Deutsches Tauchsportabzeichen ***

Die Folien sind eng an die DTSA***-Fragen angelegt. Es gibt daher auch Überschneidungen mit den DTSA*- und DTSA**-Folien zum gleichen Thema. Dies ist aber gewollt.

Allgemeines Gasgesetz - ideales Gas

Die allgemeine Gasgleichung beschreibt die Abhängigkeiten der Zustandsgrößen des idealen Gases voneinander.

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

p = Druck
V = Volumen
n = Stoffmenge
R = all. Gaskonstante
T = Temperatur

Für *n = konstant* gilt:

$$\frac{p \times V}{T} = \text{konstant}$$

Allgemeines Gasgesetz - ideales Gas

Spezialfälle

Gesetz von Boyle-Mariotte:

$$P \times V = \text{konstant} \quad \text{oder} \quad P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Bei *konstanter Temperatur* steht für eine gegebene Gasmenge der Druck im umgekehrten Verhältnis zum Volumen

Gesetz von Gay-Lussac:

$$V / T = \text{konstant}$$

Bei *konstantem Druck* steigt oder fällt die Temperatur einer gegebenen Gasmenge im gleichen Verhältnis wie das Volumen

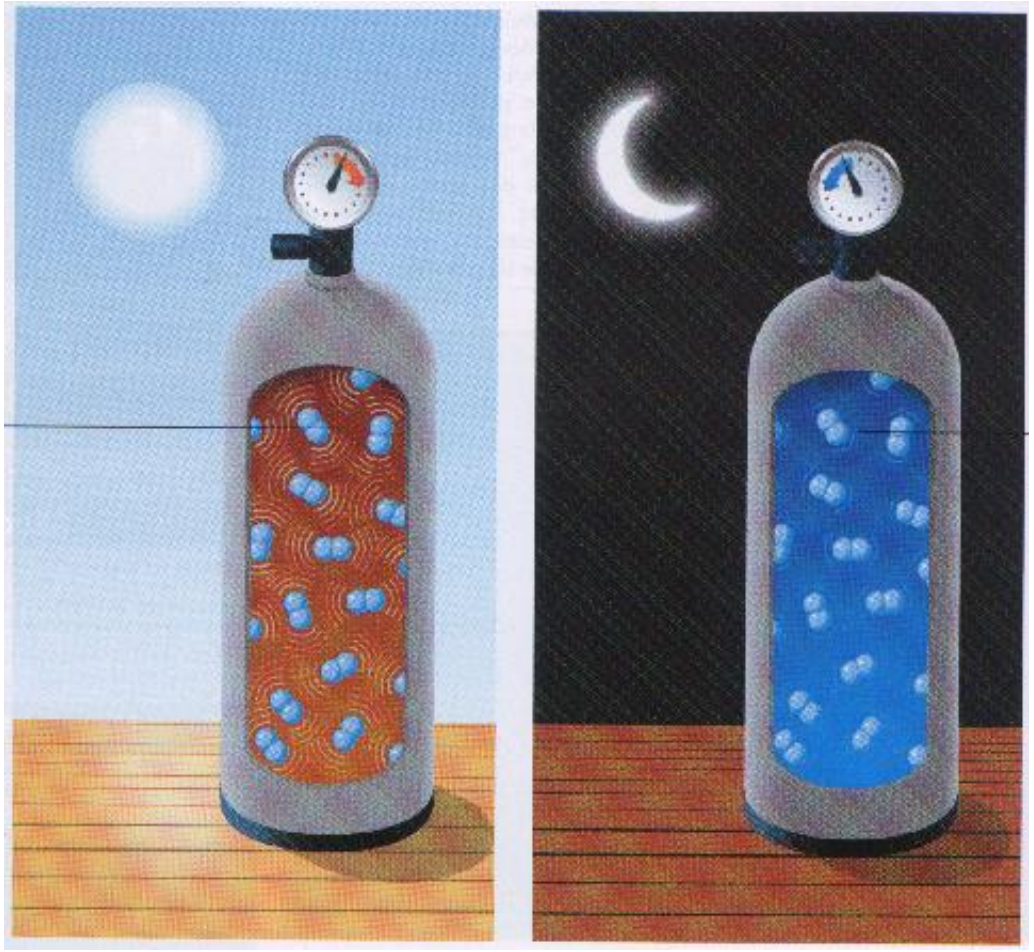
Gesetz von Amontons (2. Gesetz von Gay-Lussac):

$$p / T = \text{konstant}$$

Bei *konstantem Volumen* steigt oder fällt der Druck einer gegebenen Gasmenge im gleichen Verhältnis wie die absolute Temperatur

Amontons (Gay – Lussac)

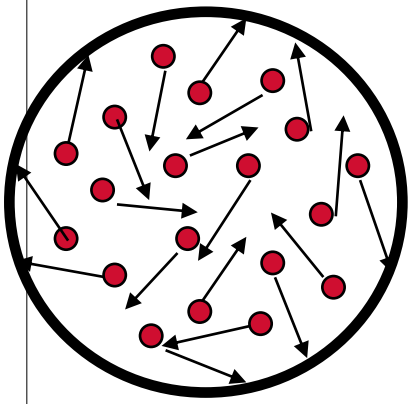
Steigt die Temperatur in einem geschlossenen, mit Gas gefüllten Behältnis, **steigt auch der Druck**, ohne dass neue Gasmoleküle hinzu kommen. Dies ist die Folge der schnelleren Molekularbewegung, denn je mehr sich die Gasteilchen bewegen, desto häufiger stoßen sie an die Wände und üben dabei einen größeren Druck aus.

