

# 1. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Kapitel 1 beschreibt die physikalischen Grundgesetze, denen ein Taucher insbesondere unterliegt. Ein sehr gutes Verständnis dieser physikalischen Zusammenhänge ist Voraussetzung für die Sicherheit und erfolgreiche Arbeit eines Forschungstauchers.

## 1.1. Begriffe, Definitionen

### 1.1.1. Kraft, Masse, Gewicht

*Sir Isaac Newton, 1642-1727, englischer Philosoph und Wissenschaftler*

#### Newtonsche Näherung

**Kraft = Masse × Beschleunigung**

Formel:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \times \mathbf{b}$$

SI-Einheiten:

$$m = \text{Masse [kg]}$$

$$F = \text{Kraft [N]}$$

#### Definition:

Ein **Newton** {SI-Einheit} entspricht der Kraft, die einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung  $1 \text{ m s}^{-2}$  erteilt. [1 N = 1 kg m s<sup>-2</sup>]

*Diese Definition gilt immer, sie ist nicht auf die Erde bezogen. Dagegen ist die Fallbeschleunigung  $b$  von der geographischen Breite abhängig. Der mittlere Wert ist mit  $9,81 \text{ m s}^{-2}$  festgelegt.*

Unter dem "Gewicht" eines Körpers versteht man die Gewichtskraft, d.h. die im Schwerfeld der Erde auf ihn ausgeübte Kraft.

**„Gewicht“ ≡ Gewichtskraft**

Die Masse (Menge) eines Körpers wird in kg angegeben und ist vom Ort unabhängig. So ist die Masse eines Körpers auf der Erde gleich seiner Masse auf dem Mond, während seine Gewichte deutlich verschieden sind.

Auf der Erde gilt:

$$\underline{\underline{1 \text{ kg Masse "wiegt" (in Luft):}} \quad 1 \times 9,81 \text{ N} = 9,81 \text{ N} \approx \underline{\underline{10 \text{ N}}}}$$

*oder anders ausgedrückt:*

*9,81 N ( 10 N ) ist die Kraft, um die eine Masse von 1 kg im freien Fall beschleunigt wird.*

Beispiel 1 Eine Masse von 29 kg ‚wiegt‘ an Land  $29 \cdot 9,81 = 290 \text{ N}$ .

Beispiel 2 Ein Newton ist die Kraft, mit der eine Tafel Schokolade (Masse = 102 g) auf eine Unterlage drückt.

## 1.1.2. Dichte

"Dichte" ist eine skalare Größe, definiert als Masse pro Volumen.

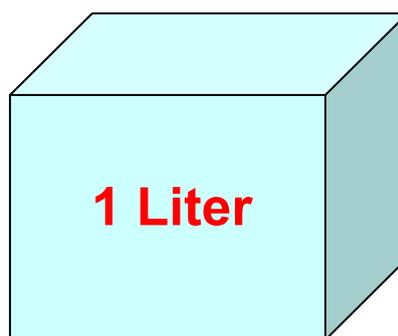
**Dichte = Masse pro Volumen**

$\rho := (\text{rho})$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$\rho$  = Dichte [  $\text{kg dm}^{-3}$  ] = [  $\text{kg l}^{-1}$  ]  
 $m$  = Masse [kg]  
 $V$  = Volumen [l]

1 kg chemisch reines Wasser nimmt bei seiner größten Dichte (3,98 °C) einen Raum von  $1 \text{ dm}^3$  (= 1 Liter) ein.



**Kantenlänge: jeweils 10 cm**

**Reines Wasser** (Süßwasser) hat bei 4 °C seine **maximale Dichte**. Diese und weitere ungewöhnliche Eigenschaften des Wassers werden allgemein als '**Anomalie des Wassers**' bezeichnet. Eis ist leichter als Wasser und schwimmt deshalb an der Oberfläche. In tieferen

Süßwasserseen unserer geographischen Breiten hat das Wasser am Boden immer eine Temperatur von etwa 4 °C.

Bei **Salzwasser** hängt die Dichte auch vom Salzgehalt ab. Der Gefrierpunkt liegt niedriger als beim Süßwasser. Bei einem Salzgehalt von 24,7 liegt er bei -1,33 °C; bei einem Salzgehalt von 35,0 bei -1,91 °C.

*Anmerkung: In der Meereskunde wird der Begriff „Praktischer Salzgehalt“ („practical salinity“) verwendet und verkürzt der Begriff „Salzgehalt“ benutzt. Aufgrund der zugrunde gelegten Definition entfällt der Faktor  $10^{-3}$ , der früher durch  $Y$  oder ppt ausgedrückt wurde.*

Tabelle I / 1 :

**Dichte von gasförmigen, flüssigen und festen Stoffen** (1 l = 1 dm<sup>3</sup>)  
(Dichte bei 0 °C und 1013 mbar Luftdruck, falls nichts anderes angegeben.)

Stoff	Dichte [kg l <sup>-1</sup> ]	Dichte [g l <sup>-1</sup> ]	
<b>Luft</b>	<b>1,29 * 10<sup>-3</sup></b>	<b>1,29</b>	
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	1,25 * 10 <sup>-3</sup>	1,25	
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	1,42 * 10 <sup>-3</sup>	1,42	
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	1,98 * 10 <sup>-3</sup>	1,98	= ρ <sub>Luft</sub> × 1,5
Helium	0,17 * 10 <sup>-3</sup>	0,17	
<b>Süßwasser von 4 °C</b>	<b>1,00000</b>		
Süßwasser von 15 °C	0,99910		1 g leichter als bei 4 °C
Süßwasser von 20 °C	0,99823		2 g leichter als bei 4 °C
Süßwasser von 25 °C	0,99705		3 g leichter als bei 4 °C
<b>Salzwasser</b>	<b>~ 1,03</b> (1,01 - 1,08)		
Blut	1,055		
Kork	0,2 - 0,3		
Holz	0,4 - 1,0		
Eis von 0°C	0,917		
Aluminium	2,7		
Beton	2,2 - 2,4		
Stahl	7,8		
<b>Blei</b>	<b>11,34</b>		

Hinweis In britischen und amerikanischen Einheiten wird die Dichte in 'pounds per cubic foot [lb ft<sup>-3</sup>]' angegeben. Die Umrechnung von der metrischen Einheit (SI-Einheit) in die brit./amerik. Einheit erfolgt durch Multiplikation mit 0,06245.

### 1.1.3. Spezifisches Gewicht

$$\text{Das spezifische Gewicht eines Stoffes} = \frac{\text{Gewichtskraft des Stoffes}}{\text{Volumen des Stoffes}}$$

Das spezifische Gewicht eines Körpers ist das Verhältnis seiner Gewichtskraft zu seinem Volumen.

Die Dichte und das spezifische Gewicht unterscheiden sich um den Faktor der Fallbeschleunigung  $G$ . Dichte ( $\rho$ )  $\times$  Fallbeschleunigung ( $G$ ) = Spezifisches Gewicht ( $\gamma$ )

Das spezifische Gewicht ist im Gegensatz zur Dichte ortsabhängig, da die Fallbeschleunigung nicht überall gleich ist.

Einheiten für spez. Gewicht ( $\gamma$ ): [ $\text{N} / \text{m}^3$ ] oder [ $(\text{kg m}) / (\text{m}^3 \text{s}^2)$ ]

### 1.1.4. Temperatur (kinetische Gastheorie)

Alle Stoffe kommen in **drei Zustandsformen** (Aggregatzustände) vor:

- fest
- flüssig
- gasförmig

Dabei führen die kleinsten Teilchen (Atome, Moleküle) Bewegungen aus:

fest	-	Bewegung um die Ruhelage <i>Da die gegenseitige Bindung der Teilchen an ihren Nachbarteilchen verhältnismäßig stark ist, bleiben feste Strukturen erhalten.</i>
flüssig	-	Freie Bewegung, aber im gegenseitigen Kontakt. <i>Die durchschnittlich gleiche Entfernung der Nachbarmoleküle bleibt erhalten → konstantes Volumen, aber die Gestalt kann sich ändern.</i>
gasförmig	-	Isolierte Teilchen führen eine freie Bewegung durch, es kommt zu Zusammenstößen. <i>Geringe gegenseitige Bindungskräfte, durchschnittliche gegenseitige Entfernung wird nur durch den verfügbaren Raum bestimmt.</i>

**Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie (Bewegungsenergie) der Moleküle eines Körpers (Wärme).** Sie wird mit einem Thermometer gemessen.

Grundlage für die gebräuchliche Temperatur-Skala (Grad Celsius) sind bestimmte Eigenschaften von Wasser (bei 1 bar Umgebungsdruck) und zwar sind Fixpunkte:

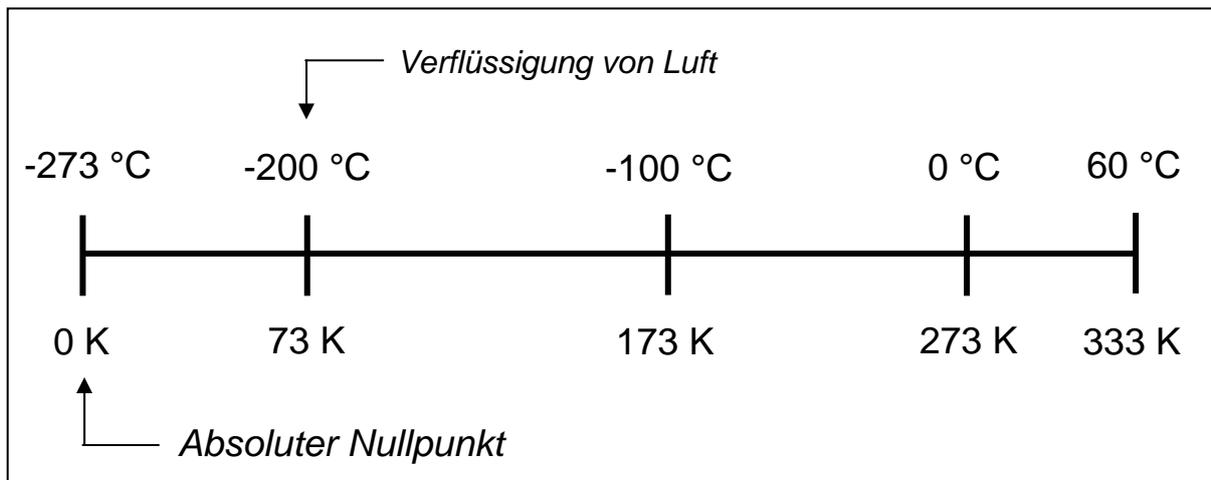
$$\begin{aligned} \text{Schmelzpunkt von Eis} &= 0\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \text{Siedepunkt von Wasser} &= 100\text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

In den Naturwissenschaften (Anwendung der Gasgesetze) benutzt man meist die **thermodynamische Temperatur-Skala** (*absolute oder Kelvin Skala*) mit gleicher Einheit, d.h. **1 °C Temperatur-Differenz entsprechen 1 Kelvin-Temperatur-Differenz, aber der Nullpunkt ist verschoben.**

Symbole:  $t$  = Temperatur in °C  
 $T$  = Temperatur in Kelvin (K)

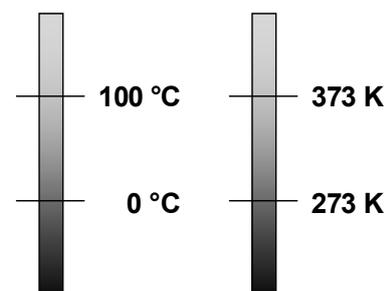
$$0\text{ Kelvin} \equiv -273,15\text{ }^{\circ}\text{C} \equiv \text{absoluter Nullpunkt}$$

Bei 0 Kelvin findet keine Bewegung der Moleküle mehr statt. Die Bewegungsenergie (kinetische Energie) ist gleich Null.



**Umrechnung von GRAD CELSIUS [°C] in KELVIN:**

$$K \approx \text{ }^{\circ}\text{C} + 273$$



Hinweis

In den USA werden die Temperaturen noch überwiegend in Fahrenheit angegeben,

wobei  $^{\circ}\text{F} = \left(\frac{9}{5}\right) \times ^{\circ}\text{C} + 32 = (1.8 \times ^{\circ}\text{C}) + 32$

und  $^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32)}{1.8} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32)}{1.8}$ .

*Der Schmelzpunkt von Eis liegt bei 0° C bzw. bei 32° F.*

*Der absolute Nullpunkt liegt bei -460 °F, bei -273,15 °C und bei 0 Kelvin.*

Übung 1 Welcher Kelvintemperatur entsprechen 37 °C?

Übung 2 Welcher Kelvintemperatur entsprechen 27 °C?

Übung 3 Welcher Kelvintemperatur entsprechen 3 °C?

### 1.1.5. Wärmemenge

*James Prescott Joule, 1818-1889, britischer Physiker*

Wärmemenge ist die Energie, die einem Körper bei Temperaturänderung zu- oder abgeführt wird. Die Maßeinheit für die Energie ist Joule [J]. ( $1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ W s}$ )

*Auch der Energiegehalt (Brennwert) von Nahrungsmitteln wird in dieser Einheit angegeben, dabei entsprechen 4,184 Joule der veralteten Einheit von einer Kalorie.*

4,1865 Joule sind die Energiemenge, die ausreicht, um 1 Gramm Wasser von 14,5 °C auf 15,5 °C zu erwärmen.

### 1.1.6. Luftmenge (in "Barlitern")

Zur Vereinfachung von Berechnungen verwenden wir als Maßeinheit für Luftmengen einen in der Sporttaucherei geprägten Begriff.

**1 Barliter Luft [ bar l ] ≡  
Luftmenge, die einem Liter Luft bei 1 bar entspricht.  
( = 1,29 g Luft )**

Beispiel 1      1 barl     $\equiv$  1,0 Liter Luft bei 1,0 bar Druck    =     $1,0 \cdot 1,0$     = 1 [barl]

Beispiel 2      1 barl     $\equiv$  0,5 Liter Luft bei 2,0 bar Druck    =     $0,5 \cdot 2,0$     = 1 [barl]

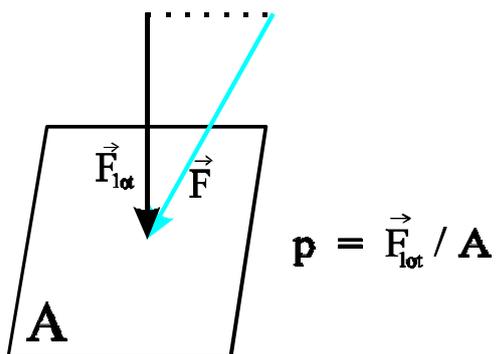
Beispiel 3      1 barl     $\equiv$  2,0 Liter Luft bei 0,5 bar Druck    =     $2,0 \cdot 0,5$     = 1 [barl]

Hinweis: 1 barl Luft hat eine Masse von etwa 1,29 g.

## 1.2. Druck

### 1.2.0 Allgemeines

Druck = Kraft, die senkrecht auf eine Flächeneinheit wirkt. (Kraft pro Flächeneinheit).



