

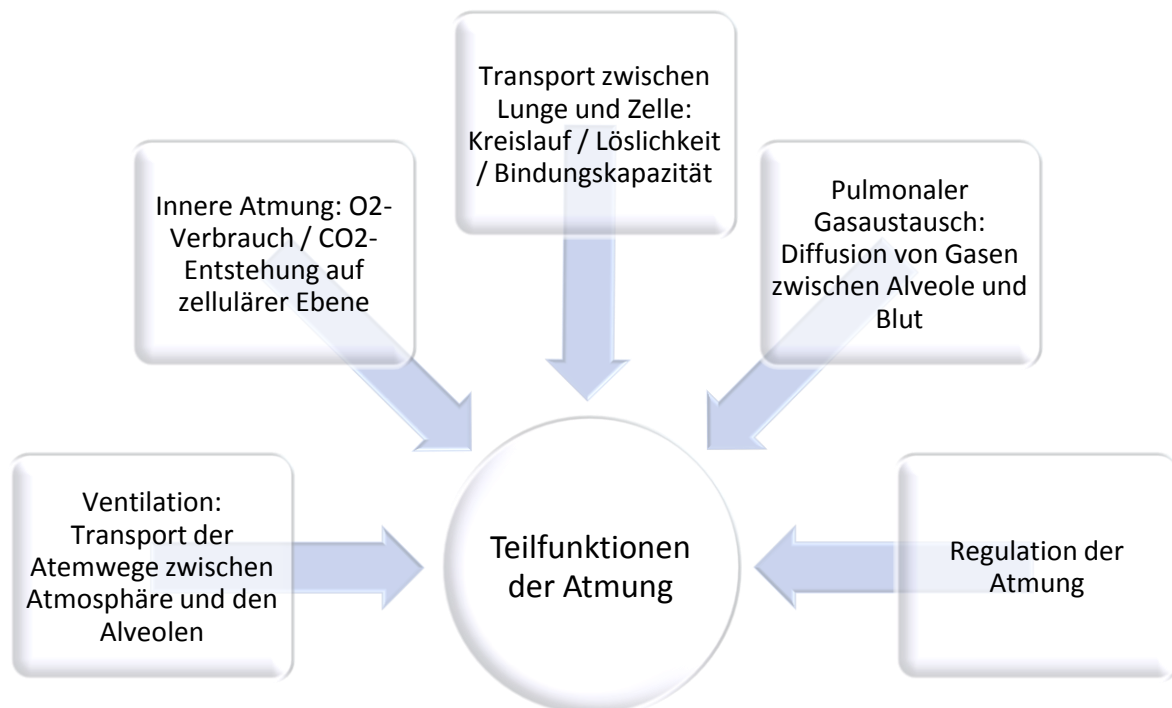
## Handbuch

## Anatomie und Physiologie Atmung

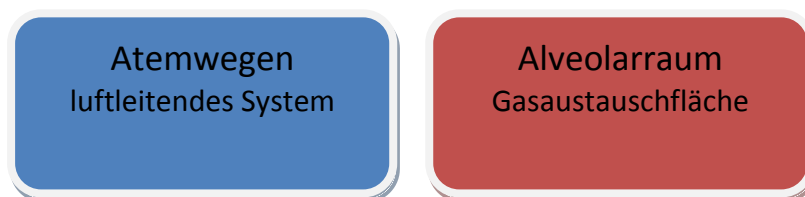
# INHALT

- 1 Physiologie der Atmung
  - 1.1 Aufgaben der Atemwege
  - 1.2 Larynx
  - 1.3 Untere Atemwege
  - 1.4 Alveolen
  - 1.5 Atemmechanik
  - 1.6 Atemmuskulatur
  - 1.7 Bronchiolen
  - 1.8 Compliance
  - 1.9 Resistance
- 2 Lungenvolumina
- 3 FRC
- 4 Totraumvolumen
- 5 Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt
- 6 Verteilung der Lungendurchblutung
- 7 Hypoxisch pulmonale Vasokonstriktion
- 8 Pulmonaler Gasaustausch
- 9 Hinweise zur Beatmung (NIV, Invasive Beatm.)

