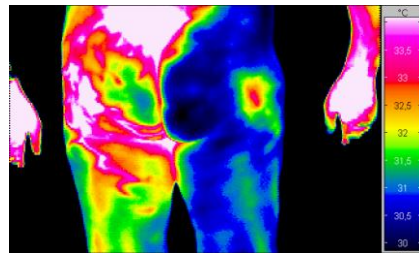
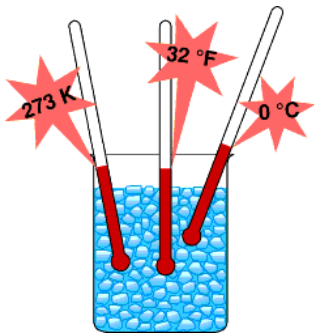


Grundlagen der medizinischen Biophysik

5. Vorlesung 20. 09. 2023.

Ádám Orosz

1. Wärmelehre



1. Innere Energie und Thermische Energie
2. Temperatur und Temperaturskalen
3. Wärme
4. Wärmekapazität und spezifische Wärmekapazität
5. Aggregatzustände
6. Phasenumwandlung und Umwandlungswärme
7. Ideales Gas

2. Hydrostatik

Normal blood pressure is:

Systolic 115 mm Hg
Diastolic 70 mm Hg



1. Gasdruck
2. Luftdruck
3. Partialdruck
4. Dichte
5. Druck
6. Hydrostatischer Druck
7. Blutdruckmessung

Thermodynamik

Wiederholung: Erhaltung der mechanische Energiearten und der Arbeitssatz

$$\sum E_i = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} + E_{\text{el}} = \text{konstant} \quad W = \Delta E_{\text{kin}}$$

Wohin geht die Energie bei einem unelastischen Stoß oder Reibung?

"Erwärmt den Körper" (Temperatur steigt); "Wird in Wärme verwandelt"

$$W = \Delta E_{\text{innere}}$$

Die physikalische Schlüsselgröße des Themas ist die **innere Energie**.

Sie ist verbunden mit:

1. unregelmäßigen **Wärmebewegung** atomarer Teilchen
2. **Wechselwirkungen** atomarer Teilchen untereinander

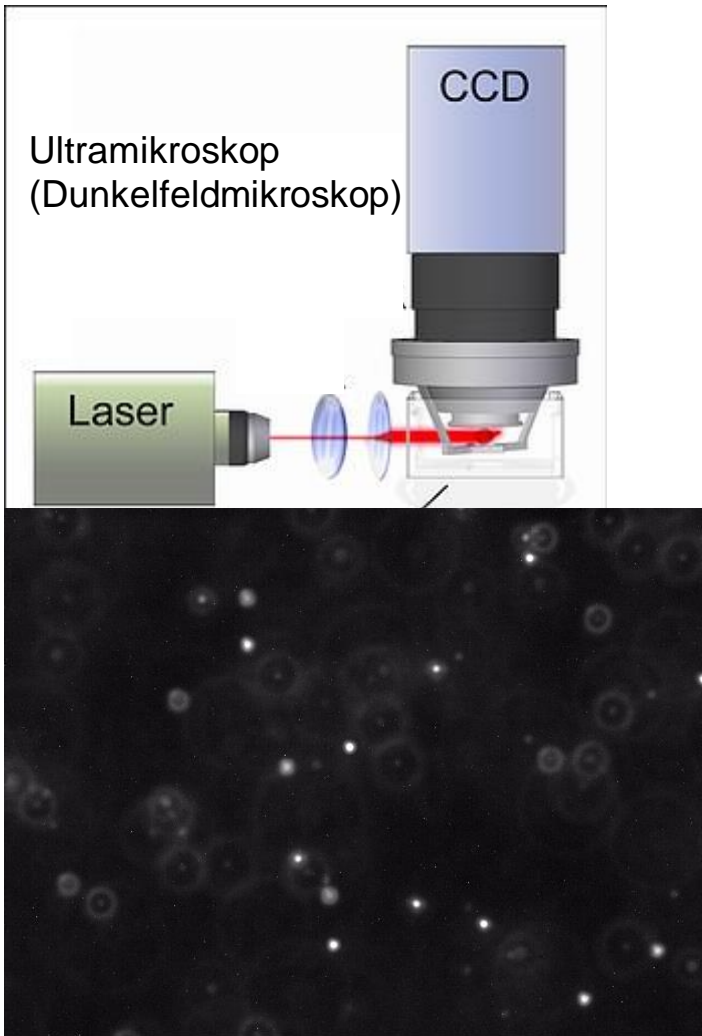
Thermische Wechselwirkung

Neue makroskopische Wechselwirkung (zusätzlich zur mechanischen),
in Form von **Wärmeübertragung**:

$$Q = \Delta E_{\text{innere}}$$

Zwei neue Größe: Wärme (Q) und **Temperatur** (T)

Thermische Bewegung und thermische Energie



$$E_{innere} = E_{therm} + E_{bind} + E_{kern}$$

Die **thermische Energie** eines Körpers umfasst die Energie der verschiedenen **Bewegungen** - Translation, Vibration, Rotation - **der Teilchen** innerhalb eines Körpers.

