

Physik und Medizin

DRUCK  
ATMUNG  
BLUTKREISLAUF

Teil 2

Umgebungsdruck und Atmungsstörungen

Lehrstuhl für Didaktik der Physik  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Giuseppe Colicchia, Andrea Künzl und Hartmut Wiesner

# Umgebungsdruck und Atmungsstörungen

## Vorbemerkungen

Die Atmung ist interessant, weil sie eine lebenswichtige Funktion für den Körper hat, nämlich die Versorgung mit Sauerstoff und den Abtransport von Kohlendioxid. Junge Menschen interessieren sich für Sport und Bewegung in der Natur. Bei Sportarten wie Bergsteigen und Tauchen kann es zu extremen Verhältnissen kommen, die zu einem großen Teil auf den herrschenden Umgebungsdruck zurückzuführen sind. Der Körper passt sich nur langsam dem niedrigen Luftdruck beim Bergsteigen in großen Höhen an [Zink (1985)]. Das andere Extrem sind die enormen Wasserdrücke, auf die sich der Körper beim Tauchen einstellen muss.

## Einleitung

Der menschliche Körper braucht zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur und zum Leisten von Arbeit eine bestimmte Energiemenge. Ein Großteil der Energie wird durch die Verbrennung von Nährstoffen gewonnen. Jede Zelle des Organismus muss daher mit Sauerstoff versorgt werden. Bei dem oxidativen Abbau von Nährstoffen entstehen wiederum Abfallprodukte (z. B. Kohlendioxid), die aus den Zellen an die Außenluft abgegeben werden müssen.

Bei kleinen und wenig entwickelten Tieren (z. B. Qualle, Regenwurm) atmen die Zellen direkt über die Haut. Bei Menschen genügt die Gasdifffusion durch die Haut (etwa  $1,8 \text{ m}^2$ ) zur Bewältigung des relativ großen Stoffwechsels nicht, weil ein relativ dickes Gewebe zwischen Hautkapillaren und Luft vorhanden ist, so dass nur ein sehr geringer Gasaustausch (ca.1%) stattfindet.

Hauptaufgabe des Atmungssystems ist die Sauerstoffsättigung des Blutes auf seiner Passage durch die Lungen durch Aufnahme von Sauerstoff und die Abgabe von Kohlendioxid. Das Atmungssystem hilft dem Körper zu atmen, d.h. Gase mit der Umgebung auszutauschen, indem es das Blutkreislaufsystem mit der Atmosphäre verbindet, die einen unbegrenzten Vorrat von Sauerstoff bietet und eine unbegrenzte Deponie für Kohlendioxid aus dem oxidativen Zellstoffwechsel darstellt.

## Physikalisches und medizinisches Hintergrundwissen

### a) Umgebungsdruck

Durchschnittlich lastet auf jedem Quadratcentimeter der Erde in Meereshöhe eine Luftsäule mit einer Masse von etwa 1 kg. Ihre Gewichtskraft erzeugt daher einen Bodendruck von ca.  $10 \text{ N/cm}^2 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ . Mit zunehmender Höhe wird die darüber liegende Luftsäule bzw. das Luftsäulengewicht kleiner und der Druck nimmt bei normalen Bedingungen pro 100 m um ca. 0,01 bar ab. Da auch die Luftdichte mit zunehmender Höhe abnimmt, wird die Druckabnahme/km kleiner. Die Barometrische Höhenformel  $p(h) = 1 \text{ bar} e^{-h/8432\text{m}}$  beschreibt diese Abhängigkeit.

Zu bemerken ist auch, dass mit zunehmender Höhe nicht nur der Druck sondern auch die Temperatur abnimmt und zwar in Mittel um ca.  $6,5^\circ\text{C/km}$  (Bild 1).

Unter Wasser muss zum Luftdruck (1 bar) der Schweredruck des Wassers summiert werden. Der Schweredruck des Wassers nimmt pro 10 m Tiefe um ca. 1 bar zu.

