Verlegung der Atemwege
- Gastrointestinale Blutung oder Ileus
- Koma – nicht hyperkapnisch bedingt

relativ

- Koma – hyperkapnisch bedingt
- Hypersekretion trotz Bronchoskopie
- Schweregradige Hypoxämie oder Azidose ($\text{pH} < 7.1$)
- Hämodynamische Instabilität (kardiogener Schock, Myokardinfarkt)
- Probleme mit Adaption der NIV/Maske - anatomisch bedingt und / oder durch Agitation
- Z.n. oberer gastrointestinaler OP

3.4 Durchführung der nichtinvasiven Beatmung

Für die nichtinvasive Beatmung stehen folgende Maskentypen zur Verfügung:

- Nasenmasken → bei leichter akuter hypoxämischer RI (Respiratorische Insuffizienz oder Schlafapnoe)
- Vollgesichtsmaske (ful face mask) → akute hyperkapnische und/oder hypoxämische RI
- Vollgesichtsschale (total face mask) → akute hyperkapnische und/oder hypoxämische RI
- Beatmungshelm → akute hypoxämische RI für den präklinischen Einsatz nicht geeignet

Die Durchführung der nichtinvasiven Beatmung stellt nicht nur für das Klinikpersonal, sondern auch insbesondere für die Rettungskräfte im prä- bzw. außerklinischen Bereich eine außerordentlich große Herausforderung dar. Professionelles und fachkompetentes Arbeiten ist für den Erfolg unabdingbar. Die Praxis zeigt immer wieder, wie sehr der Erfolg dieser Therapie im Zusammenhang mit der Kompetenz der durchführenden Person bzw. des Teams steht. Nicht selten heißt es, dass der Patient die NIV schlecht toleriere und die NIV kaum oder nur kurzzeitig durchführbar sei. Zweifellos können solche Situationen nie ganz vermieden werden, aber oft zeigt sich, dass durch kleine Veränderungen der

Geräteeinstellung, durch Korrektur des Maskensitzes oder durch Maskenwechsel eine erhebliche Verbesserung erzielt werden kann. Nicht zuletzt hängt der Erfolg der NIV von einer einfühlsamen Begleitung des Patienten ab. Nicht selten zeigt sich der Patient dieser Therapie gegenüber ablehnend, weil ihm zuvor seine Ängste nicht genommen werden konnten bzw. er nicht ausreichend aufgeklärt wurde, d.h. ihm die Maske aufgesetzt wurde, ohne ihn zuvor damit vertraut zu machen.

Vorbereitung

- Patient über die erforderlichen Maßnahmen umfassend aufklären
- Richtige Größe der Maske auswählen, ggf. verschiedene Maskentypen ausprobieren
- Patienten anleiten, wie er die Maske rasch entfernen kann
- Beatmungsgerät einstellen

Durchführung

- Insbesondere beim erstmaligen Einsatz gilt:
 - Maske zunächst nicht mit den Kopfbändern fixieren, sondern mit der Hand halten. Auf Wunsch kann die Maske auch vom Patienten gehalten werden.
 - Damit dem Patienten beim Aufsetzen der Maske die Luft nicht zu stark entgegenströmt, werden die Beatmungsdrücke zunächst niedrig eingestellt. Anschließend rasch den erforderlichen Wert einstellen.
 - Auf guten Sitz der Maske achten und Undichtigkeiten beseitigen, ggf. die Maske wechseln
 - Bei Zahnprothesenträgern kann mitunter durch Einsetzen der Zahnprothese Abhilfe geschaffen werden.
 - Alternativ die Ganzgesichtsmaske und den Castar-Helm in Betracht ziehen.
 - Monitoring und klinische Beobachtung:
 - Atmung: Wird die Atmung ruhiger? Ist die Einatembemühung des Patienten synchron mit dem Respirator? Reicht die Höhe der maschinellen Unterstützung? Wie ist das AZV und AMV?
 - Oxygenierung: Verbessert sich die SpO₂. Hat der Patient eine COPD und bekommt zu viel Sauerstoff?
- Bewusstseinslage: wird der Patient ruhiger und bleibt wach, oder wird er somnolent oder gar komatös?

Gefahr: Luft schlucken durch positiven Druck im Nasenrachenraum. Erbrechen kann die Folge sein.

Pflegerische Probleme:

Druckstellen und Dekubiti:

Durch flexible und weiche Gelränder der Masken und vor allem durch korrekten Sitz und Größe der Maske können Druckstellen reduziert werden. Besonders gefährdete Hautstellen (z.B. Nasenrücken) können zum besseren Schutz mit einer dünnen Kolloidplatte abgeklebt werden.

Konjunktivitis:

Ein kontinuierlicher, wenn auch sehr kleiner Luftstrom in die Augen kann sehr schnell zu einer Konjunktivitis führen. Daher ist es besonders wichtig, Undichtigkeiten zu vermeiden.

Atemgasleckagen:

Sonden und andere Ableitungen, welche zwischen Haut und Maskenrand abgeleitet werden, können durch spezielle Hilfsmittel für Masken besser abgepolstert werden. Atemleckagen werden dadurch deutlich reduziert.

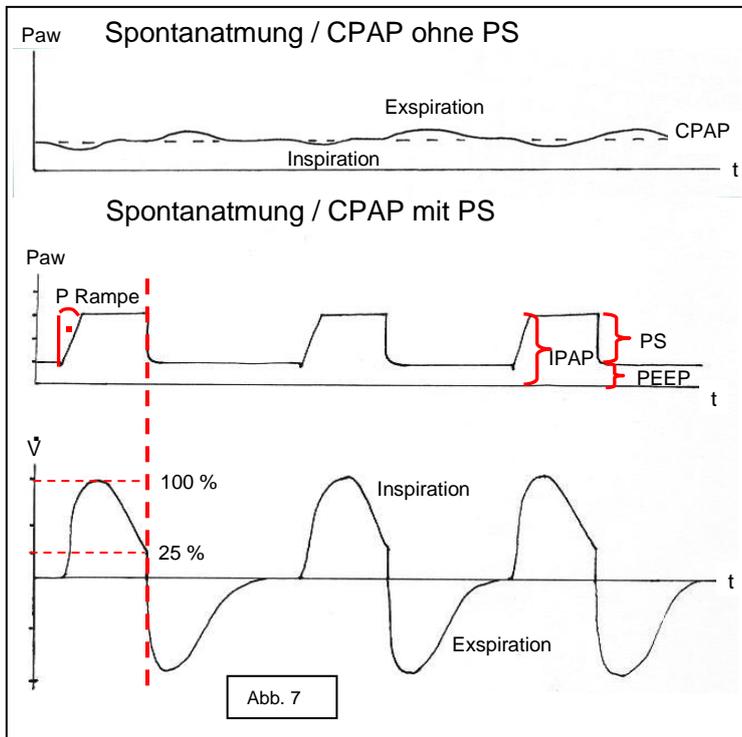
Atemgasklimatisierung:

Zwar mischen die Respiratoren für den präklinischen Einsatz durch die Pneumatik bzw. Turbine Raumluft zum Sauerstoff hinzu, durch hohe Atemgasflüsse können die Schleimhäute aber trotzdem sehr schnell austrocknen. HME-Filter sind bedingt durch Leckagen meist nicht zu empfehlen und erhöhen den Totraum merklich. In der Folge steigt das Kohlendioxid.

