

GRUNDLAGEN DER AUßERKLINISCHEN BEATMUNG



Version
Januar 2024

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)
Fachkrankenpfleger für Anästhesie und Intensiv**

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



PULMONARY
SURVIVAL
TRAINING
NETWORK

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| 1. Grundlagen - Anatomie und Physiologie des Respirationstraktes | 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 |
| Ventilation | 8 |
| 1.8 Pulmonaler Gasaustausch - Oxygenierung..... | 9 |
| Blutgasanalyse (BGA)..... | 10 |
| 2. Der tracheotomierte Patient | |
| 2.1 Geschichte..... | |
| 2.2 Techniken der Tracheotomie und Begriffserklärung | |
| 2.4 Indikationen und Komplikationen | |
| 2.5 Komplikationen der Tracheotomie | |
| 2.6 Trachealkanülenarten | |
| 2.7 Pflege des tracheotomierten Patienten | |
| 2.7.1 Endotracheales Absaugen..... | |
| 2.8 Auswirkungen der Tracheotomie auf den Patienten..... | |
| 2.8.1 Sprechkanüle und Sprechaufsatz (Ventil) | |
| 2.9 Befeuchtung / Erwärmung der Atemgase–Atemgasklimatisierung..... | |
| 3. Allgemeine Überwachung der Beatmung | 107 |
| 3.1 Überwachung der Atmung | |
| 3.2 Überwachung der Trachealkanüle | |
| 3.3 Überwachung des Respirators..... | |
| Grundeinstellung der Beatmung und Alarmparameter | |
| 3.4 Überwachung der Oxygenierung mit der Pulsoxymetrie - SpO ₂ | |
| 3.5 Überwachung der Ventilation mit der Kapnometrie – etCO ₂ | |
| 4. Die außerklinische Beatmung | 20 |
| 4.1 Verschiedene Formen der außerklinischen Beatmung..... | |
| 4.2 Unterschiede und Anwendungsindikationen von Respiratoren..... | |
| 4.3 Indikationen zur außerklinischen Beatmung..... | |
| 4.4 Masken und Systeme | |
| 4.4.1 Vollgesichtsmasken - full face mask | |
| 4.4.2 Vollgesichtsschalen – total face mask | |
| 4.4.3 Beatmungssysteme | |
| 5. Prinzipien der Beatmung über Tracheostoma | 22 |
| 5.1 Voraussetzungen für die außerklinische Beatmung | |
| 5.2 Ausstattung in der außerklinischen Beatmung | |
| 6. Klassifizierung und Steuerung der Beatmungsformen | 24 |
| 6.1 Atemtyp | |
| 6.2 Steuerung | |
| 6.3 Spontane Beatmungsverfahren – SPN - PSV | |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 6.3.1 | Druckanstiegsgeschwindigkeit | |
| 6.3.2 | Atemwegswiderstand beim Beatmungspatienten | |
| 6.4 | Volumenkontrollierte Beatmung - VCV | |
| 6.5 | Druckkontrollierte Beatmung - PCV | |
| 7. | Respiratorisches Alarm- und Notfallmanagement | 30 |
| 7.1 | Alarm „Druckuntergrenze / Atemwegsdruck tief / Diskonnektion / Leckage hoch“ | |
| 7.2 | Alarm „Beatmungsdruckobergrenze / Atemwegsdruck hoch“ → in der Regel bei VCV | |
| 7.3 | Alarm „Atemzugvolumen tief / MV tief“ → in der Regel bei PCV | |
| 7.4 | Alarm „Leckage tief“ oder „Rückatmung“ | |
| 7.5 | Alarm „Atemfrequenz zu hoch“ | |
| 7.6 | Fehllage der Trachealkanüle | |
| | Exemplarische Übersichtstabelle der Sofortmaßnahmen bei respiratorischen Zwischenfällen unter maschineller Beatmung | |
| 8. | Herz-Lungen Wiederbelebung (Guideline 2021) | 34 |
| 8.1 | Diagnostischer Block | |
| 8.2 | Herzdruckmassage | |
| 8.3 | Beatmung | |
| | Abkürzungen | |
| | Begriffserläuterungen | |
| | Literaturverzeichnis | |

1. Grundlagen - Anatomie und Physiologie des Respirationstraktes

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. Diaphragma) als stärkster Muskel des Atemapparates.