**Druck = Kraft pro Fläche**

$$p = \frac{F}{A}$$

**P = Druck**      [Pascal] = [N m<sup>-2</sup>]  
**F = senkrecht wirkende Kraft** [N]  
**A = Fläche**      [m<sup>2</sup>]

In den USA: pounds per square inch [psi]

1 bar ~ 14,7 psi

1 hPa = 1 mbar

Obwohl die korrekte Einheit für den Druck das Pascal [Pa] ist,  
**messen Taucher den Druck weiterhin in [bar],**  
 wobei  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pascal} = 100\,000 \text{ Pa} (= 10 \text{ N} / \text{cm}^2)$ .

$$100\,000 \text{ Pa} = 1\,000 \text{ Hektopascal [hPa]} = 1 \text{ bar}$$

*Auf der Erdoberfläche übt eine Masse von einem Kilogramm auf die Fläche von einem Quadratzentimeter annähernd die Gewichtskraft aus, die einem bar entspricht.*

**Beachte:** Geringe Gewichtskraft kann bei großer Fläche kleinen Druck und bei kleiner Fläche großen Druck erzeugen.  
 (Siehe hierzu auch die folgenden Beispiele.)

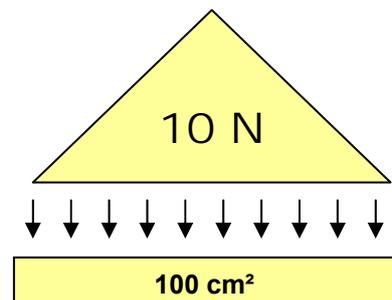
Beispiel 1

$$F = 10 \text{ N}, \quad A = 100 \text{ cm}^2$$

$$p = \frac{10}{100} = 0,1 \quad [\text{N} / \text{cm}^2]$$

→

$$= 0,01 \quad [\text{bar}]$$



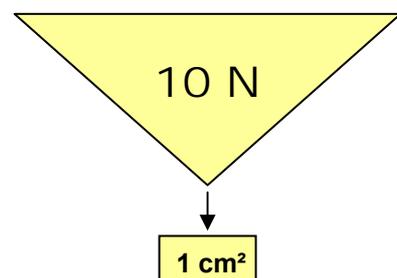
Beispiel 2

$$F = 10 \text{ N}, \quad A = 1 \text{ cm}^2$$

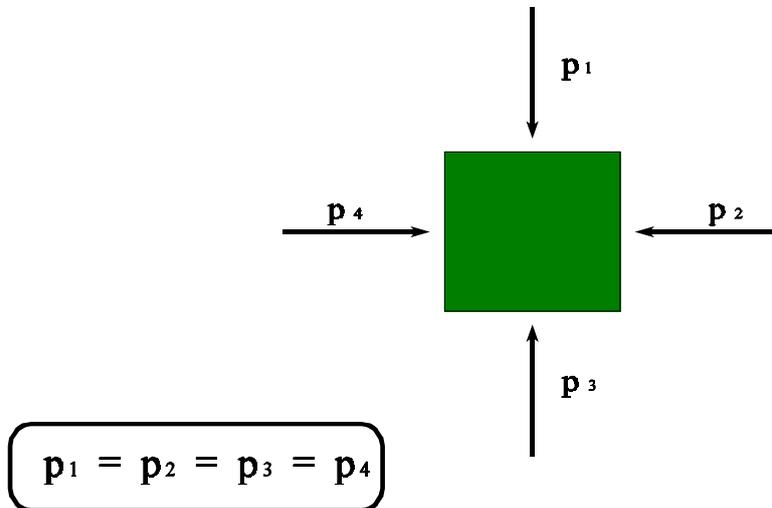
$$p = \frac{10}{1} = 10 \quad [\text{N} / \text{cm}^2]$$

→

$$= 1,0 \quad [\text{bar}]$$

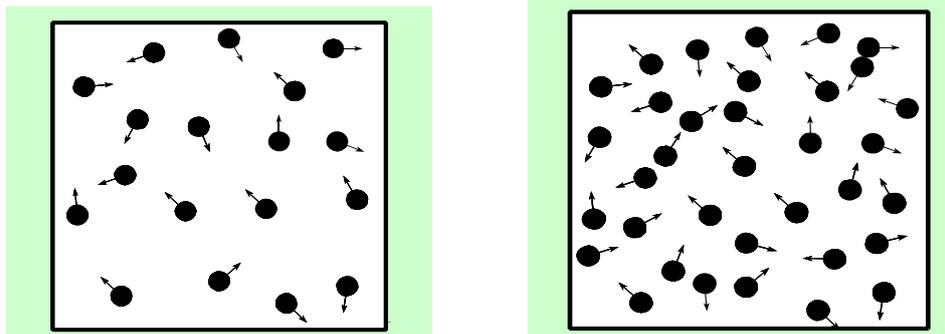


(Wasser-) Druck wirkt auf ein unendlich kleines Volumenelement aus allen Richtungen mit der gleichen Kraft!



Nach der *kinetischen Gastheorie* ist "Druck" der Ausdruck der Molekularbewegung; Moleküle in dauernder Bewegung  $\rightarrow$  Zusammenstöße untereinander  $\rightarrow$  Zusammenstöße mit der Wand eines Behälters.

Abb.: Doppelte Molekülanzahl ( $V = \text{const}$ )  $\rightarrow$  doppelte Anzahl von Kollisionen  
 $\rightarrow$  doppelter Druck



### 1.2.1. Atmosphärendruck (Luftdruck)

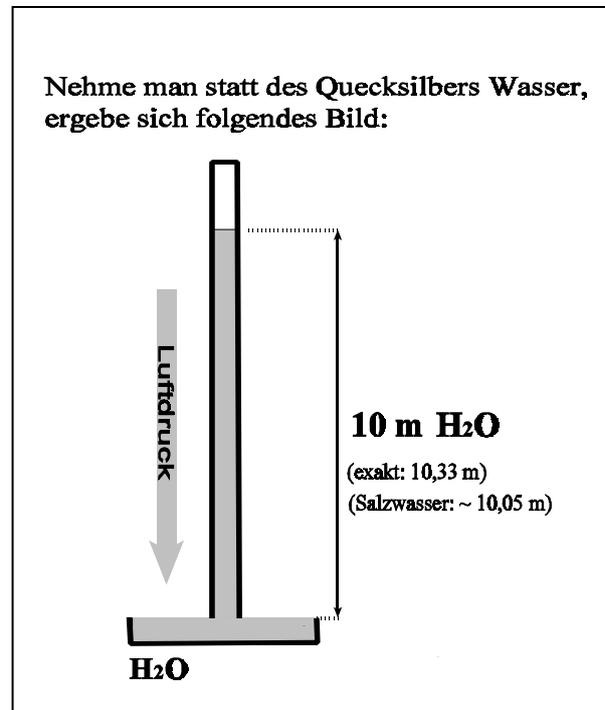
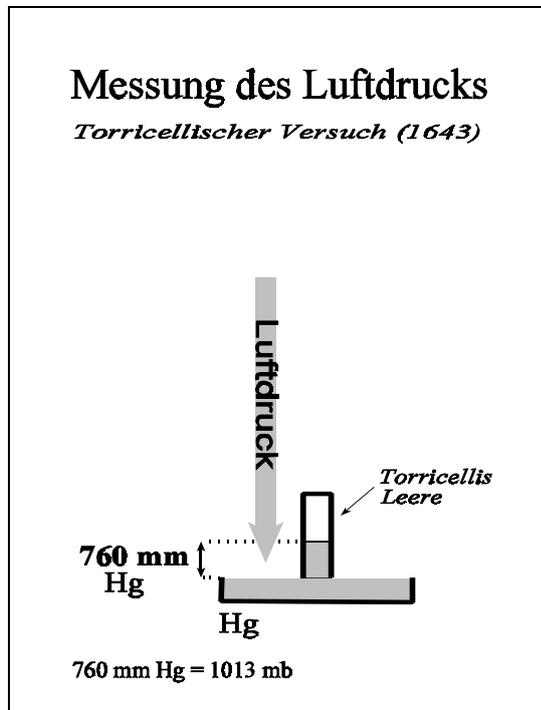
Die Lufthülle der Erde (80-100 km hoch) übt auf jeden Quadratcentimeter der Erdoberfläche auf Meereshöhe eine Gewichtskraft von 10 N aus. Entsprechend lastet auf dem menschlichen Körper eine Luftmasse von 15-18 t. Da der Mensch vorwiegend aus Wasser (fast inkompressibel) besteht, könnte er auch Drucksteigerungen auf das Tausendfache (bezogen auf die rein mechanische Druckwirkung) vertragen.

**Atmosphärendruck = Gewicht der atmosphärischen Gase (Luft)**

Der Atmosphärendruck wirkt auf alle Körper und Strukturen in der Atmosphäre und darunter. Er wirkt in jedem Punkt in alle Richtungen, daher neutralisieren sich seine Wirkungen im Allgemeinen.

In Meereshöhe herrscht ein Normaldruck von 1,01325 bar. (Dies gilt bei 15 °C und Vernachlässigung von meteorologisch bedingten Druckschwankungen (*Durchzug von Hoch- oder Tiefdruckgebieten*)). Für tauchphysikalische Berechnungen kann im Allgemeinen der Wert abgerundet werden. (Ausnahme: Tauchen in Bergseen oder auf anderen Planeten).

**Luftdruck (in Meereshöhe)  $\approx$  1 bar ( $\pm$  3%)  
(Atmosphärendruck)**

**Torricellischer Versuch (1643):**

**Torricelli, Evangelista, ital. Mathematiker und Physiker (1608-1647), Schüler Galileis u.a. Erfinder des Quecksilberbarometers.**

*Torricelli folgte einer Anregung von Galilei zur Messung des „horror vacui“, indem er eine an einem Ende zugeschmolzene und etwa 1,2 m lange Glasröhre mit Quecksilber füllte und dann in einer Schüssel mit Quecksilber aufrichtete. Er beobachtete, dass ein Teil des Quecksilbers nicht ausfloss und sich über dem Quecksilber ein Vakuum bildete. Er war damit der erste Mensch, der ein dauerhaftes Vakuum schuf. Nach vielen Beobachtungen folgerte er des weiteren, dass die Höhenschwankungen des Quecksilbers durch die Änderungen des Luftdrucks verursacht wurden. Er hat diese Erkenntnisse jedoch nie publiziert, da er zu sehr mit dem Studium der reinen Mathematik beschäftigt war.*

**Der Gesamtluftdruck (Atmosphärendruck)  $p$  nimmt mit der Höhe  $h$  exponentiell ab!** (Grund: Luft (Gas) ist kompressibel und die Dichte nimmt mit der Höhe ab.) Dieser Effekt muss bei Tauchereinsätzen in Höhenlagen (Gebirge) beachtet und bei tauchphysikalischen Berechnungen besonders berücksichtigt werden (Stichwort: **Bergseetauchen**, s.a. Kap. 5 und Kap. 8)!

Formelmäßig gilt näherungsweise die „**Barometergleichung**“

$$p(h) = p_o \times e^{-\left(\frac{g \times \rho_o}{p_o}\right) \times h}$$

wobei  $p_o$  = Luftdruck auf Meereshöhe,  $\rho_o$  = Dichte der Luft auf Meereshöhe und  $g$  = Erdbeschleunigung (im Mittel etwa  $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ).

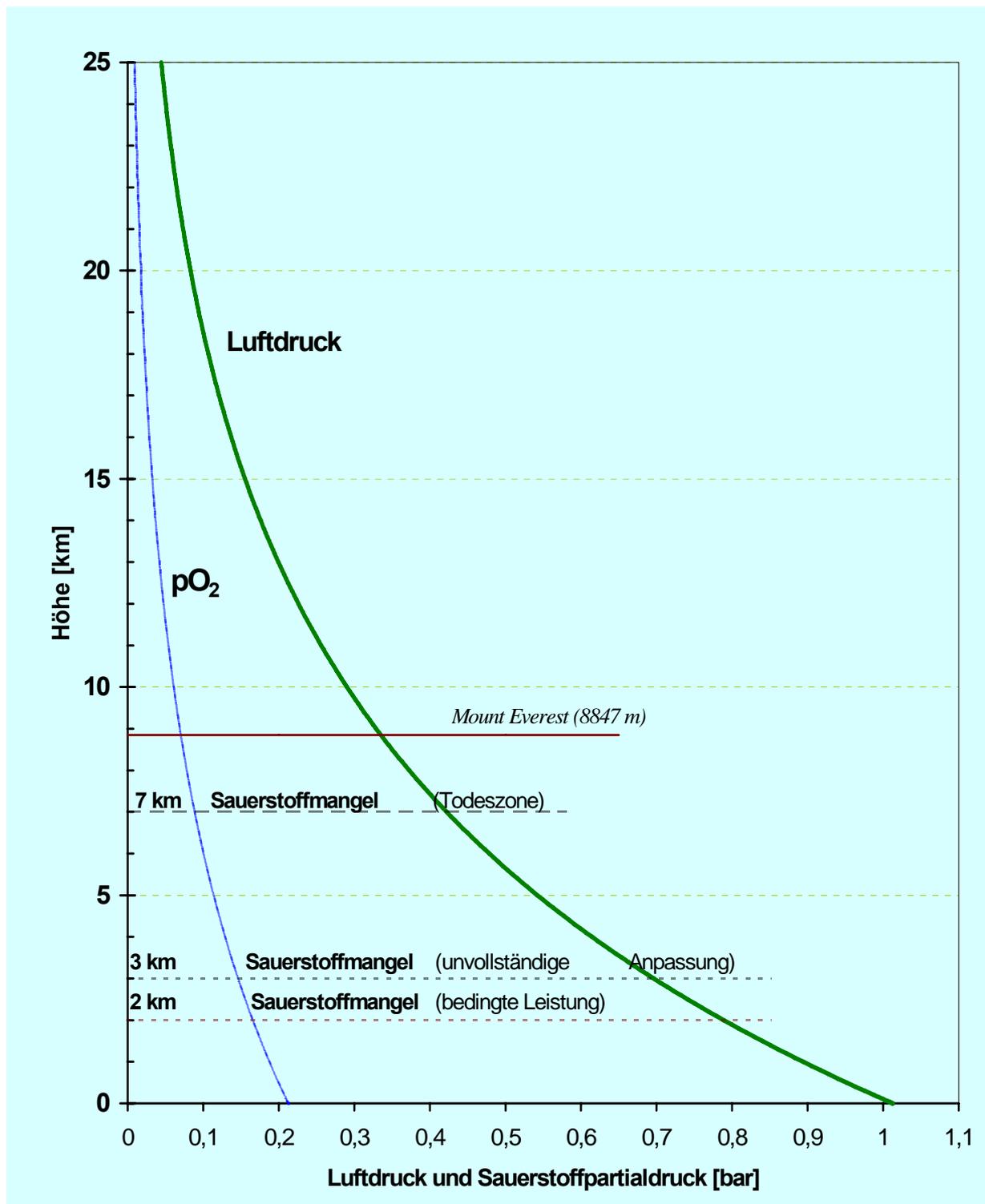
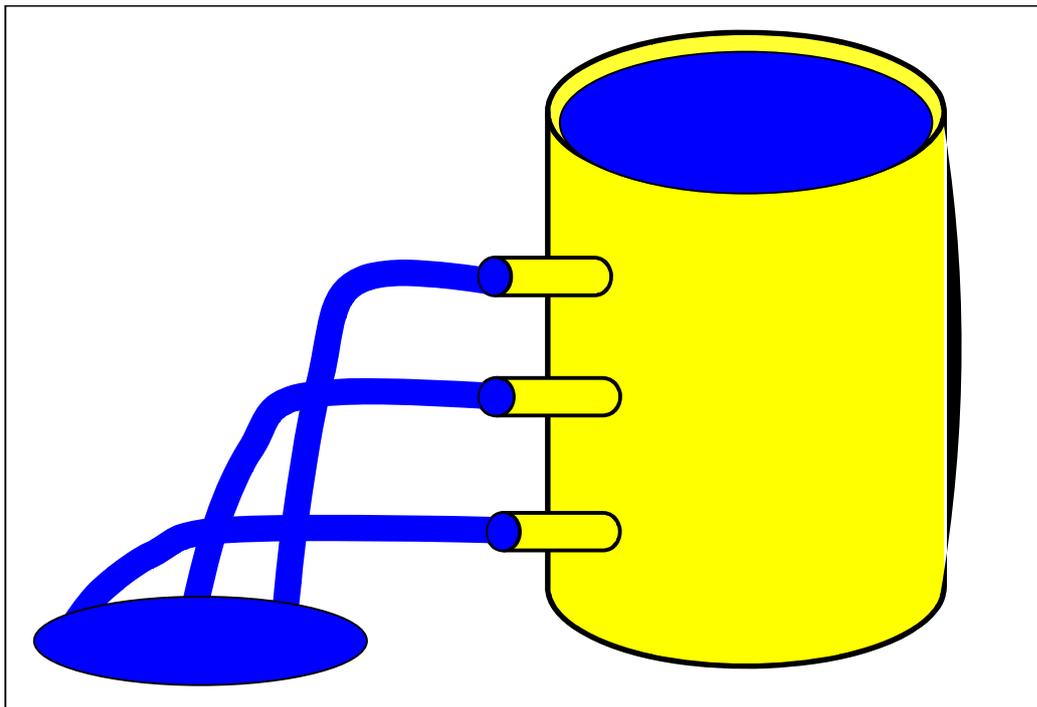


Abbildung Vertikale Verteilung des Gesamtluftdruckes und des O<sub>2</sub>-Partialdruckes entsprechend der (vereinfachten) barometrischen Höhenformel.  
Der Begriff „Partialdruck“ wird ab Kap. 1.4.3 näher erläutert.