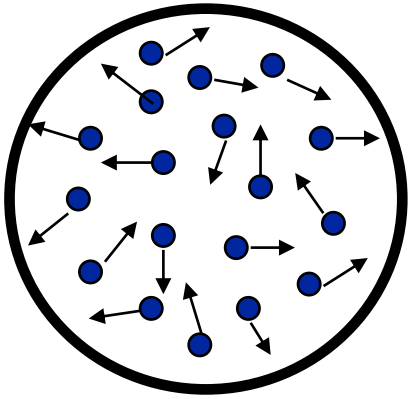


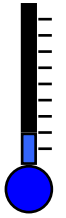
Umgekehrt **fällt der Druck** in der Flasche, wenn **die Temperatur sinkt**, ohne dass nun Gasteilchen entnommen wurden. Die Molekularbewegung ist nun langsamer, und die Teilchen stoßen weniger häufig an die Wand. Daraus erklärt sich auch der geringere Druck in der Tauchflasche, wenn sie sich durch das Eintauchen in Wasser abkühlt.

Amontons (Gay – Lussac)

Bei konstantem Volumen steigt oder fällt der Druck einer gegebenen Gasmenge im gleichen Verhältnis wie die absolute Temperatur







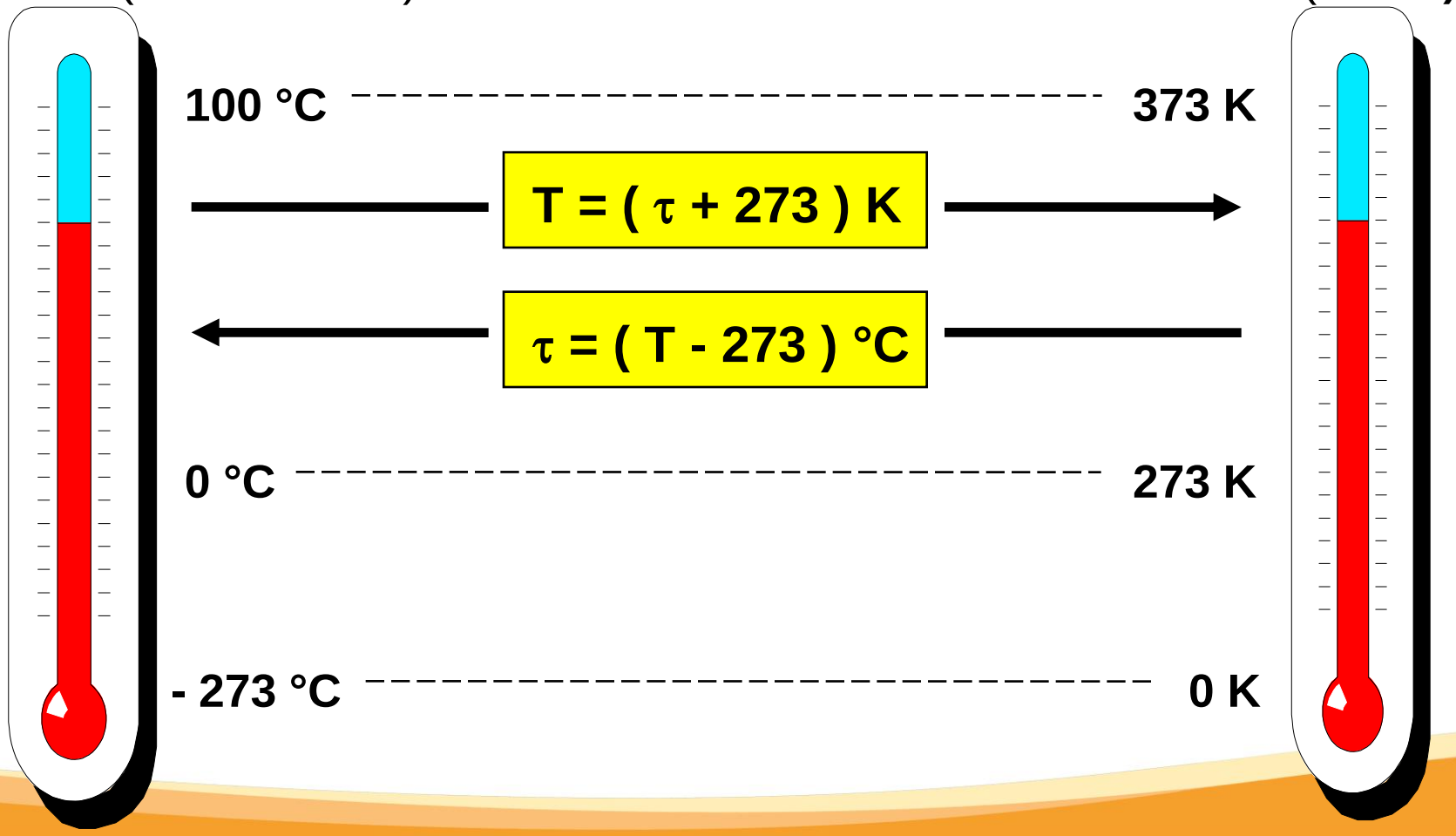
p / T = konstant

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Amontons (Gay – Lussac)

Temperatur
in °C (Grad Celsius)

absolute Temperatur
in K (Kelvin)



Archimedes

Die Gewichtskraft (F) eines Tauchers:

F = **Masse** x Erdbeschleunigung

z.B.:

Konstante

F = **100 kg** x 9,81 m/s^2

F = 981 N (kg x m/s^2)

Archimedes

Beim Eintauchen ins Wasser wirkt die

Gewichtskraft der verdrängten Wassermenge

der

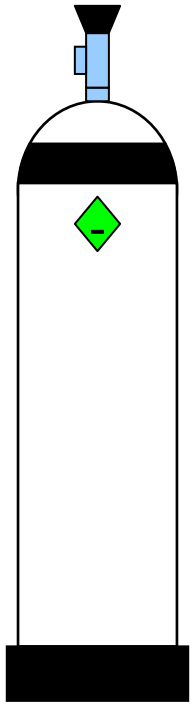
Gewichtskraft des Tauchers

entgegen.

Ein Körper, der in eine Flüssigkeit eintaucht, verliert scheinbar soviel an Gewicht, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeit wiegt!

