

2. ANATOMIE UND PHYSIOLOGIE

2.1. Atmung

Durch die Atmung wird Sauerstoff (O_2) in den Körper gebracht und Kohlendioxid (CO_2) aus ihm entfernt. Auf ihrem Weg durch Nase, Mund und Hals wird die eingeatmete Luft erwärmt, mechanisch gereinigt und angefeuchtet.

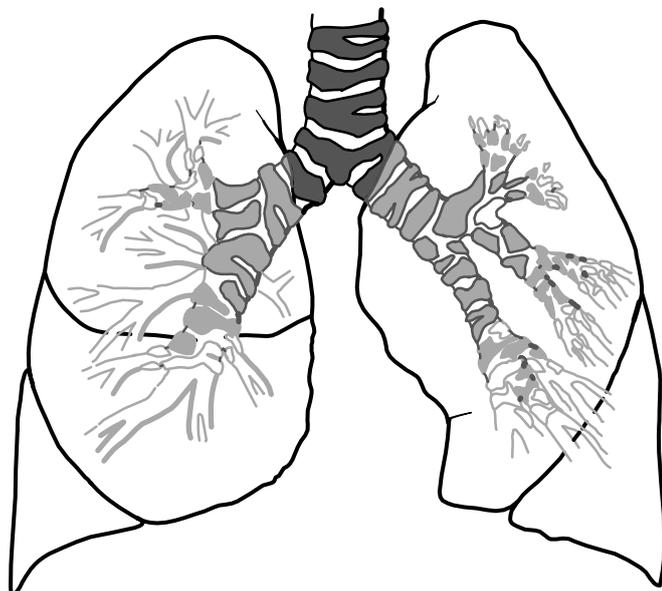
2.1.1 Atemapparat

Obere Atemwege	Nasenhöhlen oberer und mittlerer Teil des Rachens
	Kehlkopf
Untere Atemwege	Luftröhre (Trachea) ca. 12 cm lang Stammbronchien (Hauptbronchien) Bronchialbaum
Atemkammeraum	Lungenbläschen (Alveolen)

Die Stammbronchien teilen sich in der Lungenwurzel in die fünf Lappenbronchien (rechts drei, links zwei) auf. Der linke Lungenflügel besteht nur aus zwei Lappenbronchien um Raum für das Herz zu schaffen.

Aus den Lappenbronchien gehen die Segmentbronchien hervor, die sich **in immer feinere Äste (Bronchiolen) aufteilen**.

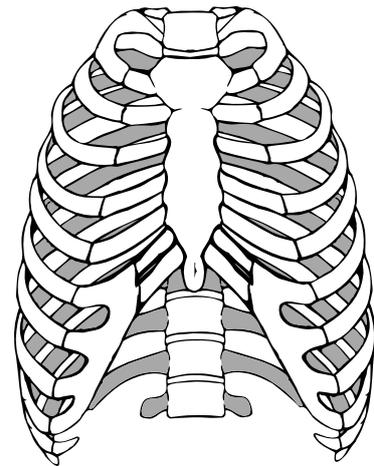
Die Bronchiolen gehen in Alveolengänge und in **Lungenbläschen (Alveolen)** über. Die Lungenbläschen haben einen Durchmesser von ca. 0,2 - 0,06 mm. Ihre Anzahl beträgt ca. 500 (300-750) Mio. Stück. Sie sind von einer dünnen Membran umhüllt, die den Gasaustausch ermöglicht.



Zwischen den Alveolen liegen das elastische Bindegewebe sowie **Blutgefäße**.

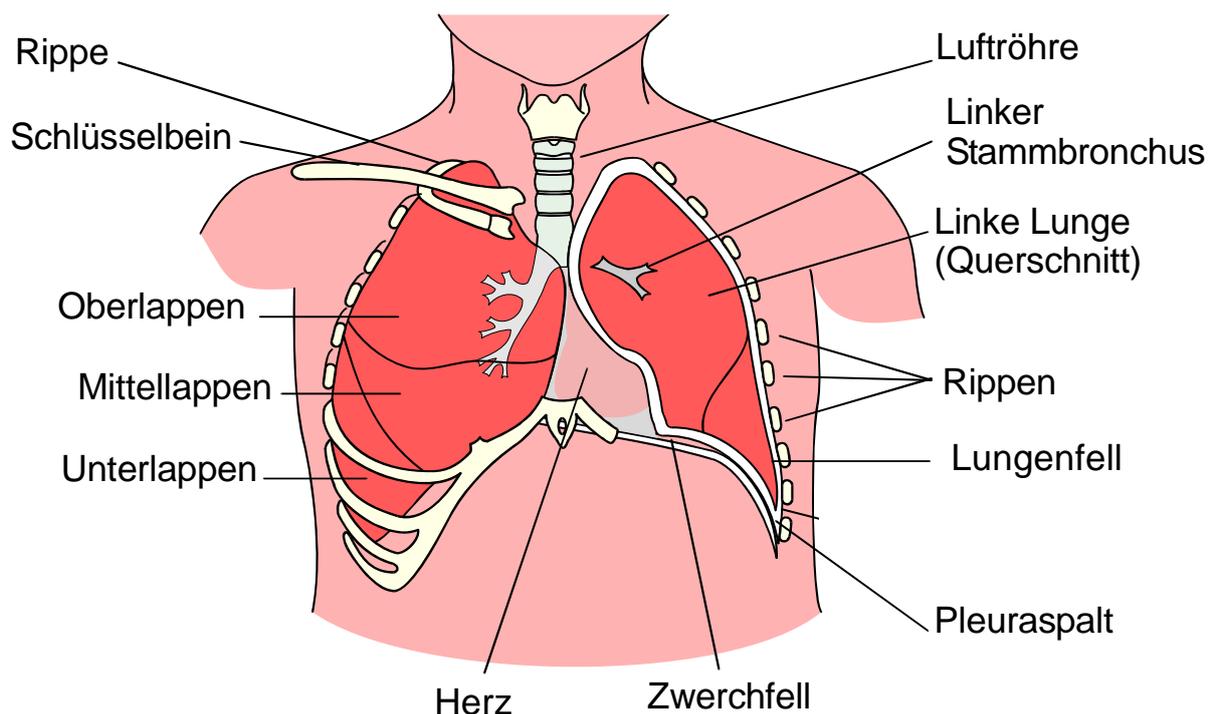
Zwischen den Alveolen und dem Kapillarnetz erfolgt der **Austausch von O_2 , CO_2 und N_2 entsprechend dem Gesetz von Henry** (d.h.: rein physikalischer Vorgang (Diffusion)). Für diesen Gasaustausch beträgt die Fläche (Oberfläche der Lungenbläschen) etwa 100 - 200 m^2 .

Die **Lungenflügel** liegen im Brustkorb (*Thorax*), der von den Rippen und dem Zwerchfell begrenzt wird. Die Rippen sind gelenkartig mit der Brustwirbelsäule verbunden und haben teilweise eine Verbindung mit dem Brustbein. Der von den Rippen gebildete knöcherne Korb kann durch Muskeln in den Zwischenrippenräumen seinen fassförmigen Raum vergrößern oder verkleinern. In der Brusthöhle (Brustraum) befindet sich die Lunge. Sie besteht aus einem rechten und einem linken Lungenflügel. Die Lungenflügel teilen sich weiter auf in die Lungenlappen (rechts: 3, links: 2), diese wiederum in die Lungenläppchen (*Lobulus*). Die Lungenläppchen haben einen Durchmesser von 1 cm bis 1,5 cm.



Die Innenflächen des Brustkorbes sind mit dem **Rippenfell** oder Brustfell (*Pleura parietalis*) ausgekleidet, während das **Lungenfell** (*Pleura visceralis*) das Lungengewebe umhüllt.

Lunge und Brusthöhle



Zwischen Rippenfell und Lungenfell liegt der Pleuraspalt. Er ist mit einer dünnen Flüssigkeitsschicht ausgefüllt. Vergrößert sich der Brustraum (Einatmung, aktive Muskelarbeit) entsteht ein Unterdruck im Pleuraspalt ($p = \text{ca. } -8 \text{ mbar}$) [*Intrapleuraler Druck = Druckdifferenz zwischen Intrapleuralspalt und Atmosphäre = „negativer Druck“, Unterdruck*], die Lungenflügel folgen der Ausweitung des Raumes und Luft wird in die Lunge eingesogen. Beim Ausatmen erschlaffen die Muskeln, der Brustraum verkleinert sich wieder und die Lungenflügel ziehen sich aufgrund ihrer eigenen Elastizität wieder zusammen (Rückkehr in die Ausgangslage). Dabei

wird die Luft ausgepresst. Der Druck im Pleuraspalt nimmt leicht auf $p = - 5$ mbar zu. Bei einem Druck von $p = \pm 0$ mbar würde sich der betroffene Lungenflügel auf Faustgröße zusammenziehen und den Gasaustausch (zwischen Lunge und Blut) unterbrechen.

Vergrößert sich der Brustraum (d.h. der Unterdruck im Pleuraspalt), so folgt die Lunge der Ausweitung des Raumes.

2.1.2. Atemmechanik

Einatmung (Inspiration):
 √ Zwerchfell zieht sich zusammen und seine Kuppeln flachen ab.
 √ Zwischenrippenmuskulatur hebt die Rippen an und der Brustraum wird dadurch vergrößert.
(aktive Muskelarbeit)

Ausatmung (Expiration):
 √ Zwerchfell erschlafft → zwei Kuppeln werden nach oben gewölbt,
 √ Erschlaffung der Zwischenrippenmuskulatur
 → Brustraum verkleinert sich.
(Elast. Kräfte → Ausgangslage)

Dem Zwerchfellmuskel kommt die Hauptaufgabe bei der Atmung zu.

Je älter der Taucher ist, umso geringer wird die Atmung durch die Zwischenrippenmuskulatur (Brustatmung) unterstützt.

Äußere Atmung

Luft wird durch Erweiterung des Brustkorbes
 (aktive Muskelzusammenziehung der Zwischenrippenmuskulatur und des Zwerchfells)
 in die Lungenflügel eingesaugt
 und durch Verkleinerung des Brustraumes wiederum ausgepresst.
 Die Lungen folgen passiv diesen Bewegungen.

Die Atembewegungen werden gesteuert vom **Atemzentrum** im verlängerten Rückenmark (*Medulla Oblongata*). Die Steuerung erfolgt vor allem durch den Kohlendioxidgehalt ($p\text{CO}_2$) im Blut, der mit Hilfe von Chemorezeptoren gemessen wird.

Hoher CO_2 -Gehalt → Vertiefte Atmung
 Niedriger CO_2 -Gehalt → Verlangsamte Atmung, Atempause

Der selbstständige Rhythmus kann auch willkürlich beeinflusst werden durch Signale von der Großhirnrinde. Kurzfristig sind willkürliche Ventilationssteigerungen bis etwa 150 l min^{-1} möglich. Die Atemmotorik besitzt damit also eine "Doppelansteuerbarkeit".