1.2 Die oberen Atemwege

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

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

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

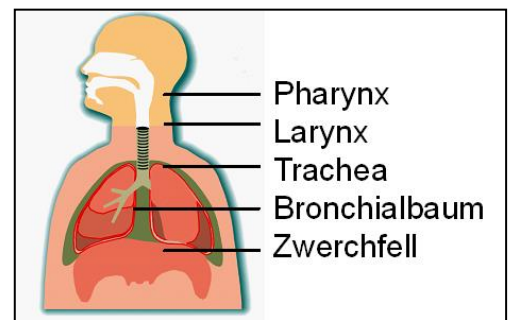


Abb. 1: Der Respirationstrakt

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.

Bei Kindern wird in der Regel bis zum 8-10. Lebensjahr 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. Ein tiefes Absaugen ist in der außerklinischen Beatmung selten sinnvoll. 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. In der außerklinischen Beatmung ist das Verwenden von Standardabsaugkathetern ausreichend. Diese werden ohne Sog eingeführt und sind günstiger.

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.

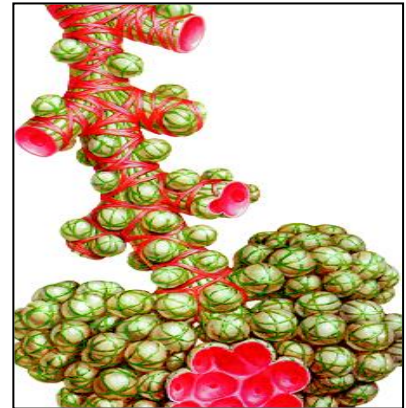


Abb. 2: Der Bronchialbaum und die Alveolen

1.3.1 Flimmerepithel

Die Trachea und die Bronchien sind von einer Schleimhaut und dem darauf sitzenden 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 Lipoproteinfilm 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.

Bei Frühgeborenen mit ungenügender Lungenreife ist der Surfactant nicht vollständig ausgebildet. Die Lungenreife kann mit Kortison positiv beeinflusst werden.

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 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 ($R = \text{Resistance}$) entgegen. Je kleiner der Durchmesser des Atemweges, desto größer wird die Resistance. Die Resistance wird in mbar/l/s angegeben. Die Resistance wird definiert als das Verhältnis der treibenden Druckdifferenz ($\Delta P = \Delta P$) zwischen Atmosphäre und Alveolen und dem pro Zeiteinheit durchströmenden Atemgasvolumen ($\text{Flow} = \dot{V}$).

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

Normwert:

Erwachsene: 1-2 mbar/l/s - unter maschineller Beatmung mit Trachealkanüle 6-10mbar/l/s

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

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

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

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

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

1.5.2 Compliance

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

Die Compliance wird in ml/mbar angegeben.

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

Normwert: für **Lunge und Thorax**

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

Die Compliance verschlechtert sich bei Erkrankungen des Lungenparenchyms wie z.B. bei Pneumonie, ARDS oder beim Lungenödem.

1.6 Die Atemmuskulatur

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

Unter Atemnot 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

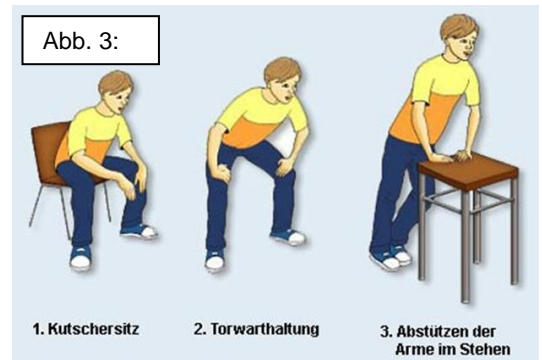
- äußere Zwischenrippenmuskeln = Musculus intercostalis externus
- Musculus scalenus
- Rippenheber-Muskel = Musculus levator costarum
- Sägemuskeln = Musculi serratus
 - hinterer oberer Sägemuskel = Musculus serratus posterior superior
 - hinterer unterer Sägemuskel = M. serratus posterior inferior
 - vorderer Sägemuskel = Musculus serratus anterior
- Kopfnicker / Kopfwender = Musculus sternocleidomastoideus
- großer und kleiner Brustmuskel:
 - M. pectoralis minor (klein) und major (groß)