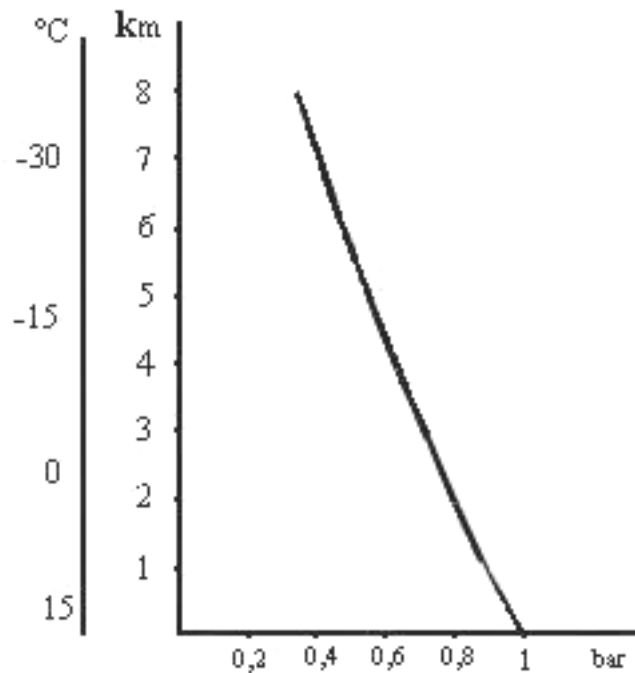


Bild 1: Temperatur und Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe

### b) Zustandsgleichung des idealen Gases

Die allgemeine Gasgleichung bestimmt das Verhalten eines idealen Gases:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

wobei  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $n$  die Zahl der Mole,  $R$  die allgemeine Gaskonstante und  $T$  die Temperatur in Kelvin ist. Diese Gleichung gilt in guter Näherung für Gase mit geringer Dichte (z. B. Luft bei atmosphärischem Druck).

### c) Partialdruck

Bei einer Gasmischung (Luft) tragen alle darin enthaltenen Gase zum Druck bei. Jedes einzelne Gas liefert zum Gesamtdruck einen Beitrag (Partialdruck). Bei idealen Gasen ist der Partialdruck eines Gases gleich dem Druck, den dieses ausüben würde, wenn es sich allein in dem gesamten Volumen befände, das die Gasmischung einnimmt (Dalton'sches Gesetz). Der Gesamtdruck entspricht also der Summe der Teildrücke seiner Bestandteile (Bild 2):

$$p = p_A + p_B + p_C + \dots$$

Will man die allgemeine Gasgleichung und das Dalton'sche Gesetz bei der Lungenatmung anwenden, dann muss vom Gesamtdruck  $p$  noch der Sättigungsdampfdruck  $p_{H_2O}$  des Wasserdampfs abgezogen werden. Das Gas in der Lunge ist mit Wasserdampf gesättigt und für dieses gilt bei  $37^\circ\text{C}$  das ideale Gasgesetz natürlich nicht mehr.

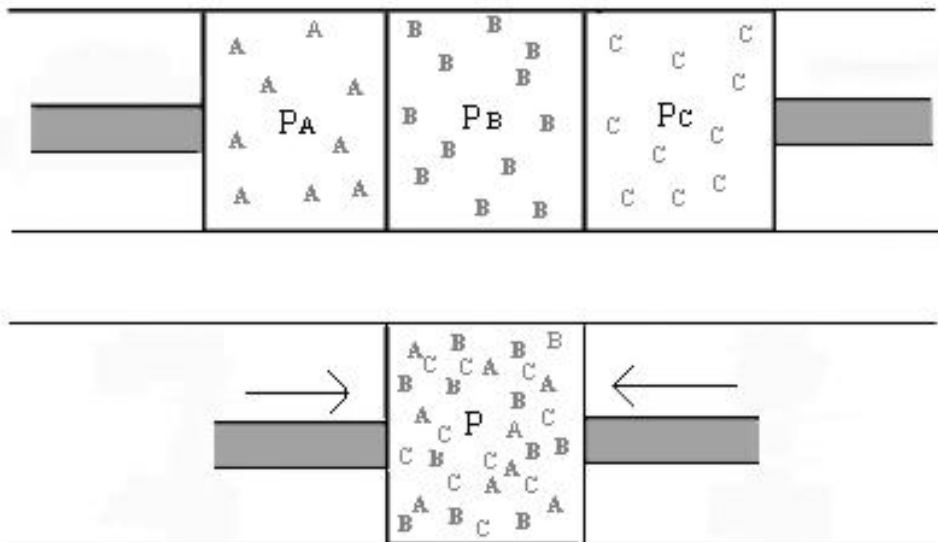


Bild 2: Die Gassorten A, B und C füllen einzeln das Volumen  $V$  aus. Die einzelnen Drücke sind  $p_A$ ,  $p_B$  und  $p_C$ . Der gesamte Druck  $p$  im unteren Volumen ist gleich die Summe der oberen Partialdrücke:  $p = p_A + p_B + p_C$ .