Weitere Faktoren für den Atemtrieb sind die Sauerstoffbeladung ($p\text{O}_2$) und die Säuerung (H^+ -Ionenkonzentration) des arteriellen Blutes. Veränderungen der drei Faktoren $p\text{CO}_2$, $p\text{O}_2$, H^+ wirken sich direkt auf Volumen und Frequenz der Atmung aus. Diese Veränderung der Atmung (Ventilation) beeinflusst dann die Abgabe des CO_2 und die Aufnahme von O_2 und führt damit letztendlich auch

wieder zu einer Änderung der o.g. Steuergrößen im arteriellen Blut. Es kommt also zu einer Rückkoppelung der Faktoren. Beispielsweise führt ein erhöhter $p\text{CO}_2$ im Blut zu einer Ventilationssteigerung, die dann wiederum die CO_2 -Abgabe über die Lunge an die Umgebung erhöht. Im Gegensatz zum $p\text{CO}_2$ führt ein Absinken des $p\text{O}_2$ erst nach längerer Zeit zu einer schwachen Ventilationssteigerung. Dies kommt hauptsächlich im Hochgebirge mit seinem im Vergleich zum Meeresniveau deutlichen geringeren $p\text{O}_2$ in der Atemluft vor. Grundsätzlich ergibt eine Ventilationssteigerung nur dann eine zusätzliche Aufnahme von Sauerstoff im Blut, wenn dort dafür freie Transportkapazitäten bestehen. Da diese aber im Normalfall (gesunder Taucher, Meeresniveau) bereits zu über 95% genutzt werden, sind nur noch geringfügige Steigerungen bis maximal 5% möglich.

2.1.3. Atemgrößen (Atemrhythmus, -volumen)

Normale Atemfrequenz (AF):	12 (-16) Atemzüge pro Minute
Normales Atemzugvolumen (AZV):	ca. 0,5 Liter (Respirationsluft, Atemzugvolumen)

Atemminutenvolumen (AMV): 6-8 Liter

Der Sauerstoffverbrauch vom Organismus hängt von seiner Arbeitsleistung ab. Um den Körper mit der notwendigen Menge zu versorgen, kann das [Atemminutenvolumen \(AMV\)](#) auf bis zu **120 Liter pro Minute** gesteigert werden!

Tabelle 2/1: Atemgrößen in Abhängigkeit von der geleisteten Arbeit

	Atemvolumen [l]	Atemfrequenz [min^{-1}]	AMV [l min^{-1}]
in Ruhe	0,3 - 0,75	10 - 16	5 - 10
leichte - mittlere Arbeit	0,75 - 1,5	10 - 24	10 - 40
schwere - schwerste Arbeit	1,0 - 5,0	20 - 35	40 - 120

Tabelle 2/2: Atem-Minuten-Volumen (AMV) in Abhängigkeit von der Leistung

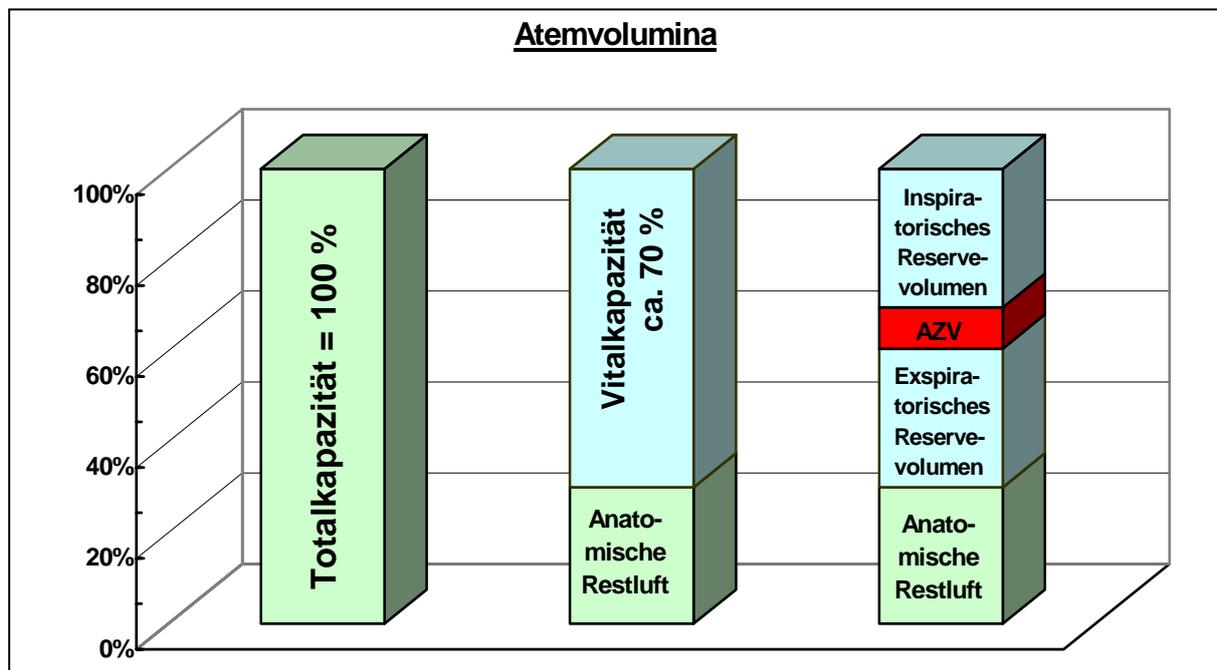
	AMV [l min^{-1}]
absolute Ruhe	6
Gehen 3 km/h	15
Schwimmen 15 m/min	17,5
Schwimmen 30 m/min	39
Laufen 12000 m/h	46,5
Schwimmen 40 m/min (1000 m / 25 min)	65

Bei **einfachen Berechnungen zum Luftverbrauch** wird das Atemminutenvolumen (**AMV**) eines Tauchers mit **20 Litern** angesetzt.

Folgende Begriffe bezeichnen unsere Atemvolumina (Atemgrößen):

Totalkapazität, Vitalkapazität, Atemzugvolumen, inspiratorisches Reservevolumen, expiratorisches Reservevolumen, anatomische Restluft.

Begriff	Erläuterung	Typische Werte (erwachsene Person)
Vitalkapazität	Luftmenge, die nach maximaler Einatmung maximal wieder ausgeatmet werden kann	4000 - 7000 ml
anatomische Restluft (Residualluft)	Luftmenge, die nach maximaler Ausatmung in der Lunge verbleibt	1000 - 1800 ml
Totalkapazität	Summe von Vitalkapazität und Restluft	5000 - 9000 ml
Atemzugvolumen (AZV)	normales Ventilationsvolumen	500 ml
inspiratorische Reservevolumen	Luftvolumen, das (nach Einatmung) zusätzlich eingeatmet werden kann	2500 - 4600 ml
expiratorische Reservevolumen	Luftvolumen, das (nach Ausatmung) zusätzlich ausgeatmet werden kann	1000 - 1800 ml



Vitalkapazität

Luftmenge, die nach **maximaler Einatmung** maximal wieder ausgeatmet werden kann.

Die Vitalkapazität ist abhängig von Alter, Geschlecht, Größe und Gewicht. Nach dem 30. Lebensjahr nimmt die Elastizität der Lunge und damit auch die Vitalkapazität ab. Bei jungen Menschen lässt sich die Vitalkapazität durch Training deutlich steigern.

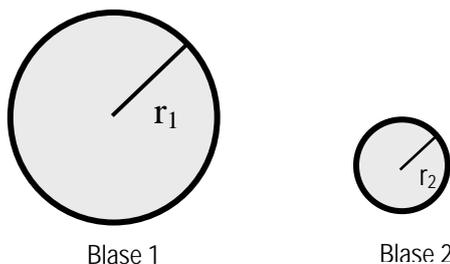
2.1.4 Surfactant ('surface active agent')

Bei der Einatmung (Inspiration) folgt die Lunge der Ausweitung des Brustkorbes. Die Alveolen werden gedehnt und Frischluft strömt ein. Da das Volumen eines normalen Atemzuges (Ruheatmung eines Erwachsenen) etwa 0,5 Liter beträgt, werden nur ca. 10 % des gesamten Lungenvolumens genutzt, d. h. jede 10. Alveole ist bei einem normalen Atemzug beteiligt. Damit auch nicht entfaltete Alveolen geöffnet werden, ist etwa jeder 100. Atemzug ein sehr tiefer. Bei Arbeitsleistung sind entsprechend mehr Alveolen beteiligt. Bei schwerer Arbeit wird die gesamte Vitalkapazität beansprucht.

Die innere Oberfläche der Alveole ist von einem hauchdünnen Flüssigkeitsfilm bedeckt. Die gegenzeitige Anziehung der Moleküle in dieser Flüssigkeitsschicht tendiert zu einer Verkleinerung der Oberfläche. Diese an den Grenzflächen von Flüssigkeiten wirkende Kraft wird als Oberflächenspannung σ [N/m] bezeichnet.

(Relativ leichte Gegenstände wie z. B. Nadeln kann man auf einer Wasseroberfläche schwimmen lassen. Die Kraft, die diese Gegenstände schwimmen lässt, ist nicht die Auftriebskraft, sondern die Oberflächenspannung. Sie resultiert aus den Kohäsionskräften, die zwischen den einzelnen Wassermolekülen wirken und entsteht an den Berührungsstellen zweier Substanzen unterschiedlicher Phasen.)

Die Dehnung einer Gasblase ist gleich zu setzen mit einer Vergrößerung ihres Radiuses. Entsprechend dem **Gesetz von Laplace** (Laplace, Pierre-Simon de, frz. Astronom, Mathematiker und Physiker, 1749 - 1827) nimmt der Innendruck p_i einer als kugelförmig angenommen Gasblase i hyperbolisch mit abnehmendem Radius r_i zu:

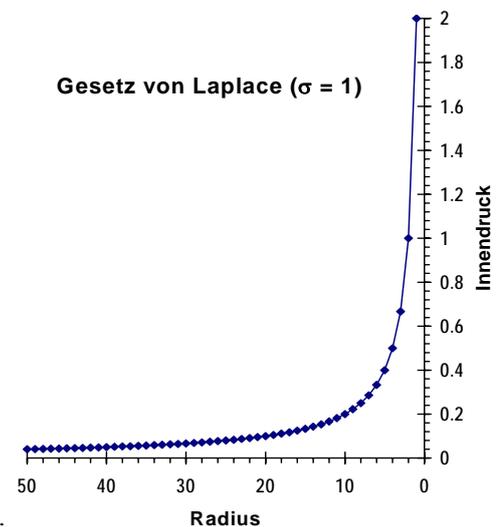


$$p_1 = \frac{2 \times \sigma}{r_1} < p_2 = \frac{2 \times \sigma}{r_2}$$

wobei

Blase 1: Innendruck p_1 , Radius r_1 Blase 2: Innendruck p_2 , Radius r_2
 Radius $r_1 >$ Radius r_2

Beide Blasen haben hier eine gleiche Oberflächenspannung σ .



Kleine Blasen haben also nach dem Gesetz von Laplace bei konstanter Oberflächenspannung σ einen größeren Innendruck als große Blasen.

Wendet man nun das Gesetz von Laplace einfach auf die Lungenbläschen (Alveolen) an und berücksichtigt, dass die Alveolen miteinander verbunden sind, würde sich für die Alveolen mit einer gleichen, konstanten Oberflächenspannung σ , folgendes Szenario ergeben:

Die kleinen Alveolen würden zum Kollaps neigen und sich in die größeren Alveolen entleeren. Insgesamt käme es also damit zu einer Umverteilung der Gasvolumina in die größeren Alveolen. Folge wäre eine Destabilisierung der Lunge und ihrer Funktion.

Bereits 1929 wurde von dem Schweizer Wissenschaftler *Kurt Neergard* vermutet, dass eine oberflächenaktive Substanz existieren muss, die die Oberflächenspannung der Alveolen reduziert. Erst 40 Jahre später gelang dem amerikanischen Wissenschaftler *John Clements* der Nachweis dieser Substanz, die als „**Surfactant** (surface active agent)“ bezeichnet wird. Sie besteht aus einem komplexen Gemisch von seifenähnlichen Substanzen (80-90% Lipide, 5-10% Proteine).

(Auch im Haushalt werden Surfactants verwendet: Spülmittel nimmt dem Wasser seine Oberflächenspannung und macht es damit geeignet, auch fettiges Geschirr zu reinigen.)