Bei Asthma (bei Erwachsene & Kinder) und COPD (bei Erwachsenen) nennen sich solche atemerleichternden Körperstellungen Kutschersitz oder Torwartstellung. Letztendlich geht es darum durch abstützen der Arme Gesicht 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 dadurch 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

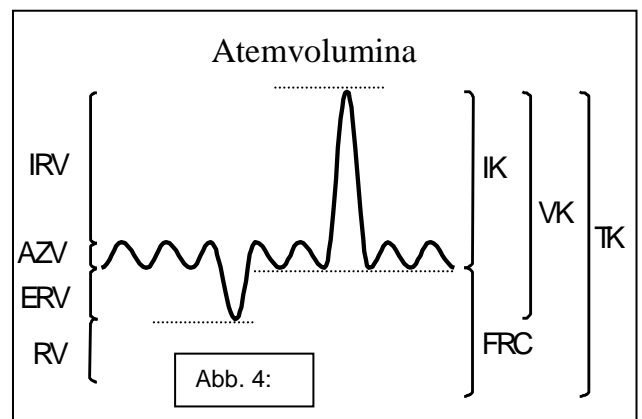
Luftmenge, die nach einer normalen Inspiration zusätzlich eingeatmet werden kann (ca. 2500-3000ml)

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 die FRC wird verhindert, dass die Alveolen in der Expiration kollabieren und durch die verbleibende Luft in den Alveolen ein Gasaustausch auch während der Expiration stattfindet.

Ventilation

Unter **Ventilation** versteht man das Ein- und Ausatmen des Atemgases. Die Ventilation umfasst das gesamte Atemzugvolumen. Durch die Ventilation wird Kohlendioxid (CO_2) abgeatmet. Wenn das $PaCO_2$ (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 CO_2 abzuatmen nicht die Ventilation, sondern die alveoläre Ventilation (Tab. 1).

Parameter der Ventilation unter Spontanatmung:

Erwachsener (70 kg):

| | | |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Atemfrequenz: | f | 12 - 20/min |
| Atemzug- oder Tidalvolumen: | AZV (V_t) | 400 - 600ml (ca. 7ml/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) | = Alveolares Volumen |

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) | = Alveolares Volumen |

Volumen das nicht am Gasaustausch teilnimmt nennt man Totraum.

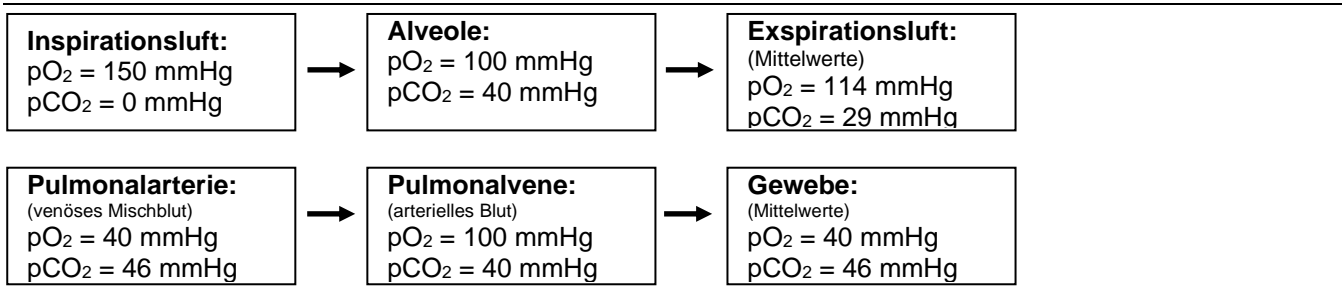
1.8 Pulmonaler Gasaustausch - Oxygenierung

