

GRUNDLAGEN DER MASCHINELLEN BEATMUNG



Version
April 2023

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.....	10
1.11	Indikationen der maschinellen Beatmung.....	11
2	Klassifizierung und Steuerung	12
2.1	Atemtyp.....	12
2.2	Kontrollvariable	12
2.3	Zyklusvariable - Steuerung.....	13
2.4	Respiratoren und deren Beatmungsformen.....	12
2.5	Unterschiede und Anwendungsindikationen von Respiratoren.....	12
2.6	Funktionsprinzip der spontanen Beatmungsverfahren.....	12
2.7	Beatmungsparameter und Einstellgrößen des Respirators.....	13
2.8	Beatmungsmasken und Systeme	16
3	Nichtinvasive Beatmung - NIV	18
3.1	Sinn und Zweck der NIV.....	18
3.2	Vor- und Nachteile der NIV gegenüber der endotrachealen Intubation.....	18
3.3	Indikationen und Kontraindikationen.....	
3.4	Durchführung der nichtinvasiven Beatmung	
4	Spontane Beatmungsverfahren - SPN.....	
4.1	SPN - PSV - Druckunterstützte Spontanatmung.....	
4.1.1	Inspiratorischer Trigger.....	
4.1.2	Expiratorischer Trigger	
4.1.3	Druckanstiegsgeschwindigkeit	
4.2	Atemwegwiderstand beim Beatmungspatienten	
4.3	Automatische Tubuskompensation – ATC/TRC	
4.4	PAV – Proportional Assist Ventilation PPS® - Proportional Pressure Support.....	
5	Kontrollierte / Assistierte Beatmung	
5.1	Volumenkontrollierte Beatmung - VCV	
5.2	Druckregulierte Beatmung – PRVC	
	ASV – Adaptive Support Ventilation	
5.3	Druckkontrollierte Beatmung - PCV.....	
6	Strategien und Konzepte der maschinellen Beatmung	
6.1	Open Lung Management.....	
6.1.1	Vergleich zwischen VCV und PCV zur Rekrutierung von Alveolen	
6.2	Moderne Beatmungsstrategien	
6.2.1	Beatmungsstrategie beim ARDS/ALI: Oxygenierungsindex < 300 mmHg	

6.2.2	Beatmungsstrategie beim kardiogenen Lungenödem
6.3	Beatmungsinduzierte Lungenschädigung
6.4	Auswirkung der maschinellen Beatmung auf die Herzfunktion
6.4.1	Auswirkungen der maschinellen Beatmung auf die Linksherzinsuffizienz
6.4.2	Auswirkungen forcierter Spontanatmung auf die Herzfunktion
7	Entwöhnung vom Respirator
7.1	Kriterien zum Beginn der Entwöhnung
7.1.1	Schritt 1 der Entwöhnung
7.2	Entwöhnungsmethoden
7.2.1	Kontinuierliche Entwöhnung
7.2.2	Diskontinuierliche Entwöhnung
7.2.3	Schritt 2 der Entwöhnung
7.2.3	Schritt 3 der Entwöhnung
7.3	Extubationskriterien
Abkürzungen
Literaturverzeichnis

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.