Das Surfactant bewirkt, dass die Oberflächenspannung in der Alveole reduziert wird. Die Oberflächenspannung des die Alveolen bedeckenden Flüssigkeitsfilms ist gegenüber einem wässrigen Flüssigkeitsfilm ohne Surfactants ca. 10 mal geringer.

Surfactant → $\sigma \downarrow$

Das Surfactant bewirkt, dass die Oberflächenspannung in der Alveole mit zunehmender Dehnung bzw. Inspiration anfangs kaum, dann deutlich abnimmt. Dadurch wird die Atemarbeit deutlich reduziert.

Je kleiner die Fläche, desto größer die Spannung. Diese Eigenschaft stabilisiert die Alveolen unterschiedlicher Größe. Das Zusammenfallen (Kollabieren) der Alveolen wird verhindert.

$r \uparrow \sigma \downarrow$ und $r \downarrow \sigma \uparrow$

r = Radius

Surfactant stabilisiert die Alveolen durch Verminderung ihrer Oberflächenspannung und reduziert so die Atemarbeit.

Ist die Bildung von Surfactant innerhalb der Lunge gestört, können ganze Lungengebiete kollabieren.

Reiner Sauerstoff kann den Surfactant nach gewisser Einwirkdauer zerstören.

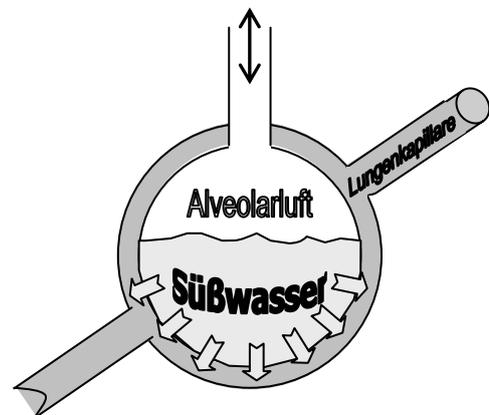
2.1.5 Ertrinken und Beinahe-Ertrinken

Wir unterscheiden zwischen „Beinahe-Ertrinken“ und „Ertrinken“. Unter „Ertrinken“ versteht man den Tod durch Ersticken aufgrund von Sauerstoffmangel nach Eintauchen in Flüssigkeiten. Als „Beinahe-Ertrinken“ bezeichnet man einen Ertrinkungsunfall, der zumindest einige Zeit (≥ 24 Stunden) überlebt wird. Bei der Ausübung des Sporttauchens stellt der Ertrinkungsunfall die häufigste Todesursache dar. Auch im normalen Alltagsleben steht das Ertrinken bei Unfällen mit Todesfolge in der Rangliste weit vorne. Im Sommer 2001 starben in Deutschland (nach Angaben der DLRG) 520 Menschen durch Ertrinken (1999 waren es 597 Menschen). Dies waren 10% der Unfälle mit tödlichem Ausgang (Verkehrsunfällen brachten es auf 60%).

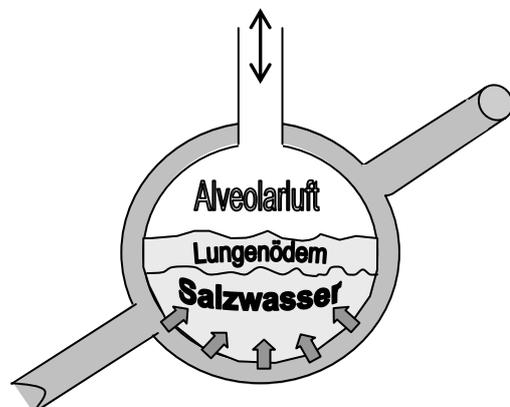
Ein untrainierter Mensch kann die Luft etwa zwei Minuten unter Wasser anhalten. Danach gerät er in Panik und verschluckt ein wenig Wasser. Folge ist ein reflektorischer Atemwegskampf („Stimmritzenkrampf“), der dann das weitere Eindringen von Wasser in die Lunge verhindert. Da die Lunge nun nicht mehr belüftet wird, kommt es zu einem Sauerstoffmangel im Blut und im gesamten Organismus. Dieser Mangelzustand führt zur Bewusstlosigkeit des Verunfallten. In etwa 85-90 % aller Fälle löst sich der Stimmritzenkrampf bei Bewusstlosigkeit und Wasser oder Erbrochenes wird eingeatmet (*nasses Ertrinken*). Die Vermischung von Luft und Wasser führt zu einer ausgeprägten Schaumbildung in den Lungen. In den restlichen 10-15 % der Fälle bleibt der Krampf bestehen und es kommt zum *trockenen Ertrinken*.

In der Lunge führt die eingedrungene Flüssigkeit zur Schädigung der Alveolen. Dabei wird traditionell nach der Art der eingedrungenen Flüssigkeit unterschieden:

- Süßwasser führt zur Auswaschung des Surfactant. Die Folge ist eine Instabilität und letztendlich ein Kollabieren (Zusammenfallen) der Lungenbläschen. Die Dehnbarkeit der Lunge („*Compliance*“) nimmt ab und der lebenswichtige Gasaustausch ist eingeschränkt. Außerdem kommt es aufgrund des Diffusionsgradienten zum Übertritt von Wasser in den Blutkreislauf. Das Blut wird also dünner. Auch in die roten Blutkörperchen (Erythrozyten) dringt Wasser ein und es kommt dadurch zu einem Zerfall derselben (= Hämolyse). Freigesetztes Kalium kann zum Herzstillstand führen.



- Salzwasser führt aufgrund des Diffusionsgradienten zum Einstrom von Plasmaflüssigkeit aus den Lungenkapillaren in die Lungenbläschen. Es kommt zur Ausbildung eines Lungenödems und damit zur Unterbindung des Gasaustausches. Das Blut "dickt ein".



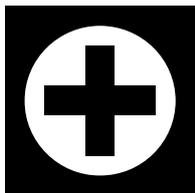
Unabhängig von der Art des eingedrungenen Wassers kommt es zum Sauerstoffmangel (Hypoxie) und dadurch zum Lungenversagen. Zusätzliche Lungenschädigungen können durch bestimmte Bestandteile des Wassers (Bakterien, Gifte) auftreten. Die Hypoxie führt nach kurzer Zeit auch zum Versagen anderer Organe (z. B. Herz, Zentralnervensystem).

Für die Maßnahmen der Ersten Hilfe ist es ohne Bedeutung, ob das Beinahe-Ertrinken im Süßwasser oder im Salzwasser erfolgte. Auch klinisch wird meist nur die Hypoxie beobachtet, nennenswerte Elektrolytverschiebungen oder gar Zeichen einer massiven Hämolyse finden sich fast nie. *Die Unterscheidung in Süßwasser- und Salzwasser-Beinahe-Ertrinken erfolgt hier nur, da es derzeit noch relevanter Prüfungsstoff für Forschungs- und Sporttaucher ist.*

Beim Beinahe-Ertrinken bestimmen hauptsächlich zwei Faktoren die Überlebenschance des Verunfallten:

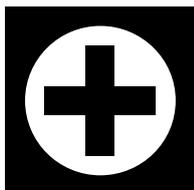
- Wie stark ist die Lunge durch das eingedrungene Wasser geschädigt?
- Wie stark ist das Zentralnervensystem (ZNS) durch den Sauerstoffmangel geschädigt?

Sofortmaßnahmen (nach der schnellstmöglichen Rettung):



Patient bei Bewusstsein

- **Sauerstoff-Gabe (100%)**
- Ausatmung mit 'Lippenbremse' oder besser: Ausatmung gegen CPAP-Ventil (*Continuous Positive Airway Pressure, kontinuierlicher positiver Atemwegdruck*)
- Ständige Überwachung der Vitalfunktionen
- Vor weiterer Auskühlung schützen (*metallbeschichtete Rettungsdecke*).
- In jedem Fall Transport ins Krankenhaus!



Patient ohne Bewusstsein

- **Sauerstoff-Gabe (100%)**
- Bei Atemstillstand: **Beatmung mit 100% Sauerstoff** und mit PEEP (*'positive endexpiratory pressure', positiver endexpiratorischer Druck*)
- Bei Herzkreislaufstillstand: **HLW** (kardiopulmonale Reanimation)
- Lagerung flach
- Vor Unterkühlung schützen (*metallbeschichtete Rettungsdecke*).
- **Notarzt** rufen; ggf. Transport mit Rettungshubschrauber.

Achtung:

Keine Versuche zur Entfernung des Wassers aus der Lunge unternehmen!

Behandlung:

Mindestens 24 Stunden intensivmedizinische Überwachung.

(11% der zunächst Überlebenden versterben noch nach 24 Stunden!)

Röntgen-Thoraxaufnahme und regelmäßige Blutgasanalysen zur Diagnosestellung

Therapie (Infusion, Medikamente, Beatmung, etc.)

2.1.6 Sparatmung

Der Taucher atmet sehr tief, behält die eingeatmete Luft dann für 20-40 Sekunden in der Lunge, bevor er sie wieder ausatmet. Anschließend atmet er sofort wieder ein. Das Atemmuster setzt sich zusammen aus: Einatmung - Pause - Ausatmung. Diese Verfahrensweise wird als "Sparatmung" bezeichnet. Der Taucher beabsichtigt damit seinen Luftverbrauch zu senken. Tatsächlich aber ist eine solche Atemtechnik falsch und für die Gesundheit gefährlich.

Im eingeatmeten Zustand ist die Zwischenrippenmuskulatur angespannt, sie leistet also Arbeit. Nach einiger Zeit beginnt sich die Muskulatur unmerklich und langsam zu entspannen. Damit wird der Brustkorb kleiner und der Luftdruck in der Lunge steigt an. Diese Druckerhöhung reduziert die Gefäßdurchmesser und damit die Durchblutung. Das Herz reagiert daraufhin mit einer höheren Schlagzahl (Frequenzerhöhung) und einer Steigerung des Blutdrucks.

Folge: erhöhter Sauerstoffverbrauch → erhöhte CO₂-Produktion
→ Gefäßweitstellung → Anschwellen des Gehirns → häufig roter Kopf
→ Kopfschmerzen bis Übelkeit

Das richtige Atemmuster ist Einatmung - Ausatmung - Pause. Durch einfache willkürliche Beeinflussung der Atmung ist dies aber nicht zu erreichen. Es gehört dazu eine grundsätzliche Umstellung der Atemgewohnheiten. Bei Belastungen, wie Heben eines schweren Gegenstandes, Aufrichten aus der Kniebeuge, etc., ist grundsätzlich auszuatmen!

2.2. Herz und Kreislauf

Blut besteht und	zu 45% aus Blutzellen (rote und weiße Blutkörperchen, Blutplättchen) zu 55% aus Blutplasma (enthält zu 90% Wasser).
Blutmenge:	8% des Körpergewichtes (Beispiel: 750 N schwerer Mensch \approx 6 l Blut) (Gesamtblut enthält ca. 50% Wasser.)

Plötzlicher Blutverlust: 10% gut verträglich, 30% gefährlich und 50% tödlich.

Die **Erythrozyten** (rote Blutzellen) ermöglichen den überwiegenden Teil des Sauerstofftransportes im Blut. Sie enthalten Kaliumsalze und Hämoglobin. (*Häm - aktiver, Eisen enthaltender Anteil, Globin - ein Eiweiß*). Das Hämoglobin kann den Sauerstoff binden (Oxyhämoglobin, O₂ Hb) und ihn wieder abgeben (reduziertes Hämoglobin).

