

6. Atmungssystem (ca. 3 Std.)

- obere und untere Atemwege, Lunge
- Atemmechanik, Atemmuskulatur
- statische und dynamische Ventilationsgrößen der Lunge
- Regulation der Atmung

6.1 Obere und untere Atemwege, Lunge

6.1.1 Allgemeine Grundlagen

Zum Abbau der mit der Nahrung aufgenommenen Nährstoffe und zur Gewinnung von verwertbarer Energie braucht man Sauerstoff. Dabei entstehen CO_2 und H_2O .

Die Aufnahme von Sauerstoff und die Abgabe von Kohlendioxid stehen im Mittelpunkt des Gasstoffwechsels, der Atmung genannt wird

Man unterscheidet eine

- a) äußere Atmung Lunge: Aufnahme von O_2 und Abgabe von CO_2
 b) innere Atmung Gewebs- oder Zellatmung: Aufnahme von Sauerstoff aus dem Blut in das Gewebe und Kohlendioxidabgabe ans Blut

Die Lungenatmung macht den wesentlichen Teil aus. Die Hautatmung beträgt ca. nur 2% des gesamten Gasaustausches.

6.1.2 Obere und untere Atemwege

Die Atemluft wird durch die Nase oder den Mund eingeatmet und gelangt durch die **oberen Atemwege** (Nasenhöhle, Mundhöhle, Rachen, Kehlkopf) zu den **unteren Atemwegen** (Luftröhre, Luftröhrenäste (Bronchien) und Lungenbläschen (Alveolen)), wo der Gasaustausch mit dem Blut stattfindet.

Dieser lange Weg der Außenluft bis zu den Alveolen ist nötig, damit sie **angewärmt, angefeuchtet und gesäubert** (insbesondere bei der Nasenatmung durch Flimmerhärchen und Nasenschleimhaut) werden kann. Die Lunge besteht aus zwei Flügeln, dem rechten und linken Lungenflügel.

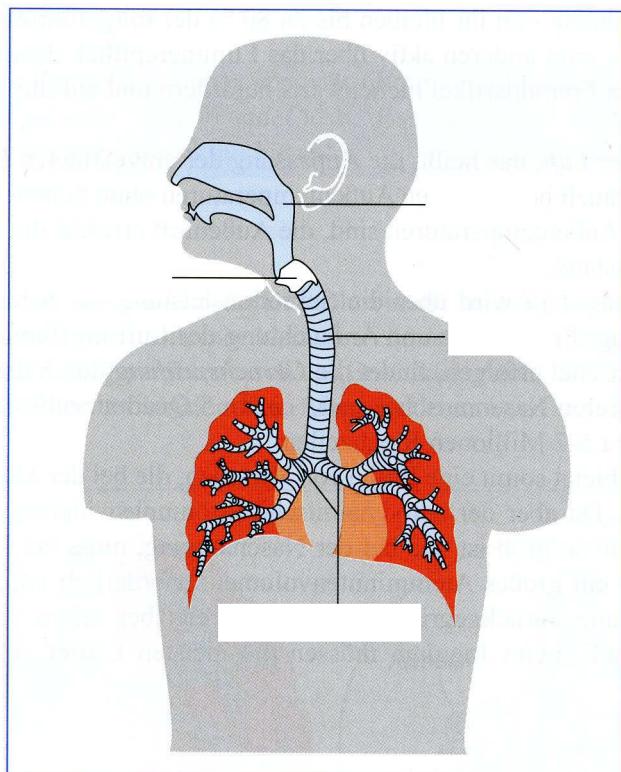


Abb. 1: Übersicht über Lage und Gliederung des Atemtraktes

6.2 Atemmechanik, Atemmuskulatur

Die Atmung erfolgt über Volumenänderungen des Brustraums. Die Lunge selbst ist ein passives Organ.

Die Lunge ist durch das Lungenfell und das Brustfell in den Thorax eingespannt. Dazwischen befindet sich ein flüssigkeitsgefüllter Gleitspalt (Pleuralspalt), in dem ständig Unterdruck herrscht. Wegen dieses Unterdrucks folgt die Lunge den Bewegungen des Brustkorbes.

