

GRUNDLAGEN DER MASCHINELLEN BEATMUNG



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



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	Der Beatmungsplatz	12
1.11	Indikationen der maschinellen Beatmung	12
2	Klassifizierung und Steuerung	12
2.1	Atemtyp	13
2.2	Kontrollvariable	13
2.3	Zyklusvariable - Steuerung	13
2.4	Respiratoren und deren Beatmungsformen	14
2.5	Unterschiede und Anwendungsindikationen von Respiratoren	15
2.6	Funktionsprinzip der spontanen Beatmungsverfahren	16
2.7	Beatmungsparameter und Einstellgrößen des Respirators	16
2.8	Beatmungsmasken und Systeme	19
3	Nichtinvasive Beatmung - NIV	20
3.1	Sinn und Zweck der NIV	20
3.2	Vor- und Nachteile der NIV gegenüber der endotrachealen Intubation	21
3.3	Indikationen und Kontraindikationen	21
3.4	Durchführung der nichtinvasiven Beatmung	22
4	Spontane Beatmungsverfahren - SPN	23
4.1	SPN - PSV - Druckunterstützte Spontanatmung	23
4.1.1	Inspiratorischer Trigger	23
4.1.2	Expiratorischer Trigger	24
4.1.3	Druckanstiegsgeschwindigkeit	24
4.2	Atemwegwiderstand beim Beatmungspatienten	25
4.3	Automatische Tubuskompensation – ATC/TRC	25
4.4	PAV – Proportional Assist Ventilation PPS® - Proportional Pressure Support	26
5	Kontrollierte / Assistierte Beatmung	27
5.1	Volumenkontrollierte Beatmung - VCV	27
5.2	Druckregulierte Beatmung – PRVC	28
5.2.1	ASV – Adaptive Support Ventilation	29
5.3	Druckkontrollierte Beatmung - PCV	29
6	Strategien und Konzepte der maschinellen Beatmung	30
6.1	Open Lung Management	30
6.1.1	Vergleich zwischen VCV und PCV zur Rekrutierung von Alveolen	31
6.2	Moderne Beatmungsstrategien	31
6.2.1	Beatmungsstrategie beim ARDS/ALI: Oxygenierungsindex < 300 mmHg	31
6.2.2	Beatmungsstrategie beim kardiogenen Lungenödem	32

6.3	Beatmungsinduzierte Lungenschädigung	33
6.4	Auswirkung der maschinellen Beatmung auf die Herzfunktion.....	34
6.4.1	Auswirkungen der maschinellen Beatmung auf die Linksherzinsuffizienz.....	34
6.4.2	Auswirkungen forcierter Spontanatmung auf die Herzfunktion	35
7	Entwöhnung vom Respirator	35
7.1	Kriterien zum Beginn der Entwöhnung.....	36
7.1.1	Schritt 1 der Entwöhnung.....	36
7.2	Entwöhnungsmethoden	37
7.2.1	Kontinuierliche Entwöhnung.....	37
7.2.2	Diskontinuierliche Entwöhnung	38
7.2.3	Schritt 2 der Entwöhnung.....	39
7.2.3	Schritt 3 der Entwöhnung.....	39
7.3	Extubationskriterien	39
Abkürzungen	40
Literaturverzeichnis	41

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 Atemzentrums), 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 (Kehldeckel). 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.

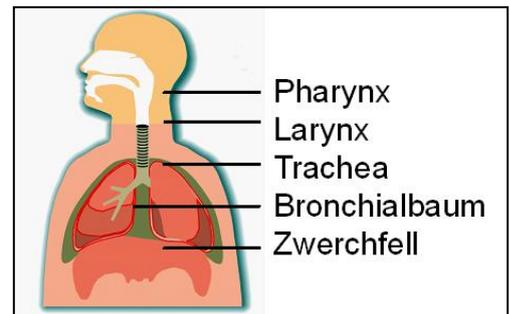


Abb. 1: Der Respirationstrakt

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 offengehalten. 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 Abzweigungswinkel 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 zu wenig 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 physiologischer Weise 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.

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

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 Lungenparenchyms 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 einströmen. Das Zwerchfell ist hierbei der stärkste und zugleich bedeutendste Einatemmuskel.

Unter Atemnot werden 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

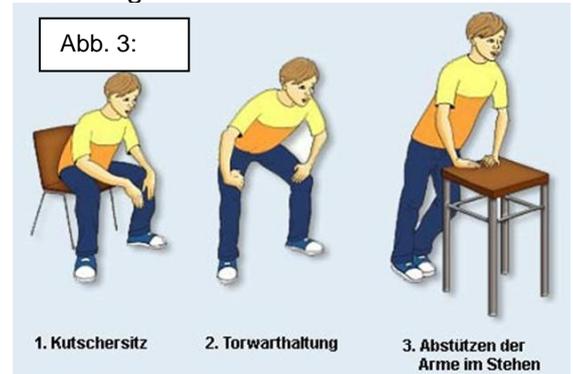
- äußere Zwischenrippenmuskeln = Musculus intercostalis externus
- Musculus scalenus
- Rippenheber-Muskel = Musculus levator costarum
- Sägemuskeln = Musculi serratus
 - hinterer oberer Sägemuskel = Musculus serratus posterior superior
 - hinterer unterer Sägemuskel = M. serratus posterior inferior
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

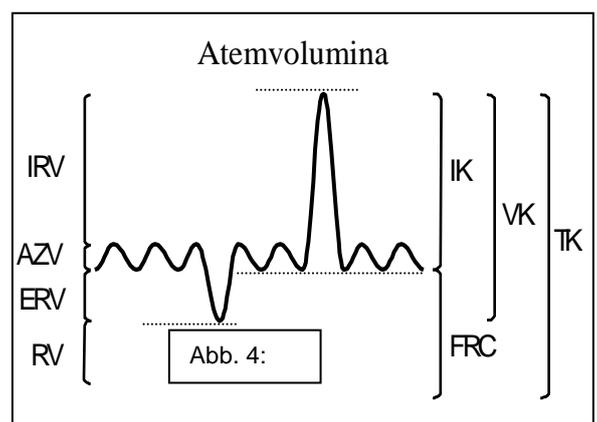
Luftmenge, die nach einer normalen Inspiration zusätzlich eingeatmet werden kann (ca. 2500-3000 ml)

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.
 $AMV = AF \times AZV$

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) 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

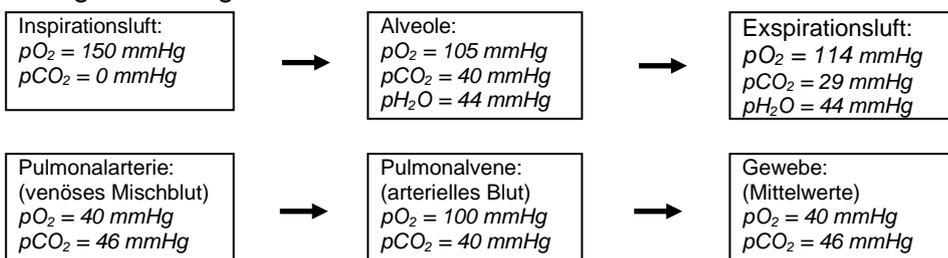
Der pulmonale Gasaustausch findet in den Alveolen statt. Sauerstoff (O₂) aus der eingeatmeten Alveolarluft diffundiert durch das respiratorische Epithel und das direkt benachbarte Gefäßendothel in das Lungenkapillarblut, Kohlendioxid (CO₂) hingegen diffundiert frei durch das Lungengewebe gegenläufig in die Alveolarluft. Die Sauerstoffaufnahme ist auf eine gute Lungendurchblutung und Lungenbelüftung angewiesen. Die Kohlendioxidabgabe ist 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 O₂ 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

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

Ein Kohlendioxid (PaCO_2) > 45 mmHg bei gleichzeitig $\text{pH} < 7,35$ gilt grundsätzlich als Indikation der maschinellen Beatmung insbesondere nichtinvasiv.

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

1.9.2 Pulsoxymetrie – SpO_2

Durch den Einsatz des Pulsoxymeters kann ermittelt werden wie viel Prozent des Hämoglobins mit Sauerstoff gesättigt ist. Der Normwert beim lungengesunden Erwachsenen beträgt 96 – 98 %. Die SpO_2 ist ein geeigneter Parameter, um die Versorgung des Körpers mit Sauerstoff zu überwachen. Er gibt jedoch keine Auskunft darüber, ob der Patient eine ausreichende Menge an Luft ein- und ausatmet.

Der Einsatz der SpO_2 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 (Alarmmeldung 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 SpO_2

- 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 – etCO_2

Die Kapnometriemessung (etCO_2) zeigt, ob die Menge an eingeatmeter Luft pro Minute ausreichend ist. Das gemessene Produkt ist das Gas Kohlendioxid (CO_2) Durch die speziell vorhandene Messküvette wird das CO_2 in der Ausatmung gemessen. Die Küvette wird zwischen Tubusverlängerung Beatmungssystem eingesetzt. CO_2 ist ein Abbauprodukt, das durch den Verbrauch von Sauerstoff im Stoffwechsel anfällt und dann abgeatmet wird. Wenn das Atemminutenvolumen des Patienten absinkt, erhöht sich das endtidale CO_2 (etCO_2). 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 etCO_2 beträgt 30-35 mmHg. Nach einer Korrektur der Einstellung dauert es ca. 10-20 Minuten bis der etCO_2 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. Eine verminderte Ventilation erhöht das CO_2 , beeinflusst i.d.R. nicht die Oxygenierung. Die Sauerstoffsättigung kann im Normbereich sein, der etCO_2 aber nicht.

Ursachen für ein zu hohes etCO_2

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

Ursache für ein zu niedriges etCO_2

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

1.10 Der Beatmungsplatz

Monitoring:
- EKG
- RR/ABP
- SpO₂

Infusomat
Injektomat

Absaugung
- Absaugkatheter CH 14



Beatmungsbeutel &
Beatmungsmaske

Respirator
- Cuffdruckmesser
- Stethoskop
- Atemgasklimatisierung

Flowmeter

Abb. 5

1.11 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** - intermitt positive 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 darauffolgenden 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 (SPN/PS/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 des 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.