Das menschliche Blut enthält etwa ~ 25 Billionen (25.000.000.000.000) Erythrozyten. Ihre gesamte Oberfläche beträgt damit etwa 3000 m². 1 mm³ Blut enthält etwa 5 Mio. Erythrozyten. Jedes rote Blutkörperchen umfasst 300 Mio. Moleküle des Blutfarbstoffs Hämoglobin.

Kohlenmonoxid und Hämoglobin:

Kohlenmonoxid (CO) hat eine ca. 250 mal größere Affinität zum Hämoglobin (Hb) als O₂; d.h. O₂ wird verdrängt. Dies ist der Grund für die extreme Giftigkeit von CO!

Ein Anteil von 0,3% CO in der Atemluft besetzt bereits 80% des Bluthämoglobins, es kann dann nicht mehr ausreichend O₂ transportiert werden, so dass es zur "inneren Erstickung" kommt.

Der **Blutkreislauf** versorgt die Körperzellen mit Sauerstoff, Nährstoffen und Hormonen. Er entsorgt die Zellen von CO₂ und Stoffwechselprodukten

Der **Blutkreislauf** besteht aus **zwei parallel geschaltete Kreislaufabschnitten**:

Im **Lungenkreislauf** (**Kleiner Kreislauf**) wird das sauerstoffarme Blut aus der rechten Herzkammer über die Lungearterie in die Lunge(n) gepumpt. Aufgrund der sehr vielen kleinen Kapillaren kommt es dort zu einem starken Druckabfall. Nach dem Stoffaustausch (insbesondere: O₂, CO₂) reicht der Restdruck aber noch aus, um das nun sauerstoffreiche Blut über die Lungenvene zum linken Vorhof des Herzens fließen zu lassen. Dann ist aber eine **zweite kräftige Pumpe** (= linke Herzkammer) notwendig, um den Körperkreislauf zu versorgen.

Im **Körperkreislauf** (**Großer Kreislauf**) wird das sauerstoffreiche Blut aus der linken Herzkammer in die große Körperschlagader (Aorta) gepumpt, von dort über die Schlagadern, Arterien, Arteriolen und die Kapillaren im gesamten Körper verteilt. Nach erfolgtem Austausch von Sauerstoff, Nährstoffen und Stoffwechselprodukten wird das sauerstoffarme Blut dann über die Venolen, Venen und Hohlvenen wieder gesammelt und zum Herzen in den rechten Vorhof geführt.

Definition der GefäÙe	Körperkreislauf	Lungenkreislauf
Arterien (vom Herzen <u>weg</u>)	O₂-reich	O₂-arm
Venen (zum Herzen <u>hin</u>)	O₂-arm	O₂-reich

Die **Arterien verteilen** das Blut an alle Gewebe und Organe des Körpers. Die **Venen sammeln** das Blut dort wieder auf und transportieren es zum Herzen.

Eigenschaften des Arteriensystems

- relativ hoher Druck (direkt der Pumpwirkung des Herzens ausgesetzt)
- Wenn Blut aus der linken Herzkammer ausgetrieben wird entsteht eine Druckwelle, sie ist über einer oberflächlichen Arterie tastbar.
- dicke und muskulöse Wände
- beinhalten ~15 % der Blutmenge

Eigenschaften der Venen

- Relativ niedriger Druck
- Dünnwandig
- Sehr dehnbar
- Speichern ca. 85 % des Blutes
- Sehr gleichmäßig Blutrückfluss zum Herz

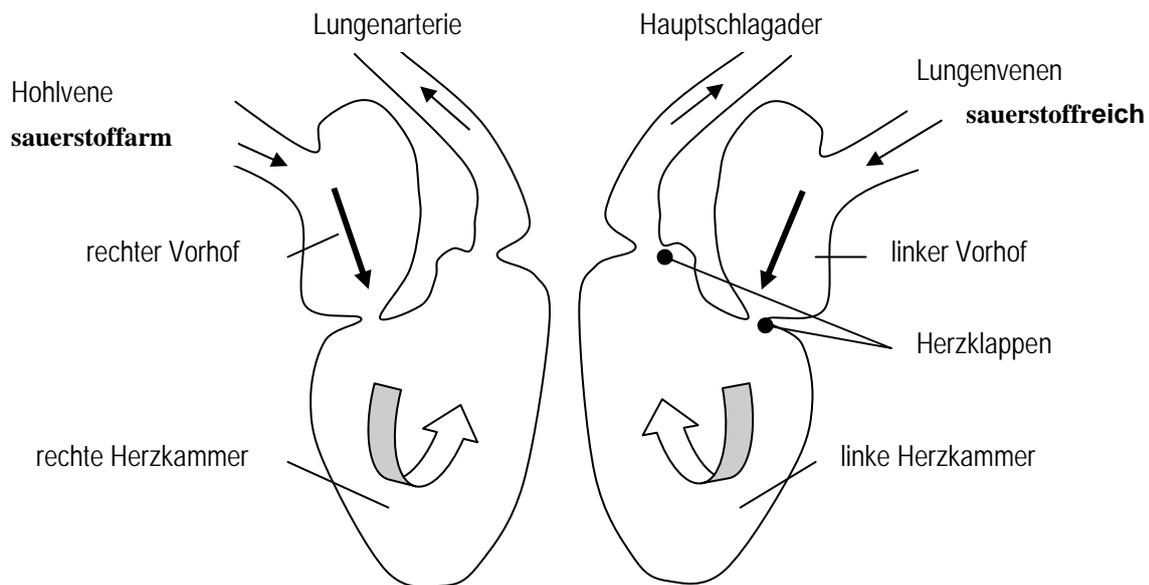
Begriff „Embolie“

Verstopfen eines Gefäßes durch ein mit dem Blutstrom verschleppten Fremdkörper („Embolus“) (z. B. Blutgerinnsel, Fetttropfen, Luftblase, Gasblase)

Das etwa faustgroÙe **Herz** (*bzw. die beiden Herzkammern*) pumpt das Blut durch den Kreislauf. Es arbeitet in Ruhe mit 60 bis 80 Schlägen/min und bei Belastung mit bis zu 180 Schlägen/min. Pro Herzschlag werden 70 (-100) ml Blut ausgeworfen, d.h. der Volumentransport pro Minute beträgt 5 (7 - 30) Liter (Herzminutenvolumen). (*Dies bedeutet: pro Stunde: 300 Liter, pro Tag: 7200 Liter, pro Jahr: 2,6 Millionen Liter und pro 75 Jahre: 2 Milliarden Liter.*) Das gesamte Blut strömt in ca. einer Minute einmal durch rechtes Herz, Lunge, linkes Herz und den Körper!

Das Herz hat **vier Höhlen**:

- **2 Vorhöfe** (Atrien)
- **2 Herzkammern** (Ventrikel)



Herzschlag: ca. alle 0,8 sec (bei einem Puls von 75 / Minute).

1. Kontraktion der Vorhöfe

bei gleichzeitiger Erschlaffung der Kammern (ca. 0,1 sec)
 → Blut wird aus den Vorhöfen in die Kammern gepumpt

2. Kontraktion der Kammern

bei gleichzeitiger Erschlaffung der Vorhöfe (ca. 0,3 sec)
 → Blut wird in den Kreislauf gepumpt.

3. Pause von ca. 0,4 sec.

Begriffe:

- **Systole** = Kontraktion der Herzwand
- **Diastole** = Erschlaffung der Herzwand

2.2.1 Blutdruck und Blutdruckmessung

Systolischer Blutdruck: Arterieller Druck während der Kammersystole.
(Herzmuskel zieht sich zusammen)
(Normaler Wert: ca. 120 mm Hg + 5 mm Hg pro Lebensjahrzehnt;
ein Wert > 150 mm Hg ist grundsätzlich zu hoch, unabhängig vom
Alter)
Der systolische Druck ist ein Maß für die Herzleistung.

Diastolischer Blutdruck: Arterieller Druck bei Diastole der Herzkammer.
(Blut strömt in die Herzkammer (bei 20-Jährigen ca. 80 mm Hg;
Werte > 100 mm Hg = stets krankhaft)
Der diastolische Druck ist ein Maß für die Elastizität der Arterien-
wände.

Blutdruck: *Normalwerte: RR 120/80 in mm HG (RR:= Riva-Rocci)*

Blutdruck: Messung und Interpretation

Blutdruckmessung:

- Luft aus der RR-Manschette vollständig rauslassen
- Manschette fest am rechten Oberarm anlegen
- Oliven des Stethoskops in die Gehörgänge stecken
- Manschettenventil schließen
- Stethoskopmembran auf die Innenseite der Ellenbeuge legen und festhalten,
mit der anderen Hand die Manschette bis 180 mm Hg aufpumpen
- Ablassventil leicht öffnen
- Druck langsam ablassen, auf die Pulsschläge horchen.



Der oberste Wert (systolischer Wert) ist der Wert, den ich auf dem Manometer ablese, wenn ich den Puls zum 1. Mal höre.

Der untere Wert (diastolischer Wert) ist die Zahl, die ich ablese, wenn ich den letzten Pulsschlag höre.

Der systolische Wert ist der maximale Druck, den das Herz gegenwärtig aufbaut, die Diastole ist der Druck, den das Herz in seiner Erschlaffungsphase aufrecht erhält (abhängig vom Zustand der Blutgefäße).

Die Normalwerte liegen bei 120/80 mm Quecksilbersäule (geschrieben: RR 120/80).

RR = Riva-Rocci, ein Mediziner, der die Blutdruckmessung mit Gummimanschetten einführte).
Viele Menschen leben aber auch mit einem systolischen Wert von 100 mm Hg.

2.2.2 Schock und Schockindex

Schock: Definition: Akute Störung des Blutflusses mit verminderter Kapillardurchblutung, Sauerstoffmangel im Gewebe und dadurch entstehende schwere Organveränderungen.
Ursache: Volumenverminderung (Blutung, Erbrechen, Durchfälle,..)
Gefäßveränderung (Hormone, Bakterien, Gifte, ..)
Verminderung der Herzleistung (Infarkt, Entzündung)

Therapie: Schockursache bekämpfen,
Schocklagerung (flache Rückenlagerung, Beine ca. 45° hoch lagern),
Ruhigstellung, vor Unterkühlung schützen, psychische Betreuung, Flüssigkeitszufuhr (wenn möglich: Infusion), Sauerstoffgabe, Kreislaufmittel,
rascher Transport ins Krankenhaus.

Je früher eine gezielte Therapie einsetzt, desto besser ist die Prognose.

Schockindex:

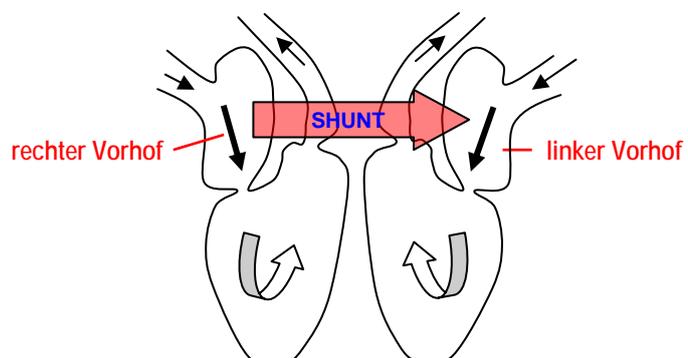
Quotient aus Herzfrequenz und systolischem Blutdruck.
(Maß zur Bestimmung der Minderung des Blutvolumens im Schock.)

S = 0,5	Normal	[Herzfrequenz: 70 / systol. Blutdruck: 140]
S = 1,0	Hinweis auf ein beginnendes Kreislaufversagen:	
S = 1 - 1,5	Schocksituation	→ sofort entsprechend handeln!!
S = 1,5	Voll entwickelter Schock	

Je größer der Index, desto schwerer der Schock!