Boyle – Mariotte und Archimedes

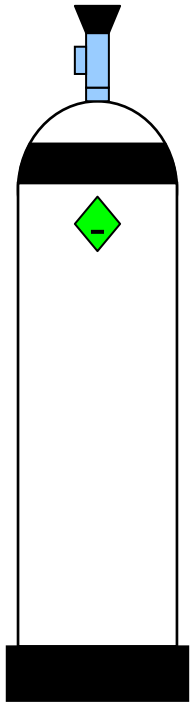
Auftrieb bzw. Abtrieb von vollem und leerem DTG



- **Gewichtskraft des DTG (10 Liter)**
- **Gewichtskraft von Luft (230 bar)**
- **Gewichtskraft von Luft (50 bar)**

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auf- und Abtrieb eines DTG

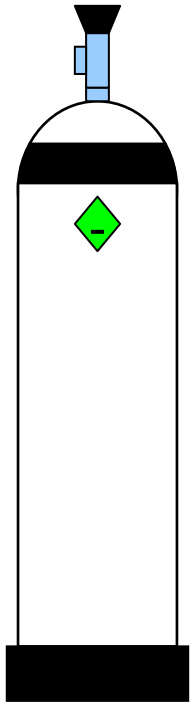


$$F_{Gesamt(DTG)} = F_{Abtrieb(DTG)} - F_{Auftrieb(DTG)}$$

- $F_{Abtrieb\ (DTG)} = Masse_{DTG} \times g$ [Erdbeschleunigung]
- $F_{Auftrieb(DTG)} = V_{Gesamtvolumen} \times \rho_{Wasser} \times g$ [Erdbeschleunigung]

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auf- und Abtrieb eines DTG



$F_{Abtrieb\ (DTG)} = Masse_{DTG} \times g$ [Erdbeschleunigung]

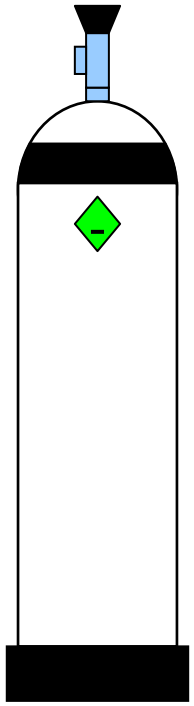
Masse einer 10l Stahlflasche = 9,9 kg
Erdbeschleunigung g = 9,81 m/s²

$F_{Abtrieb(DTG)} = 9{,}9\ kg \times 9{,}81\ m/s^2 = 97{,}2\ kg \times m/s^2$

97,2 kg x m/s² = 97,2 N

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auf- und Abtrieb eines DTG



$$F_{Auftrieb} = V_{Gesamtvolumen} \times \rho_{Wasser} \times g \text{ [Erdbeschleunigung]}$$

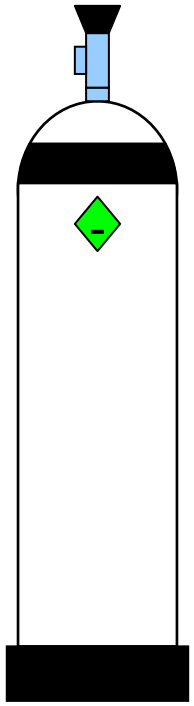
Dichte (Wasser):	$\rho = 1\ kg/dm^3$
Erdbeschleunigung:	$g = 9{,}81\ m/s^2$

$$V_{Gesamtvolumen} = V_{Stahl} + V_{Innenvolumen}$$

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auf- und Abtrieb eines DTG

Volumen des Stahls



$$V_{Stahl} = \frac{9{,}9 kg}{7{,}9 \frac{kg}{dm^3}} = 1{,}25 dm^3$$

$$V_{Stahl} = \frac{m_{Stahl}}{\rho_{Stahl}} \frac{[kg]}{[\frac{kg}{dm^3}]}$$

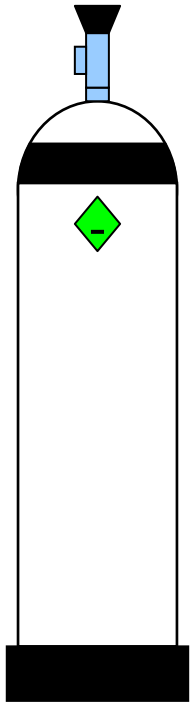
Masse des Stahl-DTG: 9,9 [kg]

Dichte$_{Stahl}$: ρ = 7,9 [kg/dm³]

V_{Stahl} = 1,25 dm³ = 1,25 Liter

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auf- und Abtrieb eines DTG



Gesamtvolumen des 10 l DTG

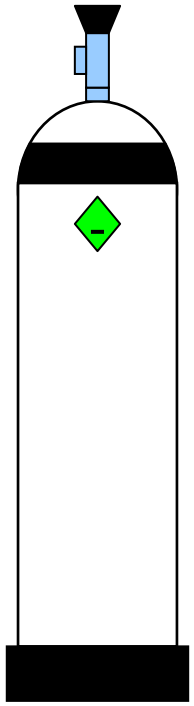
$$V_{Gesamtvolumen} = V_{Stahl} + V_{Innenvolumen}$$

$$V_{Gesamtvolumen} = 1{,}25\ dm^3 + 10\ dm^3 = 11{,}25\ dm^3$$

1 dm^3 = 1 Liter

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auf- und Abtrieb eines DTG



$$F_{Auftrieb} = V_{Gesamtvolumen} \times \rho_{Wasser} \times g \text{ [Erdbeschleunigung]}$$