- Die **Temperatur** ist ein Maß für die **thermische Energie** des Körpers

$$\left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT \right)$$

Temperatur und Temperaturskalen

- Zentraler Begriff der Wärmelehre: **Temperatur** (SI-Basisgröße)
- Charakterisiert den Zustand des Körpers, ein **Maß für die thermische Energie** des Körpers
- Gemessen wird die Temperatur in der Physik auf der **Kelvin-Skala** (Einheit: Kelvin)
- Die Kelvin-Skala besitzt einen **absoluten Nullpunkt** (0 K), aber **keine obere Grenze**
- Beim **absoluten Nullpunkt** würden, sofern dieser erreicht werden könnte, sich die Teilchen des Körpers **nicht mehr bewegen**
- **Viele Eigenschaften** von Körpern **verändern sich abhängig von** ihrer jeweiligen **Temperatur**, wie z.B.:
 - Volumen (**thermische Ausdehnung**)
 - Farbe
 - Elektrischer Widerstand
 - Druck eines Gases

Wärmeausdehnungskoeffizienten:

Für feste Stoffe (linear)

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \Delta T}$$

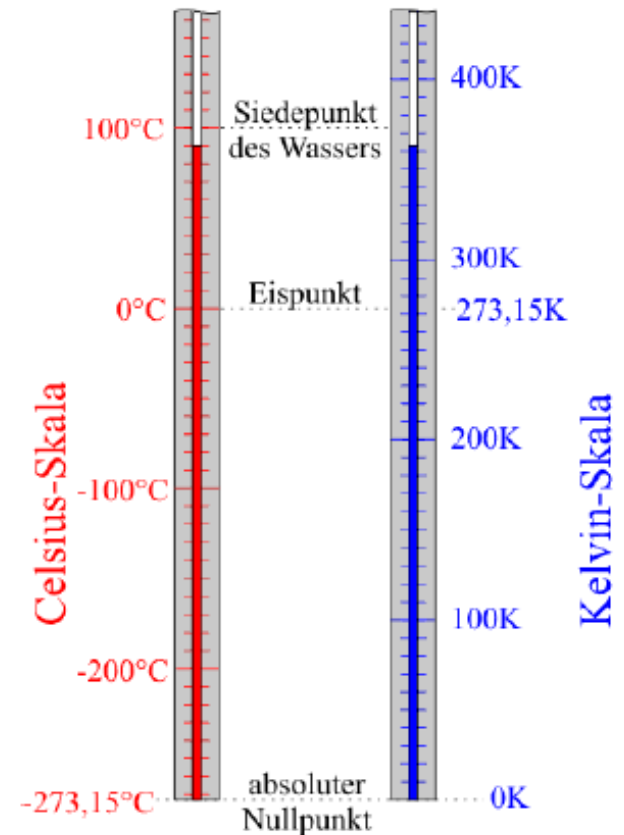
Für Flüssigkeiten (volumetrisch)

$$\beta = \frac{\Delta V}{V \Delta T}$$

- Die zwei Temperaturskalen sind im Vergleich zueinander verschoben – **die Schritte der beiden Skalen sind jedoch gleich groß**

$$t_{\text{Celsius}} = T_{\text{Kelvin}} - 273$$

$$T_{\text{Kelvin}} = t_{\text{Celsius}} + 273$$



Wärme und Wärmekapazität

Wärme (Formelzeichen Q): Die von einem Körper auf den anderen **übertragene thermische Energie**.