4 Spontane Beatmungsverfahren

4.1 SPN - PSV - Druckunterstützte Spontanatmung

ASB, CPAP, PSV, spont,



Spontane Beatmungsformen werden in der präklinischen Beatmung zur invasiven und nicht-invasiven Beatmung eingesetzt.

Bei spontanen Beatmungsverfahren wird jede Inspiration vom Patienten ausgelöst (getriggert). Durch das Einstellen eines CPAP (PEEP) wird der Atemwegsdruck dauerhaft erhöht. Die funktionelle Residualkapazität und somit das endexpiratorische Lungenvolumen erhöht sich und führt zu einer Verbesserung der Oxygenierung. Das Einstellen eines CPAP (PEEP) von 3-5 mbar entspricht ungefähr dem physiologischen PEEP durch die Stimmritze.

Durch das Einstellen einer inspiratorischen Druckunterstützung wird dem Patienten das Einatmen erleichtert. Somit sinkt die Atemarbeit des Patienten und der Widerstand des Endotrachealtubus wird teilweise kompensiert. Daraus resultiert eine Zunahme des Atemzugvolumens. Die Druckunterstützung wird durch den sog.

„Trigger“ aktiviert.

Beim Oxylog (Fa. Dräger) 1000 und 2000 ist das Einstellen einer Druckunterstützung nicht möglich. Durch den Trigger erkennt der Respirator kleinste Einatembemühungen des Patienten. Sobald die Triggerschwelle erreicht ist, reagiert der Respirator mit der Öffnung des Inspirationsventils. Die Empfindlichkeit wird beeinflusst von der Art der Atemgasbefeuchtung (Widerstand und unterschiedliches kompressibles Volumen) sowie von Filtersystemen (Flusswiderstand)

Die Druckunterstützung als solche wird immer in einem konstanten Druckmuster verabreicht. Sie steigt schnell auf den vom Anwender gewünschten Wert an, bleibt während der gesamten Inspiration auf demselben Niveau und fällt abrupt auf das PEEP-Niveau ab, wodurch die Expiration eingeleitet wird.

4.1.1 Inspiratorischer Trigger

Die Druckunterstützung wird durch den sog. „Trigger“ aktiviert. Durch den Trigger erkennt der Respirator kleinste Einatembemühungen des Patienten. Sobald die Triggerschwelle erreicht ist, reagiert der Respirator mit der Öffnung des Inspirationsventils.

Man unterscheidet einen Flow- und einen Drucktrigger. Der Flowtrigger reagiert auf kleinste Flussbewegungen des Atemgases und der Drucktrigger auf negative Druckveränderungen (bei neueren Respiratoren immer ausgehend vom PEEP-Niveau). Die Empfindlichkeit wird beeinflusst von der Art der Atemgasbefeuchtung (Widerstand und unterschiedliches kompressibles Volumen) sowie von Filtersystemen (Flusswiderstand).

Der Flowtrigger ist sensibler und wenn möglich dem Drucktrigger vorzuziehen. Standarteinstellung beträgt zwischen 2-5 l/min. Je niedriger desto sensibler reagiert der Trigger. Niedrigere Werte sind nicht uneingeschränkt zu empfehlen, weil die Gefahr einer Selbsttriggerung nicht auszuschließen ist.

4.1.2 Expiratorischer Trigger

Das Abschaltkriterium der Druckunterstützung ist die Flussgeschwindigkeit des Atemgases (Flowsteuerung) gegen Ende der Inspiration. Wenn der Atemgasfluss nur noch 25% des inspiratorischen Spitzenwertes beträgt, wird die Druckunterstützung abgeschaltet. Bezeichnungen für

diesen Parameter können z.B. ETS, Esens oder expiratorischer Trigger sein. Eine Einstellung von 25% kann als Standarteinstellung betrachtet werden. Vereinzelt kann durch Veränderung des expiratorischen Triggers die maschinelle Druckunterstützung besser an die Spontanatmung des Patienten angepasst werden. Dadurch sinkt u. U. die Atemarbeit. Eine Einstellung von 40-60% verkürzt z.B. bei COPD die Inspiration, dadurch bleibt mehr Zeit für die Expiration. In der Folge sinkt bei verlängertem Expirium der Intrinsic-PEEP.

Bei nichtinvasiver Beatmung kann der expiratorische Trigger bedingt durch Leckagen nicht immer zuverlässig gesteuert werden, deshalb kann häufig zusätzlich eine minimale und maximale Inspirationszeit vorgegeben werden.

4.1.3 Druckanstiegsgeschwindigkeit

Flowanstieg, P-Rampe, Flowakzeleration

Die Druckanstiegsgeschwindigkeit regelt die Geschwindigkeit des inspiratorischen Druckanstieges der Druckunterstützung. Die eingestellte Druckunterstützung wird durch einen langsamen Druckanstieg nicht sofort auf sein Maximum ansteigen, sondern je nach Einstellung mehr oder weniger verzögert. Durch eine leichte Verzögerung von 0.05 - 0.25 Sekunden (beim Bennett 840 Flowakzeleration 50-80%) fließt das Atemgas homogener zum Patienten und die Luftverwirbelungen, die zu Beginn der Inspiration durch einen plötzlichen Druckwechsel im Beatmungssystem verursacht werden, können reduziert werden. Ein leicht verzögerter Druckanstieg ermöglicht dem Patienten ein angenehmeres Atmen, weil die Druckunterstützung nicht ruckartig aktiviert wird. Ein Druckanstieg von über einer Sekunde erschwert das Atmen des Patienten, weil die Druckunterstützung viel zu langsam aktiviert wird. Die Folge ist eine erhöhte Atemarbeit

Wesentliche Einstellparameter sind:

FiO₂, PEEP, Druckunterstützung (Pressure Support), Trigger, Druckanstieg, Atemfrequenz, obere Druckgrenze

Alarmgrenzen: insbesondere obere AF, unteres und oberes MV und Apnoe-Zeit und Ventilation

4.2 Atemwegswiderstand beim Beatmungspatienten

Der Endotrachealtubus ist beim beatmeten Patienten der Ort mit dem größten Widerstand. Vor allem bei der Spontanatmung stellt dieser ein großes Problem dar. Die Atemarbeit nimmt stark zu und dadurch wird das Einatmen des Patienten erschwert. Die Hinzunahme einer Druckunterstützung kann diesen Widerstand nicht ausreichend kompensieren. Eine zu große Druckunterstützung kann die Atemarbeit des Patienten sogar erhöhen, da der Patient am Ende der Inspiration Atemarbeit leisten muss, um der Druckunterstützung entgegenzuwirken damit die Expiration eingeleitet wird. Das Ausatmen über einen kleinen Endotrachealtubus ist ebenfalls erschwert, und ein hoher PEEP kann diesen Widerstand weiter erhöhen.