2.2.3 Foramen ovale

Beim Fetus (Kind im Mutterleib) existiert eine Verbindung zwischen den beiden Vorhöfen, das "ovale Loch (**Foramen ovale**)". Damit wird das Blut zum größten Teil an der Lunge vorbeigeleitet, man spricht von einem „**Shunt**“ (**Kurzschlussverbindung**, engl. Nebenschluss, Weiche). Ein weiterer Shunt existiert vor der Geburt zur Umgehung der Leber. (Beim Fetus sind die Lunge und die Leber relativ funktionslos.)

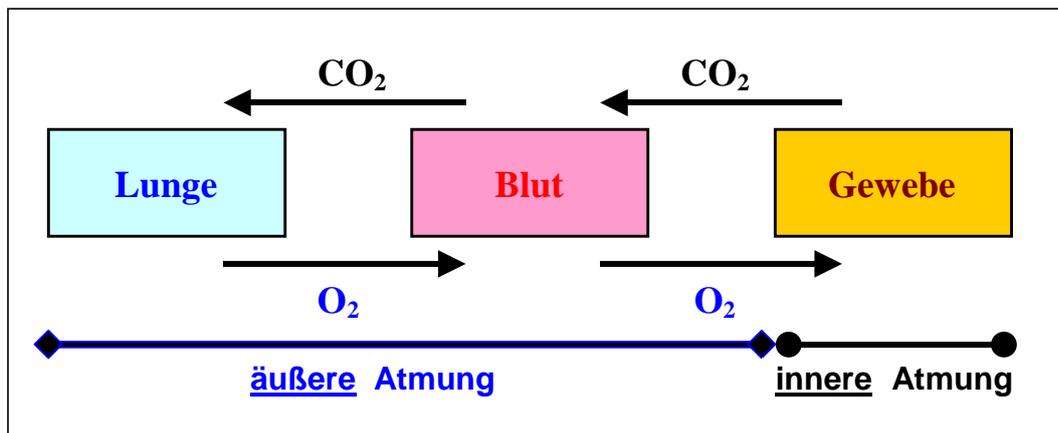


Das Foramen ovale schließt sich normalerweise nach der Geburt. Falls dies nicht oder nicht vollständig geschieht, besteht ein Kurzschluss zwischen dem venösen und arteriellen Kreislauf und es kann bei Tauchgängen zu einer arteriellen Gasembolie (AGE) kommen.

2.2.4 Atemfunktion des Blutes

Unter der Atemfunktion des Blutes (*Hämodynamik*) versteht man den Transport von Sauerstoff (O_2) zur Zelle und den Abtransport von dort gebildetem Kohlendioxid (CO_2).

Die Atmung wird in zwei Phasen aufgeteilt (nach: *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch, 1990*): die "**äußere**" **Atmung** und die "**innere**" **Atmung**.



1. Äußere Atmung (*Lungenatmung, Respiration*)
 - a. Ventilation: Lufttransport in die Lunge durch aktive Atemtätigkeit, *Steuerung durch Atemzentrum*
 - b. Perfusion: der Ventilation angepasste Durchblutung der Lungenkapillaren
 - c. Diffusion (durch die aveolokapillare Membran): O_2 -Übertritt in das Blut bei gleichzeitiger Abgabe des CO_2 (Partialdruckdifferenzen zwischen der Alveole und dem Blut)
 - d. Konvektion: Gas-Transport im Blut bis zur Zelle (überwiegend chemisch am Hämoglobin gebunden, nur etwa 1% physikalisch gelöst; beim Tauchen ist eine Erhöhung des Anteils des physikalisch gelösten O_2 mit der Tiefe möglich)

2. Innere Atmung (*Zellatmung*)
 - a. Übertritt in die Zelle (durch Diffusion, wie 1c.)
 - b. Verwertung in der Zelle (Stoffwechsel)

Hinweis: Einige Autoren (z. B. *Stibbe, 1997*) definieren den Punkt **1d.** als eigenständige Phase.

2.2.5 Transport von Sauerstoff und Kohlendioxid im Blut

(Hintergrundwissen)

Normobar (*ohne Überdruck*) sind im Blutplasma nur etwa 6 % des CO₂ und etwa 1 % des O₂ physikalisch gelöst. Diese Prozentwerte sind nicht ausreichend für die Ver- und Entsorgung der Zellen und deshalb muss der **Haupttransport in chemisch gebundener Form** erfolgen! Bei höheren Partialdrücken werden dagegen größere Mengen physikalisch gelöst.

Der O₂-Transport erfolgt zu etwa 99 % durch chemische Bindung an das Hämoglobin in den Erythrozyten. Das Blut transportiert den Sauerstoff dann zu allen Zellen, wo er zur Oxidation gebraucht wird. Beim Stoffwechsel in der Zelle entstehen CO₂ und H₂O.

Der CO₂-Anfall im Gewebe ist abhängig von der Arbeitsleistung:

- in Ruhe 250-300 ml CO₂/min.
- bei normalen Tauchgängen 600 – 1000 ml CO₂/min.
- bei schwerster Arbeit bis > 6000 ml CO₂/min.

Das CO₂ diffundiert (*aufgrund seines höheren Partialdrucks*) aus den Gewebezellen in die umgebenden Blutkapillaren, also ins Blutplasma, und wird dort physikalisch gelöst. Normobar erfolgt der Transport erfolgt zu 88 % als HCO₃⁻ (Bikarbonat) in Plasma und Erythrocyten, zu 6 % als Carbamino-HB (*am Hämoglobin gebundenes CO₂*) und zu etwa 6 % physikalisch gelöst. (*Andere Autoren geben hier als Zahlenwerte an: 80 %, 10 %, 10%.*) Das CO₂ wird mit dem Blutstrom in Richtung Lunge abtransportiert.

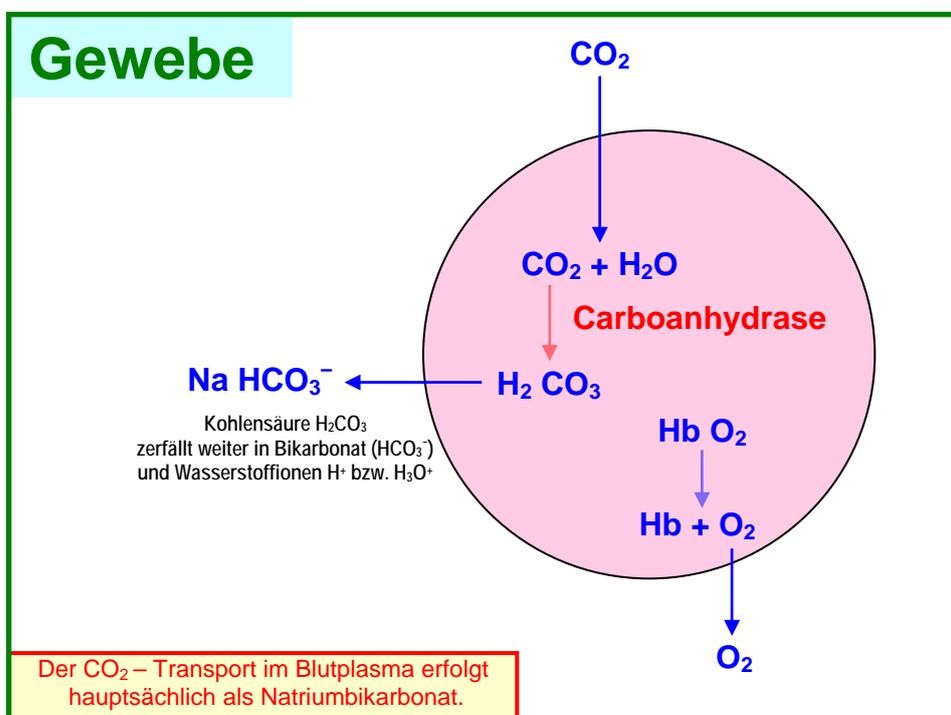
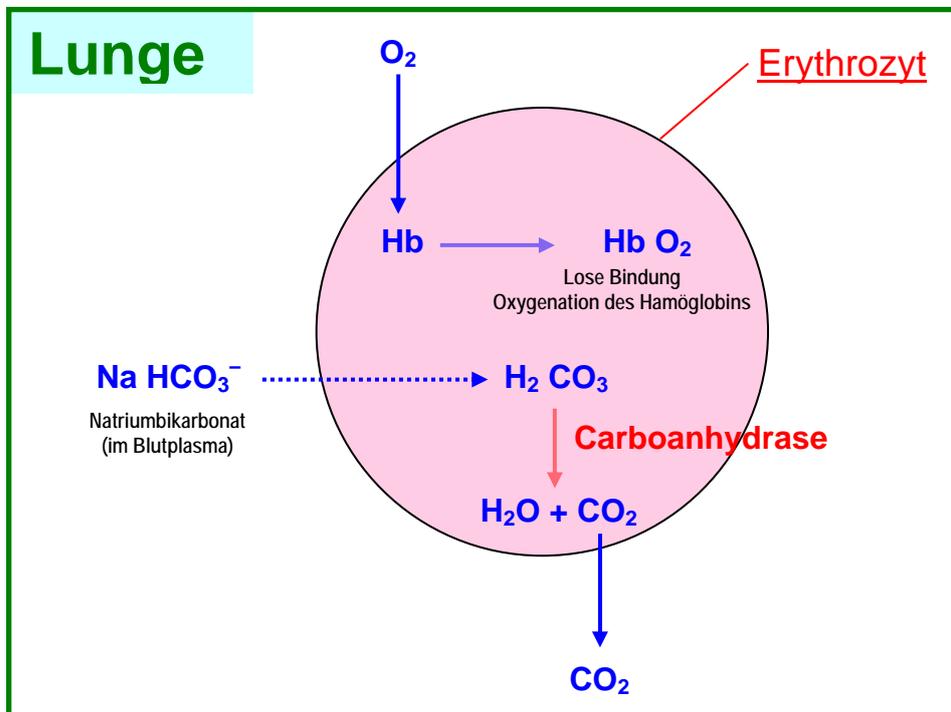
Für den Transport in chemisch gelöster Form sind die Vorgänge in den Erythrozyten und dabei insbesondere die Wirkung des Enzyms „**Carboanhydrase**“ von Bedeutung. Enzyme sind von lebenden Zellen erzeugte besondere Eiweißstoffe, die an sich langsam verlaufende chemische Reaktionen beschleunigen und lenken. Sie wirken praktisch als „**Katalysator**“.

Das Enzym Carboanhydrase beschleunigt die folgende Reaktion in beide Richtungen (je nach pCO₂):

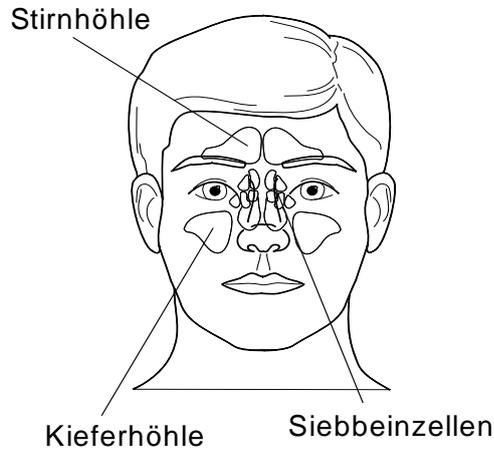


Im Bereich der Lunge wird dadurch die Aufnahme von O₂ und die Abgabe von CO₂, im Bereich des Gewebes die Aufnahme des CO₂ und die Abgabe des O₂ bewerkstelligt.