Erzeugung des Luftstromes durch Volumenänderung des Brustraumes:

- **Zwerchfell** als wichtigsten Atemmuskel (**Zwerchfellatmung, Bauchatmung**)
 - Einatmung (Inspiration = aktive Vergrößerung des Brustraums) durch Kontraktion – ZF wölbt sich durch Kontraktion nach unten → Vergrößerung des Brustraums
 - Ausatmung (Exspiration = passive Verkleinerung durch Elastizität) durch Erschlaffung – ZF wölbt sich durch Erschlaffen nach oben → Verkleinerung des Brustraums
- **Atem-** (Zwischenrippenmuskulatur) und **Atemhilfsmuskulatur** (Hilfseinatmer: z.B. kleiner und großer Brustmuskel / Hilfsausatmer: z.B. Bauchmuskulatur) (**Brustatmung**) → Anheben und Absenken des Brustkorbes durch Kontraktion bzw. Erschlaffen der Atem- und Atemhilfsmuskulatur

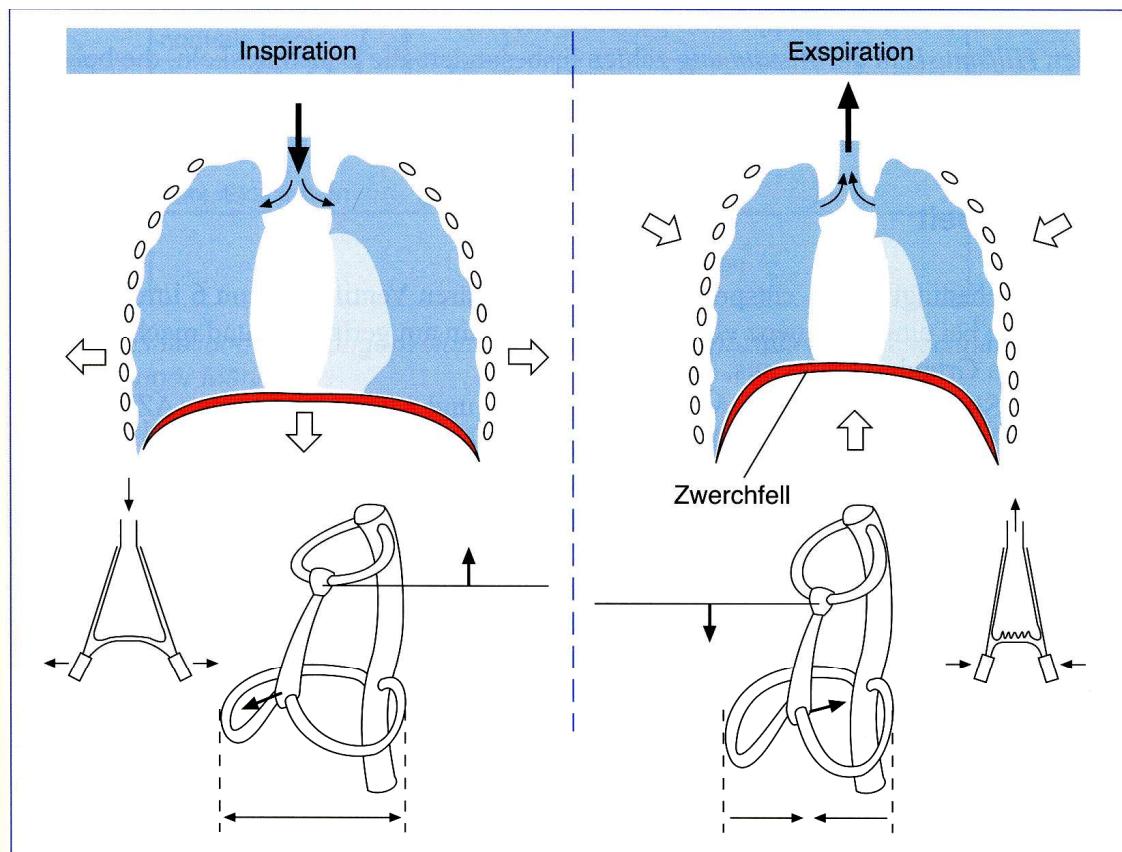


Abb. 2: Veränderung des Brustkorbes bei Inspiration und Exspiration. Nach dem Blasebalg-Prinzip zieht dabei eine Volumenvergrößerung des Brustkorbvolumens eine Einatmung, eine Volumenverkleinerung eine Ausatmung nach sich

Merke: Die an der Atmung beteiligte Muskulatur verschlingt in Ruhe etwa 1% des Gesamtumsatzes; bei schwerer körperlicher Arbeit bis zu 30%!

6.3 Statische und dynamische Ventilationsgrößen der Lunge

6.3.1 Statische Ventilationsgrößen der Lunge

Bei den statischen Ventilationsgrößen handelt es sich um Funktionsgrößen, bei denen der Zeitfaktor unberücksichtigt bleibt.