## 1.2.2 Hydrostatischer Druck (Wasserdruck)

Im Verhältnis zu Luft ist Wasser etwa 800mal schwerer und fast inkompressibel.

Der hydrostatische Druck (Wasserdruck) entsteht durch das Eigengewicht des Wassers über der jeweiligen Wassertiefe. Er nimmt mit der Tiefe linear mit etwa  $10 \text{ [N cm}^{-2}\text{]}$  (entspricht  $1 \text{ [bar]}$ ) pro  $10 \text{ m}$  Wassersäule zu. Der Wasserdruck ist in gleicher Tiefe in alle Richtungen gleich groß.



Für den hydrostatischen Druck gilt folgende Formel:

$$p_{\text{hydrost}} = \frac{F}{A} = \frac{m \times g}{A} = \frac{\rho \times g \times V}{A} = \frac{\rho \times g \times D \times A}{A} = \rho \times g \times D$$

wobei

$F$  = Kraft (engl. 'force'),  $m$  = Masse,  $\rho$  = Dichte,  $V$  = Volumen,  
 $A$  = Fläche der Flüssigkeit bzw. der Flüssigkeitssäule,  
 $D$  = Tiefe und  $g$  = Erdbeschleunigung (etwa  $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ).

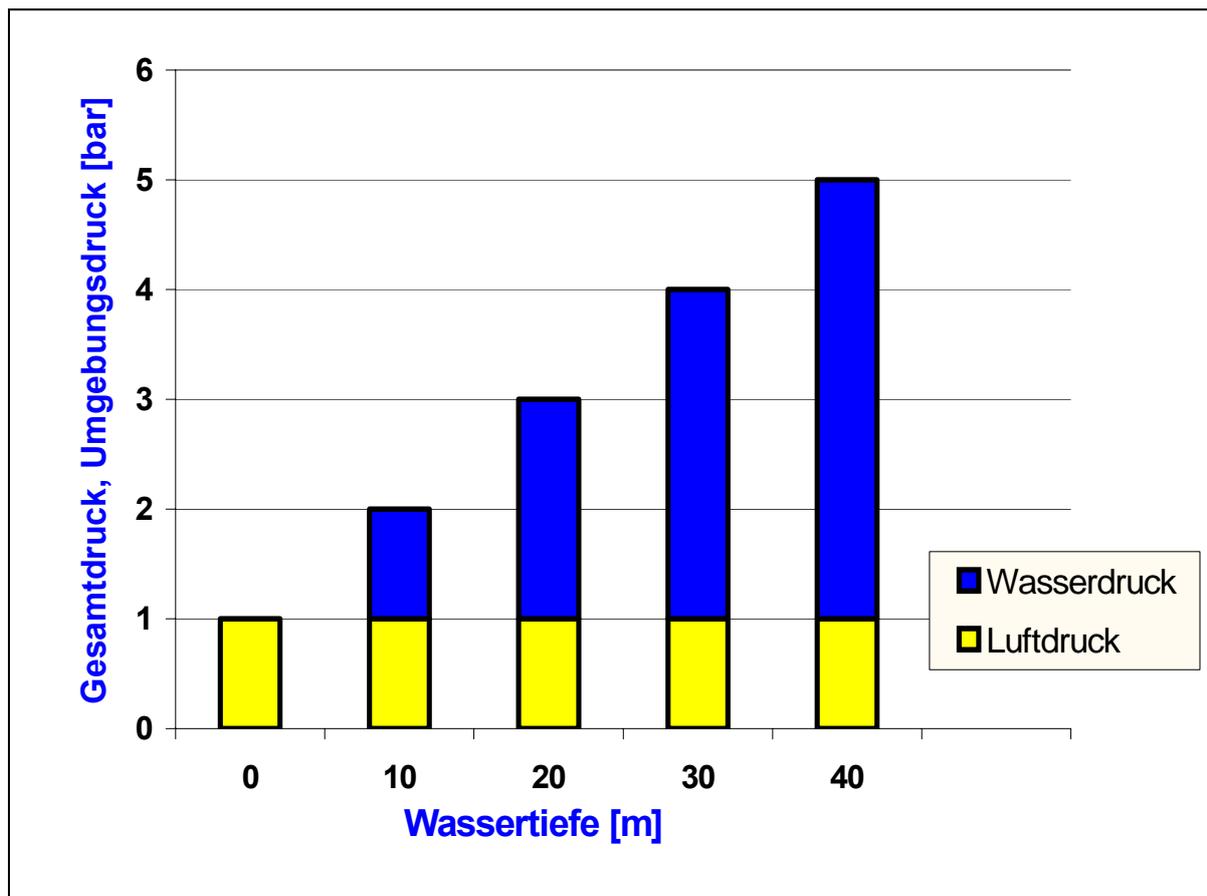
**Wasserdruck pro 10 m Wassersäule  $\approx 1 \text{ bar}$  ( $\pm 2\%$ )**

Beispiele:

Wassertiefe	Wasserdruck
0 m	0,0 bar
10 m	1,0 bar
30 m	3,0 bar
70 m	7,0 bar
13 m	1,3 bar
27 m	2,7 bar

### 1.2.3. Gesamtdruck (Umgebungsdruck, absoluter Druck)

Der Gesamtdruck (Umgebungsdruck, absoluter Druck) ist die Summe von atmosphärischen Druck und hydrostatischen Druck, die auf einen Körper ausgeübt wird.



**Der Druck auf einen Taucher unter Wasser  
ist die Summe zweier Kräfte:**

**Gewicht des Wassers über ihm (und um ihn herum)  
plus  
Gewicht der Luft über dem Wasser.**

$$P_{\text{Gesamt}} = \frac{\text{Tiefe} \quad [m]}{10 \quad [m]} \quad [bar] + 1 \quad [bar]$$

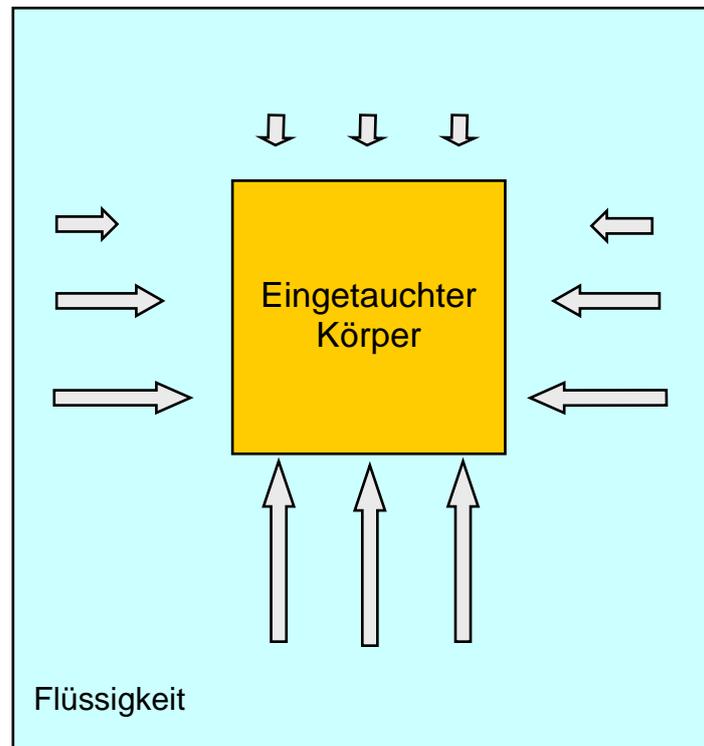
### **Vereinfachte Druckberechnung für Taucher:**

*Die Abweichung vom Idealwert beträgt bei der vereinfachten Berechnung maximal 6,3 %, in 20 m Tiefe nur 3,3 %. Der Fehler ergibt sich aus den wetterbedingten Schwankungen des Luftdruckes, der Variationsbreite der Wasserdichte (Süßwasser:  $\approx 0,996$ , Salzwasser  $\approx 1,03$   $[kg \, l^{-1}]$ ) und der unterschiedlichen Erdbeschleunigung.*

**Für Taucher von Bedeutung** ist die Tatsache, dass beim Abtauchen in die Tiefe die relative Änderung des Umgebungsdruckes in der Nähe der Wasseroberfläche am größten ist!

## 1.3. Auftrieb

### 1.3.1. Auftriebskraft



Auf einem in eine Flüssigkeit (hier: Wasser) eingetauchten (würfelförmigen) Körper wirkt der Umgebungsdruck (Schweredruck) entsprechend der Tiefe ein. In gleicher Tiefe ist der Druck gleich groß, d.h. die Kräfte auf die Seitenflächen des Würfels heben sich gegenseitig auf. Da der Druck an der Bodenfläche größer als an der Deckfläche ist, entsteht eine resultierende Kraft, die den Würfel nach oben drückt. Diese aus der Druckdifferenz resultierende Kraft wird als „**Auftriebskraft**“ bezeichnet. Dieser Auftriebskraft **entgegen wirkt die Gewichtskraft** des Würfels. Ist die Auftriebskraft größer als die Gewichtskraft, dann steigt der Würfel in der Flüssigkeit nach oben und schwimmt dann an der Oberfläche. Übersteigt die Gewichtskraft die Auftriebskraft, dann sinkt der Würfel auf den Boden. Sind beide Kräfte gleich groß, schwebt der Würfel in ständig gleicher Höhe in der Flüssigkeit.

**"Auftrieb"** = Kraft in Gasen und Flüssigkeiten, die durch Druckunterschiede entsteht.

### 1.3.2. Archimedisches Prinzip

Der "statische Auftrieb" ist die Kraft auf einen in einer Flüssigkeit (oder in einem Gas) ruhenden oder sich bewegenden Körper, die durch die Verdrängung von Flüssigkeit (oder Gas) durch diesen Körper hervorgerufen wird (Archimedes). Der statische Druck wirkt entgegen der Schwerkraft und lässt sich aus der Druckabnahme mit der Höhe erklären.

*Archimedes, um 287 - 212 v. Chr., griechischer Mathematiker, Physiker, Mechaniker und Erfinder, lebte in Syrakus (Sizilien), für einige Zeit auch in Alexandria (Ägypten)*

#### Archimedisches Prinzip

**„Ein Körper verliert in einer Flüssigkeit (scheinbar) soviel an Gewicht, (bzw. erhält soviel Auftrieb,) wie die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt.“**

Ein Körper, der ganz oder teilweise in einer ruhenden Flüssigkeit eingetaucht ist, unterliegt zwei Kräften: der Gewichtskraft in Richtung der Erdbeschleunigung und der lotrecht nach oben gerichteten Auftriebskraft. Das Verhältnis der beiden Kräfte bestimmt, ob der Körper sinkt, schwebt oder auftreibt.

Der Betrag der Auftriebskraft ist gleich der Gewichtskraft der von dem Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge. Diese Gewichtskraft errechnet sich aus dem Produkt von Volumen und Dichte der verdrängten Flüssigkeit.

$$F_A = F_F - F_L$$

- $F_L$     Gewichtskraft eines Körpers in Luft
- $F_F$     Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge
- $F_A$     Restkraft

*Hinweis:        In einigen Lehrbücher wird die Restkraft als  $F_A = F_L - F_F$  definiert.*

**"AUFTRIEB"**

$F_F > F_L$  (d.h.  $F_A > 0$ ) Der **Körper steigt** (bzw. schwimmt).

Eine Restkraft größer Null wird im Sprachgebrauch als "Auftrieb" bezeichnet.

**"ABTRIEB"**

$F_L > F_F$  (d.h.  $F_A < 0$ ) Der **Körper sinkt**.

Eine Restkraft kleiner Null wird im Sprachgebrauch als "Abtrieb" bezeichnet.

**"AUSTARIERT"**

$F_L = F_F$  (d.h.  $F_A = 0$ ) Der **Körper schwebt (ist austariert)**.

Er befindet sich im hydrostatischen Gleichgewicht.

Beispiel

Wie verhalten sich 8 kg Blei ( $\rho_{Pb} = 11 \text{ kg/l}$ ) unter Wasser?

$$\begin{aligned} V_{Pb} &= \text{Volumen der 8 kg Blei} \\ &= \text{Masse / Dichte} \\ &= 8 \text{ [kg]} / 11 \text{ [kg/l]} \\ &= 0,72 \text{ [l]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_F &= \text{Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge} \\ &= V_{Pb} \times \rho_{\text{Wasser}} \times \text{Erdbeschleunigung} \\ &= 0,72 \text{ [l]} \times 1 \text{ [kg/l]} \times 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} \\ &\approx 0,72 \text{ [l]} \times 1 \text{ [kg/l]} \times 10 \text{ [m/s}^2\text{]} \\ &= 7,20 \text{ [kg} \times \text{m/s}^2\text{]} \\ &= 7,20 \text{ [N]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_L &= \text{Gewichtskraft des Körpers in Luft} \\ &= 80 \text{ [N]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_A &= F_F - F_L \\ &= 7,2 - 80 \text{ [N]} \\ &= -72,8 \text{ [N]} \end{aligned}$$

Ergebnis: Da  $F_A < 0$  Der Körper (Blei) sinkt (Abtrieb).

Übung 1

Wie verhalten sich 12 kg Blei ( $\rho = 11 \text{ kg/l}$ ) unter Wasser?