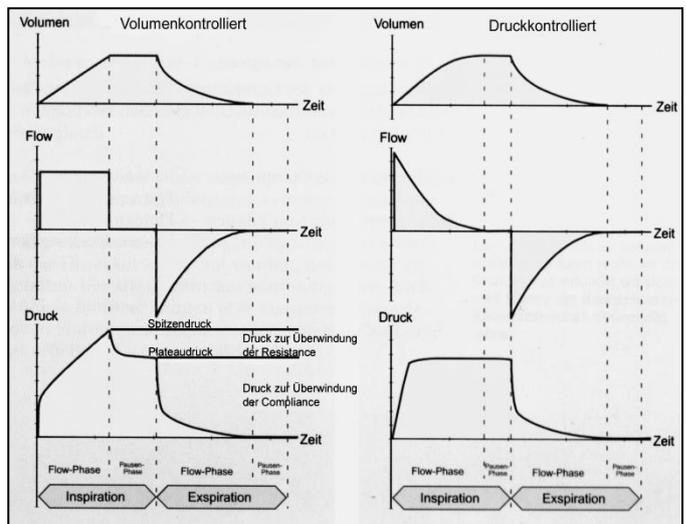


Abb. 6 Volumen-, Flow- und Druckdiagramm bei volumen- und druckkontrollierter Beatmung

2.4 Respiratoren und deren Beatmungsformen

Respiratoren mit Schwerpunkt invasive Beatmung:

Fa Covidien - Bennet 840, 980

- PCV: druckreguliert
- Spontanatmung:
- Spezielle Optionen:

- P-SIMV und BiLevel
- VC+
- CPAP (PS), VS und PAV/PAV+
- TC - Tubuskompensation

Fa Dräger - Evita V300-800

- PCV: Druckreguliert:
- Spontanatmung:
- Spezielle Optionen:

- PC-BIPAP, PC-APRV und PC/AC
- AutoFlow (IPPV, SIMV, MMV)
- CPAP/PS, CPAP variabler PS, PPS, Smart Care
- ATC, NIV und High-Flow

Fa Hamilton - G5/S1, C1/C2/C3, C6 und T1

- PCV: Druckreguliert:
- Spontanatmung:
- Spezielle Optionen:

- P-CMV, P-SIMV, DuoPAP und APRV
- APVSIMV, ASV und IntenlliVent-ASV
- spontan
- TRC, NIV, NIV-ST und High-Flow

Fa Löwenstein – Elisa 300-800

- PCV: Druckreguliert:
- Spontanatmung:
- Spezielle Optionen:

- BiLevel, mand. BiLevel, APLV
- dyn. BiLevel, duales BiLevel, WOBOV
- PSV, prop.PS und PAPS
- TC, NIV (inkl. BiLevel ST) und High-Flow

Fa Maquet – Servoi, Servo U

VCV:	VC und SIMV
PCV:	PC und BiVent/APRV
Druckreguliert:	PRCV
Spontanatmung:	SPONTAN, VS und NAVA

Respiratoren mit Schwerpunkt nichtinvasive und/oder außerklinische Beatmung:

Fa Breas - VIVO 3, 45 und Vivo 50/60

Spontanatmung:	CPAP und PSV mit und ohne Zielvolumen
Druckkontrolliert/-reguliert:	PCV mit und ohne Zielvolumen, inkl. auto EPAP

Fa Löwenstein – PrismaVent 30/40, Luisa

Spontanatmung:	PSV, ST
Druckkontrolliert/-reguliert:	aPCV mit und ohne Zielvolumen, auto S/T

Fa Resmed – Astral, Stellar 100/150

Spontanatmung:	PSV, ST, mit und ohne Zielvolumen, inkl. automatischer EPAP iVAPS
Druckkontrolliert/-reguliert:	APCV mit und ohne Zielvolumen

Fa Philips/Respironics - V60, Trilogy und A-Serie

Spontanatmung:	CPAP und S/T, PAV-Modus
Druckkontrolliert/-reguliert:	PCV, AVAPS und AVAPS-AE (auto EPAP)

2.5 Unterschiede und Anwendungsindikationen von Respiratoren

Intensivrespiratoren

Dies sind modernste mikroprozessorgesteuerte Respiratoren, welche i.d.R. über viele moderne Beatmungsformen mit Zusatzoptionen wie z.B. der automatischen Tubuskompensation (ATC, TC, TRC) verfügen. Aufgrund einer guten Darstellung von Kurven/Diagrammen und einer aufwendigen Messtechnik mit vielen Messparametern können bei der invasiven Beatmung differenzierte Beatmungsstrategien bei schweren Oxygenierungs- und Ventilationsstörungen vorgenommen werden. Die Pneumatik der Respiratoren wird über Druck- und O₂ Anschluss betrieben. Die Turbinentechnik, welche den Druckluftanschluss ersetzt, findet allmählich technisch Einzug.

Respiratoren zur nichtinvasiven Beatmung

Diese NIV-Respiratoren sind meist kleiner und handlicher als Intensivrespiratoren. Sie verfügen über Beatmungsformen zur Spontanatmung (CPAP, PSV, S/T), druckkontrollierter Beatmung (PCV, BiLevel – mit und ohne Zielvolumen) und vereinzelt optional über volumenkontrollierte bzw. druckregulierte Beatmung (VCV/SIMV, AVAPS). Einige sind auch für die invasive Beatmung zugelassen. Die Sauerstoffkonzentration kann nur vereinzelt direkt eingestellt werden. Hierfür ist ein O₂ Anschluss für die zentrale Gasversorgung notwendig. Ansonsten kann mit Raumluft (21% O₂) beatmet, oder über einen Adapter im Beatmungssystem oder separaten Anschluss direkt am Respirator O₂ hinzugegeben werden. Die O₂ Konzentration kann dann meist nur abgeschätzt werden. Mehr als 35-40 % O₂ ist i.d.R. nicht erreichbar. Die Turbinentechnik in Kombination mit Leckagesystemen ermöglicht eine sensible Triggertechnik und hohe Atemgasflüsse. Diese ist bei NIV vorteilhaft, um der zum Teil hohen Atemanstrengung der Patienten gerecht zu werden. Auch die CO₂ Auswaschung in der Maske ist wesentlich besser. Eine hohe Leckagekompensation komplettieren die Vorteile der Turbinentechnik.

Respiratoren für die außerklinische Beatmung

Respiratoren für die außerklinische Beatmung (z.B. Astral, Luisa, 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.

2.6 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 folgende Systeme:

Demandflow System

Beim Demandflow 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 wird ein sogenannter Basisflow (auch Flow-by genannt) in Respiratoren eingesetzt. Diese vereinen die Vorteile der beiden Verfahren (Demand- und Continuous-Flow) und erreichen hierdurch sehr kurze Triggerlatenzzeiten. Beim Basisflow fließt kontinuierlich Atemgas von Insp. zu Expiration und hält dadurch das Atemgas in Bewegung.

Continuousflow System

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

Continuousflow Systeme bzw. 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.

High-Flow System – HFOT (High-Flow Therapie)

Die letzten Jahre hat die High-Flow Therapie mit transnasaler Applikation eines Gasgemisches zum Einsatz enorm an Bedeutung gewonnen. 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. Sehr effektiv wird die Kohlendioxid reiche Ausatemluft effektiv ausgewaschen und der Totraum wird minimiert. Die Atemarbeit sinkt.

Das Atemgas über eine spezielle Nasencannula oder tracheale Schnittstelle befeuchtet und erwärmt mit einem Gesamtfluss von 10-60l/min verabreicht.

2.7 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	$\frac{60\text{sek}}{\text{AF}} = 1 \text{ Atemzyklus}$	$\frac{60}{10} = 6 \text{ Sekunden}$
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 $AF \times AZV$

Als Rechengrundlage wird außer bei lungenprotektiver Beatmung beim ARDS das normale Körpergewicht (nicht das tatsächliche KG) herangezogen. Um das $PaCO_2$ im Normbereich zu halten gilt ein Atemminutenvolumen von 90–120 ml/kgKG als ausreichend.

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.

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: 3-5l/min

Der **Drucktrigger** reagiert auf Druckveränderungen im Atemsystem. Die Schwelle beim Drucktrigger wird in der Regel zwischen -1 bis -1,5 mbar (ausgehend vom PEEP-Niveau) eingestellt. Bei Unterschreiten dieser Triggerschwelle wird die Inspiration eingeleitet.

Standarteinstellung: -1mbar

Unter Triggerlatenzzeit versteht man die 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 ein 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.

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.

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.

Druckanstieg und Druckabfallgeschwindigkeit

Flowanstieg, Flowakzeleration, Insp. Anstiegszeit, P-Rampe

Die Respiratoren verfügen über die Möglichkeit den inspiratorischen 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.

Eine verzögerter **expiratorischer Druckabfall** von ca. 0,05-0,2 sec verhindert den Kollaps (Lippenbremse) von peripheren Bronchen bei COPD/Lungenemphysem. Auch sehr hohe expiratorische Gasflüsse können beim ARDS und hoher Druckamplitude verringert werden. Hohe exp. Gasflüsse können strömungsbedingte Turbulenzen und Bronchialstress verursachen.

Diese Funktion gewinnt zunehmend an Bedeutung und ist in einigen turbinenbetriebenen NIV-Geräten und vereinzelt auch in Intensivrespiratoren verfügbar.

Inspiratorische Flussgeschwindigkeit

Inspiratorischer Flow, Peakflow

Die inspiratorische Flussgeschwindigkeit ist bei allen modernen Respiratoren automatisiert. Die Flowform ist variabel und entspricht einem dezellerierenden bis sinusförmigem Flow. Die vom Anwender vorzugebende inspiratorische Flussgeschwindigkeit bestimmte früher 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 konnte die Inspirationszeit gewählt werden. Auch der Spitzendruck nahm mit Zunahme der Flussrate zu.

2.8 Beatmungsmasken und Systeme

Masken: Vollgesichtsmasken (full face mask) geschlossen für die Intensivstation



Abb. 7

Blaues Kniestück → non vented mask
Anwendung mit allen Respiratoren geeignet!

Notatemventil, Anwendung mit Turbinenrespiratoren geeignet, Anwendung mit Intensivrespiratoren **nicht** geeignet!

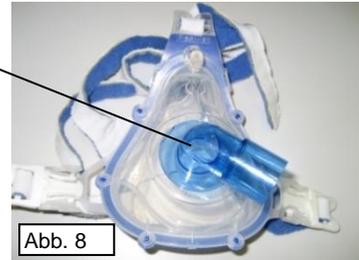


Abb. 8

PerforMax Fa Respironics
Full face mask (NV-non vented–komplett geschlossen/dicht) mit Notatemventil

Hospital mask Fa Resmed
Full face mask (NV-non vented - komplett geschlossen/dicht)

Masken: Vollgesichtsmasken (full face mask) mit integrierter Leckage für die außerklinische Beatmung und eingeschränkt für Intensivstation



Abb. 9

Leckage und Notatemventil im Kniestück integriert
Anwendung mit Turbinenrespiratoren und dichtem Schlauchsystem geeignet, Anwendung mit Intensivrespiratoren **nicht** möglich.