## Physiologie der Atmung



D i f f e r e n z i e r u n g   z w i s c h e n :



### Aufgaben der Atemwege:

- Transportfunktion zwischen Umgebungsluft und ca. 300 Mio. Alveolen
- Filtration eindringender Fremdkörper
- Geruchswahrnehmung
- Anfeuchtung (Alveolen zu 100% wasserdampfgesättigt = 47mmHg)
- Anwärmen der Einatemluft auf Körpertemperatur

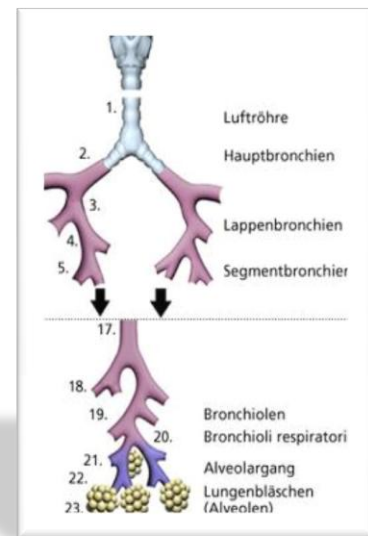
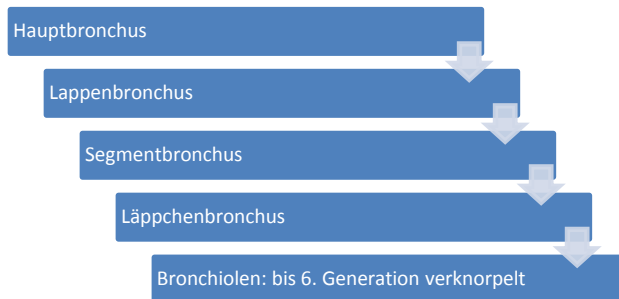
### Larynx

- Trennt zwischen extra- und intrathorakalen Atemwegen
- 2 Stimmbänder vom N. currens (aus N. vagus) innerviert

Engste Stelle im Trachealbereich bei Erwachsenen sind die Stimmbänder, bei Kindern subglottisch.

## Untere Atemwege

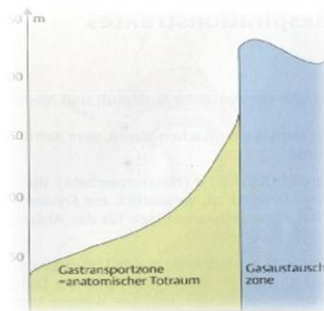
- Abgang des rechten Hauptbronchus steiler als links
  - o einseitige Intubation häufiger als rechts
  - o „blindes Absaugen“ häufiger als rechts
  - o Aspiration häufiger rechts (Oberlappen)



Kleinere Bronchiolen haben eine kräftige Muskulatur  $\Rightarrow$  maximale Bronchokonstriktion bei spastisch-obstruktiven Atemwegserkrankungen  $\Rightarrow$  Wirkort der Bronchodilatoren

**Bronchialbaum bis ca. 16. Generation**

- Luftleitendes System ohne Gasaustausch



**Bronchioli respiratorii**

- Ductus alveolaris
- Acinus mit Alveolen
- Gasaustauschfläche

## Pulmonalkreislauf = funktioneller Kreislauf

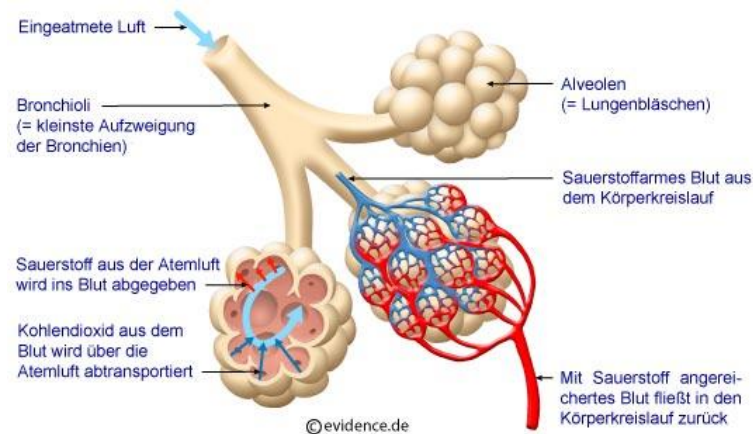
- Pulmonalarterien bringen sauerstoffarmes Blut zu den Alveolen, wo es oxygeniert wird
- Pulmonalvenen transportieren sauerstoffreiches Blut zum linken Vorhof

## Bronchilakreislauf = nutritiver Kreislauf

- Bronchialarterie aus A. thoracica versorgt Lungenparenchym und Bronchialsystem mit O<sub>2</sub> und Nährstoffen