Übung 2

Wie verhalten sich 9 kg Holz ( $\rho = 0,6 \text{ kg/l}$ ) unter Wasser?

Übung 3

Wie verändert sich der Auftrieb eines Tauchers, der unter Wasser 2 Liter Luft einatmet?

## 1.4. Atemgase

Als Atemluft werden verschiedene Gasgemische benutzt, normale atmosphärische Luft ist das gebräuchlichste (für Tiefen bis 50 m). Bei Einsätzen in sehr geringen Tiefen und in großen Tiefen werden andere Gasgemische geatmet.

Die Versorgung des Tauchers mit Atemluft erfolgt über einen Schlauch oder aus mitgeführten Atemgasbehältern (Druckgasflaschen).

(engl. "SCUBA" *Self-contained underwater breathing apparatus*)

### 1.4.1. Wichtige Gase

<b>O<sub>2</sub></b>	<b>Sauerstoff</b>	<b>lebenswichtiges Gas für den menschlichen Körper,</b> wirkt unter hohem Druck <b>toxisch (ab etwa 1,6 bar pO<sub>2</sub>)</b>
<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Stickstoff</b>	wirkt ab bestimmten Partialdruck <b>toxisch (betäubende Wirkung),</b> <u>Inertgas</u>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Kohlendioxid</b>	Expositionsgrenzwerte (AGW*: 5000 ml/m <sup>3</sup> (ppm)) entsteht bei natürlichen Prozessen (z.B. Verbrennung, Gärung, (Stoffwechsel), steuert den Atemreiz, sehr toxisch bei Konzentration > 0,03%
<b>CO</b>	<b>Kohlenmonoxid</b>	<b>äußerst toxisch!</b> Expositionsgrenzwerte (AGW*: 30 ppm, 35 mg/m <sup>3</sup> ) Entsteht bei unzureichender Verbrennung (Abgase). Starke toxische Wirkung als Atemgift (→ Bewusstlosigkeit, Tod). Lebensgefährliche Mengen können unbemerkt aufgenommen werden, da das Gas geruch- und reizlos ist und nicht zur Atemnot führt.
<b>He</b>	<b>Helium</b>	bei Tieftauchenaktionen wird ein Helium-Sauerstoff-Gemisch als Atemgas verwendet, Inertgas, Donald-Duck-Effekt
Alle fünf Gase sind farblos, geschmacklos und geruchlos.		

\* Der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) ist gemäß der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) der Grenzwert für die zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz in Bezug auf einen gegebenen Referenzzeitraum. Er gibt an, bei welcher Konzentration eines Stoffes akute oder chronische schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit im Allgemeinen nicht zu erwarten sind.

Als "**inert**" werden Gase bezeichnet, die keine biochemischen Reaktionen eingehen ("neutrale" Gase). Sie haben alle mehr oder weniger narkoseartige Wirkung, die von ihrem Partialdruck abhängen (Inertgasnarkose).

**Inertgase** sind: Helium, Neon, Wasserstoff, Stickstoff, Argon, Krypton, Xenon.

Wichtige Gasgemische für die Durchführung von Taucherarbeiten in größeren Tiefen sind:

**Heliox** = He + O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> < 21%, He > 79%)

**Trimix** = He + N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> < 21%, (He + N<sub>2</sub>) > 79%, He ≥ 79%)

Beim Militär wird bei Kampfeinsätzen in geringen Tiefen mit

**Sauerstoff** = O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> = 100%, reiner Sauerstoff, Kreislaufgeräte)  
getaucht.

Im Bereich des Sporttauchens wird seit einigen Jahren auch mit dem Atemgasgemisch **NITROX** getaucht.

**Nitrox** = N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> > 21%, N<sub>2</sub> < 78%)

Durch die Reduzierung des N<sub>2</sub>-Anteiles kann die Gefahr eines Dekompressionsunfalls verringert werden, wenn nach den gleichen Austauschregeln wie beim Tauchen mit normaler Luft getaucht wird.

Übliche Gemische sind u.a.:

NOAA NITROX I (32 % O<sub>2</sub>, 68 % N<sub>2</sub>) bis zu einer maximalen Tauchtiefe von 40 m

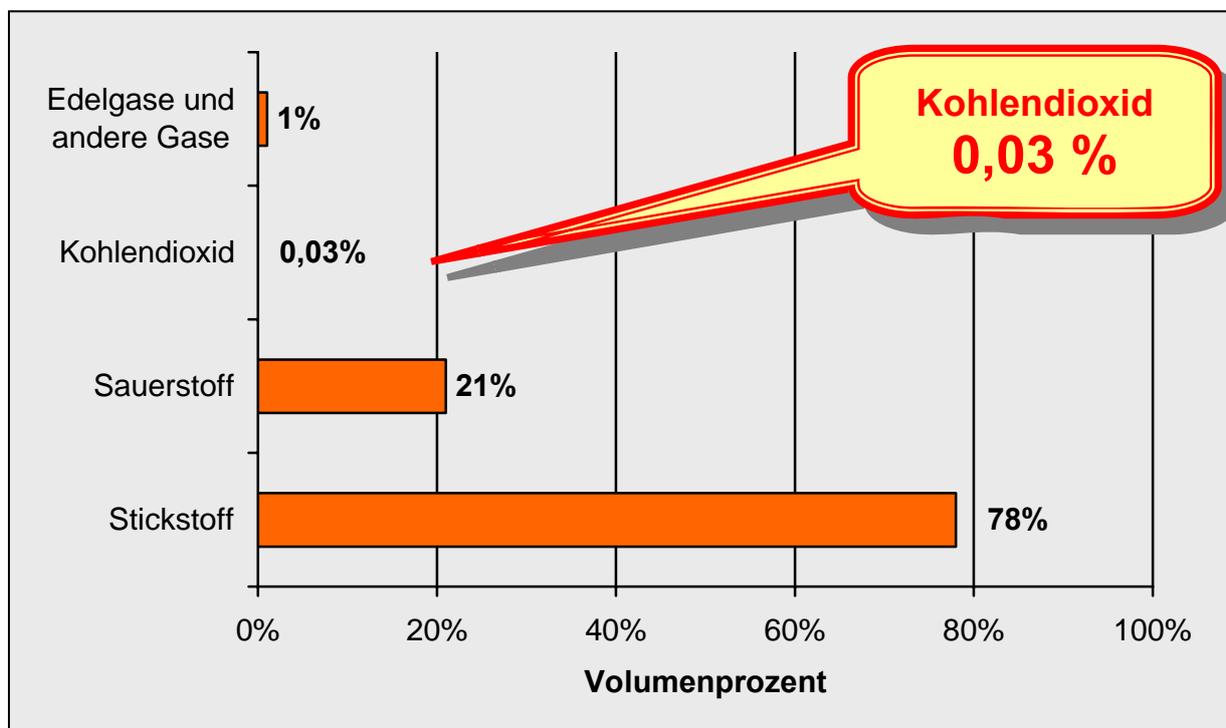
NOAA NITROX II (36 % O<sub>2</sub>, 64 % N<sub>2</sub>) bis zu einer maximalen Tauchtiefe von 36 m.

## 1.4.2. Luft

Die atmosphärische Luft ist ein Gasgemisch, bestehend aus:

<b>78 %</b>	<b>Stickstoff</b>
<b>21 %</b>	<b>Sauerstoff</b>
<b>0,03 %</b>	<b>Kohlendioxid</b>
<b>1 %</b>	<b>Edelgase und andere Gase</b>

(Näherungswerte für **trockene** Luft)



Die genauen Werte (für trockene Luft) gem. **ISO 2533** (in Volumenprozent):

78,084 %	Stickstoff (N <sub>2</sub> )
20,9476 %	Sauerstoff (O <sub>2</sub> )
0,0314 %	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )
0,9340 %	Argon (Ar)
0,000050 %	Wasserstoff (H <sub>2</sub> )
0,001818 %	Neon (Ne)
0,000524 %	Helium (He)
0,000114 %	Krypton (Kr)
0,0000087 %	Xenon (Xe)

Der **Wasserdampfgehalt der Atmosphäre liegt zwischen 0 und 5 %**.

### 1.4.3. Partialdruck

Der Anteil eines Gases *i* am Gesamtdruck eines Gasgemisches wird als "**Partialdruck des Gases *i* ( $p_i$ )**" (Teildruck) bezeichnet.

Der Partialdruck eines einzelnen Gases ist direkt proportional zu seinem Prozentanteil am Gesamtvolumen des Gasgemisches.

Bei einem Luftdruck von 1 bar (etwa Meeresniveau) gilt für unsere Atemluft:

$$\text{Bei einem Gesamtdruck von 1 bar gilt:} \\ p_i = ( \text{prozentualer Volumenanteil des Gases } i \text{ [\%] / 100 [\%]} ) \times 1 \text{ [bar]}$$

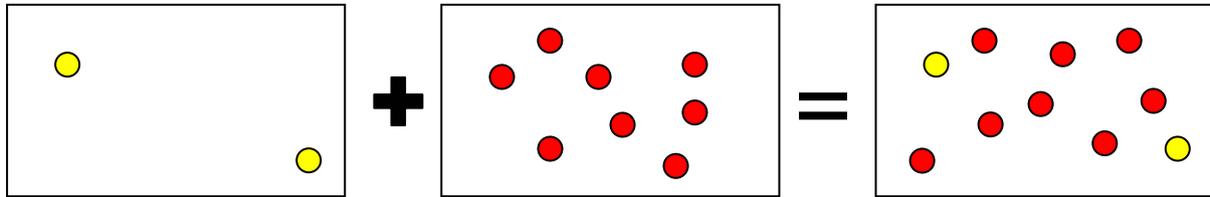
Für unsere Atemluft gilt vereinfacht (20 % O<sub>2</sub> + 80 % N<sub>2</sub>):

$$p_{\text{O}_2} = (20 / 100) \times 1 = 0,2 \text{ bar}$$

In Worten: Der Sauerstoffpartialdruck beträgt 0,2 bar.

$$p_{\text{N}_2} = (80 / 100) \times 1 = 0,8 \text{ bar}$$

In Worten: Der Stickstoffpartialdruck beträgt 0,8 bar.



Sauerstoff

$$p_{\text{O}_2} = 0,2 \text{ bar}$$

Stickstoff

$$p_{\text{N}_2} = 0,8 \text{ bar}$$

Gasgemisch

$$p_{\Sigma} = 1,0 \text{ bar}$$

Falls der Gesamtdruck  $\neq 1 \text{ bar}$ , errechnet sich der Partialdruck entsprechend **dem Gesetz von Dalton** (s. 1.5.5.).

## 1.5. Gasgesetze für ideale Gase

Bei der Betrachtung idealer Gase werden die Gasteilchen als verschwindend klein angenommen und die Wirkung der van-der-Waals Kräfte zwischen den Molekülen vernachlässigt. Für einen bestimmten Druck- und Temperaturbereich ist diese Vereinfachung in der Tauchphysik zulässig, die Fehlerbereiche sind geringer als die Messfehler der eingesetzten Manometer, Thermometer und Tiefenmesser. Zu Auswirkungen kommt es erst bei den selten verwendeten 300 bar Tauchgeräten. Auch die Vereisung (Joule-Thompson-Effekt) von Tauchgeräten kann nur durch Betrachtung realer Gase erklärt werden.

Das physikalische Verhalten idealer Gase wird von drei Eigenschaften bestimmt:

**Temperatur (T)** (absolute Temperatur in **Kelvin**)  
**Druck (p)**  
**Volumen (V).**

Die Gasgesetze beschreiben mögliche Verknüpfungen.

### 1.5.1. Gesetz von Boyle-Mariotte (Kompressibilität von Gasen)

#### **Problemstellung**

Ein Luftballon wird von der Wasseroberfläche auf eine größere Tiefe gebracht, d.h. er wird einem größeren Druck ausgesetzt. Wie ändert sich sein Volumen?

*Robert Boyle, engl. Naturforscher, 1627-1691, entdeckte 1662 experimentell den Zusammenhang zwischen Druck und Volumen der Luft.*

*Edmé Mariotte, frz. Physiker, ca. 1620-1684, machte ähnliche Versuche wie Boyle, jedoch ordnete er die Barometer in verschiedenen Tiefen unter Wasser an.*

### Gesetz von Boyle-Mariotte

**"Bei gleichbleibender Temperatur ist das Produkt aus Druck und Volumen für eine abgeschlossene Gasmenge konstant."**

$$p \times V = \text{const} \quad (\text{falls } T = \text{const})$$

$$\text{falls } T = \text{const} : \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

wobei zum Zeitpunkt 1 (Zustand 1): Druck  $p_1$ , Volumen  $V_1$   
 Zeitpunkt 2 (Zustand 2): Druck  $p_2$ , Volumen  $V_2$

#### Beispiel 1

Ein Schnorcheltaucher (Apnoetaucher) mit einem Lungenvolumen von 6 Litern taucht in einer Schwimmhalle mit einer Wassertiefe von 3,8 m.  
 Wie groß ist sein Lungenvolumen, nachdem er von der Oberfläche zum Beckenboden abgetaucht ist?

Boyle-Mariotte'sches Gesetz:	$P \times V = c$		
Oberfläche (Zustand 1):	$p_1 \times V_1 = c$	$\rightarrow$	$1 \text{ bar} \times 6 \text{ l} = 6 \text{ bar l}$
Beckenboden (Zustand 2):	$p_2 \times V_2 = c$	$\rightarrow$	$V_2 = c / p_2$
			$= 6 \text{ bar l} / 1,38 \text{ bar}$
			$\approx 4,35 \text{ l}$

Beispiel 2

Ein Gerätetaucher mit einem Lungenvolumen von 6 Litern taucht in einer Schwimmhalle mit 3,8 m Tiefe. Wie ändert sich sein Lungenvolumen, wenn er am Beckenboden aus dem Gerät geatmet hat und ohne Luftabgabe zur Oberfläche zurückkehrt?

$$\begin{array}{ll} \text{Beckenboden (Zustand 1):} & p_1 \times V_1 = c \quad \rightarrow \quad 1,38 \text{ bar} \times 6 \text{ Liter} = 8,28 \text{ bar l} \\ \text{Oberfläche (Zustand 2):} & V_2 = c / p_2 = 8,28 \text{ bar l} / 1 \text{ bar} \approx \mathbf{8,28 \text{ Liter}} \end{array}$$

Volumenzunahme: 2,28 l (38 %)

Beachte

**Lungenbläschen können ab  $\Delta p = 100 \text{ mbar}$  zerreißen (= 1 m Tiefe)!**

Übung 1

Ein Freitaucher (Schnorchler) besitzt ein Lungenvolumen von 6 Litern.

Wie groß ist sein Lungenvolumen in

- a. 10 m Tiefe      b. 30 m Tiefe      c. 17,5 m Tiefe?

Übung 2

Ein Gerätetaucher mit einem Lungenvolumen von 8 Litern atmet in 10 m Wassertiefe aus seinem Gerät (Scuba) und steigt anschließend ohne Luft abzuatmen an die Oberfläche auf.

Auf welches Volumen dehnt sich seine Lunge auf?

Übung 3

Ein Gerätetaucher verbraucht an der Oberfläche 25 Liter Luft pro Minute (AMV, Atemminutenvolumen). Wie viel Luft verbraucht er in 40 m Tiefe?