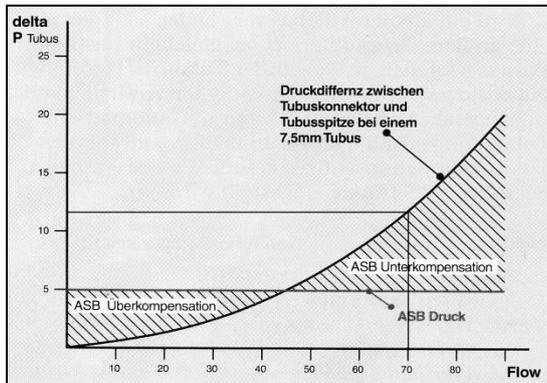


Abb. 8

Festeingestellte Druckunterstützung (ASB) im Vergleich zur prinzipiell notwendigen Druckunterstützung, um den Widerstand (Druckdifferenz) eines Tubus, abhängig von der spontanen Flussgeschwindigkeit, zu kompensieren. Bei einer Flussgeschwindigkeit von 45 l/min würde bei einem Tubus von 7,5 mm i. D. ein ASB von 5mbar ausreichen, um den Tubuswiderstand zu kompensieren.

Bei einer Flussgeschwindigkeit von 70 l/min müsste der ASB schon 12mbar betragen, um den Tubuswiderstand zu kompensieren.

Der Widerstand des Endotrachealtubus nimmt proportional zur Flussgeschwindigkeit des Atemgases zu; d.h. je schneller der Fluss des Atemgases desto größer der Widerstand. Es entsteht eine Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende des Tubus. Demzufolge müsste die Druckunterstützung bei einer hohen Flussgeschwindigkeit größer sein als bei einer langsamen Flussgeschwindigkeit. Durch eine automatische Tubuskompensation kann dieser Widerstand zumindest zum Teil sowohl in der Inspiration als auch teilweise in der Expiration kompensiert werden.

4.3 Automatische Tubuskompensation

ATC/TRC/TC

Die automatische Tubuskompensation (ATC/TC)) bietet eine optimierte automatische Kompensation der tubusbedingten Widerstände. Diese Beatmungsoption ist bei den meisten Intensivrespiratoren, aber wenigsten Respiratoren für den präklinischen Bereich verfügbar.

Der Einsatz im automatischen Tubuskompensation im präklinischen Bereich ist i.d.R. nicht möglich, aber auch nicht notwendig.

Die Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende des Tubus wird umso größer je mehr Atemgasfluss (Flow) vom Patienten angefordert wird. Der Respirator erhöht den Druck vor dem Tubus proportional zur Atemgasflussgeschwindigkeit und ist dadurch in der Lage, die zusätzliche Tubusbedingte Atemarbeit des Patienten zu kompensieren. Um die Druckdifferenz kompensieren zu können, muss dem Respirator der Tubusinnendurchmesser vorgegeben werden.

Aufgrund der Tatsache, dass der Respirator den Druckabfall über den Tubus nur errechnen und nicht messen kann ist nach derzeitigem Stand lediglich eine ca. 80-90%ige Kompensation der tubusbedingten zusätzlichen Atemarbeit möglich.

Die zusätzlich eingestellte Druckunterstützung kann in Kombination mit ATC deutlich reduziert werden, da diese nur noch den Widerstand und die Compliance der Lunge kompensieren muss. Tubusbedingte Widerstände während der Expiration werden ebenfalls kompensiert, indem der maschinelle Druck zu Beginn der Expiration kurzzeitig unter Peepniveau sinkt. Da der Respirator den Druck allerdings bis maximal dem Umgebungsdruck abfallen lässt, ist die expiratorische ATC/TC nur bei PEEP-Werten >5mbar relevant. Der Einsatz der expiratorischen ATC kann derzeit nur bedingt empfohlen werden.

Die ATC/TC kann auch mit druckregulierten (PRVC) und druckkontrollierten (PCV) Beatmungsformen kombiniert werden.

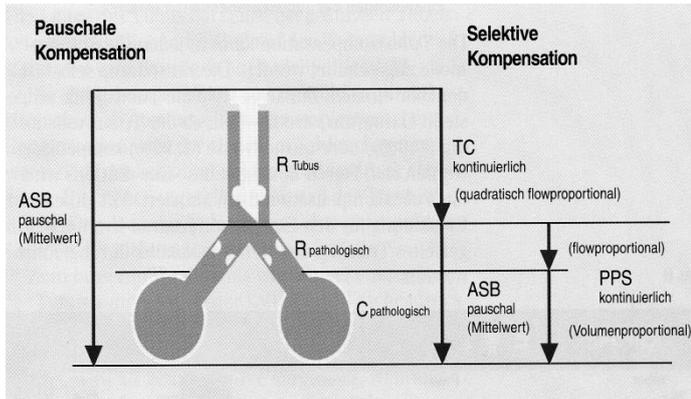


Abb. 9 Schematische Darstellung über Wirkung und Zweck einer Druckunterstützung
 Linke Seite: Die Druckunterstützung (ASB) kompensiert unspezifisch (pauschal) den Widerstand vom Tubus und wirkt der Resistance und Compliance der Lunge entgegen.
 Rechte Seite: Spezifische Kompensation des Tubuswiderstandes. (TC oder ATC = automatische Tubuskomensation) Die Druckunterstützung (ASB) wird nur noch angewendet, um der Resistance und Compliance der Lunge entgegen zu wirken.

5 Kontrollierte / Assistierte Beatmung

5.1 Volumenkontrollierte Beatmung - VCV

CMV/IPPV

SIMV

MMV

Die volumenkontrollierte Beatmung gilt als Standardverfahren in der präklinischen Notfallbeatmung. Bei der volumenkontrollierten Beatmung wird immer ein festes Atemhubvolumen vom Anwender vorgegeben, welches durch eine bestimmte inspiratorische Flowform verabreicht wird. An Respiratoren älterer Generation können verschiedene Flowformen vorgewählt werden. Im innerklinischen Einsatz hat sich mittlerweile die druckregulierte Beatmung durchgesetzt. Hierbei wird der Flow automatisiert und variabel appliziert. Dadurch ist eine schonendere Beatmung möglich und der patient hat die Möglichkeit spontan dazu zu atmen. Das Atemzugvolumen bleibt trotzdem konstant. Siehe Druckregulierte Beatmung.