Leckage

Notatemventil



Abb. 10

Leckage

Cirri Fa Hofrichter
Full face mask (vented–CPAP Version mit Notatemventil)

Quattro FX Fa Resmed
Full face mask (vented–CPAP Version)

Masken: Vollgesichtsschalen (total face mask) für die Intensivstation und außerklinische Beatmung



Abb. 11

orangenes Kniestück → vented CPAP mit Notatemventil
Anwendung mit Turbinenrespiratoren geeignet, Anwendung mit Intensivrespiratoren **nicht** geeignet. Kniestücke sind austauschbar.

Blaues Kniestück → non vented
Anwendung mit allen Respiratoren geeignet



Abb. 12

Total face mask Fa Respironics
(NV-non vented–komplett dicht)

Total face mask Fa Respironics
(vented CPAP–integrierte Leckage und Notatemventil)

Beatmungssysteme und Masken bei nichtinvasiver Beatmung



Abb. 13

Whisper Swivel - Silentflow

System mit Whisper Swivel (Leckage)
full face mask – geschlossen
(NV-non vented)
System für Turbinenrespiratoren



Abb. 14

Leckage

System mit Leckageöffnung im System
full face mask – geschlossen
(NV-non vented)
System für Turbinenrespiratoren

Beatmungssysteme bei invasiver Beatmung

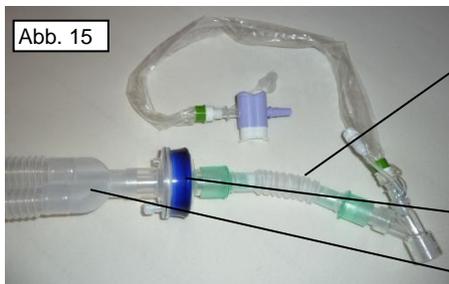


Abb. 15

Doppelschlauchsystem

- Geschlossene Absaugung
- Tubusverlängerung
- HME-Filter – Patientennah – korrekte Position
- HME-Filter – Befeuchtung ineffektiver
- Schlauchsystem mit y-Stück



Koaxialschlauchsystem
Innenliegend Inspiration, gerippter
äußerer Schlauch Expiration



Doppelschlauchsystem für
Aktivbefeuchtung mit integrierter
Schlauchheizung

3 Nichtinvasive Beatmung - NIV

3.1 Sinn und Zweck der NIV

Die nichtinvasive Beatmung (NIV) gewinnt in den letzten Jahren nicht nur im häuslichen Bereich bei der Schlafapnoe oder chronisch muskulär bedingter Ateminsuffizienz, sondern auch im intensivtherapeutischen Bereich zunehmend an Bedeutung. Besonders beim kardiogenen Lungenödem, beginnender respiratorischer Insuffizienz und akut erschöpfter Atempumpe infolge von z.B. infektexazerbierter COPD wird der NIV große Bedeutung beigemessen. Durch die NIV kann eine Intubation vermieden werden und nicht selten werden sogar bessere Therapieerfolge erzielt. Für die NIV stehen spezielle Respiratoren zur Verfügung, welche kleiner und handlicher als herkömmliche Intensivrespiratoren sind. Diese sind meist nur für die nichtinvasive und weniger für die invasive Beatmung geeignet bzw. zugelassen. Intensivrespiratoren eignen sich ohne speziellen NIV-Modus nur sehr begrenzt, weil sie nur mit NIV-Modus über ein „abgespecktes“ Monitoring und eine Leckagekompensation verfügen. Demzufolge sind ohne NIV-Modus häufige Alarmmeldungen wie z.B.

Leckage nicht zu vermeiden. Die Beatmungsformen SPN (PSV, S/T, CPAP/PS), PCV (BiLevel, BIPAP, PC/AC usw.) mit einem PEEP von 5-10 mbar und einem Inspirationsdruck von 3 – 20 mbar über PEEP eignen sich meist am besten für die NIV.

Die meisten Intensivrespiratoren können mit einem speziellen Modus für die NIV ausgestattet werden. Durch die Anwendung der NIV kann sehr effektiv die Atemmuskulatur (Atempumpe) entlastet werden. Bei Linksherzinsuffizienz bzw. kardiogenem Lungenödem kann durch einen CPAP –Druck von 5-8 mbar (kein/wenig Inspirationsdruck) die linksventrikuläre Funktion durch Senkung der Vorlast und dem Druck auf das Perikard mit Ausnutzung des Frank-Starling Effekts (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
- 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 $\text{PaCO}_2 > 45$ 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 PEEP von ca. 8 mbar extubiert und mit NIV vom PEEP und der noch nötigen Druckunterstützung weiter entwöhnt.
- Schlafapnoe und chronische Ateminsuffizienz

Kontraindikationen:

Absolut:

- Fehlende Spontanatmung, Schnappatmung
- Verlegung der Atemwege
- Gastrointestinale Blutung oder Ileus
- Nicht-hyperkapnisch bedingtes Koma

Relativ:

- hyperkapnisch bedingtes Koma
- Hypersekretion trotz Bronchoskopie
- Schwergradige 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 (full face mask) → akute hyperkapnische und/oder hypoxämische RI
- Vollgesichtsschale (total face mask) → akute hyperkapnische und/oder hypoxämische RI
- Beatmungshelm → akute hypoxämische RI

Die Durchführung der nichtinvasiven Beatmung stellt für Ärzte und Pflegepersonal nicht nur eine außerordentlich große Herausforderung dar, sondern erfordert professionelles und fachkompetentes Arbeiten. 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. Häufig 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 Vollgesichtsschale oder sehr vereinzelt den Beatmungshelm in Betracht ziehen.
- Monitoring und klinische Beobachtung:
 - Atmung: Wird die Atmung ruhiger? Ist die Einatembemühung des Patienten synchron mit dem Respiратор? 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:

Durch hohe Atemgasflüsse können die Schleimhäute sehr schnell austrocknen. Zwar wird das durch Turbinen bereitgestellte Atemgas bei Respiratoren speziell für die NIV aus der Raumluft gewonnen, trotzdem kann aber eine aktive Atemgasklimatisierung notwendig sein. HME-Filter sind bedingt durch Leckagen meist nicht zu empfehlen.

Eine aktive Atemgasklimatisierung ist auch bei größeren Leckagen insbesondere beim Einsatz von Intensivrespiratoren zu empfehlen. Temperatureinstellung 32-34° C.

4 Spontane Beatmungsverfahren - SPN

4.1 SPN - PSV - Druckunterstützte Spontanatmung

ASB, CPAP, PSV, spont,

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

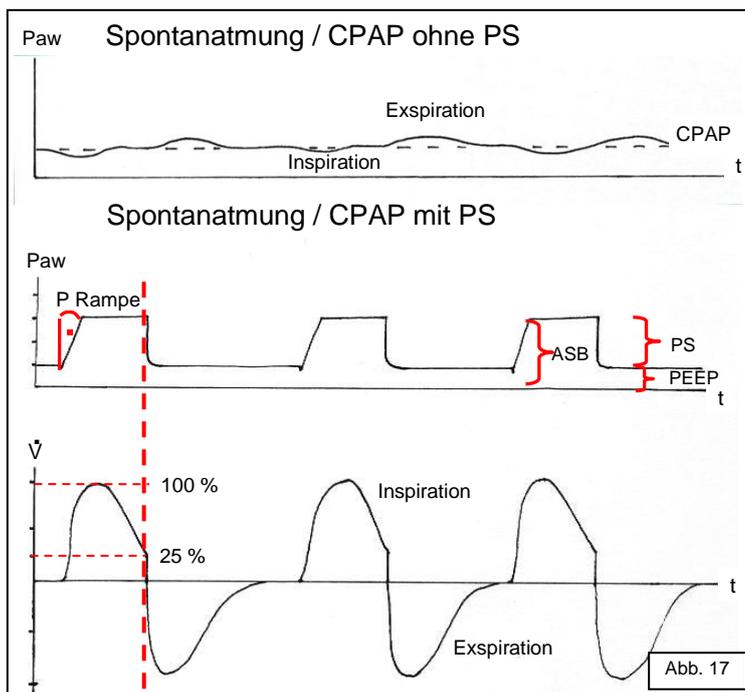
Man unterscheidet einen Flow- und einen Drucktrigger. Der Flowtrigger reagiert auf kleinste Flussbewegungen des Atemgases und der Drucktrigger auf negative Druckveränderungen (bei neueren Respiratoren immer ausgehend vom PEEP-Niveau). Die Empfindlichkeit wird beeinflusst von der Art der Atemgasbefeuchtung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

Der Flowtrigger ist sensibler und wenn möglich dem Drucktrigger vorzuziehen. Standarteinstellung

trägt 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.

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

Eine Sonderform des Flowtrigger stellt das Flow-by System dar. Bei diesem System fließt das Atemgas kontinuierlich in Form eines Basisflow vom Inspirations- zum Expirations-schenkel, wodurch das Atemgas ständig in Bewegung bleibt. Bei Einatembemühungen steht sofort ein Teil der Atemluft zur Verfügung, weil das Atemgas vom Patienten nicht erst in Bewegung gesetzt werden muss. Der



Basisflow ist bei neueren Respiratoren automatisch eingestellt und kann vom Anwender nicht mehr eingestellt bzw. verändert werden.

4.1.2 Expiratorischer Trigger

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 Standardeinstellung 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 modernen Respiratoren zur invasiven und nicht-invasiven Beatmung kann der expiratorische Trigger vom Anwender verändert werden. Bedingt durch Leckagen kann der Expirationstrigger nicht immer zuverlässig gesteuert werden, deshalb kann zur zusätzlichen Sicherheit häufig 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 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.

Bei Respiratoren für die nicht-invasive und außerklinische Beatmung ist meist üblich, dass auch bei PSV/S/T eine Atemfrequenz (AF) eingestellt werden kann. Sinkt die spontane AF unter die eingestellte AF, so übernimmt der Respirator die Beatmung. PSV ist somit nicht mehr Patienten getriggert, sondern Respirator getriggert. Eine kontrollierte Beatmung zur Entlastung der Atemmuskulatur ist dadurch auch mit PSV möglich.

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.

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.