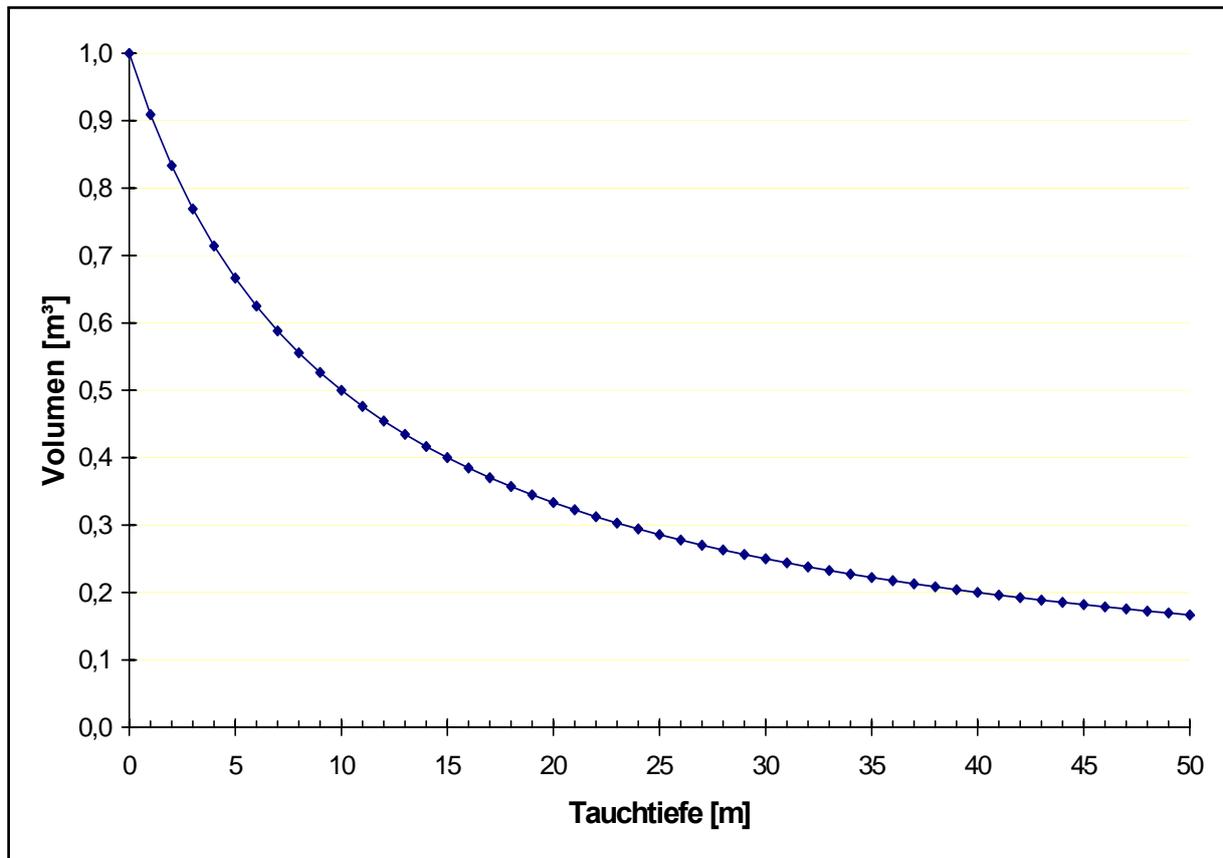


Abb.: Veränderung des Volumens einer abgeschlossenen Gasmenge mit der Tiefe entsprechend dem Gesetz von Boyle-Mariotte.

Wassertiefe [m]	Druck [bar] Tauchtiefendruck	Volumen [m³]	Volumenänderung je 10 m Tauchtiefe [%]
0	1	1,00	
10	2	0,50	50,00
20	3	0,33	16,67
30	4	0,25	8,33
40	5	0,20	5,00
50	6	0,17	3,33

## 1.5.2. Gesetz von Charles (engl. ‚Charles Law‘)

*Jacques Alexandre César Charles, frz. Physiker und Mathematiker, 1746-1823, verbesserte die Montgolfiere durch die Verwendung von Wasserstoff als Füllgas, 1783 stieg er mit einem derartigen Luftballon (Charlière) in Paris auf, er erreichte Höhen bis 3000 m. Im Jahr 1787 entwickelte er das ‚Gesetz von Charles‘ über die Wärmeausdehnung von Gasen. Da er noch vor Gay-Lussac das nach diesem benannte Gesetz (s.a. 1.5.3) erfand, wird dieses in einigen Lehrbücher als das Gesetz von Charles (‚Charles law‘) bezeichnet.*

Dieses Gesetz wird nur der Vollständigkeit halber hier mit aufgeführt. In der Tauchpraxis gibt es wenig Anwendungen. Wichtig ist es dagegen für die Ballonfahrt.

### Gesetz von Charles

**"Bei konstantem Druck wächst das Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge im direkten Verhältnis zur Zunahme der absoluten Temperatur."**

**Bei Abkühlung erfolgt der umgekehrte Vorgang.**

### Rechenvorschrift:

$$\text{falls } p = \text{const} : \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{oder} \quad \frac{V}{T} = \text{const}$$

wobei zum                      Zeitpunkt 1 (Zustand 1):      Volumen  $V_1$ , Temperatur  $T_1$   
     Zeitpunkt 2 (Zustand 2):      Volumen  $V_2$ , Temperatur  $T_2$

**Beachte: Temperatur-Angaben T in Kelvin!**

### Beispiel

Eine unten offene Taucherkammer mit einem Volumen von  $5 \text{ m}^3$  befindet sich auf 30 m Tiefe. Die Temperatur in der Kammer kühlt von  $27 \text{ °C}$  auf  $10 \text{ °C}$  ab. Wie ändert sich das Volumen in der Kammer?

Zeitpunkt 1:     $V_1 = 5 \text{ m}^3$      $T_1 = (273 + 27) \text{ K} = 300 \text{ K}$     (Kelvin!)  
 Zeitpunkt 2:     $V_2 = ? \text{ m}^3$      $T_2 = (273 + 10) \text{ K} = 283 \text{ K}$

$$V_2 = V_1 \times (T_2 / T_1) = 5 \text{ m}^3 \times (283 \text{ K} / 300 \text{ K}) \approx 4,717 \text{ m}^3$$

### 1.5.3. Gesetz von Gay-Lussac *(oder auch 2. Gesetz von Charles)*

#### Problemstellung

#### Erwärmung von Gasen in einer Druckluftflasche



Warum kann eine Druckluftflasche, die auf einen Druck von 220 bar gefüllt wurde, nach dem Eintauchen ins Wasser nach wenigen Minuten nur noch einen Druck von 190 bar aufweisen?

Bei welcher Temperatur platzt eine volle Druckluftflasche?

*Joseph Louis Gay-Lussac, 1778-1850, frz. Physiker und Chemiker*

#### Gesetz von Gay-Lussac

**"Bei konstantem Volumen wächst der Druck einer abgeschlossenen Gasmenge im direkten Verhältnis zur Zunahme der absoluten Temperatur."**

**Bei Abkühlung erfolgt der umgekehrte Vorgang.**

*(In einigen älteren deutschen Lehrbüchern gibt es die Bezeichnung "Gesetz von Amontons".)*



Beispiel 2

Ein Taucher springt mit seiner Druckluftflasche in 5 °C warmes Wasser. Vor dem Sprung hatte die frisch gefüllte Flasche an Bord einen Druck von 225 bar und eine Temperatur von 40 °C. Wie ändert sich im Wasser der Druck in der Flasche?

$$\text{Zeitpunkt 1: } p_1 = 225 \text{ bar} \quad T_1 = (273 + 40) \text{ K} = 313 \text{ K}$$

$$\text{Zeitpunkt 2: } p_2 = ? \text{ bar} \quad T_2 = (273 + 5) \text{ K} = 278 \text{ K}$$

$$p_2 = p_1 \times ( T_2 / T_1 ) = 225 \text{ bar} \times ( 278 \text{ K} / 313 \text{ K} ) \approx 200 \text{ bar}$$

**Normale Sonnenstrahlung reicht nicht aus, um eine Druckluftflasche zum Platzen zu bringen!**

**Bei Abkühlung von Druckluftflaschen, zum Beispiel im kalten Wasser, kommt es zu einer Verringerung des Flaschendruckes!**

### 1.5.4. Allgemeines Gasgesetz

Der Zustand einer bestimmten Gasmenge (ideales Gas) wird von drei Zustandsgrößen bestimmt:

**T**    Temperatur (absolute Temperatur, Kelvin)  
**p**    Druck  
und    **V**    Volumen.

Diese drei Größen sind durch die Zustandsgleichung

$p V = \gamma R T$     verknüpft,  
wobei  $R$  die universelle Gaskonstante und  $\gamma$  die Anzahl von Molen wiedergibt.

#### Allgemeine Gasgleichung (für ideale Gase)

$$\frac{p_1 \times V_1}{T_1} = \frac{p_2 \times V_2}{T_2} = \textit{konstant}$$

$p_1$	Druck im Zustand 1
$V_1$	Volumen im Zustand 1
$T_1$	Temperatur im Zustand 1 (in Kelvin!)
$p_2$	Druck im Zustand 2
$V_2$	Volumen im Zustand 2
$T_2$	Temperatur im Zustand 2 (in Kelvin!)

Die Gesetze von Boyle-Mariotte ( $T = \text{const}$ ), Charles ( $p = \text{const}$ ) und Gay-Lussac ( $V = \text{const}$ ) sind Spezialfälle des Allgemeinen Gasgesetzes.

#### Beispiel

Eine unten offene Taucherkammer wird von der Oberfläche auf 30 m Wassertiefe abgesenkt.

Das Volumen der Kammer beträgt  $10 \text{ m}^3$ .

Die Temperatur an der Oberfläche beträgt  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ , in 30 m Tiefe  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Wie groß ist das luftgefüllte Volumen der Kammer in 30 m Wassertiefe?

Zustand 1:     $p_1 = 1 \text{ bar}$      $V_1 = 10 \text{ m}^3$      $T_1 = (273 + 27) = 300 \text{ K}$   
Zustand 2:     $p_2 = 4 \text{ bar}$      $V_2 = ? \text{ m}^3$      $T_2 = (273 + 7) = 280 \text{ K}$

$$\begin{aligned} V_2 &= ( p_1 \times V_1 \times T_2 ) / ( T_1 \times p_2 ) \\ &= ( 1 \text{ bar} \times 10 \text{ m}^3 \times 280 \text{ K} ) / ( 300 \text{ K} \times 4 \text{ bar} ) \\ &\approx 2,33 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

### 1.5.5. Gesetz von Dalton (Partialdruckgesetz)

#### PROBLEMSTELLUNG

Wie viel Druck übt jedes einzelne Gas in einem Gasgemisch aus?  
Wie lässt sich dieser Druck berechnen?

**Wichtig:** Jedes Gas wirkt ab einem bestimmten Druck (Partialdruck) giftig!

*John Dalton, engl. Physiker und Chemiker, 1776-1844  
Partialdruckgesetz 1805  
(Bitte nicht verwechseln mit den "Dalton Brüdern".)*

#### Gesetz von Dalton

**"In einem Gasgemisch  
übt ein jedes der Gase den Druck aus,  
den es haben würde,  
wenn es für sich alleine den ganzen Raum erfüllte,  
dieser Druck heißt Partialdruck."**

**Der Gesamtdruck des ganzen Gasgemisches ist gleich  
der Summe der einzelnen Partialdrücke.**

#### Rechenvorschrift:

$p_i$  = Partialdruck (der Komponente i)

$$p_i = \frac{\text{prozentualer Volumenanteil [\%]}}{100 [\%]} \times \text{Gesamtdruck [Pascal]}$$

Der Gesamtdruck ist mit einem Manometer messbar. Bei Druckluftgeräten wird der Druck normalerweise in der Einheit "bar" und nicht in "Pascal" gemessen.

$$p_i = \frac{q_i}{100} \times p$$

wobei  $p$  = Gesamtdruck

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$$

$q_i$  = prozentualer Mengenanteil (Volumenanteil)

$$100\% = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

Der Index  $i$  kennzeichnet die einzelnen Komponenten (Gase).

### Beispiel 1

Entspannte Luft (1 bar Umgebungsdruck)  $\rightarrow p = 1$  [bar]

Index	Gas	Volumenanteil		Partialdruck	
1	N <sub>2</sub>	78,08 %	$q_1$	0,7808 bar	$p_1$
2	O <sub>2</sub>	20,95 %	$q_2$	0,2095 bar	$p_2$
3	CO <sub>2</sub>	0,03 %	$q_3$	<b>0,0003</b> bar	$p_3$
4	Andere	0,94 %	$q_4$	0,0094 bar	$p_4$
$\Sigma$	Gemisch	100 %	$q$	1,0000 bar	$p$

### Beispiel 2

Druckluft, 20 m Wassertiefe  $\rightarrow$  Gesamtdruck = 3 [bar]

Index	Gas	Volumenanteil		Partialdruck	
1	N <sub>2</sub>	$\approx 78$ %	$q_1$	2,3400 bar	$p_1$
2	O <sub>2</sub>	$\approx 21$ %	$q_2$	0,6300 bar	$p_2$
3	CO <sub>2</sub>	0,03 %	$q_3$	<b>0,0009</b> bar	$p_3$
4	Andere	$\approx 1$ %	$q_4$	0,0300 bar	$p_4$
$\Sigma$	Gemisch	100 %	$q$	$\approx 3$ bar	$p$

Rechenweg für Index 1:  $(78 / 100) \times 3 = 2,34$  [bar]

Rechenweg für Index 2:  $(21 / 100) \times 3 = 0,63$  [bar]

Beispiel 3

Druckluft, Gesamtdruck = 137 [bar]

Index	Gas	Volumenanteil		Partialdruck	
1	N <sub>2</sub>	78,08 %	q <sub>1</sub>	106,97 bar	p <sub>1</sub>
2	O <sub>2</sub>	20,95 %	q <sub>2</sub>	28,70 bar	p <sub>2</sub>
3	CO <sub>2</sub>	0,03 %	q <sub>3</sub>	<b>0,04</b> bar	p <sub>3</sub>
4	andere	0,94 %	q <sub>4</sub>	1,29 bar	p <sub>4</sub>
Σ	Gemisch	100 %	q	137,00 bar	p

Rechenweg für Index 1:  $(78,08 / 100) \times 137 = 106,97$  [bar]

Rechenweg für Index 2:  $(20,95 / 100) \times 137 = 28,70$  [bar]

**Gase (z.B. CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>) können bei gleichbleibendem Volumenanteil unter erhöhtem Druck einen gefährlichen Partialdruck erreichen.**

Beispiel 4

Experiment "Physalie IV" der COMEX in Marseille

Zwei Versuchspersonen atmen in einer Druckkammer bei einer simulierten Tiefe von 610 Metern 80 Minuten lang ein Gasgemisch (TRIMIX) bestehend aus: 99,15% He, 0,65% O<sub>2</sub> und 0,17% N<sub>2</sub>.

$$p(\text{He}) = 99,15 \% / 100 \% \times 62 \text{ bar} = 61,47 \text{ [bar]}$$

$$p(\text{O}_2) = 0,65 \% / 100 \% \times 62 \text{ bar} = 0,403 \text{ [bar]}$$

$$p(\text{N}_2) = 0,17 \% / 100 \% \times 62 \text{ bar} = 0,1054 \text{ [bar]}$$

Damit ist der Sauerstoffpartialdruck doppelt so groß wie an der Oberfläche → ausreichende O<sub>2</sub>-Versorgung ist gewährleistet.  
(Ein p(O<sub>2</sub>) > 1,6 bar wirkt giftig!)