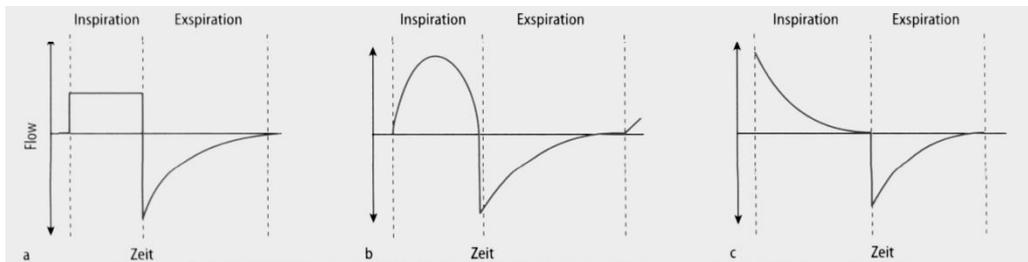


Abb.10 Schematische Darstellung von: a) konstantem Flow b) sinusförmigem Flow c) dezeleriertem Flow

Durch eine entsprechende Atemfrequenz, die ebenfalls vom Anwender vorgegeben wird, ist ein konstantes Mindestminutenvolumen gewährleistet. Bei den assistierten Beatmungsformen (SIMV, MMV) kann der Patient in der Expirationsphase spontan atmen. Kurz vor Beginn eines mandatorischen Atemzuges kann der Patient im sog. Zeitfenster diesen Atemhub triggern. Dadurch wird dieser zeitlich

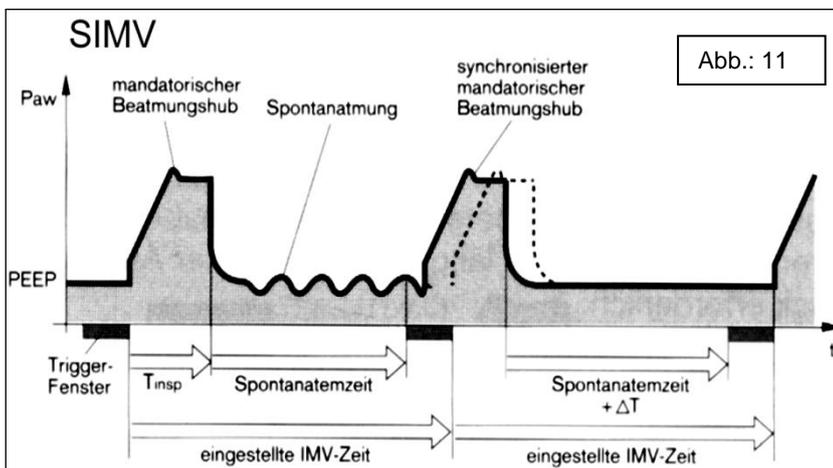


Abb.: 11

etwas vorgezogen und synchron mit den Atembemühungen des Patienten verabreicht. Ein mandatorischer Atemhub ist vom Respirator getriggert und vom Anwender durch die eingestellte Atemfrequenz vorgegeben. Ein assistierter Atemzug ist vom Patienten getriggert und ist in seiner verabreichten Form ebenfalls vom Anwender vorgegeben. Ein spontaner Atemzug ist vom Patienten getriggert und in seiner verabreichten Form vom Patienten beeinflussbar. Bei der kontrollierten

Beatmung (CMV, IPPV) hat der Patient lediglich die Möglichkeit einen Atemhub zu triggern. Der Zusatz (S)IPPV oder (A)VCV zeigt die aktivierte Triggerfunktion. Der getriggerte Atemhub ist vom Patienten in seiner Form nicht beeinflussbar.

Wesentliche Einstellparameter:

FiO₂, VT (AZV), Atemfrequenz, Tinsp (I:E-Verhältnis), PEEP, Pressure Support, Druckanstieg, Trigger Alarmgrenzen: insbesondere oberes Drucklimit, obere AF-Grenze, unteres & oberes MV

5.2 Druckregulierte Beatmung – PRVC

APV, AutoFlow, VC+

Die druckregulierte Beatmung ist eine Form der volumenkonstanten Beatmung bei der der inspiratorische Flow automatisch reduziert wird, um Spitzendrücke zu vermeiden. Die Flowform wird dezelerierend, und dadurch entsteht ein Inspirationsplateau. Der Respirator passt sich automatisch an die sich ständig veränderten Lungenverhältnisse (Resistance und Compliance) an. Ein Spitzendruck im klassischen Sinne wie bei der herkömmlichen VCV-Beatmung entsteht nicht mehr. Die druckregulierte Beatmung ist demzufolge der herkömmlichen VCV-Beatmung deutlich überlegen.

Bei Verschlechterung der Atemmechanik (Resistance und Compliance) wird der Inspirationsdruck automatisch um den Wert erhöht, der erforderlich ist um eine Volumenkonstanz zu gewährleisten. Das Druck- Zeit Diagramm eines Beatmungszyklus mit druckregulierter Beatmung ähnelt deshalb dem eines Beatmungszyklus von druckkontrollierter Beatmung.

Bei druckregulierter Beatmung übernimmt der Respirator die Einstellparameter Inspirationsflow und Drucklimitierung. Die Eingabe einer oberen Druckgrenze ist dabei sehr wichtig, damit der Beatmungsdruck nicht unbegrenzt steigen kann.

Wesentliche Einstellparameter:

FiO₂, Ziel-Volumen(AZV), Atemfrequenz, Tinsp (I:E-Verhältnis), PEEP, Pressure Support, Druckanstieg, Trigger

Alarmgrenzen: insbesondere oberes Drucklimit, obere AF-Grenze, unteres & oberes MV

5.2.1 ASV – Adaptive Support Ventilation

ASV ist eine neue von der Firma Hamilton entwickelte Beatmungsform, bei der der Respirator innerhalb gewisser Grenzen ein optimales Beatmungsmuster selbständig auswählt und appliziert. ASV kann als Weiterentwicklung von MMV angesehen werden, wobei sich ASV wesentlich umfangreicher und differenzierter automatisch auf die sich ständig verändernden pulmonalen Situationen anpassen kann. Vom Anwender können bzw. müssen lediglich folgende Parameter eingestellt werden:

- Ideales Körpergewicht des Patienten: pro kg/Kg wird der Patient mit 100 ml AMV ventiliert
- %Min Vol: gewünschtes AMV in % vom Normwert des eingestellten ideal Körpergewichtes
- obere Druckgrenze, PEEP, FiO₂, Trigger, P-Rampe und ETS

Zu Beginn der Beatmung errechnet sich ASV anhand von Messdaten wie z. B. Compliance, Resistance und in- und expiratorischen Zeitkonstanten das optimale AZV, Inspirationszeit und Beatmungsfrequenz. Wenn der Patient beginnt spontan zu atmen wird die Druckunterstützung automatisch angepasst damit das Zielvolumen (ideales AZV) erreicht wird. Je mehr der Patient selbst atmet, desto mehr reduziert ASV die maschinelle Unterstützung.