Der pulmonale Gasaustausch findet in den Alveolen statt. Sauerstoff (CO_2) aus der eingeatmeten Alveolarluft diffundiert in das Lungenkapillarblut und Kohlendioxid diffundiert in die Alveolarluft. Gase diffundieren vom Ort der höheren Konzentration zum Ort mit der niedrigeren Konzentration. Die Aufnahme von Sauerstoff durch die Alveole nennt man **Oxygenierung**. 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 760mmHg.

Unsere Atemluft besteht aus einem Gemisch aus mehreren Gasen:

| | | | |
|----------------------|---|------------|----------|
| Stickstoff (79%) | → | p_{N_2} | 600 mmHg |
| Sauerstoff (20,9%) | → | p_{O_2} | 152 mmHg |
| Kohlendioxid (0,04%) | → | p_{CO_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.



Tab. 2

Blutgasanalyse (BGA)

Bei der Blutgasanalyse erfolgt die Messung der Partialdrücke der Atemgase im arteriellen oder kapillaren Blut. Zusätzlich werden der pH-Wert und das Standardbikarbonat (HCO₃) des Blutes bestimmt. Anhand der BGA erfolgt in der Klinik die Einstellung des Heimbeatmungsgerätes. Anstatt das arterielle O₂ zu messen, um die Oxygenierung zu beurteilen, gibt in der Heimbeatmung das Pulsoxymeter über die Oxygenierung Auskunft. Sättigungswerte ≤ 90 % gelten grundsätzlich als therapiebedürftig.

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

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

| 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

3. Allgemeine Überwachung der Beatmung

3.1 Überwachung der Atmung

Folgende Kriterien eignen sich zur Überwachung und zur Beurteilung der Atmung:

Atemfrequenz, Heben und Senken des Brustkorbes, Zyanose (Blaufärbung der Haut, insbesondere der Lippen)

Wenn eine Störung auftritt, wird das Augenmerk immer zuerst auf den Patienten gerichtet. Bei Störungen der Beatmung bzw. des Beatmungsgerätes, bei denen die Beatmung nicht mehr sichergestellt werden kann, muss der Patient unmittelbar und ohne Zeitverlust (z.B. durch Fehlersuche) vom Beatmungsgerät diskonnektiert werden und mit dem Beatmungsbeutel beatmet werden.

Sicherstellung der Atmung bzw. Beatmung

Die Beatmung ist dann nicht mehr sichergestellt, wenn

- kein eindeutiges Heben und Senken des Brustkorbes zu erkennen ist.
- auskultatorisch kein Atemgeräusch hörbar ist.
- eine Zyanose zu erkennen ist – SpO₂ stark abfällt.
- der Patient auffällig unruhig (evtl. hohes CO₂ im Blut) oder auffällig ruhig wird (sehr hohes CO₂ im Blut).

Eventuell kann der Patient auch für kurze Zeit am Beatmungsbeutel oder der feuchten Nase spontan atmen. Bei ausgeprägter Atemnot ist an die Zugabe von 3-5 l/min Sauerstoff (beim Kind 1-3 l/min) über Beatmungsbeutel oder feuchte Nase und die Überwachung der SpO₂ zu denken.

3.2 Überwachung der Trachealkanüle

Störungen durch die Trachealkanüle können dann auftreten, wenn

- die Kanüle mit zähem Sekret verlegt ist.
- die Kanüle herausrutscht.
- die Kanüle falsch liegt.
- der Cuff der Kanüle die Luftröhre mangelhaft auskleidet und dadurch eine große Leckage entsteht.
- die Leckage bei Kanülen ohne Cuff zu groß wird.