Übung

Gasgemisch: 60% O<sub>2</sub> + 40% N<sub>2</sub>

Wie tief darf man mit diesem Gasgemisch tauchen, ohne den kritischen Wert von pO<sub>2</sub> = 1,6 [bar] zu überschreiten?

## 1.5.6. Gesetz von Henry, Halbwertskurve

### PROBLEMSTELLUNG: GASE IN FLÜSSIGKEITEN

Welche Menge eines Gases  $i$  kann in einer Flüssigkeit  $j$  **gelöst** werden?

Welche **Faktoren** spielen dabei eine Rolle?

Die Löslichkeit von Gasen unter Druck in einer Flüssigkeit hängt im wesentlichen ab von:

- \* **Partialdruck** des Gases  $i$  ( $\leftarrow$  *Gesetz von Henry*)
- \* **Zeit** (Dauer der Einwirkung)
- \* Temperatur
- \* Löslichkeitskoeffizient  $\alpha_{ij}$  des Gases  $i$  in der Flüssigkeit  $j$
- \* Art der Flüssigkeit  $j$  (im Löslichkeitskoeffizient eingehend)
- \* Oberflächengröße der Flüssigkeit  $j$

*Sir William Henry, engl. Arzt, Anf. 19. Jahrhundert  
(nicht verwechseln mit Joseph Henry, amerik. Physiker, „Induktion“)*

### Gesetz von Henry

**"Die in einer Flüssigkeit gelöste Menge eines Gases ist  
(im Gleichgewicht)  
seinem Partialdruck an der Flüssigkeitsoberfläche proportional."**

*Gleichgewicht = Lösung ist gesättigt  
(Es lösen sich keine weitere Mengen des angebotenen Gases in der Flüssigkeit. Oder genauer ausgedrückt: Es treten genauso viele Moleküle ein wie aus und damit ändert sich in der Gesamtbilanz nichts mehr.)*

### Rechenvorschrift:

$$Q_i = p_i \times \alpha_{ij} \times V_j$$

wobei

- $Q_i$  gelöste Menge des Gases  $i$
- $p_i$  angebotener Partialdruck des Gases  $i$
- $V_j$  Volumen der Flüssigkeit  $j$
- $\alpha_{ij}$  Löslichkeitskoeffizient des Gases  $i$  in der Flüssigkeit  $j$

Der Löslichkeitskoeffizient  $\alpha_{ij}$  ist temperaturabhängig.

**Tab. I/ 2:** Löslichkeitskoeffizienten verschiedener Gase in Abhängigkeit von der Temperatur  
(Zahlenwerte aus: *Divemaster 2/95*)

Temperatur (°C)	Luft	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	He	CO <sub>2</sub>
0	29,2	48,9	23,5	9,5	35,4
5	25,7	42,9	20,9	9,2	31,5
10	22,8	38,0	18,6	9,0	28,2
15	20,6	34,2	16,9	8,8	25,4
20	18,7	31,0	15,5	8,7	23,2
25	17,1	28,3	14,3	8,5	21,4
30	15,6	26,1	13,4	8,4	20,0
35	14,8	24,4	12,6	8,3	18,8

Die **Zeit bis zur Erreichung der Sättigung** hängt von der Oberflächengröße der Flüssigkeit ab; je größer diese ist, umso eher wird die Sättigung erreicht. Wenn eine Lösung gesättigt ist lösen sich keine weiteren Mengen des angebotenen Gases in der Flüssigkeit, der **Gleichgewichtszustand** ist dann erreicht.

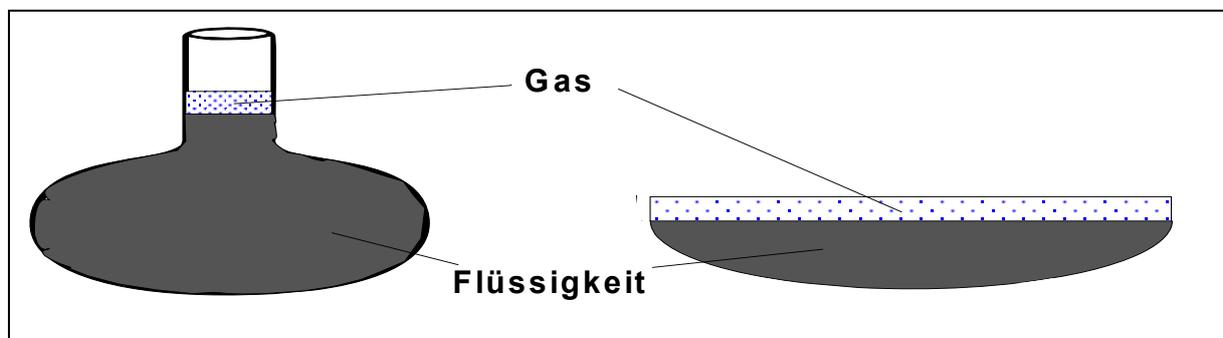
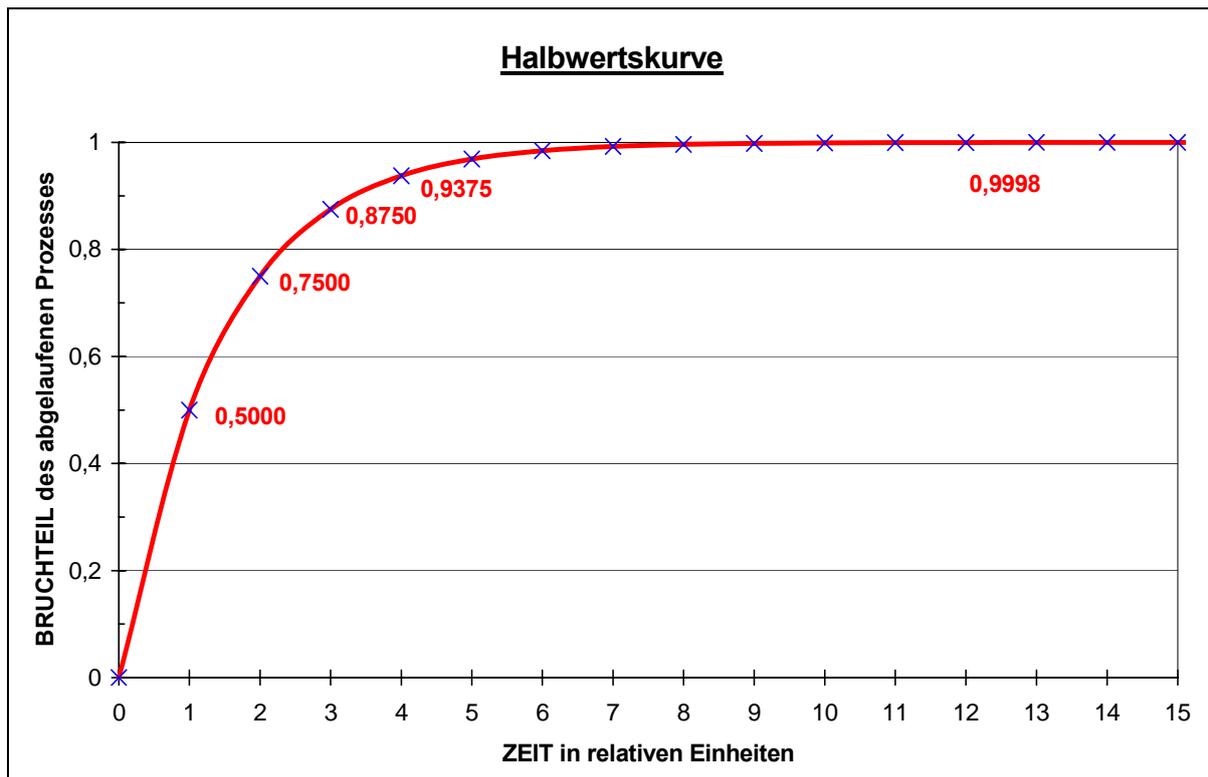


Abb. Die Flüssigkeit in der Schale ist **schneller** gesättigt!

Die **Aufsättigung eines Gases** in einem Gewebe (Flüssigkeit) **bei Druckerhöhung** erfolgt ebenso wie die **Entsättigung** nach einer **Halbwertskurve**, d.h.

nach  $t = 1x$  ist ein Prozess zu  $1/2$  abgelaufen,  
 nach  $t = 2x$  ist ein Prozess zu  $3/4$  abgelaufen,  
 nach  $t = 3x$  ist ein Prozess zu  $7/8$  abgelaufen,  
 nach  $t = 4x$  ist ein Prozess zu  $15/16$  abgelaufen,  
 etc.



Anm.:

Halbwertszeit = Zeit ( $t$ ), in der eine wägbare Menge eines radioaktiven Elementes zur Hälfte zerfällt, d.h. sich zur Hälfte in ein neues Element umwandelt.

Die **Sättigungszeit** einer Gasart  $i$  in einem bestimmten Gewebe hängt ab von  $\alpha_{ij}$  wie auch von dessen spezifischer Durchblutung.

Beim Gerätetauchen löst sich Stickstoff aus der Atemluft im Blut bzw. im Gewebe des Körpers.

Bei langen Tauchgängen in großer Tiefe und zu schneller Druckentlastung (beim Auftauchen) kommt es zum Ausperlen des Stickstoffes ( $N_2$ ) im Blut und im Gewebe (gleicher Effekt wie beim Öffnen einer Sektflasche).

➔ **Dekompressionskrankheit!**

## 1.5.7. Berechnung der maximalen Einsatztiefe für ein Gas i in einem Gasgemisch

### Abkürzungen

$f_i$	Mengenanteil (Bruchteil) des Gases i (engl. ‚fraction‘)
$f_{O_2}$	Sauerstoffanteil <i>Beispiel: normale Luft mit 21% Sauerstoffanteil <math>\rightarrow f_{O_2} = 0,21 = 21 / 100</math></i>
$p_{Gas\ i}$	Partialdruck des Gases i = Mengenanteil $f_i$ des Gases i $\times$ Gesamtdruck [bar]
$p_{Gas\ i\ max}$	maximal erlaubter Partialdruck des Gases i
$p_{O_2}$	Sauerstoffpartialdruck
$p_{O_2\ max}$	maximal erlaubter Sauerstoffpartialdruck (= <b>1,6 [bar]</b> , max. 3 Stunden lang, lt. BGI 897) <i>(Sporttaucher: etwa 1,6 bar in warmen Gewässern bei normaler Arbeitsleistung, ansonsten 0,1 bis 0,2 bar niedriger)</i>
$p_{O_2\ min}$	geringster erlaubter Sauerstoffpartialdruck (= <b>0,16 [bar]</b> lt. BGI 897)

**MOD Maximale Einsatztiefe** (engl. ‚maximum operation depth‘)

$$MOD = \left( \frac{p_{Gas\ i\ max}}{f_{Gas\ i}} - 1 \right) \times 10 \quad [Meter]$$

**Maximale Einsatztiefe bei Vorgabe eines maximal erlaubten Sauerstoffpartialdruck (MOD O<sub>2</sub>)**

$$MOD(O_2) = \left( \frac{p_{O_2\ max}}{f_{O_2}} - 1 \right) \times 10 \quad [Meter]$$

#### Beispiel

Normale atmosphärische Luft (mit 21% Sauerstoff)  $\rightarrow f_{O_2} = 0,21 = 21 / 100$   
Grenzwert für Sauerstoff = 1,6 [bar]

$$MOD = \left( \frac{1,6}{0,21} - 1 \right) \times 10 \approx 66,19 \quad [Meter]$$

Weitere Formeln:

$$p_{Umgebung} = \frac{p_{Gas}}{f_{Gas}} \quad f_{Gas} = \frac{p_{Gas}}{p_{Umgebung}} \quad p_{Gas} = f_{Gas} \times p_{Umgebung}$$

### 1.5.8. Zusammenfassung

Dichte von Luft	$1,29 \cdot 10^{-3} \text{ [kg l}^{-1}\text{]}$	<b>1,29 [g l<sup>-1</sup>]</b>	
Dichte von Süßwasser von 4 °C	<b>1,00000 [kg l<sup>-1</sup>]</b>	1000 [g l <sup>-1</sup> ]	
Zusammensetzung der atmosphärischen Luft		78 % Stickstoff 21 % Sauerstoff 0,03 % Kohlendioxid	1 % Edelgase und andere Gase
Archimedisches Prinzip	„Ein Körper verliert in einer Flüssigkeit (scheinbar) soviel an Gewicht, (bzw. erhält soviel Auftrieb,) wie die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt.“		
Die Gasgesetze gelten für ideale Gase (Vernachlässigung der Bindungskräfte zwischen den Molekülen).			
Allgemeine Gasgleichung	„Für eine beliebige abgeschlossene Gasmenge ist bei Zustandsänderungen der Quotient $pV/T$ konstant.“	$\frac{p \times V}{T} = \text{konstant}$	
Gesetz von Boyle und Mariotte	"Bei gleichbleibender Temperatur ist das Produkt aus Druck und Volumen für eine abgeschlossene Gasmenge konstant."	$p \times V = \text{konstant}$ ( $T$ konstant)	Isotherme Zustandsänderung (Temperatur bleibt konstant.)
Gesetz von Charles	"Bei <u>konstantem Druck</u> wächst das <u>Volumen</u> einer abgeschlossenen Gasmenge im direkten Verhältnis zur Zunahme der <u>absoluten Temperatur</u> ." Bei Abkühlung erfolgt der umgekehrte Vorgang.	$\frac{V}{T} = \text{konstant}$ ( $p$ konstant)	Isobare Zustandsänderung (Druck bleibt konstant.)
Gesetz von Gay-Lussac	"Bei <u>konstantem Volumen</u> wächst der <u>Druck</u> einer abgeschlossenen Gasmenge im direkten Verhältnis zur Zunahme der <u>absoluten Temperatur</u> ." Bei Abkühlung erfolgt der umgekehrte Vorgang.	$\frac{P}{T} = \text{konstant}$ ( $V$ konstant)	Isochore Zustandsänderung (Volumen bleibt konstant.)
Gesetz von Dalton	"In einem <u>Gasgemisch</u> übt ein <u>jedes</u> der Gase <u>den Druck</u> aus, den es haben würde, wenn es <u>für sich alleine den ganzen Raum erfüllte</u> , dieser Druck heißt <u>Partialdruck</u> . Der <u>Gesamtdruck</u> des ganzen Gasgemisches ist gleich der <u>Summe der einzelnen Partialdrücke</u> ."	$p_i = (q_i / 100) \times p$	$P_i$ := Partialdruck des Gases $i$ $q_i$ := Volumenanteil des Gases $i$ $Q_i$ := gelöste Menge des Gases $i$
Gesetz von Henry	"Die in einer Flüssigkeit gelöste Menge eines Gases ist (im Gleichgewicht) seinem Partialdruck an der Flüssigkeitsoberfläche proportional."	$Q_i = p_i \times \alpha_{ij} \times V_j$	$\alpha_{ij}$ := Löslichkeitskoeffizient des Gases $i$ in der Flüssigkeit $j$ $V_j$ := Volumen der Flüssigkeit $j$

## 1.6. Optik (Sehen unter Wasser)

Die Geschwindigkeit von Licht unter Wasser ist geringer als im Medium Luft. Diese Tatsache kann in Kombination mit einer unpräzisen (gewohnheitsbedingten) Umsetzung (Wahrnehmung) dieser Lichtinformationen im Gehirn dazu führen, dass ein Taucher Größe und Entfernung von Gegenständen bzw. von Lebewesen unter Wasser falsch wahrnimmt. Schwächung und Streuung des Lichtes unter Wasser, insbesondere durch Wasserinhaltsstoffe, verändern die Wahrnehmung weiter und bedingen zusätzlich ein falsches Farbsehen.