Eine alte Maßeinheit ist die Kalorie (cal): $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$

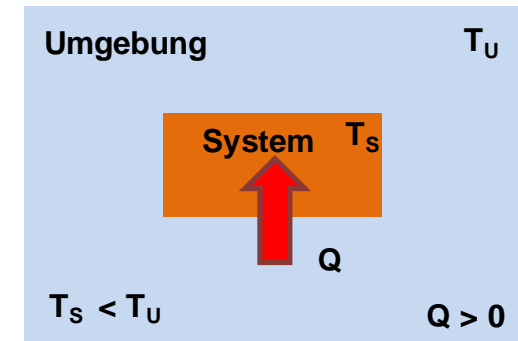
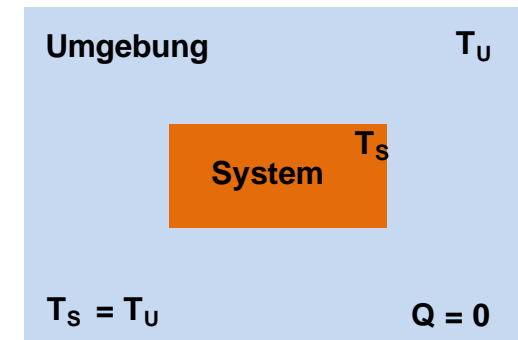
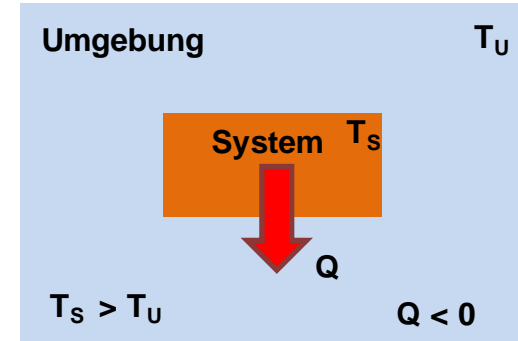
Mit Hilfe der **Wärmekapazität** C kann ein **Zusammenhang** zwischen der **Temperaturänderung** ΔT eines Körpers und der dabei aufgenommenen oder abgegebenen **Wärme** Q hergestellt werden:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \left(\frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$$

- Möchte man die Temperatur eines Körpers **erhöhen**, so muss ihm Wärme zugeführt werden: Q und ΔT sind **positiv**
- Möchte man die Temperatur eines Körpers **erniedrigen**, so muss Wärme von ihm abgeführt werden: Q und ΔT sind **negativ**
- Die Wärmekapazität eines Körpers hängt von dem **Material** des Körpers und seiner **Masse** ab, $C \sim m \rightarrow$

Spezifische Wärmekapazität c : $c = \frac{C}{m} \left(\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \right)$

Die Kombination der zwei Formeln: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$



Übung

Aufgabe:

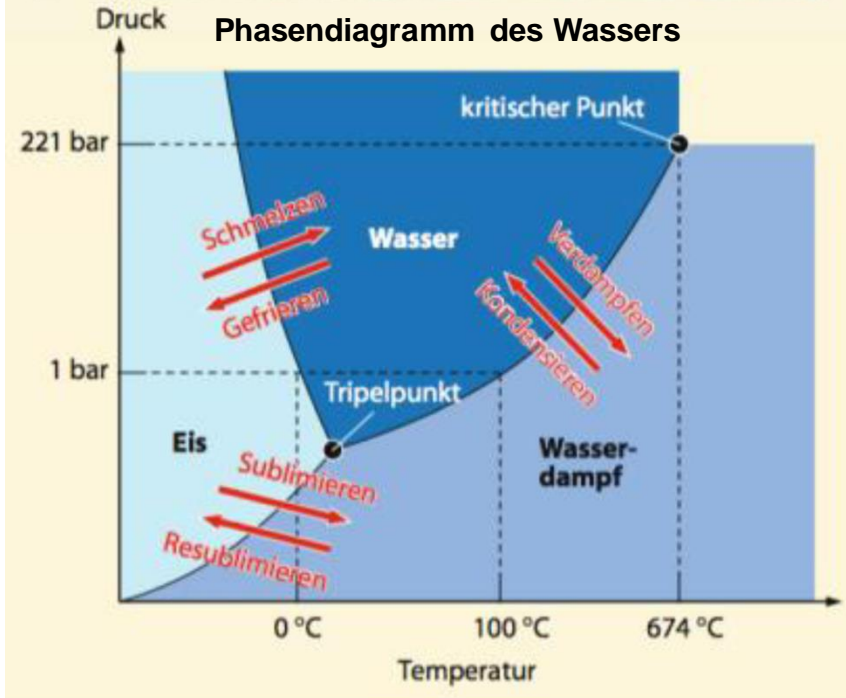
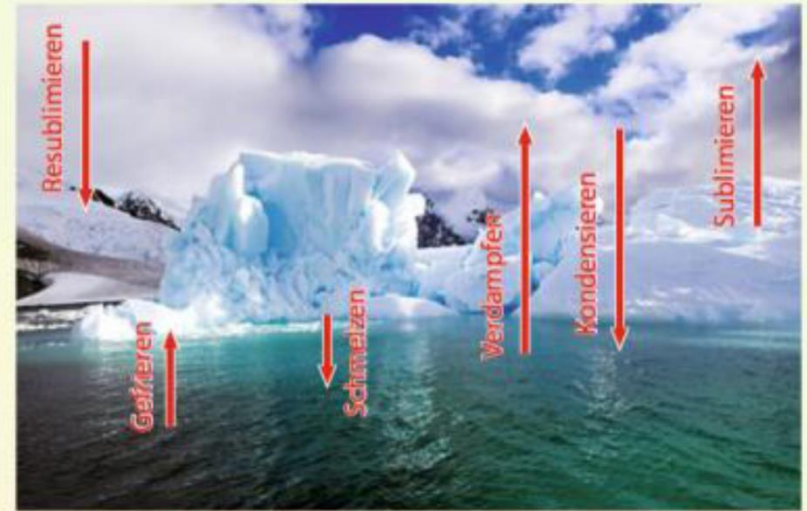
Man möchte 2 dl Orangensaft von 28°C auf 8°C abkühlen. Wie viel Wärme muss entzogen werden? (Die Dichte des Saftes beträgt 1,02 g/cm³.)