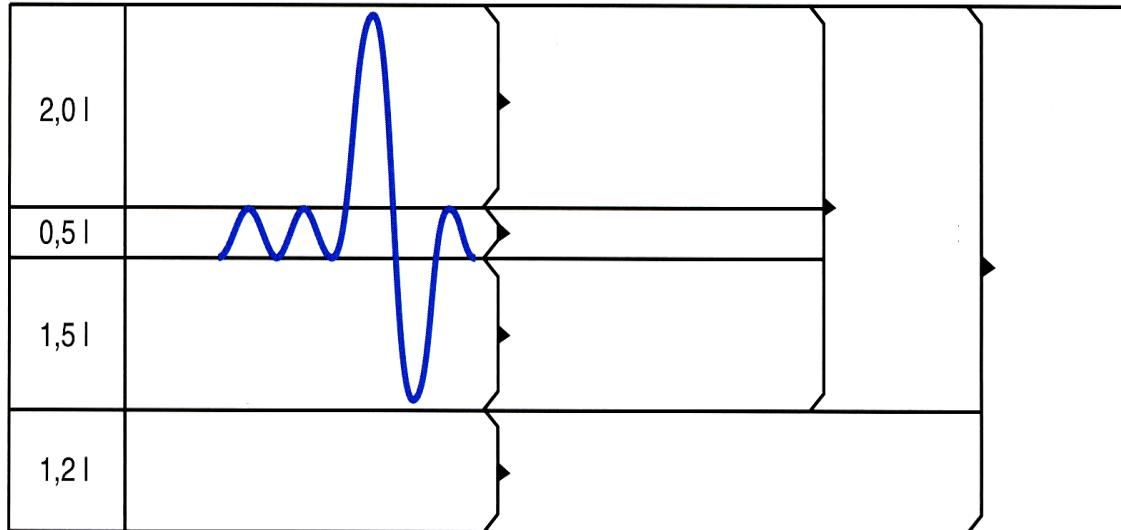


Abb. 3: Einteilung der Lungenvolumina und Lungenkapazitäten. Die Zahlenangaben beziehen sich auf die Durchschnittswerte 20- 30jähriger Männer.

Das Fassungsvermögen der Lunge schwankt von Mensch zu Mensch sehr stark und ist abhängig von der Körpergröße und dem Körpergewicht, dem Alter, der Konstitution und dem Geschlecht und nicht so sehr vom Trainingszustand.

Je nach Atemstellung unterscheidet man:

- **Atemzugvolumen** (AZV etwa 0,5l) ist das Luftvolumen, das bei einem normalen Atemzyklus ein- und ausgeatmet wird. In Ruhe beträgt es bei Erwachsenen ca. 0,5 Liter, unter Belastung kann es auf ca. 2,5 Liter ansteigen, bei ausdauertrainierten Spitzensportlern auf Werte bis um 4 Liter.
- **Inspiratorisches Reservevolumen** (IRV etwa 2l) heißt das Luftvolumen, das nach einer normalen Einatmung bei vertiefter Atmung zusätzlich eingeatmet werden kann.
- **Exspiratorisches Reservevolumen** (ERV etwa 1,5l) heißt das Luftvolumen, das man nach einer normalen Ausatmung mit Hilfe der Bauchpresse willentlich noch zusätzlich ausatmen kann.
- **Residualvolumen** (RV etwa 1,2l) heißt das Luftvolumen, das selbst bei tiefster Ausatmung noch in der Lunge zurückbleibt. Es beträgt bei gesunden Erwachsenen ca. 1,3 Liter. Weil sich die Luft im Residualvolumen immer mit der eingeatmeten frischen Luft vermischt, enthält sie noch sehr viel Sauerstoff, der deswegen während der Ausatmungsphase weiterhin in das Lungenblut übertritt, wodurch der Gasaustausch zwischen den Lungenbläschen und dem Lungenblut gleichmäßig und unabhängig von der jeweiligen Atemphase abläuft.
- Unter **Vitalkapazität** (VK etwa 4l) wird die maximale Luftmenge verstanden, die nach einem Atemzug wieder ausgeatmet werden kann. Auch wenn Ausdauersportler eine deutlich erhöhte Vitalkapazität aufweisen (bis zu 7 Litern - Untrainierte ca. 3-4 Liter/abhängig von Größe und Gewicht), so ist dies kein leistungsbestimmender Faktor. $VK = AZV + IRV + ERV$
- **Totalkapazität** (TK etwa 5,2l) heißt das Luftvolumen, das sich nach maximaler Einatmung insgesamt in der Lunge befindet. Die Totalkapazität setzt sich aus dem Residualvolumen und der Vitalkapazität zusammen. $TK = VK + RV$

6.3.2 Dynamische Ventilationsgrößen der Lunge

Bei den dynamischen Ventilationsgrößen handelt es sich um Funktionsgrößen, bei denen der Zeitfaktor eine Rolle spielt.