### 1.6.1. Lichtbrechung (Refraktion)

Willebrod Snell van Rojen (lat. *Snellius*), 1580 (oder 1591?) – 1626  
Niederländischer Mathematiker und Physiker

#### Snelliussches Brechungsgesetz (~1618):

"Beim Übergang eines Lichtstrahles aus einem Medium in ein anderes ist der Quotient aus dem Sinus des Einfallswinkels und des Brechungswinkels eine von der Natur der beiden Medien abhängige Konstante."

René Descartes (1596-1650), frz. Philosoph und Mathematiker, hat 1637 das Brechungsgesetz veröffentlicht und mit der Lichtgeschwindigkeit in einen Zusammenhang gebracht („Discours de la Méthode“, 1637).

Der **absolute Brechungsindex**  $n_i$  ist gleich dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit im Medium  $i$ :

Absoluter Brechungsindex:

$$n_i = \frac{c_0}{c_i} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum}}{\text{Lichtgeschwindigkeit im Medium } i}$$

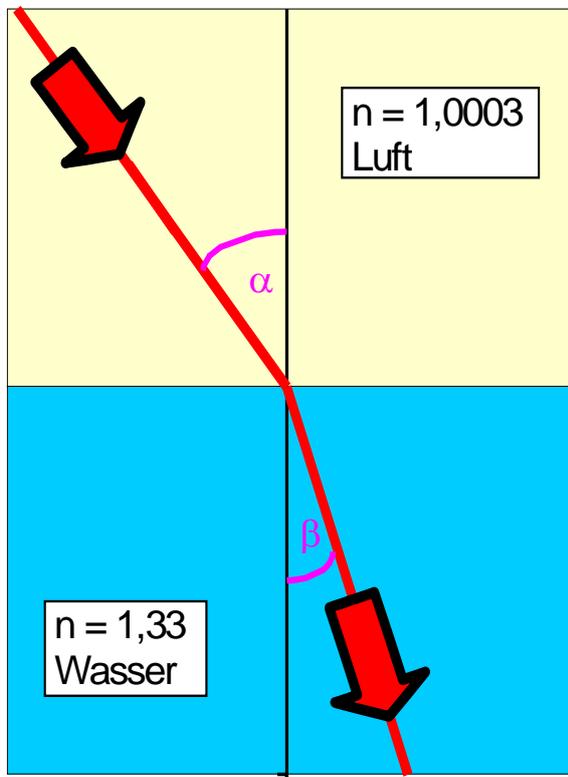
Der **relative Brechungsindex**  $n_{21}$  ist gleich dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit  $c_1$  im Medium 1 zur Lichtgeschwindigkeit  $c_2$  im Medium 2.

Relativer Brechungsindex:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

Die Konstante  $n_{21}$  heißt relativer Brechungsindex des Mediums

2 in bezug auf das Medium 1. Er ist ein Maß für die Änderung der Ausbreitungsrichtung von Lichtwellen beim Übergang vom Medium 1 zum Medium 2.



Der **relative Brechungsindex beim Übergang eines Lichtstrahls von Luft in Wasser**

ergibt sich zu  $n_{21} = 1,333\dots$ ,

wobei folgende Werte einzusetzen sind:

$$c_0 = \text{Lichtgeschwindigkeit in Vakuum} = 299796, \dots \text{ km s}^{-1}$$

$$c_1 = \text{Lichtgeschwindigkeit in Luft} \approx 300.000 \text{ km s}^{-1}$$

$$c_2 = \text{Lichtgeschwindigkeit in Wasser} = 225.000 \text{ km s}^{-1}$$

$$n_2 = n_{\text{Wasser}} = c_0 / c_{\text{Wasser}} = 1,3332$$

$$n_1 = n_{\text{Luft}} (0^\circ\text{C}; 1,013 \text{ bar}) = c_0 / c_{\text{Luft}(\dots)} = 1,000292$$

Beim Tauchen erfolgt die Lichtbrechung an der Grenzfläche zwischen der Luft in der Tauchermaske und dem umgebenden Wasserkörper. Diese Lichtbrechung bewirkt eine Vergrößerung der Abbildung auf der Netzhaut. Unter bestimmten Voraussetzungen erscheinen dem Taucher Gegenstände ein Viertel näher platziert als ihr tatsächlicher Abstand ist.

**Unter Wasser erscheinen uns alle Gegenstände  
1/3 größer  
und  
1/4 näher <sup>⊗</sup>.**

⊗ Vereinfachte Aussage, s.a. folgenden Text.

Diese Verzerrung kann die Hand-Augen-Koordination, insbesondere bei Tauchanfängern, beeinflussen, wenn sie versuchen einen Gegenstand unter Wasser zu greifen. Bei großen Entfernungen erscheinen Gegenstände dagegen weiter entfernt als sie tatsächlich sind. Die Ursache dieser falschen Entfernungsschätzungen beruht darauf, dass die vom Gehirn berechnete Entfernung auf den Winkeldifferenzen (☒) zwischen den auf den beiden Augen auftreffenden Lichtstrahlen (Signalen) beruht. Das Gehirn legt dabei seine lebenslangen Erfahrungen mit den Lichtstrahlen über Wasser zugrunde.

- ☒ Lichtstrahlen, von einem definierten Punkt im Wasser ausgehend, treffen auf ihren Wegen zu den beiden Augen mit etwas unterschiedlichen Winkeln auf dem Maskenglas auf und werden dort entsprechend unterschiedlich gebrochen.

Die Abstandswahrnehmung wird zusätzlich noch stark von der Trübung (Schwebstoffgehalt und gelöste Stoffe) des Wassers beeinflusst: je trüber das Wasser, um so näher rückt der Umkehrpunkt, an dem der Wechsel von Überschätzung zu Unterschätzung des Abstandes erfolgt.

#### Beispiel

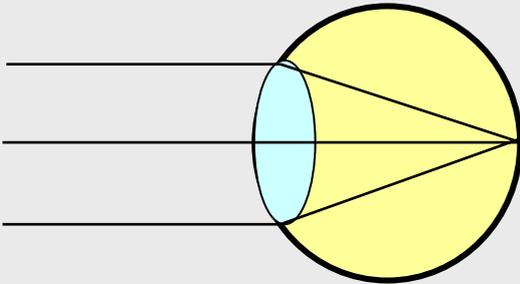
Sehr trübes Wasser:	Abstand von Objekten in 0,9 bis 1,2 m Abstand wird überschätzt.
Mäßig trübes Wasser:	Der Umkehrpunkt liegt zwischen 6,1 und 7,6 m Abstand.
Sehr klares Wasser:	Die Entfernung von Gegenständen in 15,2 bis 22,9 m Abstand wird unterschätzt.

(nach: NOAA , *Diving for Science and Technology*)

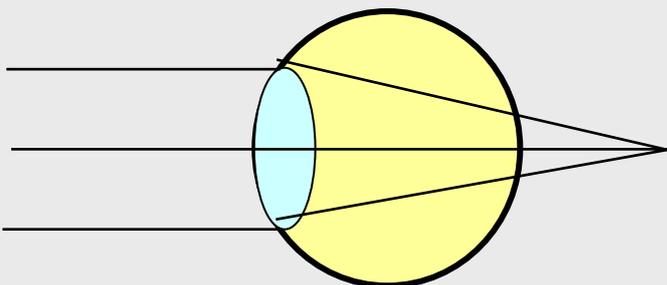
**"Daumenregel":** Je näher ein Objekt ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass es zu nahe erscheint, und je trüber das Wasser ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Abstand als zu groß angenommen wird.

Durch Erfahrung und Übung kann die Fähigkeit zur Abstands- und Größeneinschätzung deutlich verbessert werden. Dies ist sowohl für die Sicherheit als auch für Arbeiten unter Wasser (wie Forschungsarbeiten) wichtig. Als Folge der falschen Größen-/Abstandseinschätzungen wird auch die Geschwindigkeit von Objekten, die das Blickfeld kreuzen, überschätzt.

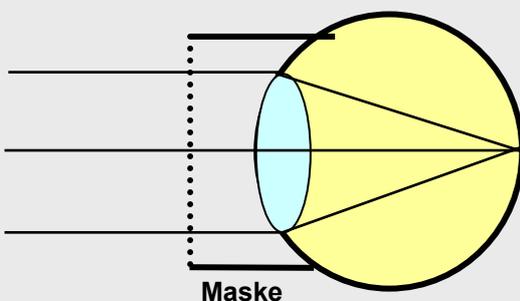
Die folgenden Abbildungen zeigen den Weg der Lichtstrahlen entsprechend den Gesetzen der geometrischen Optik:

**Weg der Lichtstrahlen im Auge über Wasser**

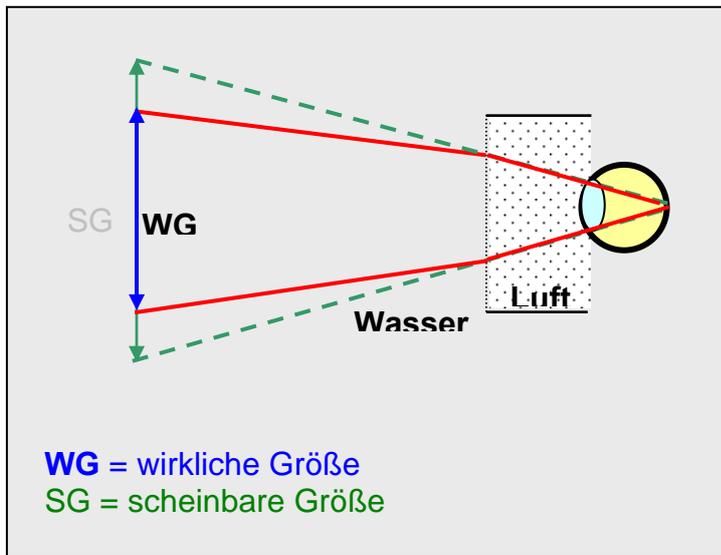
Gegenstand wird scharf auf der Netzhaut abgebildet!

**Weg der Lichtstrahlen im Auge unter Wasser (anderer Brechungsindex)**

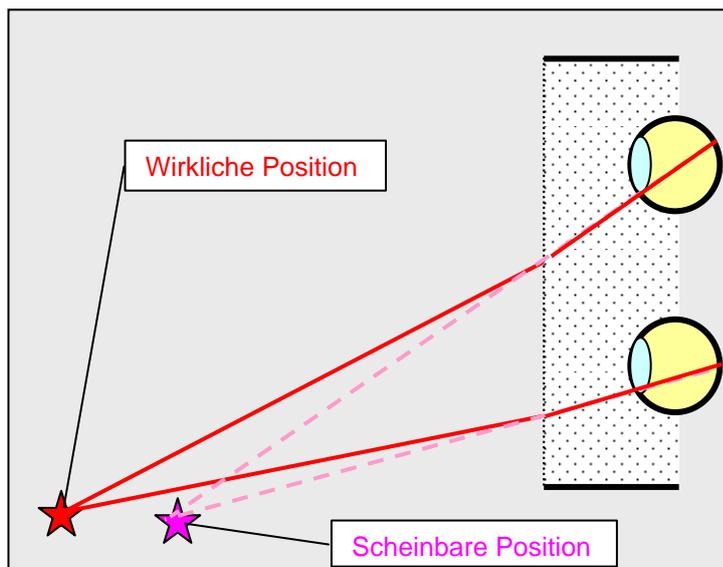
Der geänderte Brechungsindex entspricht einer **Weitsichtigkeit** von etwa **+ 45 Dioptrien!**

**Weg der Lichtstrahlen im Auge unter Wasser, korrigiert mit Maske**

Durch die ebene Glasscheibe der Taucherbrille wird die Sehschärfe korrigiert.



Der Bildwinkel wird verkleinert, dies wird aber vom Auge nicht festgestellt. Das scheinbare Bild ist etwa 1/3 zu groß.



Unterschiedliche Brechungswinkel am Maskenglas führen zu einer falschen Abstandsermittlung durch das Gehirn.

## 1.6.2. Farben und Lichtstärke (Helligkeit) unter Wasser

In das Wasser **einfallendes Licht** (Sonnenlicht, diffuses Himmelslicht) wird

a. **gestreut**

und b. **absorbiert** (in andere Energieform überführt),

wobei beide Vorgänge von der **Wellenlänge abhängig** sind.

Die **Lichtintensität nimmt dabei exponentiell** (Lambert-Beersches Gesetz) **mit der Tiefe**

**ab**. Gleichzeitig verengt sich das Spektrum des Lichts.

Tabelle I/ 3

Wellenlänge in nm (in Luft) entspr. Farbe	400 violett	450 blau	500 blau	550 grün	600 gelb	650 orange	700 rot
Vertikale Abschwächung (Atte- nuation) auf die Hälfte nach Me- tern (bei klarem Wasser)	8,66	17,33	18,23	14,7	3,53	2,22	1,18
davon verursacht durch Streuung %	45	56	39	21,3	3,6	1,6	0,7
durch Absorption %	55	44	61	78,7	96,4	99,3	99,3

(nach O. F. Ehm, 1984)

Rotes, langwelliges Licht

blaues Licht

d.h.

wird am meisten verschluckt,

wird am wenigsten verschluckt.

**Wasser wirkt wie ein Blaufilter.**

→ **Rote Gegenstände (z.B. Blut) erscheinen** in ca. 15 m Wassertiefe **schwarzgrau**, falls kein Kunstlicht benutzt wird.

(Rot wird von einigen Fischen deshalb als Tarnfarbe genutzt!)

Schwebeteilchen (z.B. Plankton) und gelöste Stoffe (z.B. Humussäure, „Gelbstoffe“) verkürzen o.g. Wegstrecken noch weiter (ebenfalls abhängig von der Wellenlänge).

Die Menge an Schwebeteilchen und gelösten Stoffen ist abhängig von der Jahreszeit und dem Gewässer.

Die Energie, die ein Lichtstrahl an der Oberfläche hatte, wird in folgenden Tiefen auf 1/16 vermindert (A. Stibbe, 1983):

blau	87 m
Gesamtlicht	46 m
gelb	31 m
rot	9 m

Von wesentlicher Bedeutung für die Lichtstärke unter Wasser sind auch der Einfallswinkel des Lichtes an der Oberfläche und die Oberflächenbeschaffenheit des Wassers (glatte Fläche, wellige Fläche, Schaumbildung) (Reflexionsverlust in unseren Breiten 3% bis 40%) und die Beschaffenheit des Grundes (desto heller, umso mehr Licht wird reflektiert).

Bei größeren Wassertiefen erscheint reines Wasser blau und chlorophyllreiches Wasser grün.

### 1.6.3. Dunkelheitsgewöhnung

Das Auge benötigt einige Zeit (ca. 10 Minuten) zur Anpassung an große Helligkeitsschwankungen. Vollständige Anpassung nach 30 Minuten.