Material	Spez. Wärmekapazität, c (J/kg·K)
Saft	4100

Aggregatzustände

- **Erscheinungsformen**, in denen ein Stoff abhängig von den äußeren Bedingungen (z.B. Temperatur und Druck) vorliegen kann
- Die **Temperatur der Umwandlungen ändert sich in Abhängigkeit vom Druck - Phasendiagramm**
- 3 Zuständen: **fest**, **flüssig** und **gasförmig**
- Zuständen des Wassers: Eis, flüssiges Wasser und Wasserdampf
- Die unterschiedlichen Zustände haben gewisse Eigenschaften:
 - *Fest*: bestimmtes Volumen und bestimmte Gestalt
 - *Flüssig*: bestimmtes Volumen, aber keine bestimmte Gestalt
 - *Gasförmig*: kein bestimmtes Volumen und keine bestimmte Gestalt

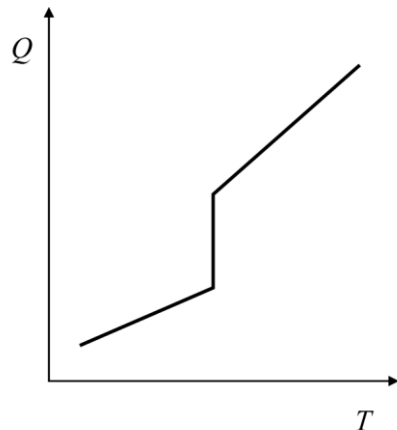
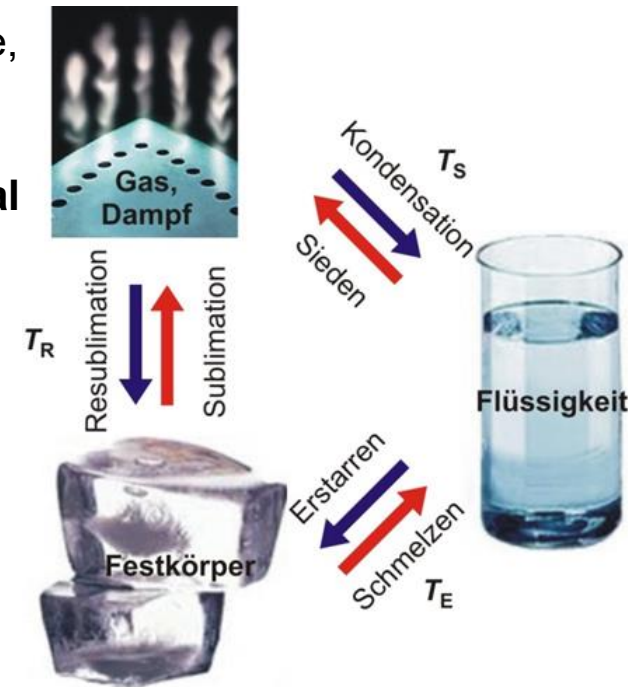


Phasenumwandlung und Umwandlungswärme

- **Strukturwandel** erfordert auch **Energie**
- Die **Umwandlungswärme** Q entspricht der Menge an Wärme, die bei einer Phasenumwandlung einem Körper zu- oder abgeführt werden muss
- Es gilt: $Q \sim m$, die **Umwandlungswärme** ist also **proportional zur Masse** des Körpers →

$$\text{Spezifische Umwandlungswärme: } q = \frac{Q}{m} \left(\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$$