ASV unterliegt bei Beatmung ohne Spontanatmung immer fest eingestellten Grenzen:

- Das minimale AZV beträgt immer 4,4 ml/kgKG (doppeltes Totraumvolumen; bei 70kg 308ml AZV)
- Die Beatmungsfrequenz beträgt min. 5/min und ergibt sich aus AMV und verabreichtem AZV
- Das AZV wird in erster Linie durch die obere Druckgrenze limitiert bzw. beträgt max. das 22 fache des Körpergewichtes (bei 70 kg; 22 x 70 kg = 1540 ml AZV)
- Das I:E Verhältnis beträgt max. 1:1 (keine IRV- Beatmung)

Bei einsetzender Spontanatmung verabreicht ASV immer so viel Druckunterstützung damit das minimale Zielvolumen erreicht wird. Durch schrittweise Reduktion des Parameter %MinVol wird der Patient entwöhnt.

5.3 Druckkontrollierte Beatmung - PCV

BiLevel, BIPAP, DuoPAP, BiVent, P-SIMV, P-IPPV

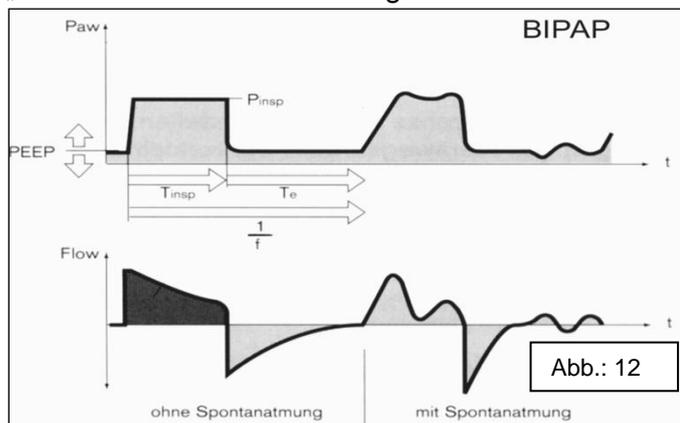
Die druckkontrollierte Beatmung findet in der präklinischen Notfallbeatmung zunehmend bei der nicht-invasiven Beatmung und bei schwer lungenkranken Patienten, welche von einer Klinik zur anderen verlegt werden.

Bei der druckkontrollierten Beatmung wird ein fester Inspirationsdruck vorgegeben. Dieser wird während der gesamten Inspiration konstant gehalten bis nach entsprechender Zeit die Expiration eingeleitet wird.

Das Atemhubvolumen hängt vor allem von der Druckdifferenz zwischen PEEP und oberem Druckniveau, der Compliance und der Resistance der Lunge ab. Demzufolge ist das Atemminutenvolumen inkonstant. Das Mitatmen des Patienten auf dem oberen Druckniveau ist bei der herkömmlichen druckkontrollierten Beatmung (DKV, PCV, P-SIMV) nur begrenzt möglich. Der Patient kann auf dem oberen Druckniveau jederzeit einatmen, jedoch nicht ausatmen. Druckkontrollierte Beatmungsformen der neueren Generation mit der sog. „freien Durchatembarkeit“ bieten einen besseren Komfort für den Patienten. Diese Beatmungsformen eignen sich von der kontrollierten Beatmung bis hin zur Spontanatmung.

Bei der druckkontrollierten Beatmung wird ein fester Inspirationsdruck vorgegeben. Dieser wird während der gesamten Inspiration konstant gehalten bis nach entsprechender Zeit die Expiration eingeleitet wird. Das Atemhubvolumen hängt vor allem von der Druckdifferenz zwischen PEEP und oberem Druckniveau, der Compliance und der Resistance der Lunge ab. Demzufolge ist das Atemminutenvolumen inkonstant. Das Mitatmen des Patienten auf dem oberen Druckniveau ist bei der herkömmlichen druckkontrollierten Beatmung (DKV, PCV, P-SIMV) nur begrenzt möglich.

Der Patient kann auf dem oberen Druckniveau zwar jederzeit einatmen, jedoch nicht ausatmen. Druckkontrollierte Beatmungsformen der neueren Generation mit der sog. „freien Durchatembarkeit“ bieten einen besseren Komfort für den Patienten. BIPAP ist als erste Beatmungsform mit der „Durchatembarkeit“ von Dräger entwickelt worden und steht in allen Eviten zur Verfügung. Beim



Galileo^{Gold} steht diese Beatmungsform unter dem Namen DuoPAP, beim Bennett unter BiLevel und beim Servo*i* unter BiVent zur Verfügung. Turbinen betriebene Respiratoren für die nichtinvasive Beatmung wie z.B. BiPAP-Vision, V60, Vivo bieten die Funktion der „freien Durchatembarkeit“ mit anderer Technik ebenfalls. Durch eine definierte Leckage Patientennah im Schlauchsystem kann überschüssiges Atemgas und Ausatemluft jederzeit entweichen. Diese Beatmungsformen eignen sich von der kontrollierten Beatmung bis hin zur Spontanatmung.

Wesentliche Einstellparameter:

FiO₂, P_{insp}/IPAP (oberes Druckniveau), PEEP/EPAP, Atemfrequenz, T_{insp} (I:E-Verhältnis), Pressure Support, Druckanstieg, Trigger

Alarmgrenzen: insbesondere unteres & oberes MV, obere AF-Grenze, oberes Druckgrenze

6 Strategien und Konzepte der maschinellen Beatmung im präklinischen Bereich

Unter maschineller Beatmung werden wesentliche physiologische Funktionen der Lunge durch den Respirator und dem dazugehörigen Beatmungskonzept übernommen: der Austausch von Kohlendioxid und Sauerstoff. Das Abatmen von Kohlendioxid (CO₂) wird gesteuert durch die Ventilation. Die Größe des AMV (AF x AZV) beeinflusst die Menge an CO₂, die abgeatmet wird.

Soll vermehrt CO₂ abgeatmet werden wird vorzugsweise die Atemfrequenz oder alternativ das AZV erhöht.

Bei der Aufnahme von Sauerstoff spricht man von Oxygenierung, welche sich unter der maschinellen Beatmung weitaus häufiger als schwierig gestaltet. Der Partialdruck von Sauerstoff im arteriellen Blut (PO₂) kann durch die Parameter FIO₂, PEEP, T_{insp} und I:E Verhältnis beeinflusst werden.

Soll die Oxygenierung verbessert werden, so wird bevorzugt in der präklinischen Beatmung das FiO₂, alternativ kann der PEEP erhöht werden. Das Verlängern der Inspirationszeit verbessert erst nach gewisser Zeit die Oxygenierung.