Die folgende Abbildung stellt die oben beschreibenden Vorgänge graphisch dar:



2.3. Gasgefüllte Körperhöhlräume



Luftgefüllte Hohlräume im Schädel		
Nasennebenhöhlen (NNH)	Stirnhöhle	Paarig angeordnete, luftgefüllte, mit Schleimhaut ausgekleidete Räume, die mit der Nasentrachee in Verbindung stehen.
	Keilbeinhöhle	
	Kieferhöhle	
	Siebbeinzellen	
Mittelohr	Paukenhöhle	
	Warzenfortsatzzellen (<i>Mastoidzellen</i>)	

Weitere gasgefüllte Körperhöhlräume
Lunge
Magenblase Dickdarm Dünndarm

2.4 Ohr

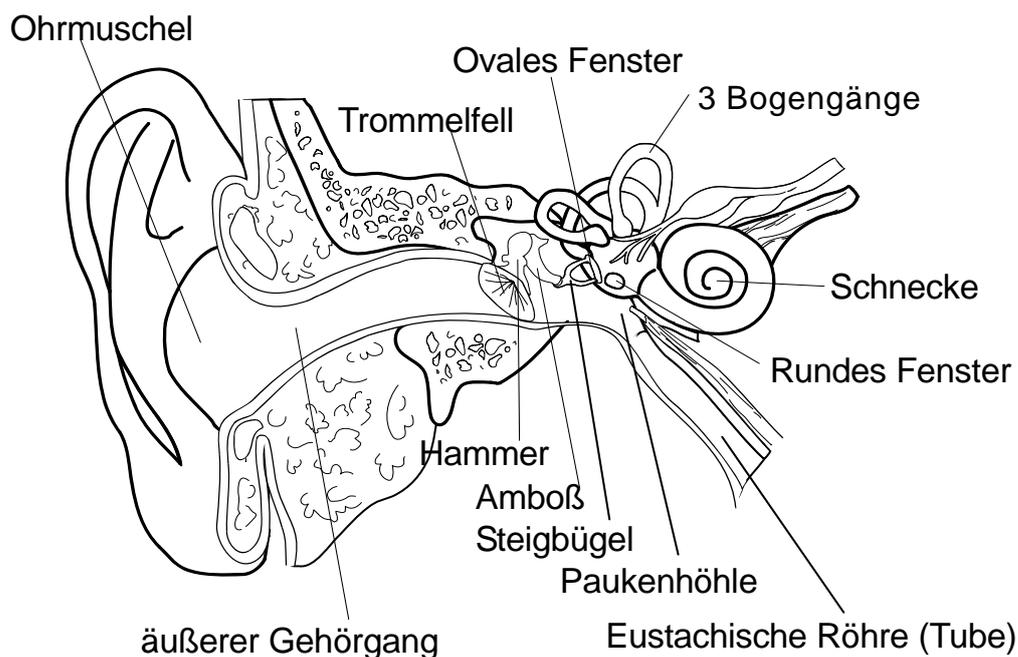
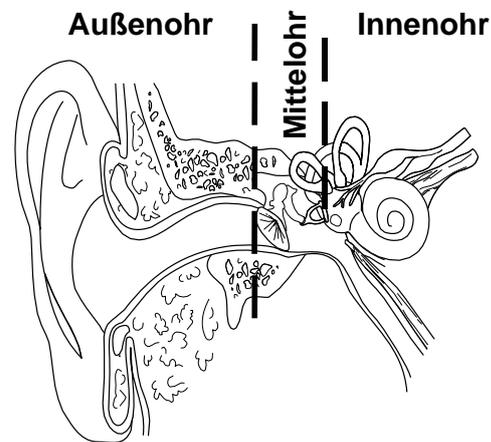
Das Ohr gliedert sich in Außenohr, Mittelohr und Innenohr:

Außenohr: Ohrmuschel, Gehörgang

Grenze zwischen Außenohr und Mittelohr:
Trommelfell

Mittelohr (Paukenhöhle):
Gehörknöchelchen (Hammer,
Amboss, Steigbügel)

Innenohr: Schnecke, Bogenapparat,
Hörnerv



Die knöcherne Wand des Innenohres wird durch das runde Fenster und durch das ovale Fenster unterbrochen. Die Gehörknöchelchen übertragen Schwingungen (Druckwellen) vom Trommelfell (Außenohr) auf die Flüssigkeit (Endolymphe) hinter dem ovalen Fenster.

*Bartolomeo Eustacchi(o), ital. Anatom, * 1524 (?), †1574*

Die **Eustachische Röhre** ((*Ohr-*)Tube, Ohrtrumpete, *Tuba auditiva*, *Tuba eustachii*) verbindet das Mittelohr mit den oberen Rachenraum. Schleimhautwandungen dieses Kanals halten die Tube verschlossen; beim Schlucken erfolgt Öffnung durch kleine Muskeln (= Druckausgleich).

Die Aufgaben der Eustachischen Röhre sind:

- Verhinderung der Schalleitung ins Ohr beim Kauen (Kaugeräusche)
- Verhinderung des Eindringens von Infektionen in das Mittelohr
- Transportweg für Schleimabsonderungen (dafür 1-2 Öffnungen pro Minute)
- passiver und aktiver (z. B. *beim Tauchen*) Druckausgleich

2.4.1 Äußerer Gehörgang: Entzündung / Vorbeugung

Der äußere Gehörgang erstreckt sich über eine Länge von etwa 2,5 cm vom äußeren Ohr bis zum Trommelfell. Durch Ohrenschmalz (*Zerumen*, *Cerumen*) werden seine Wände vor Staub, Schmutz und verunreinigtem Wasser wirkungsvoll geschützt.

Ohrenschmalz

- gelblich-bräunliche, fettige Absonderung der Ohrenschmalzdrüsen
- pH-Wert: leicht sauer
- wirkt bakterizid (*bakterienabweisend*, *-tötend*)
- wirkt fungizid
- wasserabstoßend

Wird das Ohrenschmalz mit Gerätschaften wie beispielsweise Wattestäbchen (z. B. "*Q-Tips*") entfernt, besteht die Gefahr die Gehörgangshaut zu verletzen und damit eine Besiedlung mit Keimen (pathogene Mikroorganismen) zu erleichtern. Von der Verwendung von Wattestäbchen wird deshalb dringend abgeraten!

Beim Eintauchen ins Wasser (*Tauchen*, *Baden*) wird der äußere Gehörgang zwangsläufig mit Wasser geflutet. Dieses meist unsaubere oder chlorhaltige Wasser verbleibt teilweise im Gehörgang und weicht ihn auf. Salzwasser (*auch Chlorwasser*) führt beim Trocknen zur Auskristallisation von Salz und damit nachfolgend zu einer Austrocknung der Gehörgangshaut. Im Ergebnis kommt es zur Auswaschung des schützenden Ohrenschmalzes. Die Gehörgangshaut wird nun rissig und spröde und damit ein idealer Nährboden für Keime. Folge ist eine schmerzhaft Entzündung (Schwellung) der Gehörgangshaut. In schweren Fällen kommt es zu Eiterbildung, Fieber und/oder Verschluss des Gehörganges.

Mögliche Symptome einer Gehörgangsentzündung:

- Juckreiz
- Heftiger stechender Schmerz
- Heftiger, fortdauernder und z. T. pochender Schmerz
- Halbseiten-Kopfschmerz
- Schmerz bei Druck auf die knorpelige Erhebung am äußeren Ohr (*Tragus*)
- Schmerz beim Ziehen am Ohrläppchen
- Hörminderung
- Starke Schmerzen beim Sprechen und beim Kauen.

Vorbeugung:

- Zugluft vermeiden (Mütze tragen)!
- Nach jedem Tauchgang mit körperwarmen, sauberem Trinkwasser spülen und sorgfältig lufttrocknen (fönen); ggf. danach fetten.
- Vorbeugend empfiehlt sich eine Reduktion der Keime (*Streptokokken, Staphylokokken, Pseudomonas aeruginosa, u. a.*) durch Einträufeln von entsprechend wirksamen Ohrentropfen (alkoholische Essigsäurelösungen). Nach Absprache mit einem HNO- oder Taucherarzt bieten sich verschiedene, nicht verschreibungspflichtige Rezepturen an. Nach der Anwendung dieser Tropfen muss der fetthaltige Schutzfilm im Gehörgang wieder aufgebaut werden. Dazu verwendet man beispielsweise einen Tropfen Öl (Oliven- oder Mandelöl aus der Apotheke). Diese Mittel brauchen nicht tief in den Gehörgang eingebracht werden. Durch die körpereigene Erwärmung verteilt sich das Öl selbstständig im Gehörgang. Anwendung: einmal täglich am Abend.

Ein bewährtes Rezept ist nachfolgend wieder gegeben:

<p>Rezept</p> <p>(Schreibweise für Apotheker)</p> <table> <tr> <td>Acid Acet glac mind 99</td> <td style="text-align: right;">0,5</td> </tr> <tr> <td>Aqua purif</td> <td style="text-align: right;">2,5</td> </tr> <tr> <td>Alcohol Isopropylicus</td> <td style="text-align: right;">ad 50,0</td> </tr> </table> <p>(Alternative Schreibweise, identisches Rezept)</p> <table> <tr> <td>Eisessig</td> <td style="text-align: right;">0,5</td> </tr> <tr> <td>Gereinigtes Wasser</td> <td style="text-align: right;">2,5</td> </tr> <tr> <td>Isopropanol</td> <td style="text-align: right;">ad 50,0</td> </tr> </table> <p><u>Veraltete Rezepte</u> Da der Verkauf von Borsäure nicht mehr zulässig ist, sind Mittel mit diesem Bestandteil nicht mehr erhältlich.</p>	Acid Acet glac mind 99	0,5	Aqua purif	2,5	Alcohol Isopropylicus	ad 50,0	Eisessig	0,5	Gereinigtes Wasser	2,5	Isopropanol	ad 50,0	<p>(Frau Dr. Branse-Passek (Apothekerin, Pharmazeutin in der Arzneimittelpfprüfung) und Dr. Muth, aus: <i>tauchen</i> 6/02)</p>
Acid Acet glac mind 99	0,5												
Aqua purif	2,5												
Alcohol Isopropylicus	ad 50,0												
Eisessig	0,5												
Gereinigtes Wasser	2,5												
Isopropanol	ad 50,0												

Behandlung (Therapie):

Die Behandlung einer Gehörgangsentzündung (*Otitis externa diffusa*, ‚*Taucherohr*‘, ‚*Swimmers ear*‘) sollte durch einen HNO-Facharzt erfolgen. Nach Entnahme eines Abstrichs des Ohrsekrets aus dem äußeren Gehörgang und nachfolgender mikrobiologischer Untersuchung zur Identifizierung des Erregers, erfolgt die Behandlung mit antibiotischen, entzündungshemmenden, abschwellenden und schmerzstillenden Mitteln. Typische Medikamente sind „*Panotile*®“, „*Ofloxin*®“ und „*Floxal*®“-Augentropfen (auch diese zum Einträufeln ins Ohr). Für die Behandlungsdauer besteht ein absolutes Tauch- und Badeverbot!



Bei Reisen (Taucheinsätzen) in Gebiete mit unzureichender medizinischer Versorgung gehört ein entsprechendes Mittel in die **Reiseapotheke!** Die genannten Medikamente sind verschreibungspflichtig!

Hinweis:

Auch bei vollständig verschlossenem Gehörgang ist ein Hören möglich. Die Schallwellen werden durch die umgebenden Knochen geleitet (Knochenleitung). Beim Tauchen wird dieser Effekt bei der Verwendung von „*Körperschallmikrofonen*“ genutzt.

2.4.2 Druckausgleichstechniken

Beim Auftauchen (Abnahme des Umgebungsdruckes) öffnet sich die Tube aufgrund ihrer Bauart automatisch bei einer Druckdifferenz von etwa 10 - 15 mbar. Ein willkürlicher Druckausgleich ist nicht notwendig, die Tube wirkt wie ein Überdruckventil.