Bei sehr großer Leckage z.B. wenn der Cuff die Luftröhre mangelhaft auskleidet, fließt die Einatemluft größtenteils nicht in die Lunge, sondern Richtung Mund. Beim Herausrutschen der Kanüle hat der Patient evtl. zumindest kurzfristig die Möglichkeit selbst weiter zu atmen. Bei einer kompletten Verlegung ist dies nicht mehr möglich. Mögliche Zwischenfälle mit Trachealkanüle siehe 6.4.

3.3 Überwachung des Respirators

Die Routineüberwachung des Respirators umfasst eine regelmäßige Überprüfung der Respiratoreinstellung und Alarmgrenzen. Darüber hinaus muss in bestimmten Zeitintervallen eine Funktionsprüfung des Respirators entsprechend den Empfehlungen des Herstellers durchgeführt werden. Auf eine lückenlose und regelmäßige Dokumentation der Respiratoreinstellung, Alarmgrenzen und vorgenommener Veränderungen bezüglich der Beatmung ist zu achten.

Grundeinstellung der Beatmung und Alarmparameter

Exemplarisch für einen 70kg schweren Patienten. Die tatsächliche Einstellung der Beatmung mit den dazugehörigen Alarmparametern muss individuell an den Patienten angepasst werden. Die individuelle Einstellung erfolgt generell in der Klinik vor Entlassung des Patienten. In regelmäßigen Abständen erfolgt meist eine Wiedervorstellung des Patienten in der Klinik bei der auch die Beatmungseinstellung gegebenenfalls an die aktuelle Situation angepasst wird.

Grundeinstellung: Volumenkontrollierte Beatmung (VCV) und druckkontrollierte Beatmung (PCV)

VCV - SIMV oder A/C

PCV – BiLevel, BiPAP, P-SIMV, P-IPPV

70 kg ideales Körpergewicht

| | |
|--------------------------|---------------------|
| VCV - AZV (7-8 ml/kgKG) | 500-600 ml |
| PCV – oberes Druckniveau | 20-25 mbar |
| AF | 12-15 /min |
| Flussgeschwindigkeit | 35-45 l/min |
| Inspirationszeit | 1,3-1,6 sec |
| I:E | 1:1,5-1:2,5 |
| PEEP | 5-7 mbar |
| Druckanstiegszeit | 0,1-0,2 sec |
| Druckunterstützung | 7-15 mbar über PEEP |

20 kg ideales Körpergewicht

| |
|-------------|
| ~ 150 ml |
| 18-25 mbar |
| 15-25/min |
| 25-40l/min |
| 0,5-1,0 sec |
| 1:1,5-1:2,5 |
| 3-5 mbar |
| 0,1-0,2 sec |
| 4-10 mbar |

Alarmparameter:

| | | |
|-------------------------|----------------|----------------|
| obere Druckgrenze: | 35 mbar | 25 mbar |
| oberes Minutenvolumen: | 10 l/min | 4 l/min |
| unteres Minutenvolumen | 5 l/min | 2 l/min |
| obere Atemfrequenz: | 30 /min | 35/min |
| unteres Atemzugvolumen: | 300 ml | 80 ml |
| Diskonnektion: | 8 mbar / 5 sec | 5 mbar / 5 sec |
| Apnoezeit: | 30 sec | 15 sec |

3.4 Überwachung der Oxygenierung mit der Pulsoxymetrie - SpO₂

Durch den Einsatz des Pulsoxymeter kann ermittelt werden wie viel Prozent des Hämoglobins mit Sauerstoff gesättigt ist. Der Normwert beim lungengesunden Erwachsenen beträgt 96 – 98 %. Beim Kind ~ 98%. Die SpO₂ 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 SpO₂ beim Patienten empfiehlt sich:

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

Die Sauerstoffsättigung kann z.B. verbessert werden durch Absaugen des Patienten, Gabe von Sauerstoff, PEEP-Erhöhung und Verlängern der Inspirationszeit.