Wenn  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ , ... die notwendigen Volumina der einzelnen Gase zur Entstehung des Drucks  $p$  sind, d. h.  $V_A + V_B + V_C + \dots = V$ , sind die Partialdrücke nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetz  $p_A = p \cdot V_A/V$ ,  $p_B = p \cdot V_B/V$  ...

Luft, die unter normalen Bedingungen als ideales Gas betrachtet werden kann, besteht aus ca. 21 Vol % Sauerstoff ( $O_2$ ) und ca. 79 Vol % Stickstoff ( $N$ ). Bei einem Gesamtdruck  $p$  ist daher der Partialdruck  $p_{O_2} = 0,21 \cdot p$  und  $p_N = 0,79 \cdot p$ .

#### d) $O_2$ -Diffusion

Sauerstoff geht von der Lunge nicht direkt in die Blutbahn über, sondern muss die alveoläre und kapillare Membran (ca.  $1 \mu m$ ) passieren, bevor er sich im Blut lösen kann. Dasselbe gilt für Kohlendioxid in der entgegengesetzten Richtung. Dieser Gasaustausch erfolgt durch Diffusion.

Für die diffundierte  $O_2$ -Menge  $M$  (Zahl der Mole) ist

$$M = t \cdot (p_{\text{Gas}}(O_2) - p_{\text{Blut}}(O_2)) \cdot K \cdot A / d,$$

wobei  $t$  die Diffusionsdauer,  $(p_{O_2 \text{ Gas}} - p_{O_2 \text{ Blut}})$  die  $O_2$ -Partialdruckdifferenz zwischen Alveolen (Lungenbläschen) und Blut,  $K$  die Diffusionsfähigkeit,  $A$  die Größe der Austauschfläche und  $d$  die Diffusionsstrecke ist. Der Sauerstoff im Blut, der an das Hämoglobin chemisch gebunden ist, trägt zum  $O_2$ -Partialdruck nichts bei.

#### e) Löslichkeit des Gases (Absorption)

Wenn sich ein Gas in Berührung mit einer Flüssigkeit bzw. einem Gewebe befindet, löst sich ein Teil des Gases in der Flüssigkeit bzw. in dem Gewebe. An der Grenzfläche zwischen dem Gasraum und der Flüssigkeit findet ein Austausch zwischen den Gas- und Flüssigkeitsmolekülen statt: Die Gasmoleküle dringen in die Flüssigkeit ein, gleichzeitig verläßt ein Teil der Gasmoleküle die Flüssigkeit auch wieder (Bild 3). Der Vorgang setzt sich so lange fort, bis Gleichgewicht herrscht, d. h. die Flüssigkeit mit Gas gesättigt ist. Die Löslichkeit eines Gases hängt von dem Gas und der Flüssigkeit ab ( $CO_2$  ist in Blutplasma z.B. 20 mal löslicher als  $O_2$ ), sie ist dem (Partial)Druck proportional und nimmt mit zunehmender Temperatur ab (Henry'sches Gesetz).

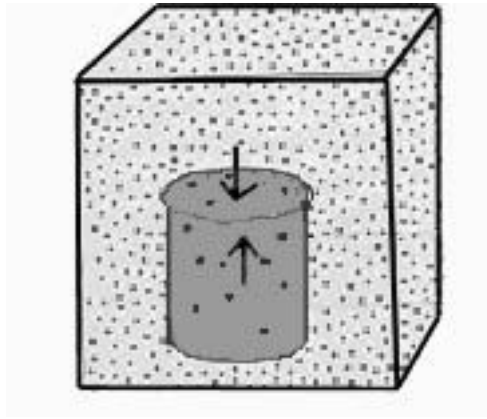


Bild 3: Die Gasmoleküle dringen in die Flüssigkeit ein, bis sie mit Gas gesättigt ist. Dann sind die Teilchenströme in die Flüssigkeit hinein und aus der Flüssigkeit heraus gleich groß.