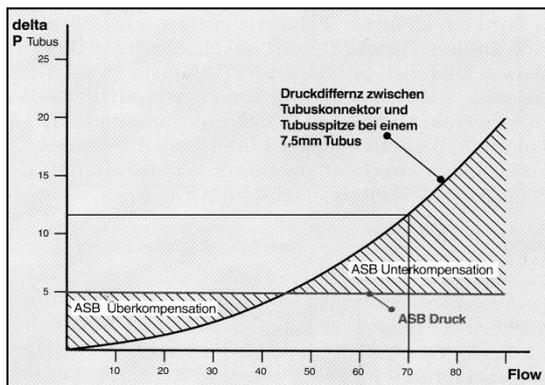


Abb. 18

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.

4.3 Automatische Tubuskompensation – ATC/TRC

Die automatische Tubuskompensation (ATC) bietet eine optimierte automatische Kompensation der tubusbedingten Widerstände.

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 nur bei PEEP-Werten >5mbar relevant. Der Einsatz der expiratorischen ATC kann derzeit nur bedingt empfohlen werden.

Bei COPD wird durch die exp. ATC die „bronchiale Schienung“ durch den PEEP vermindert. Ein kurzzeitiger Kollaps der kleinen Bronchien kann die Folge sein. Bei schwerer Kreislaufinstabilität kann durch den schnellen exp. Druckabfall die myokardiale Pumpkraft negativ beeinträchtigt werden. Dadurch kann es zu vermehrten Blutdruckschwankungen kommen.

Die ATC kann auch mit druckregulierten und druckkontrollierten Beatmungsformen kombiniert werden.

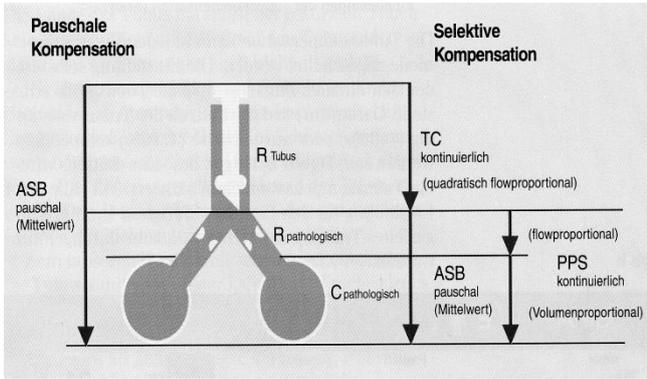


Abb. 19: Schematische Darstellung über Wirkung und Zweck einer Druckunterstützung
 Linke Seite: Die Druckunterstützung (ASB) kompensiert unspezifisch (pauschal) den Widerstand vom Tubus und wirkt der Resistance und Compliance der Lunge entgegen.
 Rechte Seite: Spezifische Kompensation des Tubuswiderstandes. (TC oder ATC = automatische Tubuskompensation) Die Druckunterstützung (ASB) wird nur noch angewendet, um der Resistance und Compliance der Lunge entgegenzuwirken.

4.4 PAV – Proportional Assist Ventilation PPS® - Proportional Pressure Support

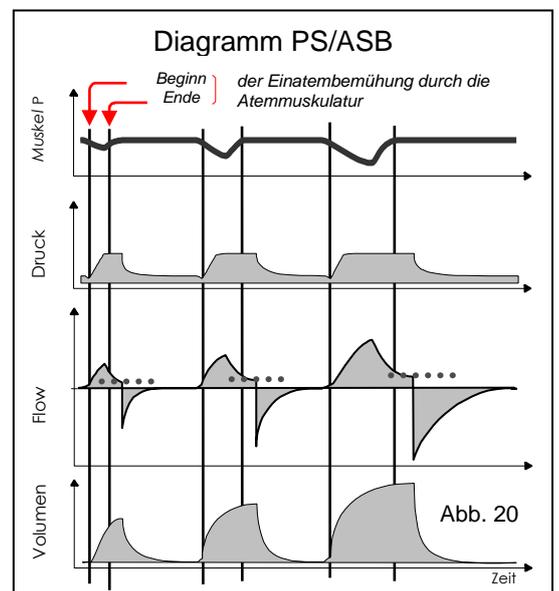
PPS (PAV) ist eine neuartige druckunterstützte spontane Beatmungsform, bei der die Druckunterstützung proportional zur Einatemanstrengung verabreicht wird. Bei hoher Einatemanstrengung wird die inspiratorische Druckunterstützung auf das erforderliche Maß erhöht, und bei geringer Atemanstrengung automatisch reduziert. Die inspiratorische Druckunterstützung wird dadurch „variabler“ und passt sich automatisch und sofort den erforderlichen Bedürfnissen des Patienten an. Die spontane Atmung als solche wird physiologischer.

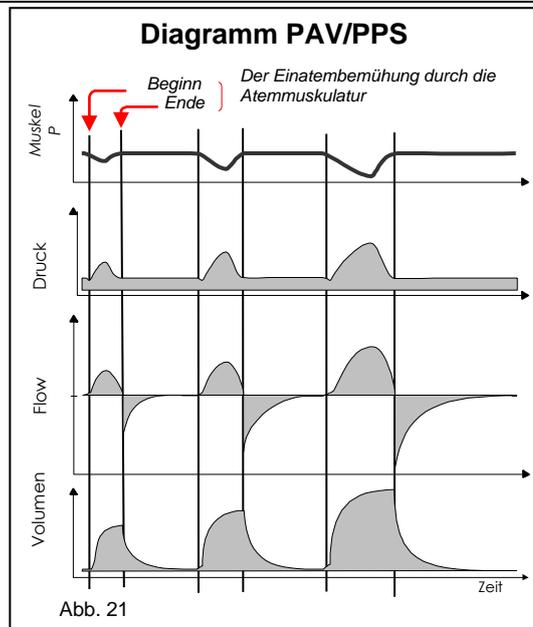
Selektiv kann der Widerstand und die Compliance der Lunge durch PPS kompensiert werden. Durch den Regler $\text{Flow}_{\text{Assist}}$ wird der Widerstand der Lunge kompensiert und die Druckunterstützung proportional zum Fluss verabreicht. Durch den Regler $\text{Volumen}_{\text{Assist}}$ wird der Compliance der Lunge entgegengewirkt und die Druckunterstützung proportional zum eingeatmeten Volumen verabreicht. Einstellen ist nicht mehr die Druckunterstützung als solche, sondern der Grad der Kompensation von Compliance und Resistance der Lunge. Um eine Einstellung beider Parameter vornehmen zu können, kann vor der Anwendung von PPS Resistance und Compliance der Lunge unter kontrollierter Beatmung gemessen werden. Um den Patienten in seiner Atmung zu unterstützen, ist eine 50-80% Kompensation beider Parameter ausreichend. Idealerweise atmet der Patient mit PPS als wäre seine Lunge gesund. Durch die Kombination von ATC und PPS könnte das Atemmuster nun so betrachtet werden, als sei der Patient „elektronisch extubiert“. Bei der Entwöhnung mit PPS werden beide Parameter schrittweise reduziert, bis keine Druckunterstützung mehr durch PPS erfolgt. Wenn Resistance und Compliance nicht mehr pathologisch verändert sind bzw. die chronisch veränderten Lungenparameter durch die vom Patienten geleistete Atemarbeit selbst kompensiert werden kann, reicht trotz bestehendem Endotrachealtubus oder Trachealkanüle die Unterstützung mit ATC.

Eine korrekte bzw. genaue Druckunterstützung ist derzeit mit PPS nicht zu verwirklichen, weil sich selbst bei korrekter Messung die resistiven und elastischen Widerstände ständig verändern. Der Grad der Kompensation von resistiven und elastischen Widerständen kann derzeit vom Anwender oft nur abgeschätzt und entsprechend korrigiert werden, und nicht wie zu wünschen wäre durch den Respiator selbst.

Gegenüberstellung von Pressure Support (ASB) und Proportional Pressure Support (PAV/PPS)

Die herkömmliche Druckunterstützung berücksichtigt im Gegensatz zu PPS nicht die sich ständig wechselnde Anstrengung der Atemmuskulatur. Bei gesteigerter Atemanstrengung muss die Muskulatur deutlich mehr Arbeit leisten, weil der Patient resistive (Resistance) und elastische Widerstände überwinden muss. Bei hoher Flussgeschwindigkeit des Einatemgases muss die Atemmuskulatur mehr Energie aufbringen, um den Widerstand der Lunge zu überwinden als wenn der Patient das Atemgas langsam einatmet. Deshalb verabreicht der $\text{Flow}_{\text{Assist}}$ die Druckunterstützung proportional zur Flussgeschwindigkeit.





Hohe Flussgeschwindigkeit des Atemgases bedeutet hohe Druckunterstützung durch den $Flow_{Assist}$. Der Pressure Support (PS) bleibt unabhängig von der gerade zu leistenden Atemarbeit in seiner Größe immer gleich.

Bei physiologischer Atmung verändert sich die Atemgasflussgeschwindigkeit ständig, und deshalb ist der eingestellte PS einmal zu niedrig (hohe Flussgeschwindigkeit) und einmal zu groß (niedrige Flussgeschwindigkeit). Ähnlich verhält es sich bei den elastischen Widerständen. Wenn der Patient ein großes Atemzugvolumen einatmet, wirken die elastischen Widerstände stärker der Einatembemühung entgegen als wenn nur ein kleines Atemzugvolumen eingeatmet wird. Deshalb verabreicht der $Volumen_{Assist}$ die Druckunterstützung proportional zum eingeatmeten Volumen.

Durch die volumenproportionale Druckunterstützung wird der Patient belohnt, wenn er tief und kräftig einatmet. Der Patient bekommt nicht das Gefühl, dass er bei

oberflächlicher Atmung weniger leisten muss als bei tiefer und kräftiger Einatmung. Auch in Bezug auf die elastischen Widerstände kann der PS nicht reagieren. Die Flowform eines spontanen Atemzuges entspricht einem sinusförmigen Verlauf. Die Flussgeschwindigkeit zu Beginn der Inspiration ist relativ schnell und nimmt gegen Ende der Inspiration ab. Die Druckunterstützung steigt die unter PPS innerhalb eines Atemzuges entsprechend der Flussgeschwindigkeit an und fällt gegen Ende der Einatmung wieder ab. Der PS entspricht in seinem Verlauf immer einer konstanten Form.

Innerhalb eines Atemzuges mit PS (ASB/Pressure Support) finden sich Phasen einer Überkompensation (PS ist relativ zur Flussgeschwindigkeit zu hoch) und Phasen einer Unterkompensation (PS ist relativ zur Flussgeschwindigkeit zu niedrig).