Mögliche Ursachen einer schlechten SpO₂

- Sekretansammlung im Bronchialsystem
- längere Atempause z.B. beim Absaugen oder Transfer aus dem Bett in den Sessel
- pulmonale Erkrankungen wie z. B. Pneumonie, Lungenödem, Pleuraergüsse, Atelektasen, Pneumothorax usw.
- Beim Kind: angeborene Herzfehler (offener Ductus Botalli, föllotsche Tetralogie)
- Fehlmessung

Grundsätzlich ist es sinnvoll Änderungen der Respiratoreinstellung nur in einer speziellen Fachklinik vorzunehmen. Änderungen der Respiratoreinstellungen im außerklinischen Bereich nur in enger Absprache und unter Vorlage eines Therapieplanes einer zuständigen Fachklinik oder niedergelassenen Facharztes vornehmen. Änderungen werden nur von autorisiertem speziell geschultem Fachpersonal vornehmen. Änderungen der Respiratoreinstellungen im außerklinischen Bereich sind nur selten sinnvoll und notwendig. Der Wechsel des Respiratortyps (nicht eines gleichen identischen Respirators) muss in der Klinik erfolgen. Die Sauerstoffgabe erfolgt nach Anordnung.

3.5 Überwachung der Ventilation mit der Kapnometrie – etCO₂

Die Kapnometriemessung zeigt, ob die Menge an eingeatmeter Luft pro Minute ausreichend ist. Das gemessene Produkt ist das Gas Kohlendioxid (CO₂) Durch die speziell vorhandene Messküvette wird das CO₂ in der Ausatmung gemessen. Die Küvette wird zwischen Tubusverlängerung und Ausatemventil in das System eingefügt. Kohlendioxid ist ein Abbauprodukt, das durch den Verbrauch von Sauerstoff im Stoffwechsel anfällt und durch die Atmung ausgeschieden wird. Wenn das Atemminutenvolumen des Patienten absinkt, erhöht sich der in der Ausatmung gemessene Kohlendioxidwert (etCO₂). Demzufolge muss dann die Atemfrequenz oder das Atemzugvolumen (AZV) gesteigert werden. Wenn das AZV der Normeinstellung entspricht, sollte die Erhöhung der Atemfrequenz bevorzugt werden. Der Normwert des gemessenen etCO₂ beträgt 30-35mmHg. Nach einer Korrektur der Einstellung dauert es ca. 15-20 Minuten bis der etCO₂ Wert auf die Veränderung reagiert. Nach dieser Zeit kann eine weitere Korrektur vorgenommen werden. Bei leichten Abweichungen vom Normwert (z.B. von 3-5mmHg) reicht i. d. R. eine Veränderung der Atemfrequenz von 1-2/min aus. Bei Atemnot sollte eine Messung des etCO₂ erwogen werden. Die Messküvette wird in regelmäßigen Abständen entsprechend der Gebrauchsanweisung abgeglichen (Nullabgleich). Das etCO₂ kann nur mittels der Kapnometrie und nicht mit der Oxymetrie (SpO₂) ermittelt werden. Es kann durchaus vorkommen, dass die Sauerstoffsättigung im Normbereich ist, der etCO₂ aber nicht.

Ursachen für ein zu hohes etCO₂

- zu niedrig eingestellte Atemfrequenz oder Atemzugvolumen
- bei körperlicher Anstrengung
- Lungen und Herzerkrankungen
- bei Fieber
- Fehlmessung

Ursache für ein zu niedriges etCO₂

- Atemfrequenz oder Atemzugvolumen ist zu groß eingestellt
- Fehlmessung

Grundsätzlich ist es sinnvoll Änderungen der Respiratoreinstellung nur in einer speziellen Fachklinik vorzunehmen. Änderungen der Respiratoreinstellungen im außerklinischen Bereich nur in enger Absprache und unter Vorlage eines Therapieplanes einer zuständigen Fachklinik oder niedergelassenen Facharztes vornehmen. Änderungen werden nur von autorisiertem speziell geschultem Fachpersonal vornehmen. Änderungen der Respiratoreinstellungen im außerklinischen Bereich sind nur selten sinnvoll und notwendig. Der Wechsel des Respiratortyps (nicht eines gleichen identischen Respirators) muss in der Klinik erfolgen. Die Sauerstoffgabe erfolgt nach Anordnung.