## Alveolen

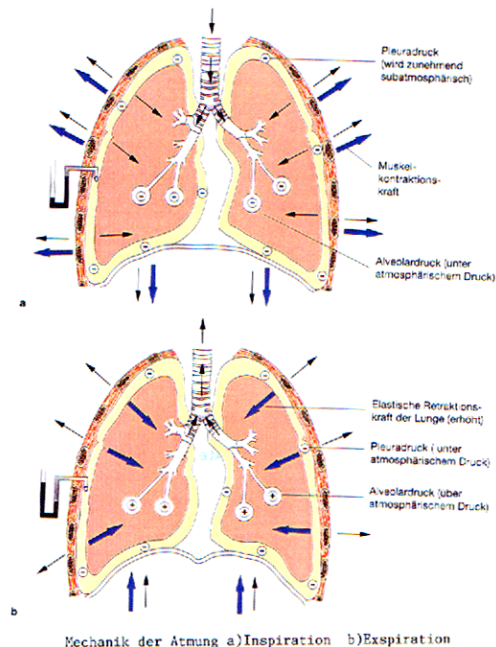
- Hauptort des Gasaustausches zwischen Luft und Blut
- Funktionseinheit von Alveolen und zu-/abführenden Blutgefäßen
- Innere Oberfläche = Gasaustauschfläche ca. 70 m<sup>2</sup>



## Oberflächenspannung in der Alveole

- Je kleiner der Durchmesser der Alveole, desto dichter ist der Surfactant angeordnet!
- Surfactant (= "Anti-Atelektase-Faktor") kleidet das Alveolarepithel aus, senkt die Oberflächenspannung und verhindert somit den endexpiratorischen Alveolarkollaps

## Atemmechanik



Inspiration:

Atmosphärischer Druck größer als Alveolardruck:  
→ Luftstrom in die Alveolen

Expiration:

Alveolardruck größer als atmosphärischer Druck:  
→ Luftstrom aus den Alveolen

## Atemmuskulatur

### Inspiration

- Hauptmuskel: Zwerchfell (Innervierung N. phrenicus, C3 und C4)
- Rippenheber: Mm. Intercostalis externi
- Atemhilfsmuskulatur:
  - Mm. Scaleni, M. sternocleidomastoideus heben obere Thoraxteile
  - M. trapezius streckt Wirbelsäule

### Expiration

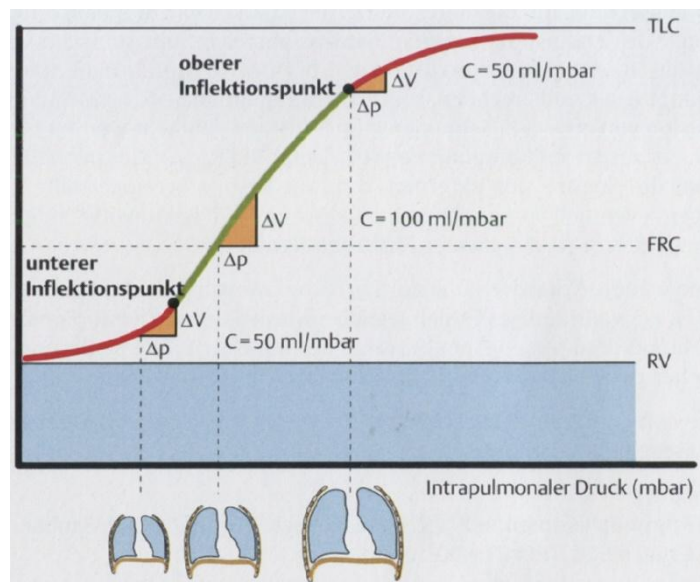
- Unter physiologischer Bedingung rein passiv (Gummibandeffekt)
- Atemhilfsmuskulatur:
  - Rippensenker: M. intercostales interni
  - Muskeln der vorderen Bauchwand wirken als Bauchpresse
  -

Bronchiolen weisen im Atemzyklus Kaliberschwankungen auf: Durchmesser in Inspiration weiter als in Expiration:



Verschließen sich die Bronchiolen unter Ausatmung, kommt es zu einer Lungenüberblähung:  
 ⇒ „air trapping“

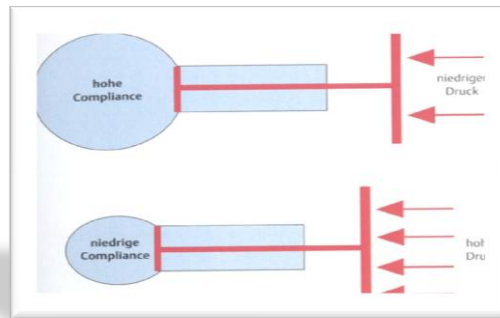
**Compliance** = die Elastizität bzw. Dehnbarkeit der Lunge



- Unterhalb des „unteren inflection point“ hohe Alveolaröffnungsdrucke
- im steilen Verlauf hohe Compliance = geringe Atemarbeit
- Oberhalb des „oberen inflection Points“ Lunge überdehnt = Barotrauma