### f) Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand  $R$  ist im allgemeinen das Verhältnis der Druckdifferenz zur Stromstärke. Bei der Atmung kann man spezifischer die Differenz zwischen Alveolen- und Umgebungsdruck ( $p_a - p_u$ ) und die Atemstromstärke ( $I$ ) annehmen, so dass der Wegströmungswiderstand  $R = (p_a - p_u)/I$  ist.

Ein großer Teil des Strömungswiderstandes ist im oberen Respirationstrakt zu finden, insbesondere bei Nasenatmung. Bei Einschränkungen (z.B. bei allergischen Anfällen) wird der größte Teil des Atemwegwiderstandes von den Bronchien und Bronchiolen verursacht, wobei dieser auf das 20fache ansteigen kann und eine lebensgefährliche Situation herbeiführen kann.

Bei laminarer Strömung ist der Widerstand umgekehrt proportional zur 4. Potenz des Radius und direkt proportional zur Länge eines Rohres. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten wird die Strömung in den größeren Luftwegen (z.B. Luftröhre) turbulent und der Strömungswiderstand nimmt zu.

### g) Oberflächenspannung und Lungen-Surfactant

Die Alveolen sind immer mit einer Flüssigkeitsschicht bedeckt. Die Oberflächenspannung  $\sigma$ , der Radius  $r$  der Alveole und der Luftdruck  $p$  in ihr sind verknüpft durch die Beziehung  $p = 2\sigma/r$ .

Würde die Oberflächenspannung  $\sigma$  in Alveolen verschiedener Größe gleich sein, dann wäre der Druck in kleinen Arteriolen gemäß obiger Beziehung größer als in größeren Arteriolen und Luft würde in die größten Alveolen strömen. So wie bei zwei miteinander verbundenen Luftballons, wobei der eine erst wenig und der zweite fast ganz aufgeblasen wurde. Der kleinere schrumpft und die Luft fließt in den größeren Ballon.

Alveolen kleineren Durchmessers kollabieren aber nicht, denn die Innenwände der Alveolen sind von einer Phosphorlipidschicht (Surfactant) ausgekleidet, die von einigen Zellen der Alveolen ausgeschieden wird und eine Reduzierung der Oberflächenspannung bewirkt. Je kleiner der Alveolendurchmesser ist, desto größer ist die Reduktion der Oberflächenspannung. Dies führt zu einer größeren Stabilität der Alveolen und zu einem geringeren Risiko des Kollapses.

Bei Neugeborenen ist wegen des sehr kleinen Radius der Alveolen die kollabierende Kraft entsprechend hoch. Ohne ausreichend vorhandene oberflächenaktive Substanz (wie es bei Frühgeborenen oft der Fall ist) erfolgt das Einatmen nur mit enormer Anstrengung. Es besteht daher bei Frühgeborenen die Gefahr, dass sie ohne mechanische Unterstützung zum Tod durch Erschöpfung kommen.

## **h) Aufbau des Atmungssystems**

Das Atmungssystem besteht aus mehreren luftführenden, mit Schleimhaut ausgekleideten Höhlen und Röhren: Die Nasenhöhle, der Rachen, der Kehlkopf, die Luftröhre, die Bronchien und die Bronchiolen (Bild 1 auf dem Arbeitsblatt zu Unterrichtseinheit 1).

Die Luftröhre teilt sich an ihrem unteren Ende in die beiden Hauptbronchien. Jeder Hauptbronchus teilt sich innerhalb der Lunge zuerst in kleinere Bronchien auf. Diese verzweigen sich weiter und bilden die noch feineren Bronchiolen. Die Bronchiolen wiederum verzweigen sich immer weiter bis zu mikroskopisch kleinen Ästchen (Alveolargängen), die in die Alveolen münden. Die Alveolen sind (etwa 300 Millionen) membranöse Lungenbläschen (Durchmesser 0,2 - 0,6 mm), über deren Kapillarnetze der Gasaustausch hauptsächlich erfolgt.

Die beiden Lungen sind schwammige Organe, die wegen ihres Aufbaus aus elastischen Fasern die Tendenz haben, sich zusammenzuziehen. Sie bestehen aus Millionen von Alveolen, und auch wenn sie nur mit wenigen Prozenten an der Körpermasse beteiligt sind, so haben sie eine riesige Oberfläche (50 - 100 m<sup>2</sup>) (bei Bergbewohnern etwas größer als bei Tieflandbewohnern), damit die Alveolen die erforderliche Gasdiffusion gewährleisten können.