- Die **Atemfrequenz** (AF) beträgt beim Erwachsenen in Ruhe etwa 12 – 16 Atemzüge/min. Bei körperlicher Belastung können Atemfrequenzen von 40 – 50, bei Spitzensportlern bis zu 60 Atemzüge/min.
- Als **Atemminutenvolumen** (AMV = AF x AZV) bezeichnet man diejenige Luftmenge, die in einer Minute ein- und ausgeatmet (ventiliert) wird. Das Atemminutenvolumen ist das Produkt aus Atemzugvolumen und Atemfrequenz.
in Ruhe : $0,5 \text{ l} \times 16 \text{ Atemzüge/min} = 8 \text{ l/min}$
bei Arbeit : $2,5 \text{ l} \times 40 \text{ Atemzüge/min} = 100 \text{ l/min}$
bei Ausdauertrainierten: $4 \text{ l} \times 60 \text{ Atemzüge/min} = 240 \text{ l/min}$
- Der **Atemstoßtest** – auch 1-Sekunden-Kapazität genannt – ist das Luftvolumen, das nach maximaler Einatmung innerhalb der ersten Sekunde ausgeatmet werden kann. Bei gesunden 20-30jährigen etwa 80% der VK.
- Der **Atemgrenzwert** (AGW) drückt die globale ventilatorische Leistungsfähigkeit des Atmungssystems aus. Die Ermittlung erfolgt durch maximal schnelle und tiefe Ein- und Ausatmungen über 10 Sekunden. Bei gesunden 20-30jährigen etwa 160l/min (Männer) bzw. 110 l/min (Frauen); bei ausdauertrainierten Männern bis zu 400 l/min.
- Atemreserve** = AGW – AMV
- Das **Atemäquivalent** gilt als Hinweis für die Ökonomie bzw. den Trainiertheitsgrad eines Sportlers und berechnet sich aus:

$$\text{Atemäquivalent} = \frac{\text{AMV}}{\text{Sauerstoffaufnahme}}$$

In Ruhe beträgt das Verhältnis etwa 28:1, d.h. zur Aufnahme von einem Liter O₂ werden 28 l Luft benötigt.

Lungen- und Totraumventilation – alveolärer Gasaustausch

- Als **Totraum** (dient zur Luftreinigung) bezeichnet man die Summe all der Hohlräume, die zwar der Luftzuleitung dienen, jedoch nicht am Gasaustausch zwischen Luft und Lungenkapillarblut teilnehmen (nur etwa 2/3 der eingeatmeten Luft gelangen in die Alveolen).
- Alveoläre Ventilation** ist das pro Minute in die Alveolen gelangende Frischluftvolumen.

Merke:

Die **Atmung ist ökonomisch bei einem großen AZV und bei niedriger Atemfrequenz**. Dabei kann eine hohe alveoläre Ventilation stattfinden und die Totraumluft verringert werden.

6.4 Regulation der Atmung

Die Atmung passt sich sofort nach Belastungsbeginn durch eine Zunahme von AF und AZV an. Die Gewährleistung des notwendigen Atemvolumens obliegt dabei dem Atemzentrum im verlängerten Rückenmark und wird gesichert durch:

- chemische Reize: Blutgase (O₂ zu gering → verstärkte Atmung, CO₂ zu gering → verstärkte Atmung) und Wasserstoffionenkonzentration (pH-Wert)
- nervöse Reize: Impulse des ZNS (z. B. willkürliches Atemhalten)
- zentrale Mitinnervation: Vorstellung einer Bewegungshandlung

6.5 Exkurs:

Die Anpassung des Atmungssystems an Ausdauertraining

6.5.1 Kurzfristige Anpassung:

- Steigerung des Atemminutenvolumens

6.5.2 Langfristige Anpassung

- **Morphologische Anpassung:**
 - Vergrößerung der Lunge
 - Hypertrophie der Zwischenrippenmuskeln und des Zwerchfells → Abnahme der Neigung zu Seitenstechen = mangelnde Versorgung des Zwerchfells bei Belastung mit O₂ (→ auch Vermeiden durch Erwärmen)
- **Funktionelle Anpassung:**
 - Vitalkapazität steigt unwesentlich (bleibt bei ca. 4-5 ltr.)
 - Optimierung der Atemregulation
 - Raschere Überwindung des „toten Punkts“: toter Punkt ist die Folge mangelnder Einstellung des Körpers auf die Belastung → Missverhältnis zwischen geleisteter Muskelarbeit und momentaner Leistungsfähigkeit der vegetativen Systeme Atmung und Kreislauf - ½ bis 6 Minuten nach Belastungsbeginn) (Vermeiden durch Erwärmen)
 - Steigerung des Atemminutenvolumens durch Steigerung des Atemzugvolumens
 - Atemfrequenz in Ruhe sinkt
 - O₂ – Verbrauch der Atemmuskulatur sinkt
 - Senkung der Totraumventilation
 - Steigerung der alveolären Frischluftventilation
 - Nach einer Belastung schnellere Normalisierung der Atmung
 - Senkung des Atemäquivalents