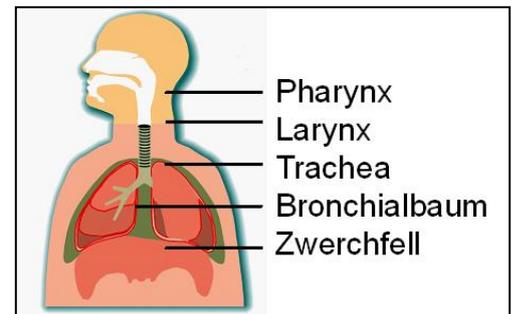


Abb. 1: Der Respirationstrakt

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

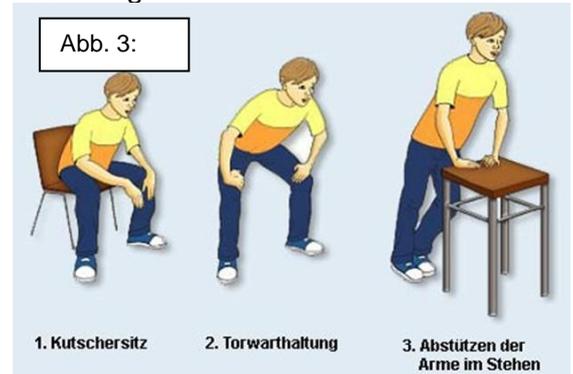
- äußere Zwischenrippenmuskeln = Musculus intercostalis externus
- Musculus scalenus
- Rippenheber-Muskel = Musculus levator costarum
- Sägemuskeln = Musculi serratus
 - hinterer oberer Sägemuskel = Musculus serratus posterior superior
 - hinterer unterer Sägemuskel = M. serratus posterior inferior
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

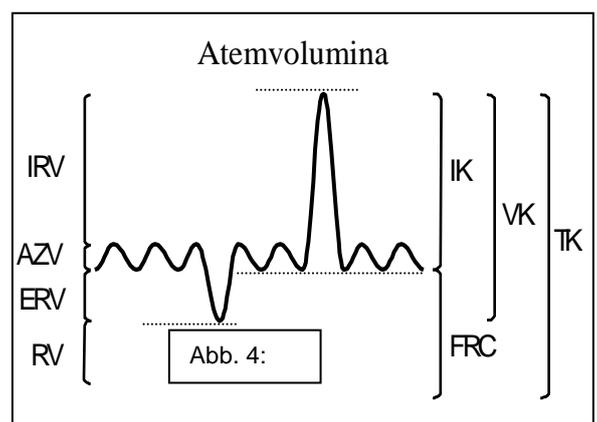
Luftmenge, die nach einer normalen Inspiration zusätzlich eingeatmet werden kann (ca. 2500-3000 ml)

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

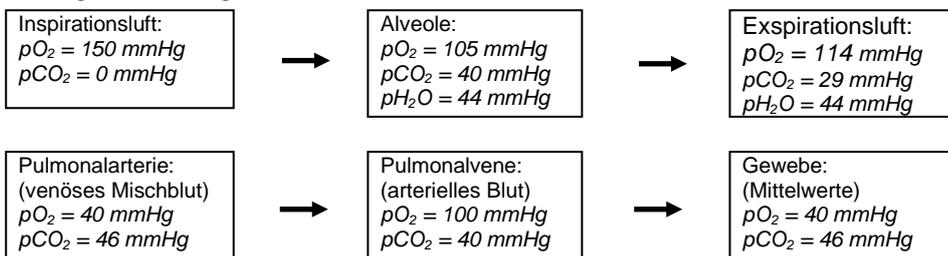
Der pulmonale Gasaustausch findet in den Alveolen statt. Sauerstoff (O₂) aus der eingeatmeten Alveolarluft diffundiert durch das respiratorische Epithel und das direkt benachbarte Gefäßendothel in das Lungenkapillarblut, Kohlendioxid (CO₂) hingegen diffundiert frei durch das Lungengewebe gegenläufig 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

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.

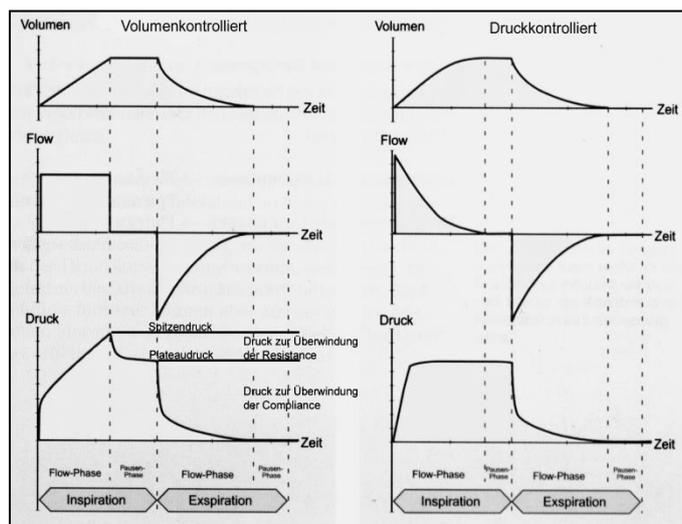


Abb. 6 Volumen-, Flow- und Druckdiagramm bei volumen- und druckkontrollierter Beatmung