Bei PPS (z.B. Fa Dräger) wird der Kompensationsgrad Flow- und $Volumen_{Assist}$ eingestellt und wird nicht automatisch vom Respirator nachgeregelt, bei PAV (z.B. Fa Covidien/Medtronic) wird der Kompensationsgrad (in Prozent) der ermittelten Atemarbeit eingestellt. Resistance und Compliance werden in regelmäßigen Abständen automatisch gemessen. Die proportionale Druckunterstützung ($Flow-$ und $Volumen_{Assist}$) wird automatisch angepasst.

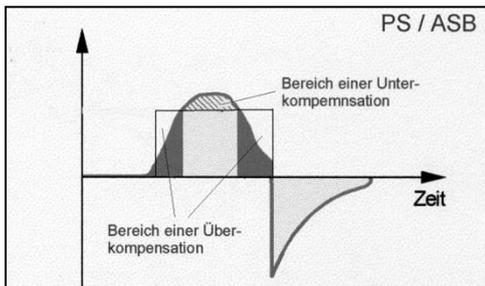


Abb.22

Innerhalb eines Atemzuges mit ASB finden sich Phasen einer Überkompensation (ASB ist relativ zur Flussgeschwindigkeit zu hoch) und Phasen einer Unterkompensation (ASB ist relativ zur Flussgeschwindigkeit zu niedrig). Um die Druckunterstützung zur Flussgeschwindigkeit optimal zu verabreichen, müsste diese nicht in einem konstanten, sondern in einem sinusförmigen Druckmuster verabreicht werden. Diese optimierte Form der Druckunterstützung bietet die Beatmungsform PAV und PPS.

5 Kontrollierte / Assistierte Beatmung

5.1 Volumenkontrollierte Beatmung - VCV

CMV/IPPV, SIMV, MMV

Bei der volumenkontrollierten Beatmung wird immer ein festes Atemhubvolumen vom Anwender vorgegeben, welches durch eine bestimmte inspiratorische Flowform verabreicht wird. An vielen Respiratoren können verschiedene Flowformen vorgewählt werden. Bei anderen Respiratoren hat der Anwender keine Möglichkeit die Flowform direkt zu verändern. Diese beatmen grundsätzlich mit einem konstanten Flowform. Die Flowform kann vom Anwender nur indirekt durch die Drucklimitierung verändert werden, indem die Druckgrenze „Pmax“ unterhalb des Spitzendrucks aber mind. 2-3 mbar über den Plateaudruck gesetzt wird. Die Flowform wird dezelerierend. Diese Form der VCV Beatmung wird dann PLV (Pressure Limited Ventilation) genannt.

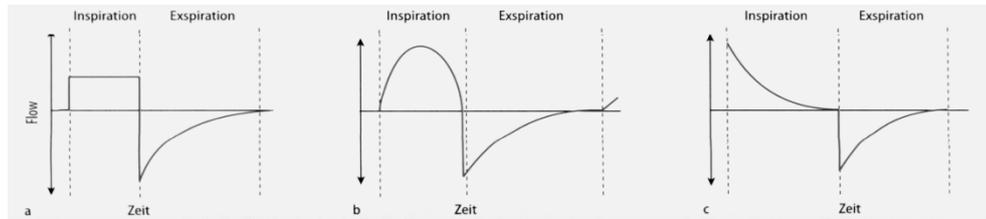
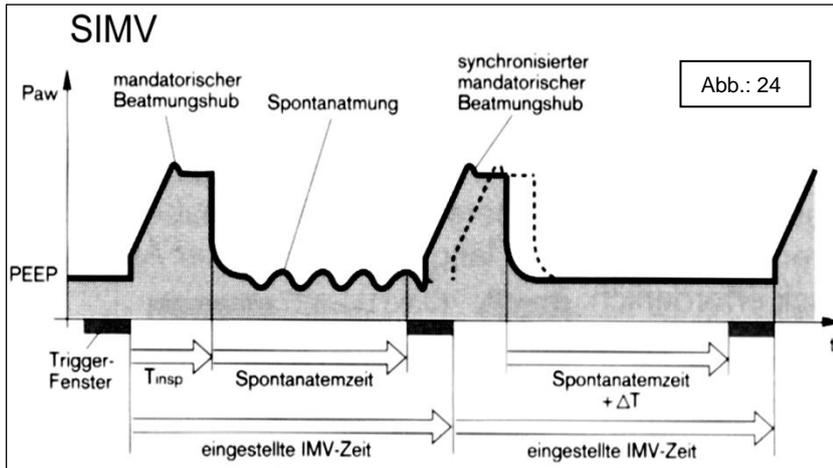


Abb.23

Darstellung von: a) konstantem Flow b) sinusförmigem Flow c) dezeleriertem Flow

Schematische

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 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. Durch das Einstellen einer Drucklimitierung oder eines dezelerierenden Flowmusters können Spitzendrücke reduziert werden.

Bei modernen Respiratoren ist diese Form der volumenkontrollierten Beatmung durch die druckregulierte Beatmung ersetzt worden und hat in der Intensivbehandlung keinen Stellenwert mehr. Die druckregulierte Beatmung weist erhebliche Nachteile wie z.B. die Gefahr erheblicher Inspirationsdrücke und nur geringe Möglichkeit der Spontanatmung nicht mehr auf.

Wesentliche Einstellparameter:

FiO₂, VT (AZV), Atemfrequenz, T_{insp} (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+, AVAPS, dynamischer BiLevel

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. Bei einigen Herstellern hat der Patient in jeder Phase

des Beatmungszyklus die Möglichkeit zu dem fest eingestellten Atemhubvolumen zusätzlich ein- bzw. auszuatmen. Man nennt dies auch „freie Durchatembarkeit“. Das Beatmungsgerät reagiert auf diese Veränderungen sehr sensibel und passt bei Inspirationsbemühungen innerhalb eines mandatorischen Beatmungshubes die Flussgeschwindigkeit dem Patienten an.

Wesentliche Einstellparameter:

FiO₂, Ziel-Volumen(AZV), Atemfrequenz, T_{insp} (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 von der Firma Hamilton entwickelte automatisierte 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 ventilert
- %Min Vol: gewünschtes AMV in % vom Normwert des eingestellten idealen 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:

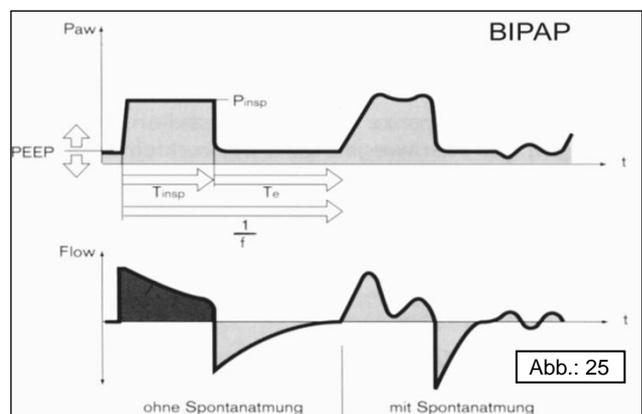
- Das minimale AZV beträgt immer 4,4 ml/kgKG (doppeltes Totraumvolumen; bei 70kg 308ml AZV)
- Die Beatmungsfrequenz beträgt min. 5/min und ergibt sich aus AMV und verabreichtem AZV
- Das AZV wird in erster Linie durch die obere Druckgrenze limitiert bzw. beträgt max. das 22 fache des Körpergewichtes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

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.



Turbinen betriebene Respiratoren für die nicht-invasive Beatmung mit patientennaher Ausatemleckage

wie z.B. V60, Vivo, Stellar oder PrismaVent 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. Um die Spontanatmung zu fördern, stehen folgende zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Die mandatorische Atemfrequenz wird schrittweise reduziert, das obere Druckniveau evtl. reduziert.
2. Das obere Druckniveau wird dem PEEP-Niveau schrittweise angeglichen, die mandatorische Frequenz evtl. reduziert.

Je niedriger das obere Druckniveau desto einfacher kann der Patient auf diesem mitatmen. Bei den Neueren BIPAP/BiLevel-Verfahren kann i.d.R. eine Druckunterstützung eingestellt werden, welche die Einatembemühung auf dem PEEP-Niveau unterstützt.

PCV-Verfahren bei Respiratoren für die nichtinvasive Beatmung wird beim Triggern auf dem PEEP-Niveau ein kontrollierter PCV-Atemhub und keine separat einzustellende Druckunterstützung verabreicht.

Bei BiLevel (Covidien) und DuoPAP (Hamilton) kann auf dem oberen Druckniveau zusätzlich eine Druckunterstützung eingestellt werden.

Einstellung am Beispiel der Respiratoren von Hamilton:

PEEP 5 mbar, oberes Druckniveau 18 mbar, (Druckdifferenz 13 mbar) und Druckunterstützung (Psupport) 15 mbar → Druckunterstützung auf dem oberen Druckniveau beträgt 2 mbar.

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

6.1 Open Lung Management

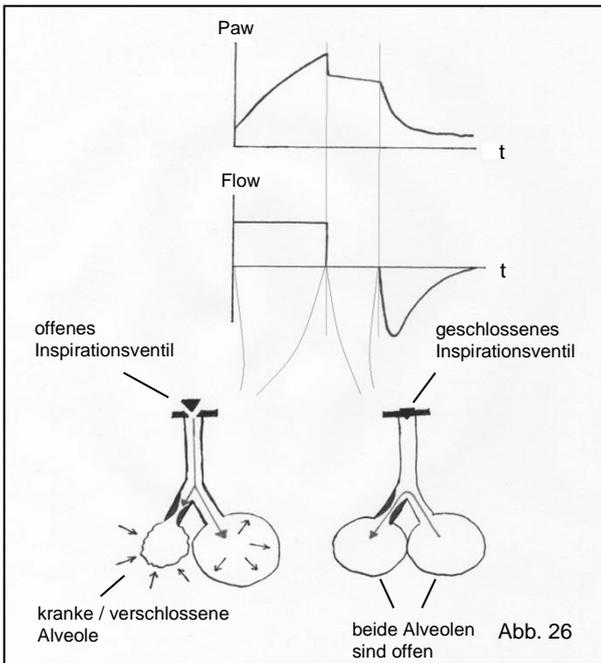
Unter maschineller Beatmung werden wesentliche physiologische Funktionen der Lunge durch den Respirator und dem dazugehörenden Beatmungskonzept übernommen: der Austausch von Kohlendioxid und Sauerstoff. Das Abatmen von Kohlendioxid (CO₂) wird gesteuert durch die Ventilation. Die Größe des AMV (VT und AF) beeinflusst die Menge an CO₂, die abgeatmet wird. 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. Der Grund einer Oxygenierungsstörung wie z.B. bei Pneumonie, ARDS, Atelektasen, Sekretstau liegt oft in einer verminderten Gasaustauschfläche. 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.