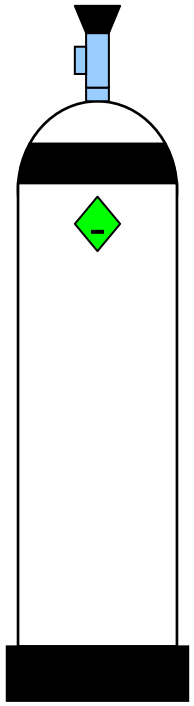
Gesamtvolumen	11,25 dm³ [Liter]
Dichte (Wasser):	ρ = 1 kg/dm³
Erdbeschleunigung	g = 9,81 m/s²

$$\mathbf{F_{Auftrieb}} = 11{,}25\ dm^3 \times 1 kg/dm^3 \times 9{,}81 m/s^2 = \mathbf{\underline{110{,}4\ kg \times m/s^2}}$$

$$110{,}4\ kg \times m/s^2 = 110{,}4\ N$$

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auf- und Abtrieb eines DTG



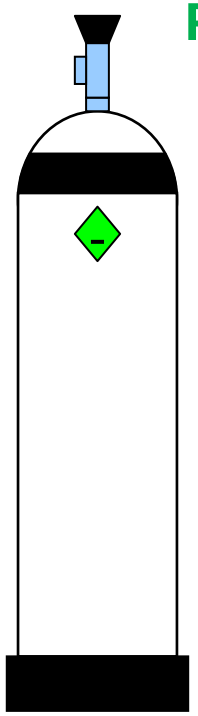
$$F_{Gesamt(DTG)} = F_{Abtrieb(DTG)} - F_{Auftrieb(DTG)}$$

$$F_{Gesamt(DTG)} = 97{,}2\ N - 110{,}4\ N = -13{,}2\ N$$

$$F_{Gesamt(DTG)} = -13{,}2\ N$$

Boyle – Mariotte und Archimedes

Abtrieb des vollen DTG (230 bar)



$F_{Abtrieb\ Luft\ (230bar)} = Volumen_{(230\ bar)} \times Dichte_{Luft} \times g_{[Erdbeschleunigung]}$

Dichte (Luft):	$\rho = 0{,}00123\ kg/dm^3$
Erdbeschleunigung:	$g = 9{,}81\ m/s^2$

$Volumen_{(230\ bar)} = Volumen_{(1\ bar)} \times Druck_{(230\ bar)}$

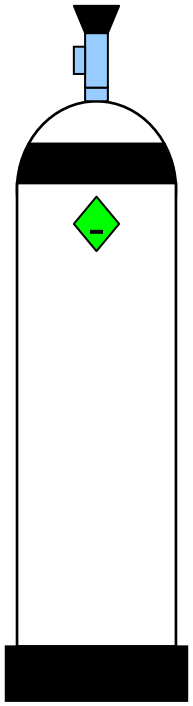
$Volumen_{(230bar)} = 10\ dm^3 / 1bar \times 230\ bar = 2300\ dm^3\ [l]$

$F_{Abtrieb\ Luft\ (230bar)} = 2300\ dm^3 \times 0{,}00123\ kg/dm^3 \times 9{,}81\ m/s^2 =$ **27,75 N**

$F_{Abtrieb\ Luft\ (230bar)} =$ 27,75 N

Boyle – Mariotte und Archimedes

Abtrieb des vollen DTG (230 bar)



$$F_{Abtrieb\ (230bar)} = F_{DTG} + F_{Luft\ (230bar)}$$

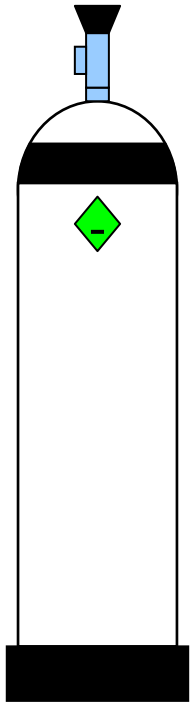
$$F_{Gesamt\ (DTG)} = -13{,}2\ N$$

$$F_{Abtrieb\ Luft\ (230bar)} = 27{,}75\ N$$

$$F_{Abtrieb\ (230bar)} = -13{,}2\ N + 27{,}75\ N = 14{,}55\ N$$

Boyle – Mariotte und Archimedes

Abtrieb des leeren DTG (50 bar)



$F_{Abtrieb\ \ Luft\ (50bar)} = Volumen_{\ (50bar)} \times Dichte_{Luft} \times g_{\ [Erdbeschleunigung]}$

Dichte (Luft):	$\rho = 0{,}00123\ kg/dm^3$
Erdbeschleunigung:	$g = 9{,}81\ m/s^2$

$Volumen_{(50\ bar)} = Volumen_{(1\ bar)} \times Druck_{(50\ bar)}$

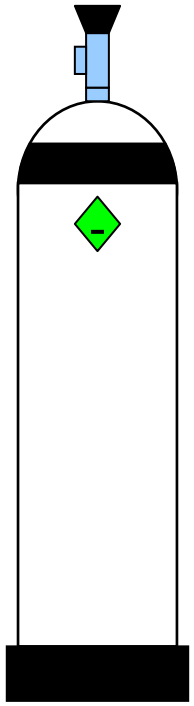
$Volumen_{(50ar)} = 10\ dm^3 / 1bar \times 50\ bar = 500\ dm^3\ [l]$

$F_{Abtrieb\ Luft\ (50bar)} = 500\ dm^3 \times 0{,}00123\ kg/dm^3 \times 9{,}81\ m/s^2 =$ **6,0 N**

$$F_{Abtrieb\ Luft\ (50bar)} = \underline{\underline{6{,}0\ N}}$$

Boyle – Mariotte und Archimedes

Auftrieb des leeren DTG (50 bar)



$$F_{Abtrieb(50bar)} = F_{DTG} + F_{Luft(50bar)}$$

$$F_{Gesamt(DTG)} = -13{,}2\ N$$

$$F_{Abtrieb\ Luft\ (50bar)} = 6{,}0\ N$$

$$F_{Abtrieb\ (50bar)} = -13{,}2\ N + 6{,}0\ N = -7{,}2\ N$$

Reale Gase versus ideale Gase

Warum enthält ein 10 Liter DTG bei 300 bar nicht 3000 Liter?