### Ursachen für erniedrigte Compliance:

- Parenchymveränderungen: Pneumonie, Lungenödem, Fibrosen, COPD
- Volumenreduktion: Zwerchfellhochstand, Adipositas permagna, Ileus, Pneumothorax
- Surfactantstörungen: Atelektasen, alveoläres Lungenödem

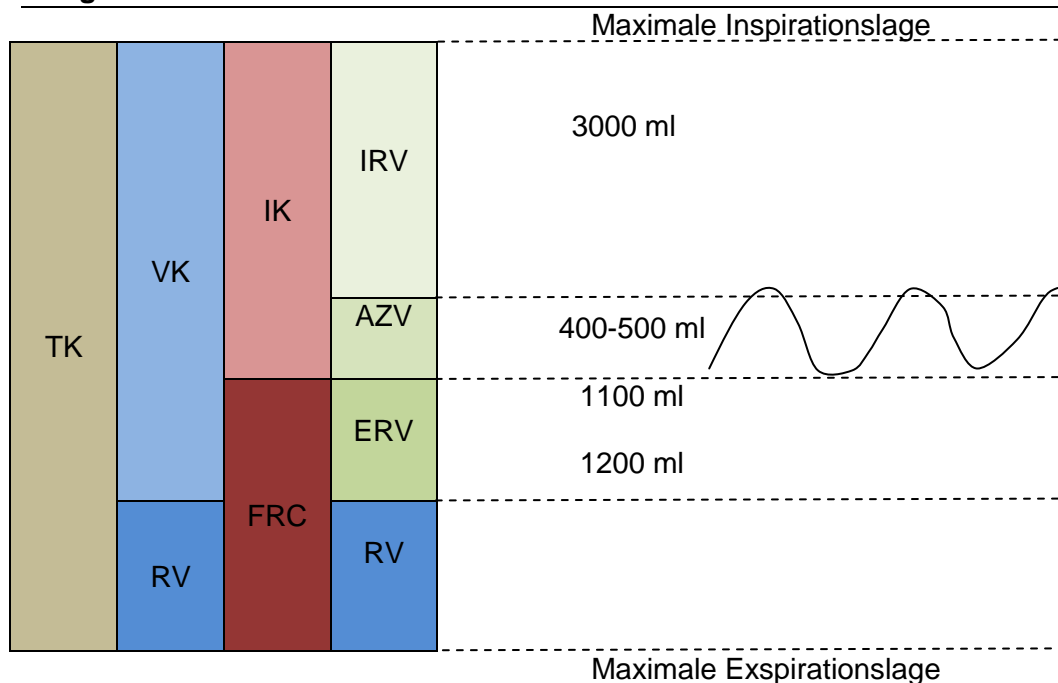


z.B. R

### Resistance

Atemwegswiderstand = Strömungswiderstand, der vom Luftstrom während der Inspiration und Expiration überwunden werden muss.

### Lungenvolumina



TK = Totalkapazität, VK = Vitalkapazität, RV = Residualvolumen, IK = Inspirationskapazität, FRC = Funktionelle Residualkapazität, IRV = Inspiratorisches Reservevolumen, AZV = Atemzugvolumen, ERV = Expiratorisches Reservevolumen

## Relevante Größen

**Atemzugvolumen (AZV):** das Volumen, das bei ruhiger Atmung ein- und ausgeatmet wird. Normalwert: ca. 0,4-0,5 Liter – entspricht 6-7 ml/kg KG

**Residualvolumen (RV):** das Volumen, das nach max. Ausatmung in den Lungen verbleibt (= nicht mobilisierbar), Normalwert: 1,5-2 Liter

**Funktionelle Residualkapazität (FRC):** das Volumen, das sich am Ende einer ruhigen Expiration in den Lungen befindet; Normalwert: 2,5-3,0 Liter (= ca. 40 ml/kg/KG) – entspricht etwa 40 % der TK

FRC ...

- ... ist im Liegen kleiner als im Stehen/Sitzen → Lagerung / Sizen im Bett
- ... verhindert Kollaps der Alveolen in Ausatmung, Grunddehnung der Lunge senkt Atemarbeit
- ... Reservoir für O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>: Permanente O<sub>2</sub>-Abgabe ins Blut möglich (auch bei Atempausen) → konstante O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub> Partialdrücke im Blut, deshalb sog. Präoxigierung)
- ... Präoxygenation vor Intubation: wäscht aus RV bzw. FRC den Luftstickstoff aus Anreicherung mit O<sub>2</sub> → Sicherheitsreserve bei schwieriger/unmöglicher Intubation

Die FRC nimmt innerhalb weniger Minuten nach Narkoseeinleitung um ca. 20-30% ab.