Folgende Maßnahmen können die Gasaustauschfläche vergrößern:

- open lung Manöver – Lachmann Manöver
- PEEP - Beatmung und/oder Inversed Ratio Ventilation
- Kinetische Therapie (90° Seitenlage, 135° Seitenlage und Bauchlage)
- druckkontrollierte Beatmung
- Teilerhaltung der Spontanatmung
- Senkung des intraabdominellen Drucks z.B. durch abführen

6.1.1 Vergleich zwischen VCV und PCV zur Rekrutierung von Alveolen

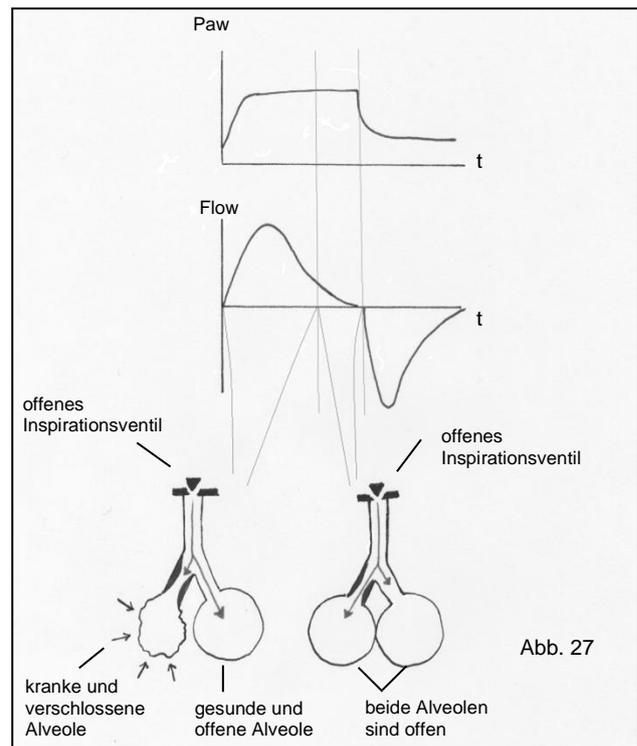
Volumenkontrollierte Beatmung



Bei der volumenkontrollierten Beatmung (VCV) wird das eingestellte Volumen mit entsprechendem Flow verabreicht, ohne auf die Lungenverhältnisse Rücksicht zu nehmen. Das Volumen geht den Weg des geringsten Widerstandes, demzufolge zuerst komplett in die gesunde Alveolen (siehe Abb. 16, rechte Alveole). Die gesunde Alveole wird überdehnt. Dadurch entstehen Scherkräfte an der Membran, die die kollabierte und die gesunde Alveole verbindet. Die Membran zwischen den Alveolen wird stark strapaziert und Verletzungen mit Schwellung sind die Folge (Volumen-Trauma, Fluid lung). In der Plateauphase ist das In- und Expirationsventil geschlossen. Durch den erhöhten Druck im Bronchialsystem und der schon offenen Alveole öffnet sich allmählich auch die Alveole mit schlechter Compliance und hohem Widerstand (hohe Zeitkonstante) und nimmt Luft auf. Die Luft fließt nun von der überblähten gesunden Alveole (gute Compliance und Widerstand) in die kranke Alveole. Diese Luft nennt man Pendelluft.

Druckkontrollierte Beatmung

Bei der druckkontrollierten Beatmung (PCV) nimmt die gesunde Alveole zu Beginn der Inspiration nur so viel Luft auf wie sie will und wie sie verkraften kann, ohne sich zu überdehnen, vorausgesetzt der obere Druck ist sinnvoll eingestellt. Nach gewisser Zeit öffnet sich nun die kranke Alveole und der Respiator schiebt durch das während der gesamten Inspiration geöffnete Inspirationsventil Luft nach. Ein dezelerierender Flow entsteht. Wenn nun der PEEP ausreichend groß gewählt wird, kollabieren die Alveolen in der Expiration nicht mehr und die schädlichen Scherkräfte werden vermieden.



6.2 Moderne Beatmungsstrategien

Nachfolgend zwei Beispiele (Auszüge) aus „Praktische Umsetzung von Leitlinien zur maschinellen Beatmung“. Weitere Informationen und Bestellung unter www.beatmungsfortbildung.de.

6.2.1 Beatmungsstrategie beim ARDS/ALI: Oxygenierungsindex < 300 mmHg

Ziele:

- Die noch gesunden belüfteten Lungenabschnitte sollen geschützt werden
- Atelektatische Lungenabschnitte sollen eröffnet werden, eröffnete sollen offengehalten werden
- Alveolarer und anatomischer Totraum sollen vermindert werden
- Toxische Sauerstoffkonzentrationen gilt es zu vermeiden ($FiO_2 \leq 0,6$ anstreben)

Strategie:

- Druckkontrollierte Beatmung (wenn möglich ein Modus mit „Durchatembarkeit“)
 - Druckdifferenz zwischen PEEP und inspiratorischem Druck (ΔP) \leq 13-15 mbar (max. 17 mbar)
inspiratorischer Druck (P_{insp}) max. 30 mbar
 - Niedrige Atemzugvolumina: 5 – 6 ml/kgKG (baby lung concept)
 - Hohe Atemfrequenz: 15 – 25 /min
(max. AF Grenze ist erreicht wenn ein Intrinsic-PEEP entsteht)
 - PEEP 8 – 18 mbar
 - Inspirationszeit schrittweise bis I:E = 1:1 verlängern
 - Vermeidung hoher insp. O_2 Konzentrationen; $PaO_2 \geq 60$ mmHg ausreichend
 PaO_2 zwischen 65 – 75 mmHg anstreben
 - $PaCO_2 \leq 55$ mmHg; falls erforderlich „Permissive Hyperkapnie“ bei $pH \geq 7,25$
- Cave: bei nicht ausreichender Oxygenierung gilt: erhöhe PEEP \rightarrow erhöhe T_{insp} \rightarrow erhöhe erst dann FiO_2 (gilt nicht für kurzzeitige FiO_2 – Erhöhungen bei akuten SaO_2 - Einbrüchen)

Vorgehensweise bei der Reduzierung der Beatmungsinvasivität:

- FiO_2 bis $\leq 0,4$ reduzieren
- I:E Verhältnis ab $FiO_2 \leq 0,5$ Richtung 1:1,5 (max. 1:2) normalisieren
- PEEP frühestens ab $FiO_2 \leq 0,45$ und Teilsponatmung schrittweise reduzieren

Hinweis:

Die Sedierungstiefe sollte so gesteuert werden, dass die Beatmung toleriert wird und Zwerchfellaktivitäten erhalten und gefördert werden. Entscheidend dabei ist nicht das spontane Zugvolumen, sondern die Möglichkeit durch den entstehenden Sog Luft in die zwerchfellnahen Areale zu befördern \rightarrow in der Akutphase Pressure Support ≤ 5 mbar \rightarrow erst bei der Entwöhnung Pressure Support anpassen.

Sedierungstiefe nach Ramsay-Score 3 - 4 (RASS - 2 / - 4) bei druckkontrollierter Beatmung mit freier Durchatembarkeit

Sedierungstiefe nach Ramsay-Score 4 - 5 (RASS - 4 / - 5) bei druckkontrollierter Beatmung ohne freie Durchatembarkeit

Ergänzende Maßnahmen:

- Lagerungstherapie z.B. 90° Seitenlage, 135° Seitenlage
- kinetische Therapie – z.B. Roto Rest von KCI®
- Atemgasklimatisierung
- Rekrutierungsmanöver
- Physiotherapie

Entwöhnungsbeginn siehe „Grundsätze der Entwöhnung“. Die Entwöhnungsfähigkeit sowie die Analgosedierungstiefe täglich evaluieren.

6.2.2 Beatmungsstrategie beim kardiogenen Lungenödem

Die nicht-invasive Atemhilfe ist primär der invasiven Beatmung mit Intubation vorzuziehen.

Strategie:

- Druckregulierte oder druckkontrollierte Beatmung (wenn möglich ein Modus mit „Durchatembarkeit“)
- FiO_2 initial bis 1,0 zur Aufsättigung; PaO_2 80 – 100 mmHg
- inspiratorischer Druck (P_{insp}) max. 30 mbar
- Atemzugvolumina 7 - 8ml/kg KG ; Atemfrequenz 12 - 15/min
- I:E ~ 1:2; T_{insp} 1,2 - 1,7sec
- PEEP 5 – 10 mbar (senkt die Vorlast des linken Ventrikels \rightarrow Nitroeffekt)
- Normoventilation; $PaCO_2$ von 35 - 45mmHg

Cave: Die zu rasche Rücknahme des Beatmungsmitteldrucks während der Weaningphase kann bei schlechter linksventrikulärer Funktion zur erneuten kardialen Dekompensation führen. Ein nahtloser Übergang zu einer nichtinvasiven Atemhilfe ist zu erwägen.

Der Mitteldruck der maschinellen Beatmung muss den hydrostatischen Druck des Lungenödems übersteigen („Ödem wird in die Kapillaren zurückgedrückt“). Der durch die maschinelle Beatmung erhöhte intrathorakale Druck wirkt über den Herzbeutel tonisierend auf den Herzmuskel. Der überdehnte Herzmuskel erhält wieder eine Vorspannung, die ihn ökonomischer arbeiten lässt (Starling-Effekt). Die Auswurf-Fraktion (Anteil des ausgeworfenen Blutes am enddiastolischen Volumen der Herzkammer) normalisiert sich.

6.3 Beatmungsinduzierte Lungenschädigung

Zu den beatmungsinduzierten Lungenschädigungen zählen unter anderem:

- Volutrauma
- Atelektrauma
- Barotrauma
- Biotrauma

Ein **Volutrauma**, auch Überdehnungstrauma genannt, wird durch die Verabreichung von zu großen Atemzugvolumina verursacht. Bei einer kranken Lunge kollabiert ein Teil der Lungenareale (Atelektasen), ein anderer Teil steht zur Ventilation zur Verfügung. Da aber die zur Verfügung stehenden Lungenareale im Gegensatz zur gesunden Lunge verkleinert sind, muss auch das zu verabreichende Atemzugvolumen reduziert werden, da es sonst zur Überdehnung (Volutrauma) der gesunden Lungenareale (Alveolen) kommt und das noch gesunde Lungenparenchym geschädigt wird. Mit Zunahme des Atemzugvolumens steigt auch der Beatmungsdruck und somit die Gefahr, dass Alveolen platzen. Die durch zu hohe Beatmungsdrücke verursachten Schädigungen nennt man **Barotrauma**.