Die Lungen enthalten ein großes Gasvolumen. Auch nach maximaler Ausatmung bleiben in den Lungen noch mehr als 3 l zurück (Residualvolumen). Das Volumen des einzelnen Atemzugs ist ca. 0,5 l bei ruhiger Atmung und bis 4 l bei tiefer Atmung. Die Bedeutung des Residualvolumens besteht darin, dass die eingeatmete frische Luft in Folge des Mischeffekts nur geringe zeitliche Schwankungen in der Zusammensetzung der Alveolarluft bewirkt.

## **i) Totraum**

Als anatomischen Totraum bezeichnet man das Volumen der Atemwege von der Nase bis zu den Terminalbronchien (ca. 150 ml). Er enthält eingeatmete Luft, die nicht in die Alveolen gelangt, wo der Gasaustausch stattfindet.

Der anatomische Totraum hat die Funktion, die durchströmende Luft zu reinigen, zu erwärmen und anzufeuchten.

Bei Ruheatmung verbleibt etwa 1/3 der insgesamt eingeatmeten Luft im Totraum. Die im Totraum verbleibende Luft pendelt immer hin und her und verringert den Anteil an Frischluft. Zum Totraum muss man auch noch belüftete aber nichtdurchblutete Alveolarräume dazurechnen, in denen kein Gasaustausch erfolgen kann. Diese Alveolen treten beim Lungengesunden nur in geringer Anzahl auf.

Bei Verwendung eines Schnorchels vergrößert sich der Totraum um das Volumen des Schnorchels. Aus diesem Grund ist es sinnvoll beim Schnorcheln eine tiefere Atmung zu machen.

## **j) Atmungsmechanik und Atemdrücke**

Der Gaswechsel wird durch Vergrößern und Verkleinern des Brustraumes erreicht. Da der Brustkorb hermetisch abgeschlossen ist, führt eine Vergrößerung des Volumens zu einem Druckabfall und eine Verminderung des Volumens zu einer Drucksteigerung in der Lunge.

Beim Einatmen vergrößert sich der Brustumfang, in den Lungen fällt der Druck ab und sauerstoffhaltige Luft fließt über die Atemwege in die Lungenbläschen (Alveolen).

Beim Ausatmen verkleinert sich der Brustumfang, der Druck in den Lungen nimmt zu und Luft wird auf demselben Wege in umgekehrter Richtung abgegeben.

Es gibt eine ganze Reihe von Atemmuskeln, die die Atmungsbewegungen unterstützen. Volumenänderungen kommen bei Bauchatmung hauptsächlich durch das kuppelförmige Zwerchfell (sehnig-muskuläre Platte, 3-5 mm Dicke) zustande, dem wichtigsten Muskel für die Atmung, indem die beiden Kuppeln sich abflachen und das Unterleibsvolumen nach unten vergrößert (Bild 4).

Gleichzeitig kommen auch andere Muskeln zum Einsatz, die sich durch Heben der Rippen (Drehen an der Wirbelsäule) am Ausweiten des Brustkorbes beteiligen.

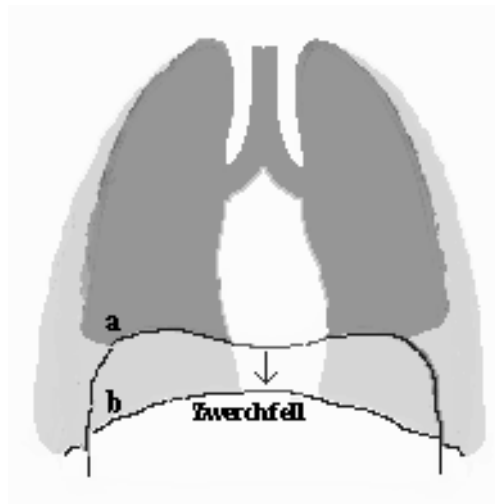


Bild 4: Während das Zwerchfell sich abflacht (a zu b), vergrößert sich der Brustumfang sowohl nach unten als auch lateral.