Ursachen:

- Höherentreten des Zwerchfells nach cranial infolge Steigerung des intraabdominellen Drucks (insbesondere Bei Adipositas, Schwangerschaft,...)
- Nachlassen des Zwerchfelltonus

Folgen:

- Verschlechterung der Oxygenierung infolge:
- Abnahme der Compliance
- Zunahme der Resistance
- Verschluss der kleinen Atemwege (Pneumonie)
- Verschlechterung des Ventilations/Perfusionsverhältnis (LE, Entz Prozesse,...)

**Therapie:**

Die Aufrechterhaltung bzw. Vergrößerung der FRC erfolgt durch Anwendung von Atemhilfe mit positivem endexpiratorischem Druck (PEEP).

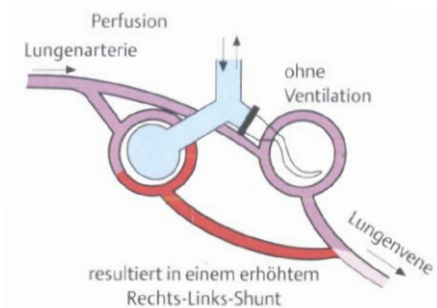


## Totraumventilation

Unter Totraum versteht man den Teil des Respirationstraktes, der nicht am Gasaustausch teilnimmt.

Dieser anatomische Totraum (NRR, Trachea, Bronchien, Bronchiolen) beträgt beim Erwachsenen etwa 150-200 ml (2ml/kg/KG)

Alveolarbezirke mit ungenügender Perfusion und überwiegender Ventilation führen zur Vergrößerung des funktionellen Totraums.



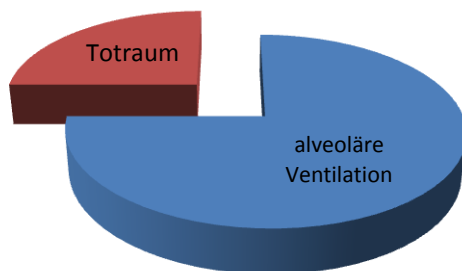
Ventilation ohne Perfusion = erhöhter funktioneller Totraum

Die alveoläre Ventilation ist die Luftmenge, die pro Minute am Gasaustausch teilnimmt. Da der anatomische Totraum mit ca. 150 ml konstant bleibt, verschlechtert sich mit zunehmender Atemfrequenz die alveoläre Ventilation.

Je schneller und oberflächlicher die Atmung abläuft, desto mehr nimmt die Totraumventilation auf Kosten der alveolären Ventilation zu. Gelingt es nicht die Totraumventilation zu reduzieren, kommt es durch Steigerung der Atemfrequenz zu einer Zunahme der Atemarbeit.

Beispiel:

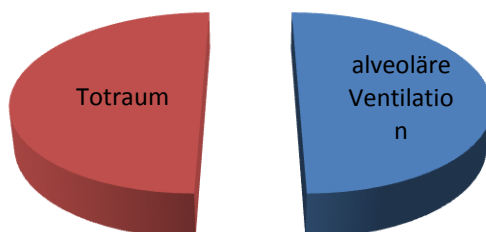
### Patient 1



AZV 600 ml/AF 10 → AMV 6 L,  
Totraumventilation 1,5 L

alveoläre Ventilation 4,5 L

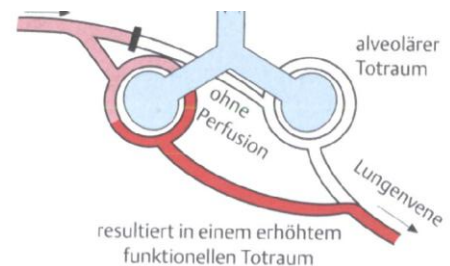
### Patient 2



AZV 300 ml/AF 20 → AMV 6 L,

Totraumventilation 3 L;

alveoläre Ventilation 3 L



## Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt

Werden Alveolen normal durchblutet, aber nicht belüftet, so wird das an den nicht belüfteten Alveolen vorbeiströmende Blut nicht oxygeniert. Somit fließt Blut durch die Lunge, welches nicht am Gasaustausch teilnimmt, d.h. es fließt vom rechten zum linken Herzen wie durch einen Kurzschluss (= intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt)