1. **Gase besitzen ein Eigenvolumen**
   Sie lassen sich deshalb durch Komprimierung nicht beliebig verkleinern, sondern werden irgendwann flüssig.

Bei > 230 Bar, lässt sich die Gasmenge nicht mehr nur mit Boyle- Marriotte erklären

Ein Liter Luft wiegt etwa 1,293 Gramm → 2000 l wiegen 2,586 kg

Reale Gase versus ideale Gase

Warum enthält ein 10 Liter DTG bei 300 bar nicht 3000 Liter ?

2. Gase besitzen Bindungskräfte (Van der Waals Kräfte)

- recht schwache Kräfte zwischen Atomen und Molekülen
- Wechselwirkung zwischen zwei Dipolen
- Wechselwirkung zwischen einem Dipol und einem polarisierbaren Molekül

➢ Die van der Waals Kräfte sind aber dafür verantwortlich, dass unpolare Verbindungen wie Wasserstoff, Methan, Hexan überhaupt flüssig oder sogar fest werden können.

$$p \times V = m \times R_{S(\ Luft\ )} \times T$$

m = Stoffmenge
R_S = spezifische Gaskonstante

Joule Thompson Effekt

Warum kühlt sich ein DTG beim Abströmen ab und erwärmen sich beim Füllen?

Wechselwirkung der Gasteilchen (Joule-Thomson-Effekt)

- Bei normaler Temperatur ziehen sich die Teilchen an. Beim Komprimieren wird Energie frei, die in die Umgebung abgegeben wird.
  → ***Das Gas erwärmt sich***

- Bei der Vergrößerung des Teilchenabstandes muss ***Arbeit gegen diese Anziehung*** geleistet werden. Die Energie dazu kommt aus der *kinetischen Energie der Gasteilchen*.
  → ***Das Gas kühlt ab.***

Joule Thompson Effekt

Bei ***idealen Gasen*** gibt es diese Wechselwirkungen zwischen den Teilchen nicht, d. h. es tritt ***kein Joule-Thomson-Effekt*** auf.

In der Praxis:

- Das im Kühlschrank befindliche Kältemittel wird durch Kompression verdichtet, erwärmt sich dadurch und gibt die so entstehende Wärme an die Umgebung ab.
- Das Gas als Kältemittel selbst wird deshalb kühler, weil es durch eine lange Kühlschlange geleitet wird, die am Ende plötzlich weiter wird, dann kühlt es durch die schlagartige Ausdehnung ab. Deshalb kühlt ein Kühlschrank.

Dalton: Partialdrücke

Partialdrücke im Atemgas:

Das Verhältnis der Gase im Atemgas bleibt bei Druckerhöhung gleich. Sauerstoff (z.B. 21 % bei Pressluft), Stickstoff (z.B. 78 % bei Pressluft) und andere Gase (z.B. 1 % bei Pressluft) behalten ihren prozentualen Anteil, egal ob der Druck verdoppelt (Mitte) oder verdreifacht (rechts) wird. Nur der absolute Wert der Partialdrücke nimmt entsprechend zu.

Dalton

Die Summe aller Teildrücke eines Gasgemisches ergibt den Gesamtdruck $P_{ges} = p_1 + p_2 + ... + p_n$

Partial- oder Teildrücke bei Druckluft

	Anteil	1 bar	2 bar	3 bar	4 bar
Sauerstoff	21 %	0,21 bar	0,42 bar	0,63 bar	0,84 bar
Stickstoff	78 %	0,78 bar	1,56 bar	2,34 bar	**3,12** bar
Rest	~1 %	0,01 bar	0,02 bar	0,03 bar	0,04 bar

Dalton

Die Summe aller Teildrücke eines Gasgemisches ergibt den Gesamtdruck $P_{ges} = p_1 + p_2 + ... + p_n$

Partial- oder Teildrücke bei einem Nitrox 32 Gemisch

	Anteil	1 bar	2 bar	3 bar	4 bar
Sauerstoff	32 %	0,32 bar	0,64 bar	0,96 bar	1,28 bar
Stickstoff	67 %	0,67 bar	1,34 bar	2,01 bar	**2,68** bar
Rest	~1 %	0,01 bar	0,02 bar	0,03 bar	0,04 bar

Dalton

Kontrollfragen:

- Sauerstoff wird ab einem Partialdruck von 1,4 bar (abhängig von Umgebungstemperatur und Anstrengung) toxisch.
  Welches ist die maximale Einsatztiefe für Pressluft?

- Bei Verwendung von Druckluft kann ab 30 m Wassertiefe, muss ab 40 m Wassertiefe mit Tiefenrausch (Stickstoff-Vergiftung) gerechnet werden.
  Wie hoch ist in diesen Tiefen der N_2-Partialdruck bei Verwendung von Druckluft ?

Das Gesetz von Henry

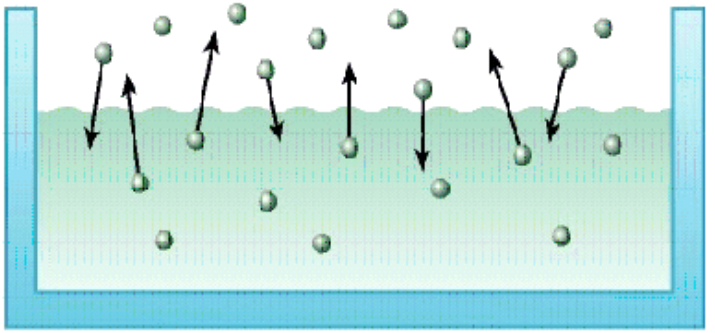
Eindringen (Diffusion) von Gasmolekülen in eine Flüssigkeit

Henry - Gesetz:

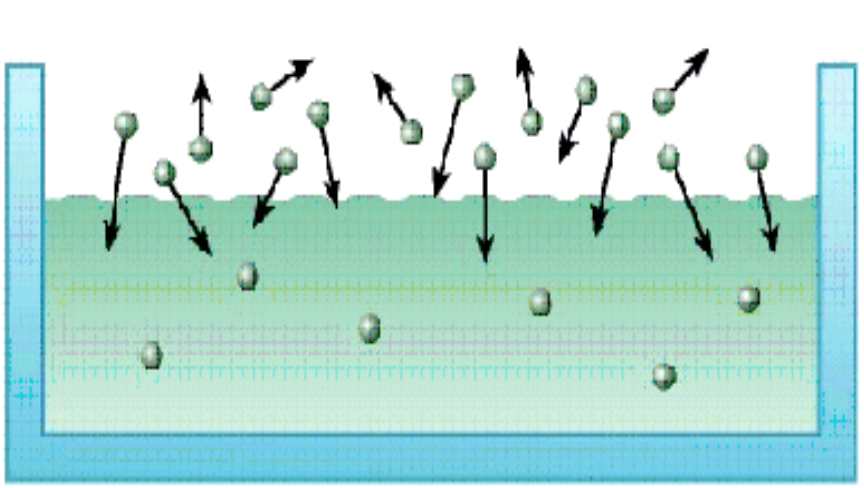
Bei konstanter Temperatur und ausreichender Zeit steht die in einer Flüssigkeit gelöste Gasmenge im direkten Verhältnis zum Druck des über der Flüssigkeit stehenden Gases.

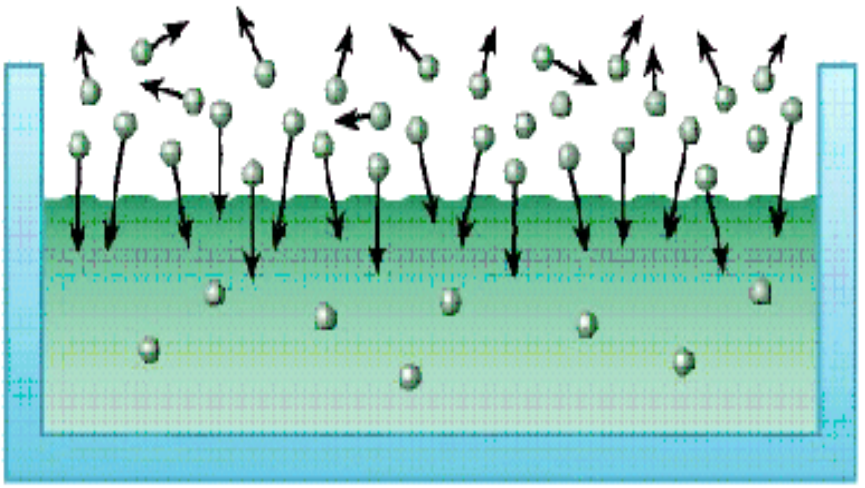
Prinzip der Sättigung:

- Es gehen genau so viele Gasteilchen in der Flüssigkeit in Lösung, wie wieder aus dieser hinaus diffundieren



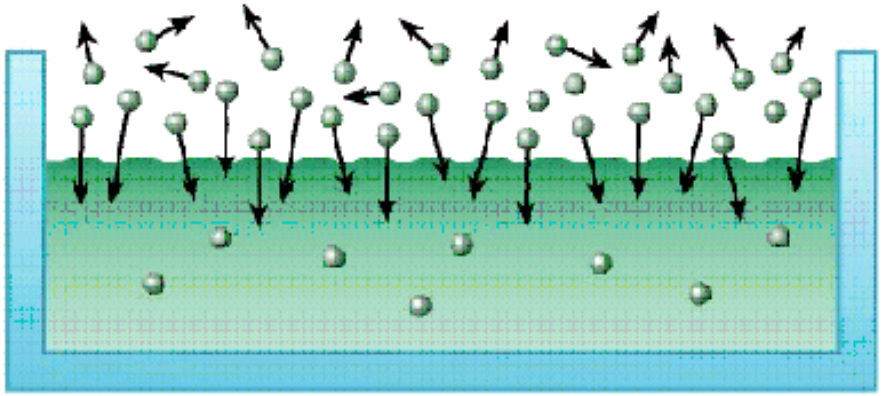
Gesetz von Henry - Druckgradient

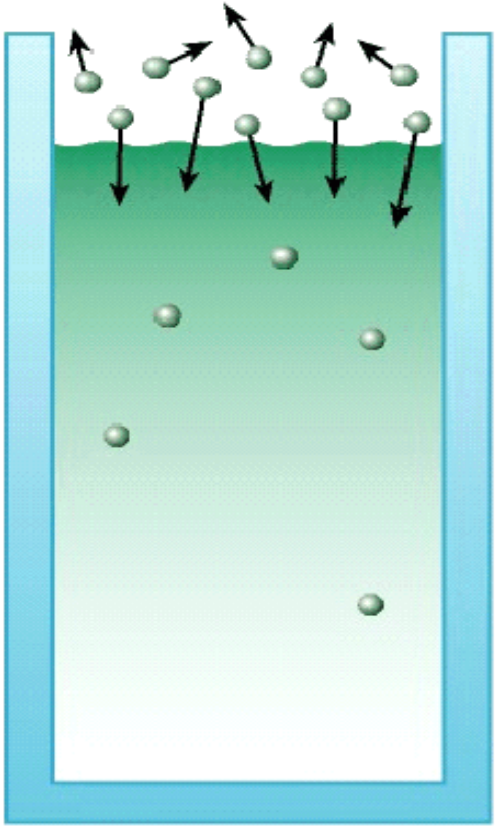




Welche **Menge** an Gasmolekülen (pro Zeiteinheit) aufgenommen werden kann, hängt von der **Differenz zwischen den Teildrücken** des Gases **über der Flüssigkeit** und **in der Flüssigkeit** selbst ab.