Im Gegensatz zum Einatmen erfolgt das ruhige Ausatmen weitgehend passiv, aufgrund der Retraktionskraft der Lunge bzw. des Unterdrucks im Brustkorb, und im Liegen auch aufgrund der Schwerkraft. Nur bei einer tiefen Atmung oder bei Behinderungen wird beim Ausatmen aktive Muskelarbeit geleistet. Zum Beispiel beteiligen sich die Bauchmuskeln am Ausatmen, indem sie durch ihre Kontraktionskraft den Bauchhöhleninhalt gegen das Zwerchfell pressen. Der subatmosphärische Druck (ca. -0,4 kPa) zwischen Lungen und Brustwand (Pleuraspalt, in dem sich eine dünne Flüssigkeitsschicht (ca. 10  $\mu\text{m}$ ) als Schmiere befindet), entsteht wegen der Lungenneigung auf Grund ihrer Elastizität zusammenzufallen und gegen die Neigung des Brustkorbs, sich auszudehnen.

Der Druck im Lungeninneren kann nicht sehr verschieden vom Umgebungsdruck sein. Besteht ein großer Unterdruck in den Lungen, kann Blut und Flüssigkeit in die Arteriolen eintreten. Bei hohem Überdruck wird die Durchblutung behindert. Außerdem können Arteriolen platzen, auch wenn sie von Gewebe umgeben sind.

### **k) Der Husten**

Der Husten ist eine Reaktion auf Irritationen der Atemwege durch Fremdkörper, Staub, Schleim oder Viren. Er ist eine Schutzvorrichtung der Atmungsorgane, denn er befreit die Atemwege von Verunreinigungen.

Der Husten beginnt mit einem tiefen Einatmen, damit die Lungen mit Luft gefüllt werden. Dann entspannen sich das Zwerchfell und die andere Atemmuskeln, der Kehledeckel öffnet sich schlagartig und Luft wird mit so hoher Geschwindigkeit (120-160 km/h, bei ruhiger Atmung kaum 10 km/h) ausgestoßen, dass sie in den Luftwegen vorhandene Teilchen mit sich reißt [Parramon (1997)].

### l) Blutkreislaufsystem und Sauerstofftransport

Das sauerstoffarme Blut fließt aus den Körpervenen zum Herzen in den rechten Vorhof. Es gelangt in die rechte Herzkammer, die es in die Lungenarterie und deren Verzweigungen pumpt. Aus den Lungen kommt das mit Sauerstoff angereicherte und kohlendioxidarme Blut über die Lungenvenen zum linken Vorhof zurück. Vom linken Vorhof strömt das Blut in die linke Herzkammer, die es in den ganze Körper pumpt. In den Endverzweigungen (Kapillaren) erfolgt der Gasaustausch. Dabei wird Sauerstoff an das Gewebe abgegeben und Kohlendioxid ins Blut aufgenommen. Das jetzt sauerstoffarme, aber CO<sub>2</sub>-beladene Blut sammelt sich in den Venen, fließt wieder zum rechten Vorhof und der Zyklus beginnt von vorne.

Das Blut transportiert Sauerstoff und Kohlendioxid im Kreislauf zwischen Lungen und Körpergewebe. Der Sauerstoff gelangt aus den Alveolen durch Diffusion in die Lungenkapillaren, die die Lungenbläschen wie ein feines Netz umgeben. Dann wird er an das Hämoglobin (ein Eiweiß in den Erythrozyten) chemisch gebunden oder als gelöster Stoff im Blutplasma transportiert. Der Beitrag durch Bindung des Sauerstoffes an das Hämoglobin überwiegt [Duke (1997)]. Beim Sauerstofftransport im Blut durch den Körper gibt das Hämoglobin durch Dissoziation (Aufspaltung) den Sauerstoff an die Zellen des Körpers ab. Das bei der Zellatmung frei werdende Kohlendioxid wird hauptsächlich als Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) im Plasma transportiert.

### m) Gasaustausch

Der Gasaustausch kommt zustande, wenn Bereiche verschiedener Konzentration bzw. Partialdrücke aufeinandertreffen. Ein solches Druckgefälle besteht auch zwischen den Lungenbläschen und den Blutkapillaren. In den Alveolen der Lungen wird durch

	Atemluftzusammensetzung	
	Eingeatmete Luft	Ausgeatmete Luft
N <sub>2</sub> (Stickstoff)	78%	78%
O <sub>2</sub> (Sauerstoff)	21%	17%
CO <sub>2</sub> (Kohlendioxid)	-	4%
Rest (Edelgas)	1%	1%

Diffusion ein Gleichgewicht zwischen dem CO<sub>2</sub>-reichen, aber O<sub>2</sub>-armen Blut und der O<sub>2</sub>-reichen, aber CO<sub>2</sub>-armen Luft in den Lungenalveolen angestrebt, d.h. CO<sub>2</sub> wird aus dem Blut abgegeben und O<sub>2</sub> aufgenommen (Äußere Atmung).