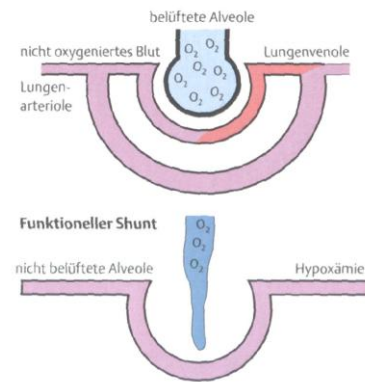
Anatomischer Shunt: Blut fließt an den Alveolen vorbei physiologisch bei Bronchial-/Pleural-/Thebesische Vv (ca. 3-5 % des HZV)

Funktioneller Shunt: Blut fließt an schlecht oder unbelüfteten Alveolen vorbei, z.B. Atelektasen, Pleuraerguß

Konsequenz: ungenügend oxygeniertes Blut aus dem Shuntareal vermischt sich mit gut oxygeniertem Blut → Resultat: arterielle Hypoxie

Die CO<sub>2</sub>-Abatmung ist nicht gestört, da CO<sub>2</sub> eine hohe Diffusionskapazität besitzt.

Ab einem Shuntanteil von ca. 30% lassen sich Shuntstörungen auch durch Erhöhung der inspiratorischen O<sub>2</sub>-Konzentration nicht wesentlich verbessern.



Kompensiert wird dies physiologisch durch sogenannte „Seufzeratmung“ (8-10 unbewußte tiefe Atemzüge pro Stunde), durch die hypoxisch pulmonale Vasokonstriktion. Die HPV reduziert den Shuntanteil, indem nicht ventilerte Lungenareale weniger durchblutet werden. Pathophysiologisch kann man die Alveolen mit einem PEEP offen halten, um so die FRC zu vergrößern und den RE-Li-Shunt zu reduzieren.

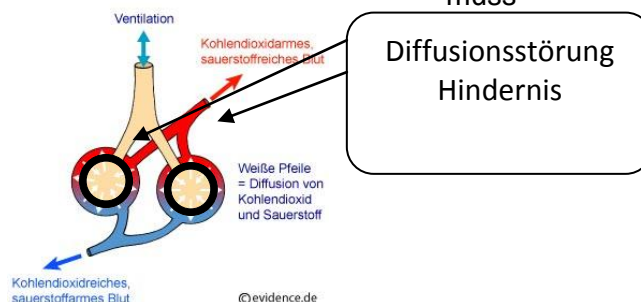
## Diffusionsstörungen

Die Diffusion von O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> erfolgt passiv aufgrund der Partialdruckgradienten.

Ursachen für Diffusionsstörungen:

- Verdickung der Alveolar- bzw. Kapillarwand (z.B. chron. Stauungslunge)
- Verkleinerung der Diffusionsfläche durch Abnahme des Alveolarraums bzw. Kapillaren (Zwerchfellhochstand)
- Verlängerung der Diffusionsstrecke (z.B. interstitielles Ödem)
- Verkürzung der kapillären Transitzeit (Tachykardie)
- Verlust von Kapillarfläche, z.B. Lungenfibrose/Emphysem

→ Belastungsdyspnoe, wenn gesteigertes HZV durch path. verkleinertes Kapillarbett fließen muss



## Verteilung der Lungendurchblutung

Die Lungenperfusion ist nicht homogen über die Lunge verteilt, sondern verändert sich schwerkraftbedingt. Oben liegende Alveolen sind weiter entfaltet, aber schlechter perfundiert als untere.

Der Gasaustausch zwischen dem Alveolarraum und dem Lungenkapillarblut ist abhängig von Ventilation, Perfusion und Diffusion. Da die alveoläre Ventilation 4-5 Liter /Minute beträgt und das Herzzeitvolumen ebenfalls ca. 5L/min, ist das Verhältnis von Ventilation zu Perfusion etwa 0,8.

$$V/Q = 0,8$$

Jede Abweichung von diesem Quotienten, entweder in Richtung 0 (intrapulmonaler Shunt) oder in Richtung  $\infty$  (Totraumventilation), bedeutet eine Beeinträchtigung des pulmonalen Gasaustausches.