Wird ein zu geringer PEEP verabreicht, kollabieren in der Expiration Alveolen, die durch den Inspirationsdruck wiedereröffnet werden. Durch das ständige Kollabieren und sofortige Eröffnen der Alveolen, dem so genannten **Atelektrauma** entstehen Scherkräfte, die das Lungenparenchym ebenfalls schädigen. Scherkräfte entstehen nicht nur, wenn Alveolen zyklisch kollabieren und eröffnet werden, sondern auch, wenn die wieder eröffneten Alveolen inspiratorisch überdehnt werden. Dieser Mechanismus wird als **Biotrauma** bezeichnet. Eine nicht homogene Füllung der Alveolen mit Luft führt dazu, dass Alveolarwände inspiratorisch Scherkräften ausgesetzt werden. Diese Scherkräfte verursachen zunächst eine Schwellung, dann kleine Einrisse des Lungenparenchyms mit Ansiedlung von Bakterien (VAP). Durch die Überdehnung des Lungenparenchyms werden so genannte Zytokine freigesetzt. Zytokine sind Mediatorstoffe, die andere Organe schädigen. Eine Multitorgandysfunktion kann die Folge sein.

Pulmonale Sauerstofftoxizität

Hohe Inspiratorische O₂-Konzentrationen können über einen längeren Zeitraum zu Veränderungen des Lungengewebes führen. Die O₂-Toxizität nimmt ab einer FiO₂ >0,6 exponentiell zu.

Mögliche Auswirkungen:

- Diffuse Schädigung der terminalen Atemwege und Alveolen
- Beeinträchtigung der mukoziliären Clearance
- Vermehrte Bildung von Sauerstoffradikalen
- Ausbildung von Resorptionsatelektasen

Resorptionsatelektasen können auch durch das präoxygenieren unter einem Absaugmanöver auftreten. Alveolen, die mit reinem Sauerstoff gefüllt sind und durch eine plötzlich zunehmende Obstruktion oder Okklusion durch Sekret nicht oder kaum mehr am Gasaustausch teilnehmen kollabieren. Der O₂ wird resorbiert und Stickstoff der die Alveolen üblicherweise dann offen hält ist bei reiner Sauerstoffinsufflation nicht vorhanden.

Die Sauerstofftoxizität kann sich deutlicher ausprägen, wenn eine Schädigung der Lunge durch andere Mechanismen voraus gegangen ist.

Eine Hypoxie wirkt sich schädlicher auf den Gesamtorganismus und die Lunge aus als eine hohe inspiratorische Sauerstoffkonzentration.

6.4 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

6.4.1 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

6.4.2 Auswirkungen forciertes Spontanatmung auf die Herzfunktion

Unter forciertes 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

7 Entwöhnung vom Respirator

Die Entwöhnung vom Respirator, das so genannte Weaning, beschreibt den schrittweisen Übergang von der maschinellen Beatmung hin zur Spontanatmung ohne jegliche Atemhilfe. Der Entwöhnungsprozess gilt dann als abgeschlossen, wenn der Patient extubiert, wurde bzw. über ein Tracheostoma mit einer „feuchten Nase“ mehr als 24 Stunden erfolgreich atmet.

Eine spezielle Entwöhnungsstrategie des Patienten ist meist nur nach Langzeitbeatmung (> 48 Stunden) notwendig. Die elektive Narkoseausleitung auf der Intensivstation bedarf in der Regel zwar Kenntnisse über Entwöhnung und Extubation, aber kein spezielles Weaning.

Eine schwierige Entwöhnung ist in der Literatur für ca. 20% aller Beatmungspatienten angegeben. Bei Patienten mit COPD ist in bis zu 50% aller Fälle mit Entwöhnungsproblemen zu rechnen.

Die Entwöhnung beginnt dann, wenn der erste Schritt unternommen wird, um die Beatmungsinvasivität zu reduzieren. Begonnen wird mit der Reduktion des inspiratorischen Sauerstoffgehaltes (FiO₂-Wert) oder des PEEP-Wertes. Die Spontanatmung unter einem Spontanatemmodus erfolgt erst im nächsten Schritt. Kleine Spontanatemaktivitäten werden aber schon deutlich früher gefördert. Dies wird, wenn möglich dadurch gefördert, indem die Analgosedierung differenziert gesteuert wird, so dass der Patient einerseits die Beatmung und pflegerische Maßnahmen toleriert, andererseits aber der Atemantrieb nicht vollständig unterdrückt wird. Auch über den PCO₂ im oberen Normbereich kann der Atemantrieb stimuliert werden. Gerade bei Beatmungsformen mit der Möglichkeit der freien Spontanatmung kann dies gut realisiert werden.

Eine große Schwierigkeit besteht darin, den richtigen Zeitpunkt für den Beginn der Entwöhnung zu finden. Zwar werden zahlreiche Kriterien und Indizes für die Entwöhnung angegeben, doch bei der Entscheidung, wann der Patient vom Respirator entwöhnt werden kann, helfen diese nur begrenzt weiter. Nicht nur deshalb stellt sich folgende Frage: Ist die schwierige Entwöhnung eine „Wissenschaft oder Kunst“? Untersuchungen konnten zeigen, dass ein protokollbasiertes Weaning nach festen Kriterien die Entwöhnungszeit mit unter deutlich reduzieren kann (Ely et al '96 / Kolleff et al '97). Einer strukturellen und konzeptionellen Vorgehensweise kommt eine entscheidende Rolle zu. Kürzere Beatmungs- und Entwöhnungszeiten haben nicht nur auf die Zahl der Ventilator Assoziierten Pneumonien (VAP) positiven Einfluss, sondern auch auf die Prognose insgesamt.

7.1 Kriterien zum Beginn der Entwöhnung

Um den frühestmöglichen Zeitpunkt für den Entwöhnungsbeginn zu ermitteln können eine Vielzahl von Kriterien herangezogen werden. Es wird unterschieden zwischen allgemeinen Faktoren und Kriterien, die täglich evaluiert werden und erfüllt sein sollten, bevor mit dem Weaning begonnen werden kann.

Begünstigende Faktoren

Allgemein

- Ausgeglichener Elektrolyt- und Säure-Basen-Haushalt
- Normale Magen-Darm-Motilität, kein Zwerchfellhochstand
- Sitzende Position verringert die Atemarbeit
- Ausreichende Nährstoffversorgung bzw. guter Ernährungszustand
- Kompetente und einfühlsame psychologische Unterstützung: Angst und Unruhe minimieren, Motivation fördern, auch Mitarbeit der Angehörigen in Erwägung ziehen
- Atemstimulierende Einreibungen

Respiratorspezifisch

- Flowtrigger sensibel einstellen
- Totraum so gering wie möglich halten (kurze Gänsegurgel)
- Bei schwieriger Entwöhnung den HME-Filter aufgrund des erhöhten Widerstandes und größeren Totraums gegen einen aktiven Befeuchter austauschen

Ungünstige Faktoren

- Kleiner Durchmesser des Endotrachealtubus oder Trachealkanüle
- Mangelnde Synchronisation zwischen Patient und Respirator
- Überhang von Analgosedierung
- Schmerzen und Stress
- Schlechte Compliance und Resistance
- Hoher Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion durch z.B. erhöhte Körpertemperatur

Voraussetzungen

Die Entwöhnung kann dann begonnen werden, wenn sich die zugrunde liegende Erkrankung gebessert hat. Folgende Kriterien sollten erfüllt sein, damit die Entwöhnung begonnen werden kann. Diese Kriterien werden täglich evaluiert.

7.1.1 Schritt 1 der Entwöhnung

Diese Kriterien stellen im Rahmen einer protokollbasierten Entwöhnung den ersten Schritt der Entwöhnung dar.

- Niedrig dosierte Katecholamine
- Atemmuskulatur ist erholt
- Oxygenierungsindex ≥ 180 (COPD ≥ 160); $\text{PaO}_2 > 60$ mmHg bei $\text{FiO}_2 \leq 0,5$
- PEEP ≤ 12 mbar
- Minutenvolumen (MV) < 15 l/min
- pH 7,35-7,45
- Temperatur $\geq 36,0^\circ\text{C}$ und $\leq 38^\circ\text{C}$

7.2 Entwöhnungsmethoden

Unabhängig von der Entwöhnungsmethode müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Analgosedierung reduzieren, damit der Atemantrieb einsetzen kann
- Die Ventilation unter maschineller Beatmung reduzieren bis durch einen PaCO_2 -Anstieg ein pH-Wert von ca. 7,35–7,40 erreicht ist. Dadurch wird der Atemantrieb gesteigert

Treten Erschöpfungszeichen auf, wird der maschinelle Anteil der Beatmung gesteigert. Dieser Grundsatz gilt immer, egal nach welcher Methode der Patient entwöhnt wird. Eine Erschöpfung des Patienten ist unbedingt zu vermeiden, da eine erschöpfte Atemmuskulatur 24–48 Stunden braucht, um sich zu erholen. In dieser Zeit dürfen keine Spontanatemversuche unternommen werden.

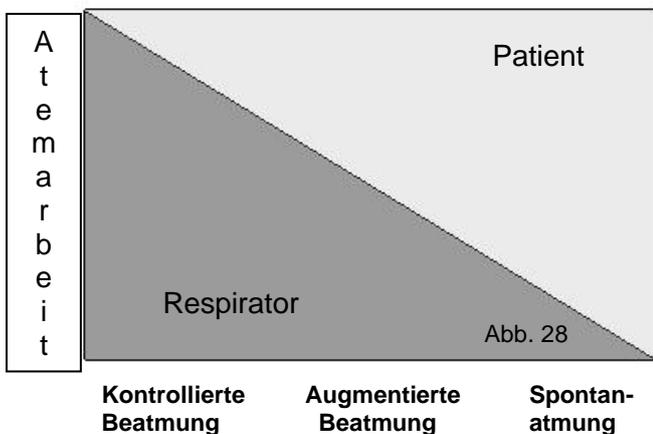
COPD und Sauerstoffgabe:

Der Atemantrieb der normalerweise vor allem über das PCO_2 gesteuert wird, kann bei COPD über den PO_2 (SpO_2) gesteuert sein. Die Steuerung des Atemantriebs über das PaCO_2 funktioniert nicht mehr, wenn immer wieder, oder auch dauerhaft das PaCO_2 erhöht ist. Die Steuerung des Atemantriebs stellt sich auf den PaO_2 um. Nimmt die Oxygenierung bei Patienten mit COPD zu stark zu, kann durch die dann zu komfortable SpO_2 von ca. $>95\%$ den Atemantrieb vermindern. Die Störung des Atemantriebs kann bis zur Apnoe führen.