6.1 Beatmungseinstellung bei Schädel-Hirntrauma und nach CPR

z.B. nach CPR, bei Schädel-Hirntrauma, Intoxikationen

Beatmungsform: VCV – volumenkontrollierte Beatmung (z.B. IPPV oder SIMV) - druckreguliert

- AMV (Atemminutenvolumen) → 6 – 7,5 l/min; 90 – 110 ml/kgKG
- AZV (Atemzugvolumen) → 450 – 600 ml; 7-8 ml/kgKG (nicht direkt einstellbar beim Oxylog 1000)
- Atemgasflussgeschwindigkeit → 35 – 45 l/min (beim Oxylog 1000/2000 nicht einstellbar)
Bei modernen Respiratoren automatisiert (druckregulierte Beatmung)
- AF (Atemfrequenz) → 12 – 15 /min
- FiO₂ → 0,5 – 1,0; nach Oxygenierung
- PEEP/CPAP → 5 mbar
- I:E Verhältnis 1:1,5 – 1:2
- T_{insp} (Inspirationszeit) → 1,4 – 1,8 sec (häufig wie beim Oxylog 1000/2000 nicht einstellbar)

Alternativ kann auch eine druckkontrollierte Beatmung eingestellt werden (PCV)

- Oberes Druckniveau (P_{insp}) statt AZV → 20 – 30 mbar (nach AZV einstellen)

Weitere Parameter sind zusätzlich einzustellen

- Pressure Support (ASB) 10–12 mbar (nicht einstellbar beim Oxylog 2000)
- P-Rampe 0,2 sec (nicht einstellbar beim Oxylog 1000/2000)
- Trigger - Flow 5 l/min; Druck -1 mbar (nicht einstellbar beim Oxylog 1000/2000)

Messparameter:

- Spitzendruck 30 – 35 mbar
- Plateaudruck 20 – 25 mbar

Alarmgrenzen: (nicht bei jedem Notfallrespirator wie z.B. beim Oxylog 1000 einstellbar)

- unteres AMV 5 l/min
- oberes AMV 10 l/min
- obere Frequenz 30 /min
- Diskonnektionsalarm ist i.d.R. automatisch eingestellt

6.2 Beatmungseinstellung beim Status Asthmaticus:

Beatmungsform: VCV – volumenkontrollierte Beatmung (z.B. IPPV oder SIMV) - druckreguliert

- AMV (Atemminutenvolumen) → 6 – 7,5 l/min; 90 – 110 ml/kgKG
- AZV (Atemzugvolumen) → 450 – 600 ml; 7-10 ml/kgKG (nicht einstellbar beim Oxylog 1000)
Atemgasflussgeschwindigkeit → 35 – 45 l/min (beim Oxylog 1000/2000 nicht einstellbar)
Bei modernen Respiratoren automatisiert (druckregulierte Beatmung)
- AF (Atemfrequenz) → 8 – 12/min (nach Thoraxbewegung und Flow- Zeit Diagramm optimieren)
- FiO₂ → 0,5 – 1,0; nach Oxygenierung
- PEEP/CPAP → 5 – 7 mbar
- I:E Verhältnis 1:2 – 1:4
- Tinsp (Inspirationszeit) → 1,0 – 1,5 sec (häufig wie beim Oxylog 1000/2000 nicht einstellbar)

Vor erneuter Inspiration sollte das zuvor verabreichte AZV abgeatmet sein. Ist dem nicht so, entsteht ein Intrinsic-PEEP. Dies ist zu erkennen an der expiratorischen Flusskurve.

Weitere Einstellungen und Alarmgrenzen wie oben.

6.3 Beatmungseinstellung bei kardiogenem Lungenödem

CPAP-Therapie bzw. nicht-invasive Beatmung (NIV) ist der Intubation, wenn möglich vorzuziehen

Ein geeigneter Respirator ist Voraussetzung

Beatmungsform: PSV (CPAP/ASB)

Beatmungseinstellung:

- PEEP/CPAP → 5 – 10 mbar
- Pressure Support (ASB) → 0-15 mbar
- FiO₂ → 0,5 – 1,0; nach Oxygenierung

Alternativ kann auch eine druckkontrollierte Beatmung eingestellt werden (PCV)

- Oberes Druckniveau (P_{insp}) → 15 – 20 mbar (nach AZV einstellen)
- AF → 15 – 25 /min (nach spontaner AF)
- Tinsp → 1,0 – 1,5 sec

6.4 Beatmungseinstellung beim ARDS

Schwere Oxygenierungsstörung wie z.B. bei Pneumonie, Atelektasen und ARDS gehen mit einer verminderten Gasaustauschfläche einher. Ziel muss es also sein, die Lungenfläche, die am Gasaustausch teilnimmt zu vergrößern. Die Gewinnung von Alveolen nennt man „Recruitment“. Das Ergebnis ist dann eine offene Lunge (open lung), die es gilt durch ausreichenden PEEP offen zu halten. Diese Patienten werden in der Intensivbehandlung mit differenzierten Beatmungsstrategien beatmet, welche zwingend auch beim Transport von einer Klinik zur anderen ununterbrochen weitergeführt werden müssen! Dazu bedarf es einer differenzierten Strategie (open lung Management) und dafür geeignete Respiratoren (z.B. Oxylog 3000 Fa Dräger, T1 Fa Hamilton, Medumat Transport/Standard 2 Fa Weinmann) und Beatmungsformen (PCV).

Grundvoraussetzung für eine Verlegung eines kritisch kranken beatmeten Patienten ist, dass die Beatmungsstrategie während dem Transport 1:1 weitergeführt werden kann.

Beatmungseinstellung:

z.B. bei Acute Respiratory Distress Syndrom (ARDS)

Die Beatmungseinstellung der Klinik wird übernommen. Das FiO₂ kann um 10% erhöht werden.

Beatmungsform: PCV – druckkontrollierte Beatmung (z.B. BIPAP, BiLevel oder P-SIMV)

- AMV (Atemminutenvolumen) → 6 – 7,5 l/min; 90 – 110 ml/kgKG
- AZV (Atemzugvolumen) 5-7 ml/kgKG (ausgehend vom idealen Körpergewicht)
- AF (Atemfrequenz) → 15 – 30/min (nach Flow- Zeit Diagramm optimieren)
- FiO₂ → 0,5 – 1,0; nach Oxygenierung

- PEEP/CPAP → 8 – 18 mbar
- I:E Verhältnis 1:2 – 1:3
- Tinsp (Inspirationszeit) → 1,2 – 1,8 sec

Der Patient wird zum Transport tief analgosediert. Eine anteilige Spontanatmung wie sie in der Intensivbehandlung erwünscht ist, ist während des Transports meist nicht sinnvoll.

Bei PEEP-Werten > 10 mbar sollte der Beatmungstubus zum Wechseln des Respirators für max. 10 - 15 sec. mit einer geschützten Klemme endinspiratorisch abgeklemmt werden.