Gesetz von Henry - Diffusionsgeschwindigkeit

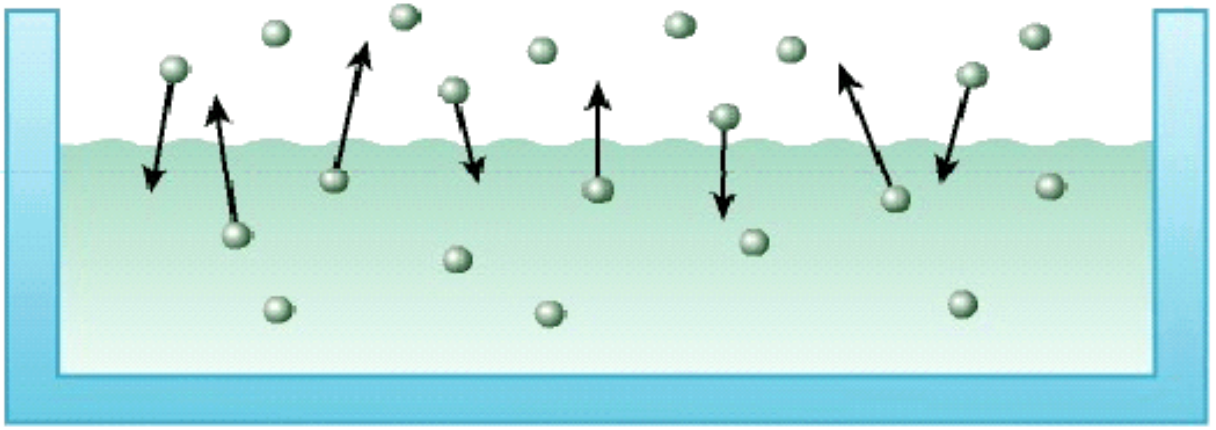




Die **Geschwindigkeit,** mit der die Gasmoleküle in die Flüssigkeit gelangen, hängt ab von:

- der **Größe der Oberfläche**, an der die Diffusion erfolgen kann
- der **Löslichkeit** des Gases in der betreffenden Flüssigkeit

Gesetz von Henry - Die gelöste Gasmenge



Wie viele Gasteilchen sich im **Sättigungs**zustand lösen können hängt ab von:

...dem **Teildruck** des Gases über der Flüssigkeit.
...der **Temperatur** der Flüssigkeit.
...der **Löslichkeit** des Gases in der betreffenden Flüssigkeit.
...der **Flüssigkeitsmenge**.

Gesetz von Henry - Geschwindigkeit und Menge

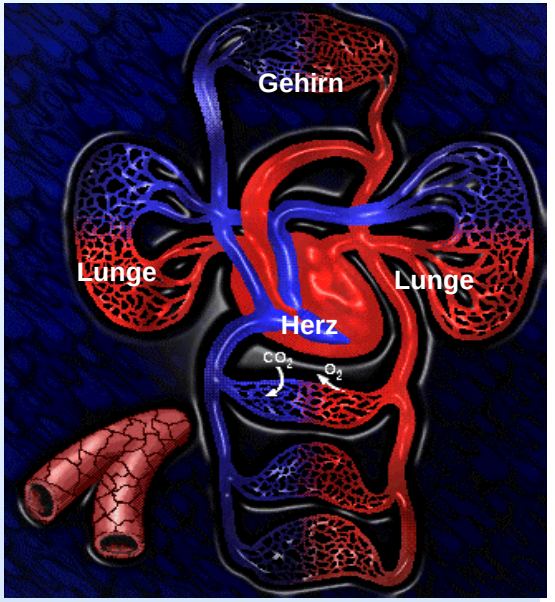
Wie schnell und wie viel Stickstoff ein Taucher bis zur vollständigen Sättigung aufnimmt hängt ab von:

- der Tauchtiefe (Druckgradient)
- der Tauchzeit
- der Körpertemperatur
- der Durchblutung der einzelnen Gewebe
- der körperlichen Aktivität/ Luftverbrauch
- der Gewebeart (Fett- bzw. Wasseranteil)
- der Körpermasse

Gesetz von Henry - Unterschiedliche Gewebe

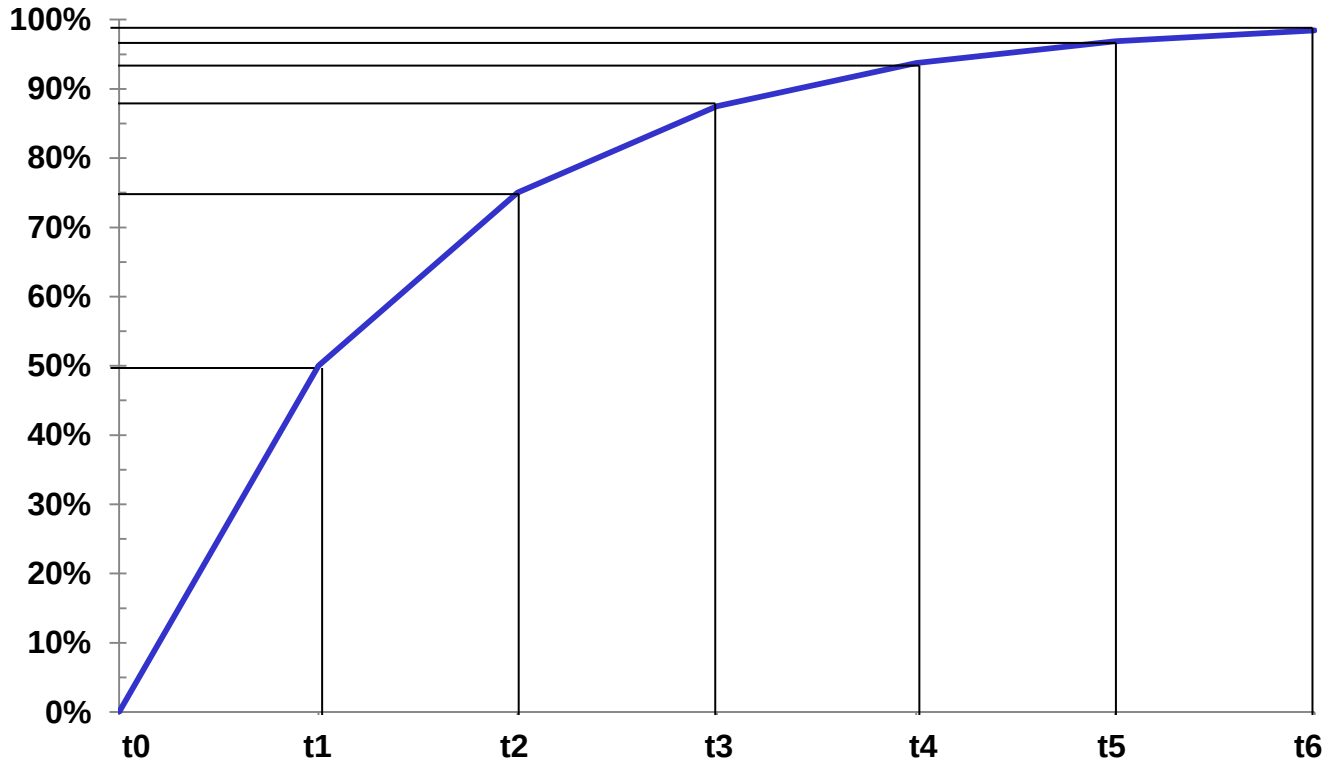
Die Sättigungsgeschwindigkeit der Gewebe hängt im Wesentlichen von ihrer Durchblutung ab.
Die Übergänge zwischen den Kategorien sind fließend.