Maßnahme: 30 Minuten vor dem Tauchen eine rote Scheibe vor den Augen tragen.

Adaption erklärt das Gefühl, es werde nach längerer Tauchzeit heller.

Bei größerer Dunkelheit Umschaltung auf Schwarzweiß = Hell-Dunkel-Sehen.

## 1.7. Akustik (Hören unter Wasser)

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  in Flüssigkeiten beträgt:

$$c \approx \sqrt{\frac{1}{K}}$$

wobei  $K$  = adiabatische Kompressibilität.  
 $K$  ist eine Funktion von Temperatur, Salzgehalt und Druck.

Wasser ist ein besserer Schalleiter als Luft, daher kann sich der Schall im Wasser weiter und schneller als in Luft ausbreiten, wobei niedrigfrequente Schallwellen eine höhere **Reichweite** als hochfrequente Wellen haben.

**Die Schallgeschwindigkeit ist im Wasser  
ungefähr 4,5 mal größer als in Luft!**

Tabelle I/ 4

<b>Schallgeschwindigkeit</b> in Abhängigkeit vom Medium	
Luft	333 m s <sup>-1</sup>
Reines Wasser	1440 m s <sup>-1</sup>
Salzwasser (35 PSU, 14 °C)	1500 m s <sup>-1</sup>
Salzwasser (35 PSU, 0 °C, 0 dbar Wasserdruck)	1449,3 m s <sup>-1</sup>
Salzwasser (35 PSU, 30 °C, 0 dbar Wasserdruck )	1545,8 m s <sup>-1</sup>
Salzwasser (35 PSU, 0 °C, 1000 dbar Wasserdruck)	1465,8 m s <sup>-1</sup>
Salzwasser (35 PSU, 30 °C, 1000 dbar Wasserdruck)	1562,5 m s <sup>-1</sup>

Konsequenzen:

**Die Richtungsortung einer Schallquelle ist unter Wasser kaum möglich.**



Der Schall einer entfernten Schallquelle benötigt unterschiedliche Zeiten bis er beide Ohren erreicht hat (unterschiedliche Strecken). Die Zeitdifferenz  $\Delta t$  wird im Gehirn verarbeitet und als Information über die Richtung der Schallquelle ausgewertet.

Im Wasser ist  $\Delta t \approx 4,5$ mal kleiner als in Luft! → Die Zeitdifferenz kann kaum noch zur Richtungsortung verarbeitet werden.

**→ Gefahr: Sich nähernde Motorboote können aufgrund der fehlender Richtungsordnung den Tauchern gefährlich werden.**

*Hinweis: Neopren (Kopfhauben) filtern Schall  $> 1000$  Hz.*

Militärische Schiffe haben Sonargeräte (Ultraschall hoher Intensität), Tauchen in der Nähe solcher Schiffe ist lebensgefährlich.

Vorsicht auch bei UW-Explosionen (z.B. Sedimentforschung), im Wasser gefährlicher, Explosionsparameter genau berechnen!

## 1.8. Temperatur-Schichtung in Süßwasserseen und biologische Produktion

### Winter: Stagnation

Bei Ausbildung einer Eisdecke hat der Wind keine Bedeutung mehr für die Zirkulation im Gewässer.

Die Wassertemperatur nahe der Oberfläche liegt bei 0 °C (Eisbildung) und nimmt mit der Tiefe bis auf 4 °C (größte Dichte des Wassers) zu.

Aufgrund der geringen Sonnenstrahlung ist die biologische Produktion unwesentlich.

### Frühjahr: Vollzirkulation

Durch die verstärkte Sonnenstrahlung erwärmt sich das Wasser auf 4 °C, Sprungschichten werden aufgelöst. Der Wind kann das Wasser leicht durchmischen.

Nach einer starken Frühjahrsblüte (geringe Sichtweiten) kommt es nach Aufzehrung der Nährstoffe zu einer deutlichen Abnahme der biologischen Produktion. Die Sichtweiten bessern sich drastisch.

### Sommer: Stagnation

Die Sonne erwärmt das Wasser weiter (d.h. es wird spezifisch leichter). Es kommt zur Ausbildung kräftiger Sprungschichten. Die schwachen Winde tragen kaum zu einer Vermischung bei.

### Herbst: Vollzirkulation

Herbststürme und Abkühlung (Abbau der Sprungschichten) resultieren in einer Durchmischung bis in größere Tiefen.

Die biologische Produktion ist aufgrund der Nährstoffeinträge erhöht (Herbstblüte)

Anmerkung: In eutrophen Seen ist die Produktion ganzjährig nahe der Oberfläche sehr stark. Darunter sind die Sichtweiten meist gut.

## 1.9. Wärmetransport, Kälteschutz

Temperatur eines Körpers = Wärmeenergie (Bewegung von Molekülen)

**Wärmetransport** erfolgt durch:

a. Wärmeleitung (Konduktion)

Übertragung in einem Material, wobei Wasser besser leitet als Luft.

*(Ungeschützter Taucher verliert einen großen Teil seiner Wärme durch direkte Wärmeleitung.)*

b. Wärmeströmung (Konvektion)

Übertragung durch bewegte Flüssigkeiten oder Gase

*(In einem Nasstauchanzug steigt warmes Wasser nach oben und kaltes Wasser strömt nach → Wärmeverlust.)*

c. Wärmestrahlung erfolgt durch elektromagnetische Wellen

(Beispiel: Sonnenstrahlung). *(Spielt für Taucher unter Wasser keine Rolle.)*

Stoffe, die Luft oder Gase enthalten (z.B. Zellkautschuk [Neopren<sup>®</sup>]), wirken als

**Wärmeisolatoren.**

*(Bei Gasen ist He bester Wärmeleiter.)*

Nasstauchanzüge werden in der Tiefe zusammengedrückt und verlieren einen Teil ihrer Wärmedämmungsqualität.

Beispiel 1

Zellkautschuk-Anzug, 7 mm dick

Auf die eingeschlossenen Gasblasen wirkt der Wasserdruck. Die Größe der Gasblasen ändert sich entsprechend dem Gesetz von Boyle-Mariotte.

Damit ändert sich die Wärmequalität, wie folgt:

in 10 m Tiefe auf 1/2,

in 20 m Tiefe auf 1/3 und

in 50 m Tiefe auf 1/6.

*(nach A. Stibbe, 1983)*

Beispiel 2

Ein nylongefütteter Neoprenanzug von 6,3 mm Stärke verliert

in 10 m Tiefe 35 % seines Volumens und

in 30 m Tiefe 50 % seines Volumens.

Dabei verringert sich seine Isolationswirkung

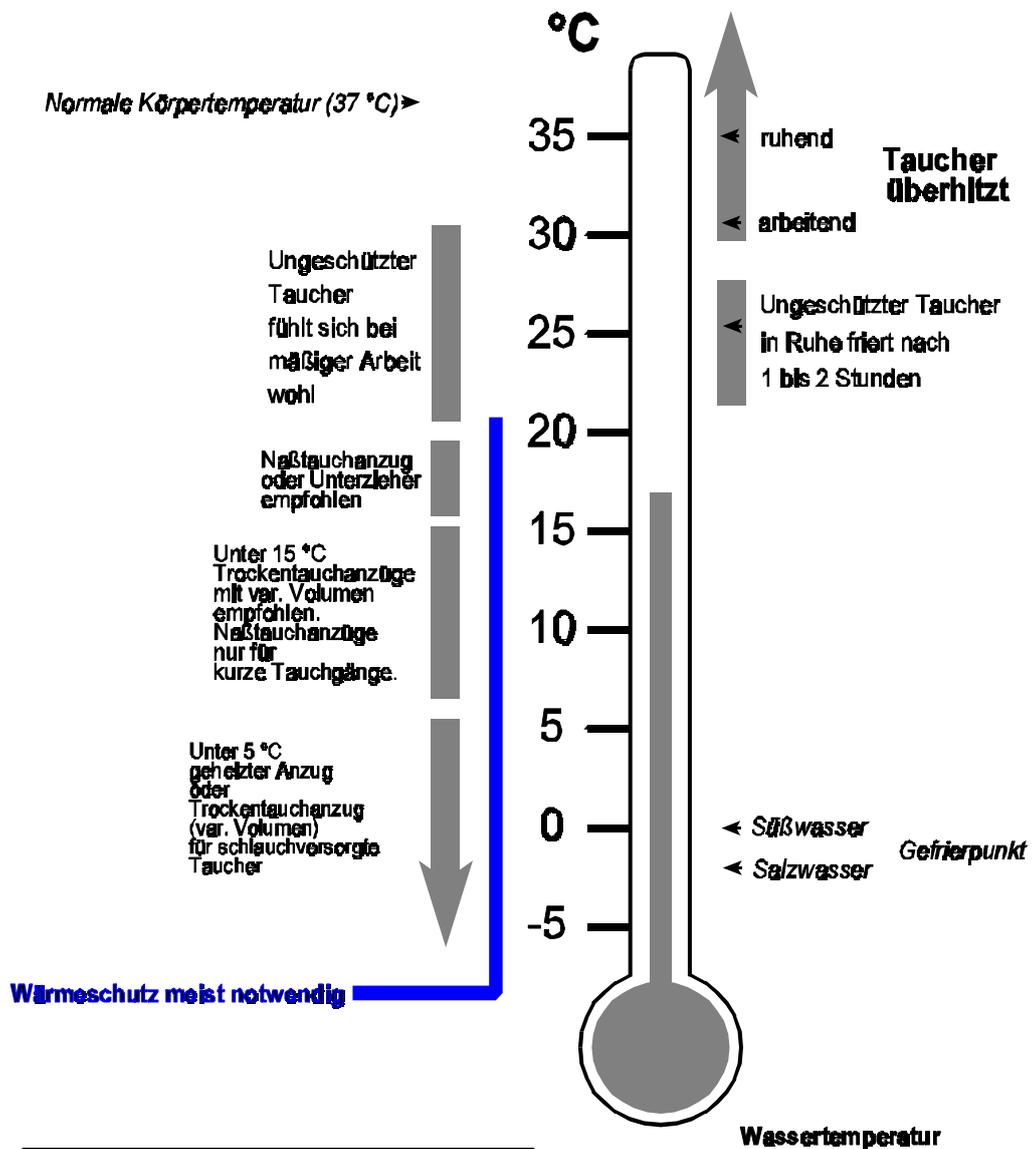
in 20 m Tiefe um 50 % und

in 30 m Tiefe um 63 %.

*(nach O. F. Ehm, 1991)*

Bei Einsätzen von Forschungstauchern in deutschen Gewässern ist die Verwendung von Trockentauchanzügen außer in den Sommermonaten (in geringen Tauchtiefen) in der Regel notwendig!

# Kälteschutzmaßnahmen im Wasser



**Hinweis:**  
Die individuelle Fitness, das Körperfett und die aktuelle Gewöhnung an das kalte Wasser bestimmen letztendlich wie lange der/die TaucherIN unterschiedlichen und extremen Temperaturen widerstehen kann.

nach:  
U.S. Navy Diving Manual Vol. 1  
Ausgabe: Rev. 3, Februar 1996

## 1.10. Diffusion

### Chemie

Gegenseitiges Durchdringen [von Gasen oder Flüssigkeiten]

### Physik

Zerstreuung

lat.;

„das Auseinanderfließen“

lat.;

dis- = auseinander,

fundo = ausgießen, ausbreiten

### Konzentrationsunterschiede bei

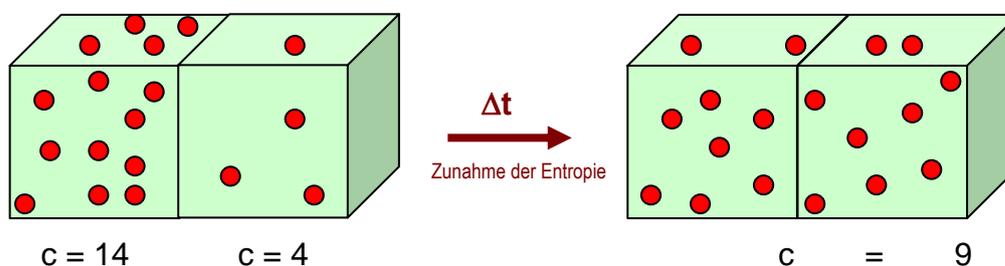
- Gasförmigen Stoffe
- Gelösten Stoffen
- Energie (*Wärme*)

→ **Ausgleich** auch ohne äußere Einwirkung

Dazu bewegen sich die Teilchen im statistischen Mittel durch die Brownsche Molekularbewegung (*zufällig und ungerichtet*) temperaturabhängig von der höheren → niedrigen Konzentration.

Bewegung der Teilchen erfolgt frei oder bei der Transfusion durch eine poröse Wand oder Membran hindurch.

Ist die Membran semipermeabel (*halbdurchlässig*) → **Osmose**.



### Beispiel aus der Tauchmedizin

#### Diffusionsbasierter Gasaustausch:

- **Äußere Atmung:** Übergang von Atemgasbestandteilen zwischen den Alveolen und den Blutgefäßen
- **Innere Atmung (Zellatmung):** Übergang von Atemgasbestandteilen zwischen dem Gewebe und dem Blut.

### 1.10.1. Ficksche Diffusionsgesetze

Adolf Fick (3.09.1829 – 21.08.1901), *deutscher Arzt (Pathologe) und Physiologe*  
Er veröffentlichte 1855 in "Poggendorfs Annalen der Physik" eine Arbeit mit dem Titel: "Über Diffusion".

#### 1. Ficksches Gesetz

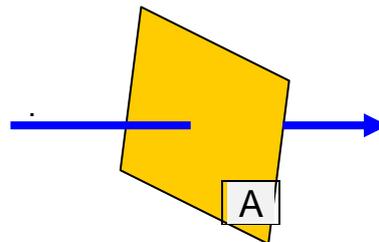
"Je höher der Konzentrationsgradient an einer Stelle, desto höher ist der Teilchenstrom an dieser Stelle."

$\frac{\partial C}{\partial x}$  Konzentrationsgradient

$C$  := Konzentration (oder auch *Anzahl von Teilchen*)  
 $K$  := Diffusionskoeffizient (*Diffusionskonstante*) des betreffenden Stoffes  
 $\partial x$  := Diffusionsstrecke  
 $A$  := durchströmte Fläche (*Referenzfläche*)

$J$  := Netto-Teilchenstrom (*Diffusionsstrom*)

$$J = -K \times A \times \frac{\partial C}{\partial x}$$



Das Minuszeichen weist daraufhin, dass der Netto-Teilchenstrom in Richtung abnehmender Konzentration erfolgt.

$J/A$  := Teilchenstromdichte (engl. *flux*)

Beispiel aus der Tauchmedizin  
 $C = \text{gelöstes Inertgas (N}_2\text{)}$ ,  $A = \text{Oberfläche der Alveole}$

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung:  $\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x}$  ergibt sich bei konstantem  $K$

die **Diffusionsgleichung (2. Ficksches Gesetz)**:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Diffusionsgeschwindigkeit  
 (zeitliche Änderung der Konzentration)

#### 2. Ficksches Gesetz (Diffusionsgleichung)

"Die zeitliche Änderung der Konzentration an einer Stelle ist proportional zur 2. Ableitung der Konzentration nach dem Ort."