Merke:

Bei COPD immer nur so viel Sauerstoff verabreichen, dass die SpO_2 nicht über 95% ansteigt. Bei schlechter SpO_2 mit Atemnot wird so viel Sauerstoff verabreicht wie benötigt wird, um eine ausreichende SpO_2 zu erzielen. Ist keine SpO_2 Überwachung möglich, wird grundsätzlich maximal 1-2 l/min O_2 verabreicht. Nur bei akuter Atemnot und Zyanose wird, aber nur bis zur Besserung der Atemnot und Zyanose, deutlich mehr Sauerstoff gegeben.

7.2.1 Kontinuierliche Entwöhnung



Die kontinuierliche Entwöhnung ist gekennzeichnet durch eine schrittweise Reduktion des maschinellen Anteils der Beatmung. Die anfänglich komplett vom Respirator übernommene Atemarbeit wird zunehmend vom Patienten selbst übernommen, bis er ohne maschinelle Unterstützung atmen kann. Um eine Überforderung und die damit verbundene zu hohe Atemarbeit zu erkennen, ist eine intensive Beobachtung des Patienten erforderlich. Ist eine Überforderung erkennbar, wird der maschinelle Anteil durch eine Atemfrequenzsteigerung erhöht. Zum nächstmöglichen Zeitpunkt wird der maschinelle Anteil erneut reduziert.

7.2.2 Diskontinuierliche Entwöhnung

Die diskontinuierliche Entwöhnung zeichnet sich dadurch aus, dass die maschinelle Beatmung intermittierend unterbrochen wird und der Patient für einige Minuten spontan atmet. Dieser Wechsel von maschineller Beatmung und Spontanatmung wird mehrmals täglich durchgeführt. Auf ausreichend lange Erholungsphasen nach einem Spontanatmungsintervall muss geachtet werden. In den ersten Tagen wird der Patient ausschließlich maschinell beatmet, um eine erholsame Nachtruhe gewährleisten zu können. Nach anfänglich nur wenigen Minuten der Spontanatmung werden die Phasen der Spontanatmung immer länger und die Phasen der maschinellen Beatmung immer kürzer. Die Dauer und Häufigkeit der Spontanatemphasen richten sich nach Leistungsfähigkeit des Patienten. Klassischerweise werden die Spontanatemphasen über T-Stück oder CPAP durchgeführt. Die

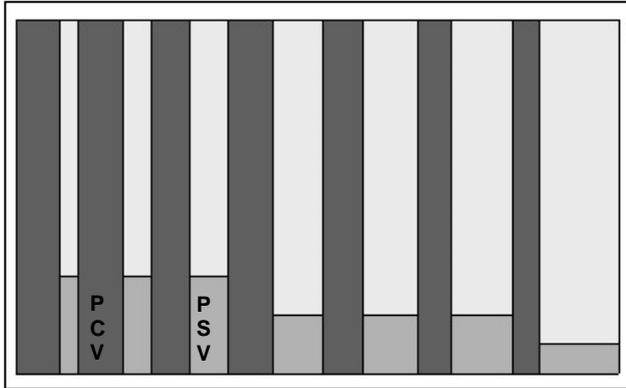


Abb. 29: modifizierte diskontinuierliche Entwöhnung: Intermittierend wird die kontrollierte Beatmung in Form von PCV oder VCV durch Spontanatmung unterbrochen. Schrittweise wird der Pressure Support reduziert und die Phasen der Spontanatmung verlängert.

Atemarbeit wird ausschließlich vom Patienten übernommen.

Alternativ ist ein modifiziertes diskontinuierliches Entwöhnen mit CPAP und einer eingestellten Druckunterstützung eine sehr empfehlenswerte Methode. Vor allem bei Spontanatmung ohne Druckunterstützung über einen Endotrachealtubus kann die Atemarbeit zu groß sein und der intrathorakale Druck fällt sehr stark ab. Die Druckunterstützung wird so eingestellt, dass eine erkennbare Atemarbeit vom Patienten zu leisten ist. Bei Auftreten von Erschöpfungszeichen wird die maschinelle Beatmung wiederaufgenommen. Eine Erschöpfung des Patienten muss in jedem Fall vermieden werden.

Vorteile einer modifizierten diskontinuierlichen Entwöhnung

- Gefahr einer zu großen Atemarbeit mit frustrierten Atembemühungen des Patienten wird vermieden
- Vermeidung von zu schnellem PEEP-Verlust am T-Stück oder „künstlicher Nase“ mit der Gefahr des Auftretens von Atelektasen
- Erhaltener PEEP von 5–8 mbar simuliert Lippenbremse beim Patienten mit COPD
- Die linksventrikuläre Funktion wird durch großen Druckabfall über den Beatmungstubus (vor allem kleinen Endotrachealtuben) bei ausgeprägter Spontanatmung deutlich weniger eingeschränkt
- Bessere respiratorische Überwachung möglich

Nachteil einer modifizierten diskontinuierlichen Entwöhnung

Ein Nachteil einer modifizierten diskontinuierlichen Entwöhnung besteht darin, dass bei jedem Intensivrespirator immer zuerst die eingestellte Triggerschwelle erreicht werden muss bis das Inspirationsventil geöffnet wird, um Spontanatemaktivitäten zu unterstützen. Diese kleine Verzögerung zwischen Beginn der Spontanaktivität und dem Öffnen des Inspirationsventils nennt man Triggerlatenzzeit. Dieser Nachteil entfällt bei modernsten Respiratoren zur nichtinvasiven Beatmung (z.B. Respironics/Phillips V60).

Praktisches Vorgehen

Grundsätzlich ist jede Beatmungsform für die Phasen der vollständigen Übernahme der Atemarbeit geeignet, wobei die Anwendung einer druckkontrollierten Beatmungsform vorteilhaft sein kann.

Um die Spontanaktivitäten unter maschineller Beatmung zu vermeiden, wird das PaCO₂ im unteren Normbereich gehalten. Zu Beginn der Spontanatemphasen ist es möglich, dass der Atemantrieb erst nach 10–20 Sekunden einsetzt. Ein Spontanatemversuch soll zeigen ob der Patient in der Lage ist zu Triggern bzw. spontan zu atmen.

7.2.3 Schritt 2 der Entwöhnung

Spontanatmungsversuch

Vor einer Extubation, ganz gleich ob nach Langzeitbeatmung oder nach elektiver Narkoseausleitung, wird ein Spontanatmungsversuch (SBT) für die Dauer von drei Minuten durchgeführt. Um einen Spontanatemtest durchzuführen, sind folgende Kriterien zu erfüllen:

Die folgenden Kriterien stellen im Rahmen einer protokollbasierten Entwöhnung den **zweiten Schritt** der Entwöhnung dar.

- Niedrig dosierte Katecholamine
- Oxygenierungsindex ≥ 200 (COPD ≥ 180); $\text{PaO}_2 > 60$ mmHg bei $\text{FiO}_2 \leq 0,4$
- PEEP ≤ 7 mbar
- $f/\text{VT} \leq 100$ ($\text{VT} \geq 5$ ml/kg KG, $f \leq 35/\text{Min}$)
- pH 7,35–7,45
- Temperatur $\leq 38^\circ\text{C}$
- Patient ist wach und Hustenreflex ist vorhanden

f/VT-Index

Der f/VT-Index (auch Rapid-shallow-breathing-Index - RSB) erlaubt eine Prognose darüber, ob der Patient erfolgreich extubiert werden kann. Zur Ermittlung des Index wird unter Spontanatmung mit geringer Druckunterstützung die spontane durch das Atemzugvolumen (in Liter) geteilt. Je kleiner der Index, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Extubation.

7.2.3 Schritt 3 der Entwöhnung

Durchführung

Wenn die Kriterien für einen Spontanatmungsversuch erfüllt sind, wird dieser nach folgenden Empfehlungen über einen Zeitraum von 3 Minuten durchgeführt:

Diese Durchführungsempfehlungen stellen im Rahmen einer protokollbasierten Entwöhnung den **dritten Schritt** der Entwöhnung dar.

Wird der 3-minütige Spontanatmungsversuch als erfolgreich gewertet, wird die Spontanatemphase mit gleicher Einstellung des Respirators bei Patienten nach Langzeitbeatmung um weitere 30–120 Minuten verlängert. Vor geplanter Extubation nach elektiver Narkoseausleitung kann dieser deutlich verkürzt werden. Bei erfolgreicher Durchführung kann der Patient mit Endotrachealtubus bei Erfüllen der im Folgenden beschriebenen Extubationskriterien extubiert werden. Patienten mit Tracheostoma können an einer „feuchten Nase“ belassen werden. Wird nach gewisser Zeit eine erneute Respiratorunterstützung benötigt wird der Patient wieder zur Entlastung der Atemmuskulatur an den Respirator genommen. Der Patient gilt als entwöhnt, wenn er > 24 Stunden keine Atemhilfe benötigt.

7.3 Extubationskriterien

- Blutgasanalyse:
 - $\text{PaO}_2 > 70$ mmHg bzw. $\text{SaO}_2 > 94\%$ bei $\text{FiO}_2 \leq 0,4$ (COPD SaO_2 90-93% ausreichend)
 - pH 7,35–7,45
 - PaCO_2 35–45 mmHg (ausgenommen COPD)
- Atemfrequenz: $< 30/\text{min}$
- Atemzugvolumen: ≥ 5 ml/kgKG
- Stabile Kreislaufsituation
- Schutzreflexe müssen vorhanden sein
- Patient verfügt über ausreichende Muskelkraft (z.B. Augen öffnen, Hand drücken)

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 Resprionics®
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
P _{max}	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
- 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 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.: Leitlinien zur maschinellen Beatmung.
www.beatmungsfortbildung.de, Auflage 4; 2017
- Zarske R.: Döring M. ATC und PPS Atemunterstützung mit bestmöglichem Komfort.
Dräger GmbH Lübeck