- schnelle Gewebe
  (z.B. Blut, Lungengewebe und Muskulatur…)
- mittlere Gewebe
  (z.B. innere Organe (Niere), Nervengewebe
  Teile der Haut…)
- langsame Gewebe
  (z.B. Bänder, Sehnen, Knorpel und Knochen…)



Bei der Entwicklung von Dekompressionsmodellen werden bis zu 20 Gewebearten unterschieden.

Aufsättigung von Gewebe

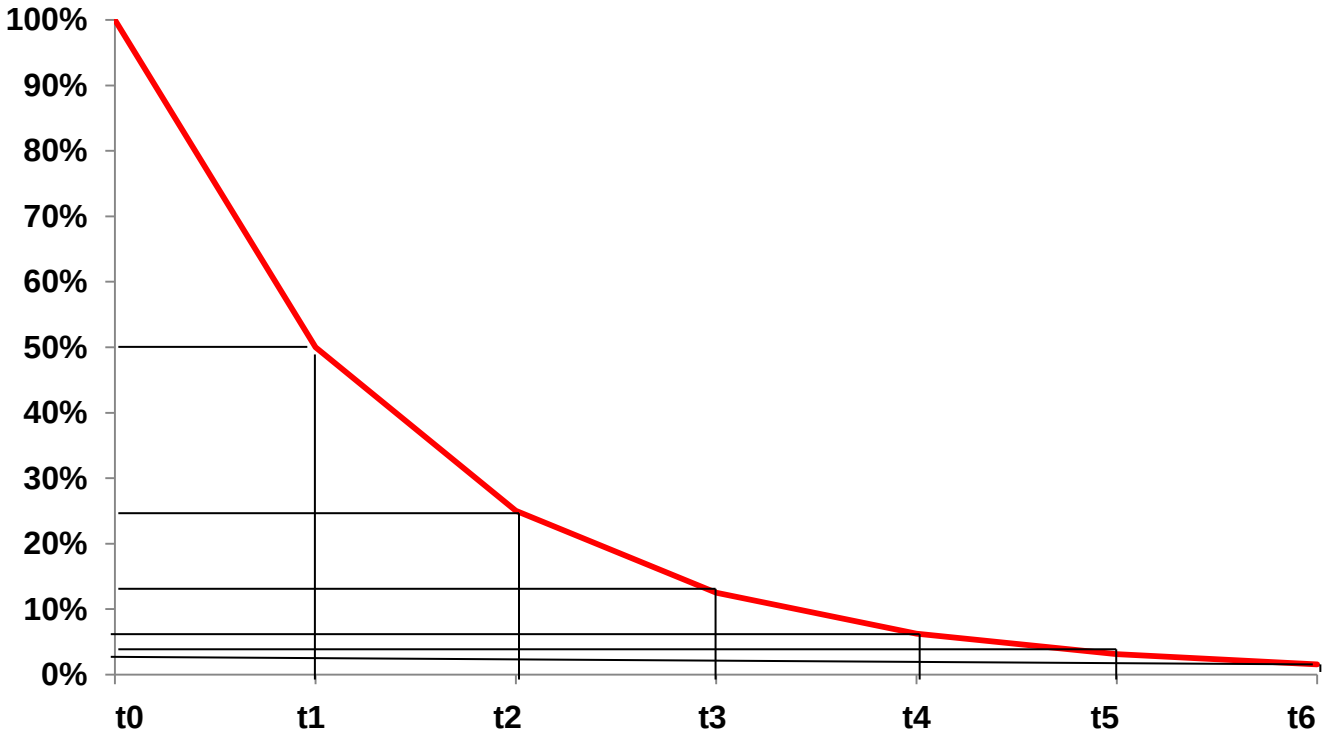


Sättigungsgrad

t0 = 0 %
t1= 50 %
t2 = 75%
t3 = 87,5 %
t4 = 93,75%
t5 = 96,875%
t6 = 98,4375 %

Halbwertzeiten

Entsättigung von Gewebe



Entsättigung

t0 = 100 %
t1= 50 %
t2 = 25%
t3 = 12,5 %
t4 = 6,25%
t5 = 3,125%
t6 = 1,5625 %

Halbwertzeiten