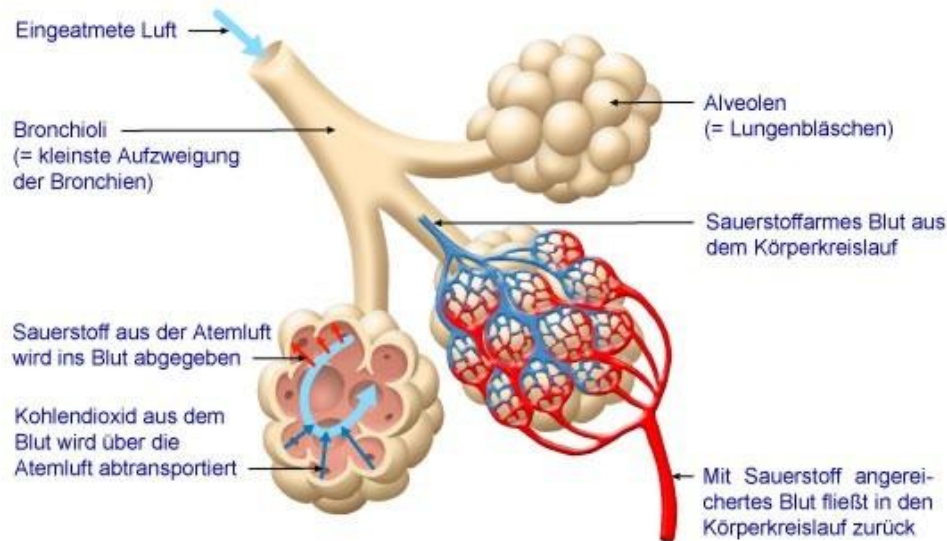
Beispiel:

Oben liegende Lungenbezirke werden besser ventiliert, aber schlechter perfundiert.

Unten liegende Lungenbezirke werden besser perfundiert, aber schlechter ventiliert.

### Pulmonaler Gasaustausch

Es funktioniert durch das Prinzip der Diffusion, d.h. der Konzentrationsausgleich erfolgt durch den Gasstrom vom Ort hoher zu niedriger Konzentration.



In einem Gasgemisch übt jedes Teilgas anteilig den Druck aus, den es im Gesamtgasgemisch anteilmäßig einnimmt.

Gesamtdruck = Summe aller Partialdrücke

Beispiel:

Gesamtdruck des Gasgemisches Luft = Summe der Partialdrücke von Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Edelgase

$P$  = Partialdruck

$F$  = fraktionelle Konzentration eines Teilgases

Zusammensetzung der Inspirationsluft (kalt und trocken)

Stickstoff 79 % ( $F_i N_2 = 0,79$ ) = 600 mmHg

Sauerstoff 21 % ( $F_i O_2 = 0,21$ ) = 159 mmHg

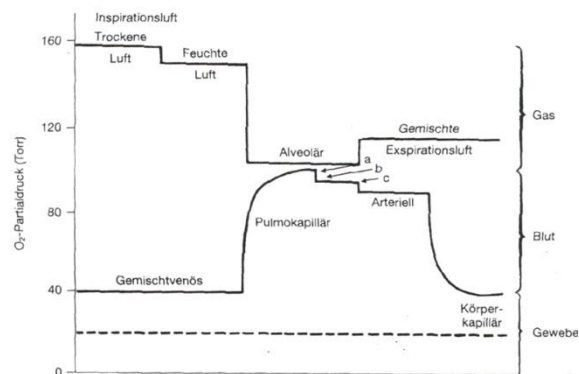
Edelgase 1 %

$CO_2$  0,03 %

Nach Aufsättigung der Inspirationsluft im NRR kommt  $p_{H_2O}$  von 47 mmHg dazu  $\rightarrow p_{O_2}$  der feuchten Luft =  $(760 \text{ mmHg} - 47 \text{ mmHg}) \times 0,21 = 713 \text{ mmHg} \times 0,21 = 149 \text{ mmHg}$

Alveolarluft:  $p_{O_2}$  ist zusätzlich durch das  $p_{CO_2}$  der Alveolen und der ständigen Diffusion vermindert:  $\rightarrow p_{O_2}$  der Alveolarluft = 105 mmHg

Expirationsluft: Mischung aus alveolärem Gas und Totraumgas → expiratorische O<sub>2</sub>-Konzentration höher als die alveoläre Konzentration



## Sauerstoffbindung

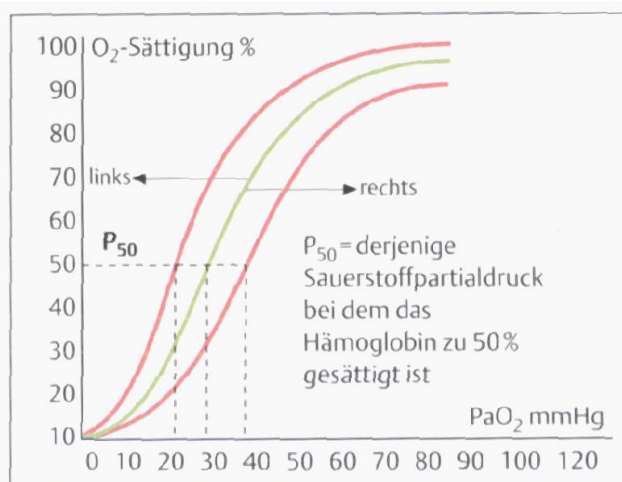
Der O<sub>2</sub>-Verbrauch in Ruhe beim Erwachsenen beträgt 3-5ml/kg/min = 200-300 ml/min  
Die CO<sub>2</sub>-Produktion in Ruhe beim Erwachsenen = 150-200 ml/min