Beim Abtauchen nimmt der Umgebungsdruck (Tauchtiefendruck) zu. Damit es zu keinen schädlichen Druckdifferenzen zwischen der Umgebung und der Paukenhöhle kommt muss rechtzeitig der sogenannter „Druckausgleich“ über die Eustachischen Röhre (Tube) erfolgen. Beträgt die Druckdifferenz beim Abtauchen von der Oberfläche aus mehr als etwa 100 mbar wird die Tube blockiert („*Tubenblock*“) und ein willkürlicher Ausgleich ist unmöglich. *Bei etwa 50% aller Menschen findet sich eine erschwerte Tubendurchlässigkeit.* Bereits bei leichten Erkältungen können die Schleimhäute im Nasen-Rachen-Raum soweit angeschwollen sein, dass ein einwandfreier Druckausgleich nicht mehr möglich ist.

Techniken des Druckausgleiches

Druckausgleich durch Schlucken:

Bewusste Schluck-, Kau- oder Gähnbewegungen, dabei: Unterkiefer vorschieben, Mund auf, Kopf in den Nacken.

Vorteil: Schonendster Druckausgleich!

Die Tuben werden durch die Anspannung der Gaumenmuskulatur weitgestellt, es findet keine Druckerhöhung statt, das Trommelfell bleibt unbelastet.

Nachteil: Bei großen Druckdifferenzen schwer durchführbar, unmöglich bei Personen mit einer erschwerten Tubendurchlässigkeit.

Druckausgleich nach Valsalva:

(Valsalva, 1704)

Mund und Nase werden verschlossen, der Druck wird mit der Lunge in den Nasen-Rachenraum gepresst, die Tuben(-lippen) werden aufgesprengt (Atemmuskulatur arbeitet mit).

Nachteil: Der Druckausgleich geschieht abrupt (Überdruck im Ohr ~53 mbar).

Gefahr: Der Druck in der Lunge wirkt auch auf Herz und Kreislauf, es kann zu Blutdruckabfällen kommen.

Druckausgleich nach Frenzel:

(Frenzel, Luftwaffenarzt, entwickelte Methode für Stuka-Pilot, 1938)

Mund und Nase werden verschlossen, der Kehlkopf ebenfalls, indem man die Muskulatur des Mundbodens nach hinten/oben drückt. Die Erhöhung des Druckes wird mit der Bewegung des Zungengrundes erreicht.

Vorteil: Keine Kreislaufprobleme, da die Druckerhöhung nur bis zum Nasenrachenraum reicht.

Nachteil: Es werden im Nasenrachenraum Drücke bis etwa 120 mbar erreicht, es findet eine Tubensprengung statt.

Gefahr: Barotrauma des Innenohres (Trommelfell macht abrupte Bewegung, die mit den Gehörknöchelchen auf das ovale Fenster übertragen wird → Druckwelle entsteht → das runde Fenster reißt.)

2.5 Ohnmacht (Blackout) beim Tauchen

2.5.1 Schwimmbad-Blackout

(Bitte nicht verwechseln mit Flachwasser-Blackout, diese betrifft nur Apnoe-Tieftaucher (s. a. 2.5.2))

Unter einem **Schwimmbad-Blackout** versteht man eine Bewusstlosigkeit unter Wasser, die durch **plötzlichen Sauerstoff-Mangel** während des Streckentauchens auftritt. Es gibt **keine Warnzeichen!**

Der Schwimmbad-Blackout tritt häufig auf, wenn vor dem Streckentauchen übermäßig (schnell und tief) ein- und ausgeatmet wird. Diese Atemtätigkeit wird als **Hyperventilieren** bezeichnet. Die *Hyperventilation wird von Tauchern häufig angewandt, um die Apnoezeit zu verlängern (bis zu 40%)*. Durch willkürliche Hyperventilation kann die **Sauerstoffsättigung im Blut nicht erhöht werden** (bzw. nur geringfügig), da das Blut im Allgemeinen bereits zu 95 - 98 % gesättigt ist.

Hyperventilation bewirkt ein verstärktes Abatmen von Kohlendioxid (CO₂). Dadurch kommt es zu einer **Absenkung der CO₂-Spannung im Blut** [*Hypokapnie*], d.h. der **Atemreiz wird verringert**.

Der

Atemzwang setzt erst verspätet ein (verzögert)

d. h. beim Streckentauchen kommt das

"Austauschen!! - Signal ↑↑"
zu spät

und der dann bereits eingetretene

Sauerstoff-Mangel

führt meist kurz vor oder nach **Erreichen** der Wasseroberfläche zu einer

Bewusstlosigkeit

mit der

Gefahr des "Absackens" und Ertrinkens.



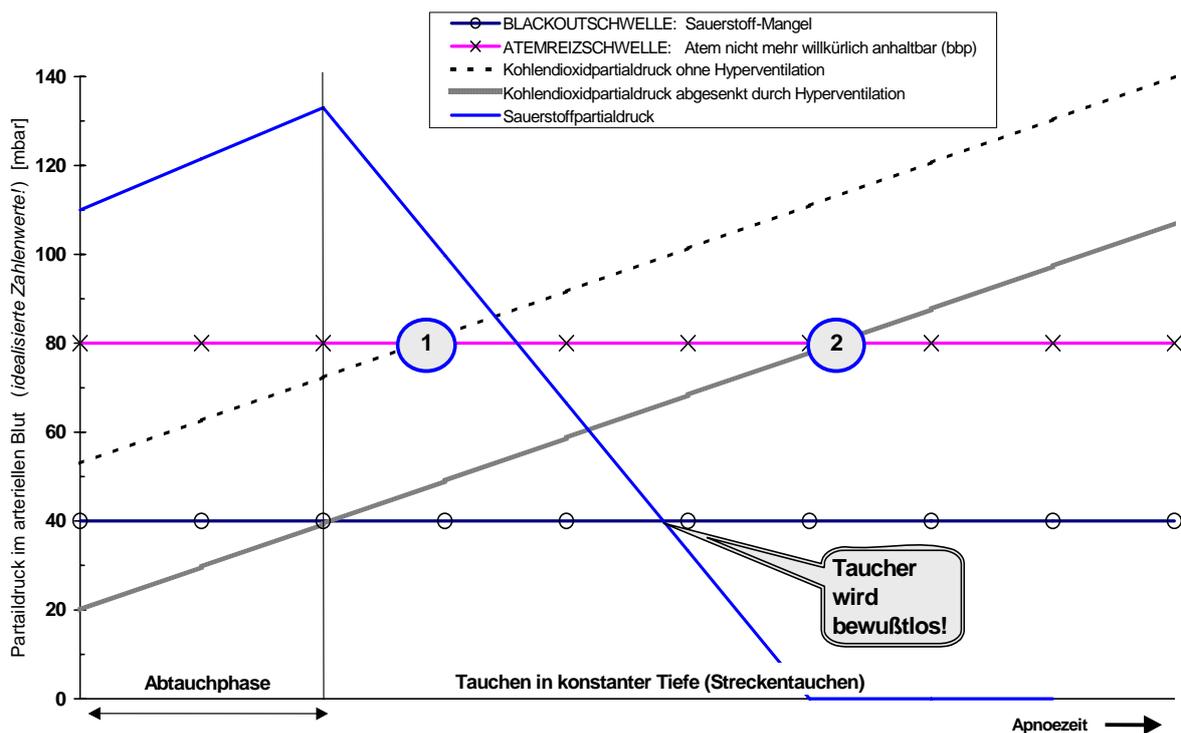
Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Sauerstoff- und Kohlendioxidpartialdrücke im Blut während des Streckentauchens ohne und mit Hyperventilation:

Die durchgezogene Kurve ohne Marker zeigt den Verlauf des Sauerstoffpartialdruckes. Während des Abtauchens steigt der Sauerstoffpartialdruck aufgrund der Druckzunahme erst etwas an, ab Erreichen des Bodens nimmt er entsprechend des Verbrauchs (Stoffwechselfätigkeit) kontinuierlich ab.

Die in der Abbildung von links nach rechts ansteigenden Linien (gestrichelt bzw. grau-breit) zeigen die zeitliche Zunahme des Kohlendioxidpartialdruckes mit bzw. ohne Hyperventilation.

Beim Tauchen ohne Hyperventilation (gestrichelte Linie) wird die CO_2 -Atemreizschwelle ❶ („breathhold breaking point“ (bbp)) [CO_2 -Partialdruck etwa 80 mbar, horizontale Linie mit „x“-Symbolen] erreicht, bevor ein kritischer Sauerstoffwert erreicht ist.

Beim Tauchen mit Hyperventilation wird die Blackout-Schwelle (Sauerstoffmangel) [O_2 -Partialdruck etwa 40 mbar, horizontale Linie mit „o“-Symbolen] unterschritten, bevor ein deutlicher CO_2 -Atemreiz ❷ einsetzt.



Bei entsprechendem Training ist ein Streckentauchen bis 50 m (unter Aufsicht) auch ohne Hyperventilation möglich. Durch Atmen von sauerstoffangereicherter Luft können die Apnoezeiten gesteigert werden.

Streckentauchen nach Hyperventilation ist lebensgefährlich!

Streckentauchen immer unter Aufsicht durchführen!

2.5.2 Geräte-Blackout

Während beim Streckentauchen die Hyperventilation vorsätzlich und bewusst erfolgt, ist ein solches Verhalten beim Gerätetauchen widersinnig, da normalerweise genug Atemgas zur Verfügung steht. In bestimmten Situationen kann es aber zu einer unwillkürlichen (unbewussten) Hyperventilation kommen.

Bei Kälte, großer Tiefe, Hektik, Aufregung oder Angstzuständen kommt es beim Gerätetaucher zu einer Steigerung des Atemminutenvolumens (AMV) und damit möglicherweise zu einer unbewussten Hyperventilation. Dadurch wird verstärkt Kohlendioxid abgeatmet, der Kohlensäurespiegel im Blut sinkt ab und der pH-Wert verschiebt sich in den alkalischen Bereich. Folge ist eine reflektorische Engstellung der Arterien und nach einer gewissen Einwirkzeit ist die Hirndurchblutung deutlich reduziert. Der abgesenkte Kohlensäurespiegel verursacht zusätzlich eine starke Bindung des Sauerstoffs an das Hämoglobin, sodass auch dadurch die Sauerstoffversorgung des Gehirns weiter reduziert wird. Letztendlich kommt es zu einem Sauerstoffmangel (Hypoxie) der Gehirnzellen. Erste Anzeichen sind Übelkeit, Brechreiz und Kopfschmerzen. Im weiteren Verlauf kommt häufig zu einer angstbedingten Pressatmung und letztendlich zur Bewusstlosigkeit.

[Psychisch labile Menschen mit unterschwelliger Hyperventilationssymptomatik werden deshalb als nicht tauchtauglich eingestuft.]



Erste Maßnahmen:

Taucher mit übermäßiger Hyperventilation sollen versuchen ihre Atemfrequenz zu senken, ihren Taucherpartner zu informieren und soweit möglich gemeinsam an die Oberfläche aufsteigen. Dort sind dann Rettungsweste/Jacket aufzublasen. Der Betroffene darf nicht alleine versuchen zum Boot/an Land zu schwimmen, da die Gefahr der Bewusstlosigkeit besteht.

Beim schlauchversorgten Tauchen hat der Signalmann ständig auf die Atemgeräusche und Anzeichen von Hyperventilation zu achten. Bei Anzeichen von Hyperventilation muss der Taucher sofort seine Arbeit einstellen. Nach Rückkehr an die Oberfläche muss er versuchen seine Atemfrequenz zu senken oder die Atmung für kurze Perioden anzuhalten. Einen CO₂-Anstieg erzielt man auch, wenn man die betroffene Person in eine Einkaufstüte ein- und ausatmen lässt.