Voraussetzung:

- keine Spontanatmung erkennbar (im Flow- Zeit Diagramm überprüfen)
- kein Spiraltubus oder Trachealkanüle abklemmen. Alternativ können flexible Gänsegurgeln abgeklemmt werden.

6.5 Auswirkung der maschinellen Beatmung auf die Herzfunktion

Bei der maschinellen Beatmung (invasiv & nichtinvasiv) wird aufgrund des dauerhaft positiven intrathorakalen Druckes das Herzkreislaufsystem abhängig von der Pumpkraft sowie des Volumenstatus beeinträchtigt. Durch die maschinelle Beatmung steigt der intrathorakale Druck an. Alle Organe im Thorax (Herz, Lunge & Blutgefäße) sind diesem Druck ausgesetzt. Die Auswirkungen sind auf das rechte und linke Herz (re & li Ventrikel) sehr unterschiedlich. Bei gesundem Herzen verringert sich der venöse Rückstrom zum rechten Ventrikel. Die rechtsventrikuläre enddiastolische Füllung wird geringer und das systolische Schlagvolumen des rechten und des linken Ventrikels sinken. Das Herzzeitvolumen sinkt, sofern durch eine reflektorische Herzfrequenzerhöhung keine Kompensation stattfindet. Reflektorische Erhöhung des Venentonus der extrathorakalen Gefäße reduziert den Effekt der intrathorakalen Druckerhöhung. Der Blutdruck sinkt ebenfalls.

Durch die maschinelle Beatmung erhöht sich auch der Druck in den Alveolen. Bei hohen Beatmungsdrücken kann die Kapillardurchblutung abnehmen. Der Widerstand und somit die Nachlast gegen den der rechte Ventrikel anpumpen muss erhöht sich.

Auswirkungen auf die Herzfunktion

- Die Vorlast des rechten und linken Ventrikels reduzieren sich.
- Die rechtsventrikuläre Nachlast steigt
- Die linksventrikuläre Nachlast sinkt

Der Mechanismus, der bei einer bestimmten Ventrikelfüllung dazu führt, dass die Pumpkraft zunimmt, wird als Frank-Starling-Mechanismus beschrieben. Nimmt das enddiastolische Volumen zu steigt die Schlagkraft. Dieser Mechanismus funktioniert aber nur innerhalb bestimmter Grenzen. Wird diese Grenze überschritten bzw. steigt das enddiastolische Volumen zu stark so nimmt die Schlagkraft ab. Nur durch ein optimales Verhältnis von Ventrikelfüllung und Pumpkraft resultiert ein möglichst großes Herzschlagvolumen.

Bei Volumenmangel (Exsikkose) nehmen die Schlagkraft des Herzens und der Blutdruck ab.

Die myokardiale Pumpkraft wird beeinflusst von

- Enddiastolischem Volumen.
- Intravasalem Volumenstatus
- Höhe des mittleren Beatmungsdruckes

6.5.1 Auswirkungen der maschinellen Beatmung auf die Linksherzinsuffizienz

Der erhöhte intrathorakale Druck wirkt tonisierend auf den linken Herzmuskel. Hierdurch nimmt der transmurale Druck (P_{transm}) ab und der Herzmuskel wird somit effektiv entlastet und muss um den gleichen systolischen Blutdruck zu erreichen weniger Kraft aufbringen.

Beispiel:

RR _{sys}	=	intrath. Druck	+	P _{transm}
100 mmHg	=	- 5 mmHg	+	105 mmHg
100 mmHg	=	+ 5 mmHg	+	95 mmHg

→ niedrigerer P_{transm} (95 mmHg) durch Anwendung eines intrathorakalen Druckes von 5 mmHg; dies entspricht einem CPAP von ca. 7 mbar

6.5.2 Auswirkungen forcierter Spontanatmung auf die Herzfunktion

Unter forcierter Spontanatmung nimmt durch den stark negativen Druck im Thorax der Rückstrom von Blut aus der unteren und oberen Hohlvene zum rechten Ventrikel erheblich zu. Die Vorlast steigt. Gleichzeitig nimmt aber die Nachlast deutlich ab.

Die Vorlast des linken Ventrikels steigt hingegen an, es kommt zum vermehrten Blutfluss aus den sauerstoffreichen Pulmonalvenen. Durch die negativen Drücke im Thorax wird die unter positiven Drücken entstehende tonisierende Wirkung auf den Ventrikel aufgehoben und sogar umgedreht. Die Kontraktion beider Ventrikel wird erheblich erschwert. Die Auswurfleistung nimmt während der Inspiration massiv ab, der Blutdruck fällt ab.

Auswirkungen sind zu erwarten bei

- Laryngospasmus
- Laryngeale Schwellung im Rahmen einer schweren anaphylaktischen Reaktion
- Stenosen in der Trachea
- Extrathorakale Stenosen wie z.B. stenosierte Trachealkanüle
- Müller-Manöver
- Spontanatmung über eine zu kleine Trachealkanüle mit geblocktem Cuff ohne oder unzureichende maschinelle Atemhilfe