Exemplarische Übersichtstabelle der Sofortmaßnahmen bei respiratorischen Zwischenfällen unter maschineller Beatmung

| Alarmzustand | Ursache | Maßnahmen |
|--|--|--|
| Atemzugvolumen tief MV tief“ i.d.R bei PCV | Verlegung der Atemwege durch Trachealsekret | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beobachtung und Sicherstellung der Atmung des Patienten ggf. Patient an Beatmungsbeutel nehmen ▪ Eventuell vorhandenes Trachealsekret absaugen ▪ Lagekontrolle der Trachealkanüle ▪ Beatmungsschläuche auf Abknickungen überprüfen ▪ Ggf. HME-Filter wechseln |
| | Fehllage der Trachealkanüle | |
| | Beatmungsschlauchsystem ist abgeknickt | |
| | Beatmungsprobleme des Patienten (pressen gegen den Respirator) oder Lagerungsveränderungen | |
| | Leckage beim Doppelschlauchsystem | |
| Beatmungsdruck-obergrenze Atemwegsdruck hoch i.d.R bei VCV | Verlegung der Atemwege durch Trachealsekret | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beobachtung und Sicherstellung der Beatmung; ggf. Patient an Beatmungsbeutel nehmen ▪ Eventuell vorhandenes Trachealsekret absaugen ▪ Lagekontrolle der Trachealkanüle und evtl. wieder richtig platzieren ▪ Beatmungsschläuche auf Abknickungen überprüfen ▪ Brusteinengende Faktoren entfernen; Ggf. Beatmungssystem wechseln |
| | Fehllage der Trachealkanüle | |
| | Beatmungsschlauchsystem ist abgeknickt | |
| | Beatmungsprobleme des Patienten (pressen gegen den Respirator) | |
| | Ausatemventil ist blockiert | |
| Druckuntergrenze Atemwegsdruck zu tief Diskonnektion Leckage hoch | Diskonnektion der Beatmungsschläuche | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beobachtung und Sicherstellung der Beatmung, ggf. Patient an Beatmungsbeutel nehmen ▪ Beatmungssystem auf Diskonnektion überprüfen ▪ Lagekontrolle der Trachealkanüle und ggf. wieder richtig platzieren ▪ Cuffdruckkontrolle ▪ Kontrolle des Alarmparameters „Druckuntergrenze/Leckage hoch“ und ggf. richtig einstellen bzw. einstellen lassen |
| | Undichtigkeit des Systems | |
| | Trachealkanüle ist herausgerutscht Cuff der TK oder Maske ist undicht | |
| | Parameter „Druckuntergrenze oder Leckage hoch“ ist nicht korrekt eingestellt | |
| Leckage tief Rückatmung | Verlegung/Stenosierung des Ausatemventils Verlegung der gewollten Leckage beim Leckagesystem Zu sensible Einstellung des Alarmparameters | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei Stenosierung der Ausatemmöglichkeit das System wechseln ▪ Kristalle der Inhalativa können die Leckageöffnungen des Leckagesystems verringern |
| Atemfrequenz zu hoch | Erhöhter Atembedarf bei körperlicher Anstrengung und Fieber | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beobachtung und Sicherstellung der Beatmung; ggf. Patient an Beatmungsbeutel nehmen ▪ Kontrolle des Beatmungssystems überprüfen ▪ Korrektheit der Alarmfunktion überprüfen |
| | Fehltriggerung Leckage / Kondenswasser im System oder zu sensibler Triggereinstellung | |
| Fehllage der Trachealkanüle | Trachealkanüle ist herausgerutscht | <ul style="list-style-type: none"> ▪ überprüfen, ob Trachealkanüle richtig platziert ist ▪ Trachealkanüle wieder richtig platzieren |
| | Trachealkanüle liegt nicht richtig in der Luftröhre | |