Eine Sauerstoffsättigung von 100 % muss nicht immer erstrebenswert sein. (Insbesondere bei

### Sauerstoffbindungskurve

Sie beschreibt die Beziehung zwischen Sauerstoffpartialdruck (PaO<sub>2</sub>) und der Sauerstoffsättigung des Hämoglobins (SaO<sub>2</sub>).

- S-förmiger Kurvenverlauf
- Im steilen Bereich hohe Änderung der O<sub>2</sub>-Sättigung bei niedriger pO<sub>2</sub>-Differenz
  - o Hohe Sauerstoffbindung an Hämoglobin



Linksverschiebung der Kurve

1. pH- Wert ↑
2. pCO<sub>2</sub> ↓
3. Temperatur ↓
4. 2, 3-DPG ↓

Rechtsverschiebung der Kurve

1. pH-Wert ↓
2. pCO<sub>2</sub> ↑
3. Temperatur ↑
4. 2, 3-DPG ↑

### **Rechtsverschiebung bedeutet:**

Bei gleichem PaO<sub>2</sub> wird weniger Sauerstoff vom Hämoglobin gebunden. Allerdings wird mehr Sauerstoff aus dem Hämoglobin freigesetzt und an die peripheren Gewebe abgegeben.

Beispiele: Azidose, Hyperkapnie, Fieber

### **Linksverschiebung bedeutet:**

Bei gleichem PaO<sub>2</sub> wird mehr Sauerstoff an Hämoglobin gebunden, so dass die Sauerstoffsättigung entsprechend höher ist. Die Bindung zwischen Sauerstoff und Hämoglobin ist verstärkt, daher wird weniger Sauerstoff aus dem Hämoglobin freigesetzt. Folge: Abnahme der Sauerstoffversorgung der peripheren Gewebe!

Beispiele: Alkalose, Hypokapnie, Hypothermie

**In Bezug auf die periphere O<sub>2</sub>-Versorgung der Gewebe ist eine Azidose günstiger als eine Alkalose!**

## **Beatmungstechnik (INVASIV-NICHTINVASIV) /**

---

Ziele der Beatmung:

- Sicherstellung des pulmonalen Gasaustausches
- Invasiv: Sicherung der Atemwege / Lungentilation
- Nichtinvasive Beatmung: Atmungsunterstützung und verbesserung der Lungentilation.

**Merke:** Jede Beatmungsstrategie muss individuell auf den Patienten abgestimmt werden. Sie ist wichtiger als der Respirator, mit dem sie umgesetzt wird.

### **Wirkungen von PEEP**

---

Verbesserung der Oxygenierung (PaO<sub>2</sub> ↑) durch

- Vermeidung von endexpiratorischen Alveolarkollaps
- Offenhalten kollapsgefährdeter Lungen
- Vergrößerung der FRC
- Abnahme des intrapulmonalen Rechts-Links-Shunts
- Verbesserung des Ventilations-/Perfusionsverhältnisses

**Merke:** Bei jedem beatmeten Patienten sollte auch bei gesunder Lunge zur Aufrechterhaltung der FRC ein PEEP von 5-10 mbar eingestellt werden.

**Merke:** Die alleinige Erhöhung des PEEP-Niveaus kann zu keiner Überdehnung von Alveolen führen, da der PEEP der niedrigste Druck in der Lunge während des gesamten Atemzyklus ist!

### **Nebenwirkungen der Beatmung**

---

- Erhöhung des intrathorakalen Drucks
- Erhöhung des ZVD
- Verminderung des venösen Rückstroms zum Herzen
- Abfall des Herzzeitvolumens
- Abnahme der Organperfusion (Niere-Leber-Splanchnikusdurchblutung ↓)
- Anstieg des intracraniellen Drucks
- Steigerung des pulmonalen Gefäßwiderstandes
- Beatmungsinduzierte Lungenschäden

## Beatmungsmonitoring

Merke: Jede Respiratortherapie muss regelmäßig arterielle Blutgasanalysen überwacht werden!

- Pulsoxymetrie
- Kapnometrie
- Compliance
- Resistance
- Alarmgrenzen am Respirator
- Beatmungsparameter am Respirator