Abkürzungen

A/C	Assist / Control (entspricht CMV + Trigger)
AF	Atemfrequenz
AMV	Atemminutenvolumen
(A)PCV	druckkontrollierte Beatmung mit Trigger (Assistiert)
APRV	Airway Pressure Release Ventilation
APV	Adaptive Pressure Ventilation, druckregulierte Beatmung der Firma Hamilton
ASB	Assisted Spontaneous Breathing, Synonym für druckunterstützte Spontanatmung
ASV	Adaptive Support Ventilation
ATC®	Automatische Tubuskompensation
AutoFlow®	druckoptimierte volumenkontrollierte/druckregulierte Beatmung
Automode	Zusatzoption beim Servoi für maschinellen Beatmungsformen bei der bei einsetzender Spontanatmung diese variabel unterstützt wird
AZV	Atemzugvolumen
BiLevel	druckkontrollierte Beatmung der Firma Tyco Puritan Bennett (entspricht im wesentlichen BIPAP)
BiPAP®	Bi-Level Positive Airway Pressure: druckunterstützte, nicht - invasive Beatmung für den Heimbeatmungsbereich - geschützter Begriff der Firma Respironics®
BIPAP®	druckkontrollierte Beatmung mit „Durchatembarkeit“; Biphasic Positive Airway Pressure – geschützter Begriff der Firma Dräger
BiVent	biphasische Ventilation beim Servoi (entspricht im wesentlichen BIPAP)
C	Compliance (Dehnbarkeit)
CMV	Continuous Mandatory Ventilation – kontrollierte Beatmung
CO ₂	Kohlendioxid
CPAP	Continuous Positive Airway Pressure (Spontanatmung mit kontinuierlich positivem Atemwegsdruck) assistierende Beatmung mit kontinuierlichem Überdruck
CPPV	Continuous Positive Pressure Ventilation entspricht IPPV + Peep
Δ P	Druckdifferenz zw. Peep und P _{insp}
DKV	Druckkontrollierte Ventilation / Beatmung
DU	Druckunterstützung
DuoPAP	druckkontrollierte Beatmung der Firma Hamilton (entspricht im wesentlichen BIPAP)
EPAP	Expiratory Positive Airway Pressure (Atmung gegen einen expiratorisch positiven Atemwegsdruck)
ETS	Expiratorische Trigger Sensitivität (Ausschaltkriterium des Hilfsdrucks in Prozent bezogen auf die max. insp. Flussgeschwindigkeit)
F	Atemfrequenz
f/IMV	SIMV und BIPAP/SIMV/ASB Atemfrequenz bei der Evita II
f/VT-Index	oder RSB-Index; Rapid Shallow Breating Index (schnell-flach Atemindex)
FiO ₂	O ₂ - Anteil (Fraktion) im inspiratorischen Gasgemisch
I:E	Atemzeitverhältnis Inspiration zu Expiration
IHS	Inspiratory Help System (druckunterstützte Spontanatmung)
ILV	Independent Lung Ventilation (seitengetrennte Beatmung)
IMV	Intermittent Mandatory Ventilation
IPAP	Inspiratory Positive Airway Pressure (Einatmung mit einer Druckunterstützung)
IPPV	Intermittent Positive Pressure Ventilation (Intermittierende Beatmung mit positivem Druck)
IPS	Inspiratory Pressure Support (Inspiratorische Druckunterstützung)
IRV	Inversed Ratio Ventilation (Beatmung mit umgekehrtem Atemzeitverhältnis)
MV	Minutenvolumen
MMV	Mandatory Minute Ventilation (maschinelle Minutenvolumen Mindestventilation)
NEEP	Negativ Endexpiratory Pressure (Negativer Druck bei der Ausatmung)
NIV	Non - Invasive Ventilation (Nicht - invasive Beatmung)
O ₂	Sauerstoff
P	Pressure (Druck)
Paw	Pressure airway (Atemwegsdruck)
PAV	Proportional Assist Ventilation - Maschinelle Unterstützung der Spontanatmung proportional zur Atemanstrengung
paCO ₂	Kohlendioxidpartialdruck (pCO ₂)
paO ₂	Sauerstoffpartialdruck
PCV	Pressure Controlled Ventilation – druckkontrollierte Beatmung
PEEP	Positive Endexpiratory Pressure (positiv endexpiratorischer Druck unter Beatmung)
P _{insp}	inspiratorisches Druckniveau bei druckkontrollierter Beatmung

Pmax	obere Druckgrenze bzw. Drucklimitierung bei volumenkontrollierter Beatmung
PNPV	Positive Negative Pressure Ventilation Wechseldruckbeatmung mit positivem und negativem Druck
P-CMV	Druckkontrollierte CMV-Beatmung
PLV	Pressure Limited Ventilation (Drucklimitierte Ventilation)
pO ₂	Sauerstoffpartialdruck
P 0.1	Okklusionsdruck
PS	Pressure Support (Druckunterstützung)
PPS	Proportional Pressure Support (Spontanatemmodus der Firma Dräger) Proportionale Druckunterstützung (Synonym für PAV)
PRVC	druckregulierte volumenkontrollierte Beatmung beim Servoi
P-SIMV	Druckkontrollierte SIMV –Beatmung
PS.Tv	PSV mit eingestelltem AZV als Zielvolumen
PSV	Pressure Support Ventilation (inspiratorische Druckunterstützung)
R	Resistance (Widerstand)
RSB	oder f/VT Index; Rapid Shallow Breating Index (schnell-flach Atemindex)
SaO ₂	Sauerstoffsättigung im arteriellen Blut
SpO ₂	Sauerstoffsättigung gemessen mittels Pulsoxymetrie
S-CMV	CMV+Trigger
S-CPPV	CPPV+Trigger
SIMV	Synchronized Intermittent Mandatory Ventilation
T	Zeit
Ti	Inspirationszeit
Te	Expirationszeit
TC	automatische Tubuskompensation beim Bennett 840
V	Volumen
V	Flow (Volumen pro Zeit)
VS	volume support – Spontanatemmodus mit einstellbarem AZV als Zielvolumen
VT	Tidalvolumen (Atemhubvolumen)
ZAP	Zero Airway Pressure (Atmung bei Umgebungsdruck in den Atemwegen)
ZEEP	Zero Endexpiratory Pressure (Ausatmung unter Umgebungsdruck)
ZPB	Zero Pressure Breathing (Atmung unter Umgebungsdruck)

Literaturverzeichnis

- Bahns E.: BIPAP. Dräger GmbH Lübeck
- Bolanz H., Oßwald P., Ritsert H.: Pflege in der Kardiologie/Kardiochirurgie
Urban&Fischer Verlag 2008
- Haberthür, Guttman, Osswald, Schweitzer: Beatmungskurven. Springer Verlag 2001
- Kuhlen R., Max M., Rossaint R.: Neue Entwicklungen in der Beatmungstherapie
Deutsche Akademie für Anästhesiologische Fortbildung, in: Refresher Course
1998, 24: 193-205
- Luxem J., Runggaldier, K., Karutz H., Flake F.: Notfallsanitäter Heute. 6. Auflage Elsevier Verlag 2016
- Larsen R., Ziegenfuss T.: Beatmung, 5.Auflage, Springer Verlag, Berlin 2012
- Lawin P.: Praxis der Intensivbehandlung. 5. neubearb. u. erw. Auflage
Thieme Verlag, Stuttgart 1989
- Larsen R.: Anästhesie und und Intensivmedizin. 6. Auflage Springer Verlag, Berlin 2004
- Lasch, Lenz, Seeger: Lehrbuch der Internistischen Intensivtherapie.3. Auflage
Schattauer Verlag, Stuttgart 1997
- Latasch L., Knipfler E.: Anästhesie Intensivmedizin Intensivpflege.2. Auflage
Elsevier Verlag, München 2004
- Neander, Meyer, Friesacher: Handbuch der Intensivpflege 2. Erg. Lfg. 10/95
Ecomed Verlag, Landsberg 1995
- Oczenski W., Werba A., Andel H.: Atmen - Atemhilfen
10. überarbeitete und erw. Auflage. Thieme Verlag, 2017
- Rathgeber J.: Grundlagen der maschinellen Beatmung. Thieme Verlag 2010
- Schäfer, Scheuermann, Wagner, Kirsch: Fachpflege Beatmung. 7. Auflage Urban & Fischer Verlag 2015
- Wisser D., Weaningkonzept nach Langzeitbeatmung. intensiv 1999, 7: 97-102; Thieme Verlag
- Wisser D.: Praktische Umsetzung von Leitlinien zur maschinellen Beatmung.
www.beatmungsfortbildung.de, Auflage 4; 2017
- Zarske R.: Döring M. ATC und PPS Atemunterstützung mit bestmöglichem Komfort.
Dräger GmbH Lübeck