Im Körpergewebe (Mitochondrien) erfolgt bei dem engen Kontakt der Erythrozyten ebenso wie in den Lungen ein Ausgleich der unterschiedlichen Konzentrationen von O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>. Jetzt liegt jedoch im Blut die höhere O<sub>2</sub>-Konzentration vor, weshalb O<sub>2</sub> aus dem Blut in die Zelle diffundiert und CO<sub>2</sub> wird über die Blutflüssigkeit wieder zurück zur Lunge befördert (Innere Atmung).

### n) Bronchialasthma

Das Bronchialasthma (obstruktiver Atemweg) kann in verschiedenen Formen auftreten und wird durch eine Enge in den Atemwegen (Bronchiolen) verursacht [Hierholzer (1991)]. Größere Bedeutung für die Schüler kann das allergische Asthma haben, weil es oft und in der Regel im Kinds- und Jugendalter nach einer Allergenexposition auftritt. Akute Anfälle werden meist durch Inhalation von Substanzen ausgelöst, die mit der Atemluft eingeatmet werden (Pollen, Stäube, Tierhaare u. s.). Sie können durch viele mit der Atemluft eingeatmete Stoffe ausgelöst oder verschlechtert werden, unter diesen Stoffen befindet sich z.B. Tabakrauch, Abgase oder anderer chemische Substanzen.

Das Hauptsymptom ist die Atemnot. Das Atmen fällt zunehmend schwerer und wird von Schweißausbruch, Unruhe und Angstzuständen begleitet.



### **o) Embolie**

Beim Tauchen mit Pressluftgeräten ist die Luft bzw. spezielle Gasmischung stark komprimiert (z. B. 200 bar). Durch Ventile wird der Druck so reduziert, dass die eingeatmete Luft unter dem gleichen Druck wie die Umgebung steht, der in der jeweiligen Wassertiefe herrscht.

Sauerstoff und Stickstoff werden durch die Luft in das Blut und dann in das Gewebe aufgenommen. Die Gewichtsmengen sind proportional dem Druck (Henry'sches Gesetz). Ein Mensch von 70 kg Körpergewicht bindet in seinem Gewebe je bar Außendruck bei voller Sättigung 1 Liter Stickstoff. Die dem Außendruck entsprechende Sättigung des Körpergewebes mit Stickstoff wird nur langsam erreicht (der eingeatmete Sauerstoff wird von dem Organismus verbraucht), in 30 Minuten bis zur Hälfte, volle Sättigung tritt in 8-10 Stunden ein.

Bei langsamer Druckentlastung wird der Stickstoff durch die Lungen entlüftet.

Bei schneller Druckentlastung reicht dieser Entlüftungsmechanismus nicht aus, der Stickstoff bildet im Innern des Blutes Gasblasen, wie sie beim Öffnen einer Mineralwasserflasche zu beobachten sind. Die Gasblasen können zur Verstopfung der Kapillaren in jedem Gefäßgebiet führen. Ist ein lebenswichtiges Organ betroffen (Gehirn, Herz), dann besteht Lebensgefahr.

Auch bei schneller Druckentlastung braucht die Gasabgabe und Gasblasenbildung, insbesondere aus Gewebe und Fett, seine Zeit. Aus diesem Grund sollen nach einem schnellen Aufstieg weitere Höhenanstiege (z. B. Transport durch Hubschrauber) vermieden werden. Hat man ausreichend Zeit für eine Behandlung kann der Taucher wieder unter Druck gestellt werden (in einer Iberbarikkammer) und langsam an den atmosphärischen Druck gewöhnt werden.

### **Literatur:**

DUKE J.B. (1997): Animal Physiology. Cambridge University Press

HIERHOLZER K.; Schmidt R: (Hsg.) (1991): Pathophysiologie des Menschen.  
Weinheim: VCH

PARRAMONT (1997): Der menschliche Körper. Augsburg: Bechtermünz Verlag

ZINK R.A. (1985): Ärztlicher Rat für Bergsteiger. Stuttgart: Thieme