2.5.3 Aufstiegs-Blackout (Sauerstoffmangel beim Apnoetieftauchen)

(Frühere Bezeichnung: Flachwasser-Ohnmacht)

Beim freien Tauchen ohne Gerät auf Tiefe (Apnoetieftauchen) besteht die Gefahr eines Blackouts beim Austauchen.

Beim Abtauchen erhöht sich der Umgebungsdruck und damit auch die Partialdrücke im Atemgasgemisch in der Lunge. Anfänglich wird dadurch mehr Sauerstoff im Blut physikalisch gelöst. Ebenfalls möglich ist ein Anstieg des CO₂, dieser ist aber noch weit von der Atemreizschwelle entfernt.

Bereits beim Abtauchen und dann während des gesamten Tauchganges wird ständig O₂ in den Körperzellen verbraucht. Durch die höhere Löslichkeit in der Tiefe ist dort ein ausreichendes Angebot von Sauerstoff gegeben.

Beim Austauchen sinken die Partialdrücke und eine Abgabe von O₂ aus dem Blut in die Lunge ist möglich. Bei Unterschreitung des Schwellenwertes für O₂ im Blut kommt es zu einem **Sauerstoffmangel** (Anoxie), der ohne weitere Warnzeichen zur **Bewusstlosigkeit kurz vor** oder nach dem **Erreichen der Oberfläche** führen kann.

Wenn in der Tiefe bereits ein starker Atemreiz gespürt wird, ist dies als absolutes Warnzeichen für einen drohenden Sauerstoffmangel zu interpretieren.

Nie Freitauchversuche mit Rekordtiefen /-zeiten durchführen!

Schnorcheltaucher, die Gerätetaucher bergen,
sind aufgrund der erhöhten Arbeitsleistung besonders gefährdet.

Grundsatz: Schnorchel nie allein bzw. nie ohne Aufsicht!

2.6 Tauchreflex und Wasser-Nasen-Reflex

Der "Tauchreflex" bewirkt eine Verlangsamung der Herzrhythmickeit (-frequenz) (*Bradycardie = Verlangsamung des Herzschlages*) und eine Drosselung des Blutdurchflusses in der Peripherie. Zum Tauchreflex kommt es beim Eintauchen des Gesichtes in Wasser (*Rezeptoren um Mund und Nase*). Die Stärke des Reflexes hängt stark von der Wassertemperatur und dem Schutz der Gesichtspartien durch Voll- oder Halbmasken ab. Er ist am stärksten beim Tauchen ohne Maske und bei kaltem Wasser. Auch durch Apnoetauchen (Atemanhalten) kommt es zu einer Bradycardie. Die Anpassung des Körpers über den Tauchreflex führt zur Sauerstoffersparnis beim Tauchen.

Der "Wasser-Nasen-Reflex" bewirkt ein Anhalten der Atmung, wenn Rezeptoren in der Nasenschleimhaut mit Wasser in Kontakt kommen. Deshalb sind einige Tauchanfänger beim Tauchen ohne Maske anfänglich nicht in der Lage aus dem Atemregler zu atmen.

2.7 Essoufflement (Kurzatmigkeit, außer Atem)

Durch eine zunächst unbemerkte, schnelle und flache Atmung ('hecheln') kann ein Gerätetaucher in einen Zustand geraten, in dem er sein Atemverhalten nicht mehr kontrollieren kann. Er kommt dadurch in akute Lebensgefahr.

Der zugrundeliegende Vorgang wird mit dem französischen Begriff "Essoufflement" (= Kurzatmigkeit, außer Atem) bezeichnet.

Ursache:

Mit zunehmender Tauchtiefe erhöhen sich die Dichte und Viskosität des Atemgases. Im Atemregler und in den Atemwegen wechselt die Strömungsart des Atemgases von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung. Der Widerstand an den Wänden der Atemwege nimmt dadurch zu und das Atemminutenvolumen (AMV) sinkt. Die Atemebene verschiebt sich in den Bereich des inspiratorischen Reservevolumens. In der Lunge verbleibt vermehrt Atemgas mit erhöhtem CO₂-Anteil (= verbrauchte Luft) (Totraumvolumen ↑).

Zunächst bleibt dieser Vorgang unbemerkt, später nimmt der Taucher seine verstärkte Atmung wahr und fühlt eine zunehmende Atemnot. Es beginnt sich ein "Teufelskreislauf" zu etablieren. Der Taucher konzentriert sich in seiner Wahrnehmung immer stärker auf den Rhythmus seiner Atmung und weniger auf seine Umgebung. Er gerät in eine CO₂-Vergiftung. Oft vermutet der Taucher die Ursache seiner Atemnot in einem Defekt seiner Atemgasversorgung und wechselt deshalb auf den Zweitautomaten seines Tauchpartners bzw. führt mit diesem eine Wechselatmung durch. Da die Ursache damit nicht beseitigt wird, gerät der Taucher meist in Panik. Er versucht dann auf dem schnellsten Wege an die Wasseroberfläche zu kommen (unkontrollierter Notaufstieg) um dort seinen vermeintlichen "Lufthunger" zu stillen. Durch die Kohlendioxidvergiftung ist auch eine Bewusstlosigkeit unter Wasser möglich. Nach Aspiration von Wasser kommt es dann in der Regel zum Ertrinkungstod (☠).

Sofortmaßnahmen unter Wasser:

- Bei den ersten Anzeichen von Kurzatmigkeit auf eine **tiefe Ausatmung** konzentrieren, (dabei nicht absacken!) und die **körperlichen Anstrengungen sofort beenden** (d.h. Arbeit unterbrechen, nicht gegen die Strömung tauchen).
- Eine deutlich geringere Tauchtiefe aufsuchen.
- Dem Tauchpartner durch das UW-Zeichen "Essoufflement" auf die mögliche Gefahr hinweisen:

Gegenläufiges Wedeln der abgewinkelten Unterarme in Höhe des Rippenbogens.

- Durch Gestik dem Partner zum „tiefen Ausatmen“ bewegen. Ggf. den Partner tarieren und beruhigen.
- Panikaufstieg verhindern / abbremsen / kontrollieren.

Verstärkende Faktoren:

Sparatmung (*Begriffserläuterung im Kap. 2.1.6*) → die Atemmittellage verschiebt sich nach oben in Richtung inspiratorische Reservekapazität.

Erhöhte CO₂-Produktion durch:

- Arbeit
- Strömung
- mangelnde Kondition
- zu viel Blei, falsche Tarierung (zuwenig Auftrieb)
- Angst, Stress
- Kälte
- enger Tauchanzug, zu enge Begurtung
- selten: Defekte am Atemregler (zu hoher Atemwiderstand)

Vorbeugen:

- Bewusst **tief ausatmen** und ruhig weiteratmen.
- Insbesondere unter Belastung die eigene Atmung beobachten.
- Bei Verdacht auf einen Gerätedefekt auch das eigene Atmungsverhalten beobachten.
- Für gute Kondition sorgen (Trainieren!).

Maßnahmen an Land bzw. an Bord:

- Maßnahmen (Einleiten der Rettungskette) sind nur bei Folgeschäden (wie beispielsweise Barotrauma der Lunge, Beinahe-Ertrinken) notwendig.

Ergänzung:

Als Ursache für das Auftreten eines 'Essoufflement' wird von einigen Lehrbuchautoren eine Ermüdung der untrainierten Atemhilfsmuskulatur angegeben.

Dagegen spricht (nach Dr. J. Wenzel (DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln), 2003):

- *Das Essoufflement tritt innerhalb weniger Minuten auf und so schnell ermüdet keine Muskulatur.*
- *Nach tiefen Tauchgängen unter Belastung müsste ein Muskelkater der Atemhilfsmuskulatur auftreten, dies wurde bisher nicht beobachtet.*

2.8 Dehydratation

"Dehydratation" = Flüssigkeitsabnahme im menschlichen Körper aufgrund gesteigerter Wasserabgabe ohne entsprechenden Ausgleich

Bei gemäßigten Umgebungstemperaturen liegt der Flüssigkeitsverlust eines Menschen bei etwa 2,5 l pro Tag, davon etwa 1,5 l über den Harn, 0,5 l über die Haut und 0,4 l über die Lunge. Der Wasserverlust über die Haut kann unter tropischen Klimabedingungen auf 10 bis 12,5 l steigen.

Bei sportlicher Betätigung produzieren die Schweißdrüsen der Haut verstärkt flüssige Absonderungen um den Körper mit Hilfe der Verdunstung abzukühlen. Gleichzeitig kommt es aufgrund des erhöhten Atemminutenvolumens zu einer stärkeren Wasserdampfabgabe über die Ausatmung. Beide Effekte summieren sich zu einem zusätzlichen Flüssigkeitsverlust von bis zu zwei Litern pro Stunde.

Auch ein Tauchereinsatz umfasst grundsätzlich eine sportliche Betätigung. Der Taucher 'schwitzt' häufig unbemerkt, da er sich in nasser und meist kühler Umgebung befindet. Zur Erwärmung und Anfeuchtung der extrem trockenen Atemluft (*nach DIN*) bei gleichzeitig erhöhtem Luftumsatz unter Tauchtiefendruck muss der menschliche Körper große Menge Wasserdampf bilden. Dies führt dann zu einer entsprechenden Abnahme an Körperflüssigkeit. Durch Kreislaufregulationsvorgänge (*'Taucherdiurese'*) wird die Urinproduktion durch die Niere auf 200-600 ml pro Tauchgang gesteigert. (*Nach einem Tauchgang verspürt jeder Taucher daher einen starken Harndrang.*)

Insgesamt ergibt sich für einen Taucher ein etwa 2% iger Gewichtsverlust durch Dehydratation (~ 1,6 l bei einer 800 N schweren Person). Diese Flüssigkeitsmenge wird vorwiegend dem Blut entzogen. Es wird dadurch dickflüssiger (viskoser), fließt entsprechend langsamer und erreicht bestimmte Gebiete nicht mehr. Der Abtransport von Stickstoff (N₂) verzögert sich erheblich und die **Gefahr von Dekompressionsunfällen**, insbesondere bei Tauchgängen mit hoher N₂-Aufsättigung, **ist deutlich erhöht**. Die reduzierte Sauerstoffversorgung bedingt ein Nachlassen der Leistungsfähigkeit um etwa 15% mit entsprechender Gefährdung des Tauchers in Belastungssituationen (z. B. starke Strömung).

Zur **Vermeidung eines Flüssigkeitsmangels** beim Tauchen wird empfohlen:

Zwei Stunden vor dem Tauchgang: 500 bis 700 ml zusätzlich trinken.

Kurz vor dem Tauchgang: 200 bis 300 ml zusätzlich trinken.

Nach dem Tauchgang und vor weiteren Tauchgängen ausreichend trinken.

Als Getränk eignet sich Mineralwasser mit wenig Kohlensäure, evtl. im Verhältnis 3:1 mit Fruchtsaft gemischt.

Die Aufnahme von koffeinhaltigen Getränken (Kaffee, schwarzer Tee) und/oder Alkoholika (Bier) führt zu einer gesteigerten Harnproduktion und damit zu einer weiteren Dehydratation. Auch körperliche Belastung (z. B.: Tragen schwerer Ausrüstung, Schwitzen im Tauchanzug, Joggen), Durchfall oder Fliegen vor einem Tauchgang verstärken den Flüssigkeitsverlust.

Diese Gefahren lassen sich aber durch entsprechendes Verhalten bzw. richtige Planung vermeiden!