Untrainierter

max. mögl. O₂-Aufnahme : 3 l/min
 tatsächliche O₂-Aufnahme : 3 l/min
 AMV : 90-120 l/min
 Atemäquivalent in Ruhe : 30-40

Trainierter

max. mögl. O₂-Aufnahme : 5-6 l/min
 tatsächliche O₂-Aufnahme : 3 l/min
 AMV : 75 l/min
 Atemäquivalent in Ruhe : 25

6.5.3 „Seitenstechen“ und „toter Punkt“

- „**Seitenstechen**“: mangelnde Versorgung des Zwerchfells bei Belastung mit O₂
 - Neigung zu Seitenstechen nimmt ab
- „**Toter Punkt**“: mangelnde O₂ – Versorgung in den kontrahierten Muskeln
 - Leistungskrise in den ersten ½ - 6 Minuten
 - Normalisierung nachdem der Sportler seinen inneren „Schweinehund“ überwunden hat → „zweiter Wind“ → „toter Punkt“ kann rascher überwunden werden.

Beachte: „Seitenstechen“ und der „tote Punkt“ können durch ein ausreichendes und ein disziplinspezifisches Aufwärmen vermieden werden.

6.5.4 Ausdauertraining in der Pubertät (12-16. Lebensjahr)

In der Pubertät:

- beträchtliche Hypertrophie der Alveolarfläche
- Volumen des Lungengewebes nimmt um fast 50 % zu
→ Ausbildung einer Leistungslunge und parallel dazu gesteigertes Brustkorbwachstum

Fazit: Gezielte Belastung führt zu einer Ökonomisierung des Atmungssystems und einer Senkung der energetischen Kosten bei der Atmung!

6.5.5 Atemtechniken bei sportlichen Übungen

- Bei manchen Sportarten und -übungen muss der Atemrhythmus der Struktur des Bewegungsablaufs angepasst werden. Beim Schwimmen ergibt sich z.B. eine verringerte Atemfrequenz und ein dadurch bedingtes größeres Atemzugvolumen. Eine willentliche Veränderung der automatischen „Einstellung“ von Atemfrequenz und Atemtiefe führt dazu, dass die Atmung unökonomischer wird (z. B. auch Anpassen an den Laufrhythmus des anderen Läufers)
- Jenseits eines AMV von 50l/min wird die Mundatmung ökonomischer als die Nasenatmung. Durch ein vergrößertes AMV kann so eine größere O₂-Aufnahme erreicht werden.

6.5.6 Wirkungen des Ausdauertrainings auf das vegetative Nervensystem

Mit die wichtigste Auswirkung des AT ist die Abnahme der Herzfrequenz. Sie wiederum beruht auf einer Umstellung des Vegetativums vom **sympathikotonen** (auf Leistung ausgerichtet) auf den **vagotonen** (auf Erholung ausgerichtet) Typ.

Schon nach wenigen Wochen AT sinkt der Katecholamingehalt (Sympathikusstoffe, u. a. Adrenalin) und erhöht sich der Azetylcholinspiegel (der Vagusstoff)

- ⇒ die Empfindlichkeit des Herzens gegenüber frequenzsteigernden adrenergen Reizen nimmt ab
- ⇒ durch die Herzfrequenzsenkung kommt es zu einer erheblichen Verringerung der tägl. Herzarbeit von 5.000-10.000 kpm verglichen mit 10.000-25.000 kpm beim Untrainierten

Die adrenergen Katecholamine verbrauchen viel Sauerstoff und bewirken so im Herzmuskel O₂-Mangel

- ⇒ durch Sympathikus-Hemmung wird der O₂-Verbrauch gesenkt und die Herzleistung dadurch ökonomisch verbessert.

Umrechnung:

$$1 \text{ kpm} = 9,81 \text{ J}$$

$$1 \text{ kpm} = 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ kcal}; 10.000 \text{ kpm} = 23,4 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ kpm} = 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ kwh}; 10.000 \text{ kpm} = 0,0272 \text{ kwh}$$