2.7 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 ($T_{\text{insp}}:T_{\text{exp}}$). Bei einer Atemfrequenz (AF) von 12–15/Min gilt ein I:E Verhältnis von 1:1,5 bis 1:2 als physiologisch.

Beispiel:

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

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.

Flowtrigger

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

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

Standarteinstellung: 5l/min

Drucktrigger

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

Standarteinstellung: -1mbar

Unter Triggerlatenzzeit versteht man die 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 (Exspiratorische 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, Pmax; Ppeak

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.

Extrinsischer PEEP

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

Intrinsischer PEEP

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

Druckanstiegsgeschwindigkeit

Flowanstieg, Flowakzeleration, Insp. Anstiegszeit, P-Rampe

Die Druckanstiegsgeschwindigkeit ist bei präklinischen Notfallrespiratoren nicht einstellbar.

Die meisten Intensivrespiratoren verfügen über die Möglichkeit den Druckanstieg zu regulieren, d.h. über einen Druckanstiegsregler kann bestimmt werden, wie schnell die Druckunterstützung und das obere Druckniveau bei druckregulierter und druckkontrollierter Beatmung vom PEEP-Niveau auf den jeweils eingestellten Druck ansteigen sollen. Durch eine geringe Verzögerung von 0,05–0,2 Sekunden kommt es zu keinem abrupten Druckanstieg und Strömungswiderstände (Luftverwirbelungen) können reduziert werden. Ein leicht verzögerter Druckanstieg ermöglicht dem Patienten unter Spontanatmung ein angenehmeres Atmen, weil die Druckunterstützung nicht ruckartig aktiviert wird.

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

Inspiratorische Flussgeschwindigkeit

Inspiratorischer Flow, Peakflow

Die inspiratorische Flussgeschwindigkeit ist bei präklinischen Notfallrespiratoren i.d.R. nicht einstellbar. Die vom Anwender vorzugebende inspiratorische Flussgeschwindigkeit bestimmt wie schnell das inspiratorische Atemgas unter volumenkontrollierter Beatmung vom Respirator verabreicht wird. Mittlere Einstellung: 30–50 l/min.

Je schneller das Atemgas verabreicht wird, desto kürzer kann die Inspirationszeit gewählt werden. Auch der Spitzendruck nimmt mit Zunahme der Flussrate zu.

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

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!

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

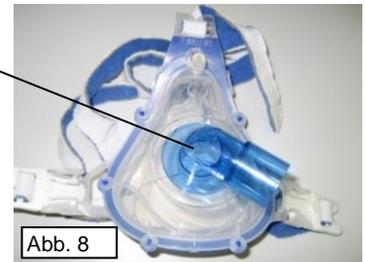


Abb. 8

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

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



Abb. 10

Leckage

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

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



Abb. 12

Total face mask Fa Respironics (vented CPAP – integrierte Leakage 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

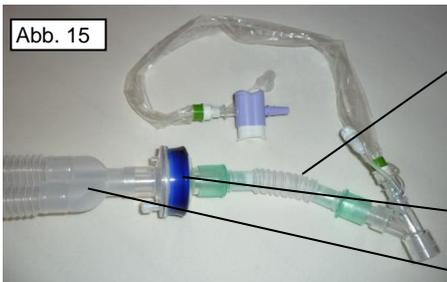


Abb. 15

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 (BIPAP, BIPAP_{Assist}, 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 (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