- Abhängig davon, von was für einem Phasenübergang man spricht, hat die spezifische Umwandlungswärme einen eigenen Namen, z.B.:
 - Spezifische Schmelzwärme
 - Spezifische Verdampfungswärme



Stoff	q (kJ/kg)
Gold — Schmelzwärme	67
Aluminium — Schmelzwärme	396
NaCl — Schmelzwärme	517
Eis — Schmelzwärme	334,4
Wasser — Verdampfungswärme bei 30°C und 101 kPa	2400
Wasser — Verdampfungswärme bei 100°C und 101 kPa	2257

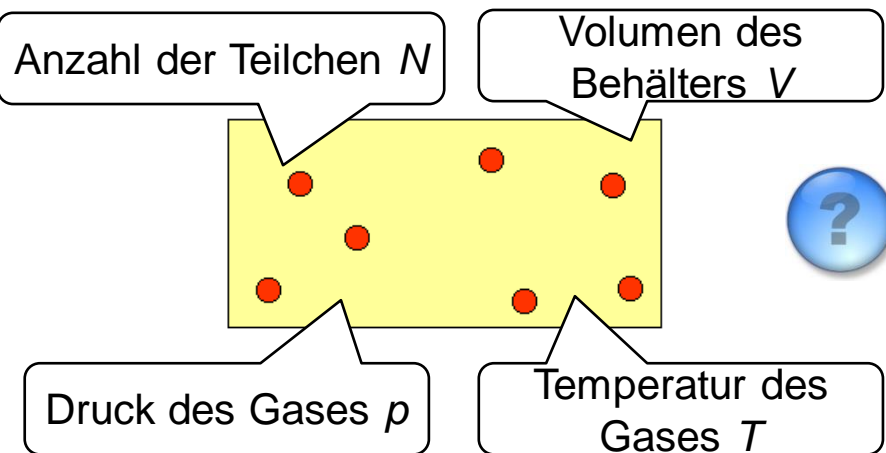
Ideales Gas

Ein **Modell** eines Gases mit folgenden Eigenschaften:

- **Gasteilchen** sind **punktförmig**
- **Gasteilchen** besitzen **kein Volumen**
- **Keine Wechselwirkung** zwischen den einzelnen Teilchen (Ausnahme: **elastische Stöße** untereinander bzw. mit der Wand des Gefäßes)

Bemerkung:

Im Gegensatz zu den extrem vereinfachten idealen Gasen hat jedes Teilchen eines realen Gases ein Volumen und steht immer wieder über Anziehungs- und Abstoßungskräfte mit seinen Nachbarn in Wechselwirkung.



$$p \sim T$$

$$p \sim N$$

$$p \sim \frac{1}{V}$$

Allgemeine Zustandgleichung eines idealen Gases:

$$pV = NkT$$

Boltzmann-Konstante
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$$kN_A = R$$
$$N/N_A = \nu$$

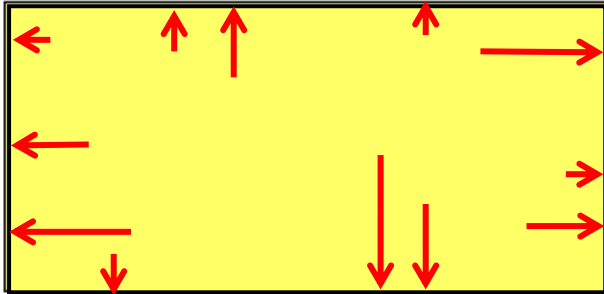
Avogadro-Konstante
 $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$

Alternativform:

$$pV = \nu RT$$

Universelle Gaskonstante
 $R = 8,31 \text{ J/(molK)}$

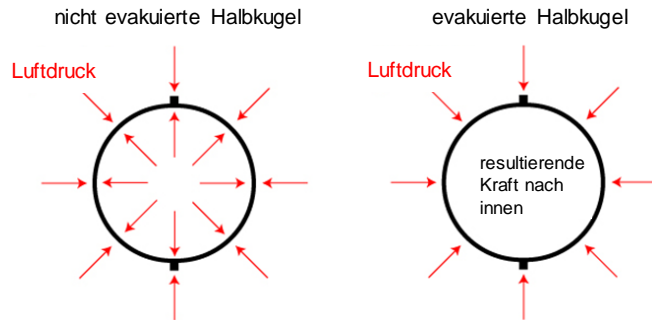
Druck in Gasen



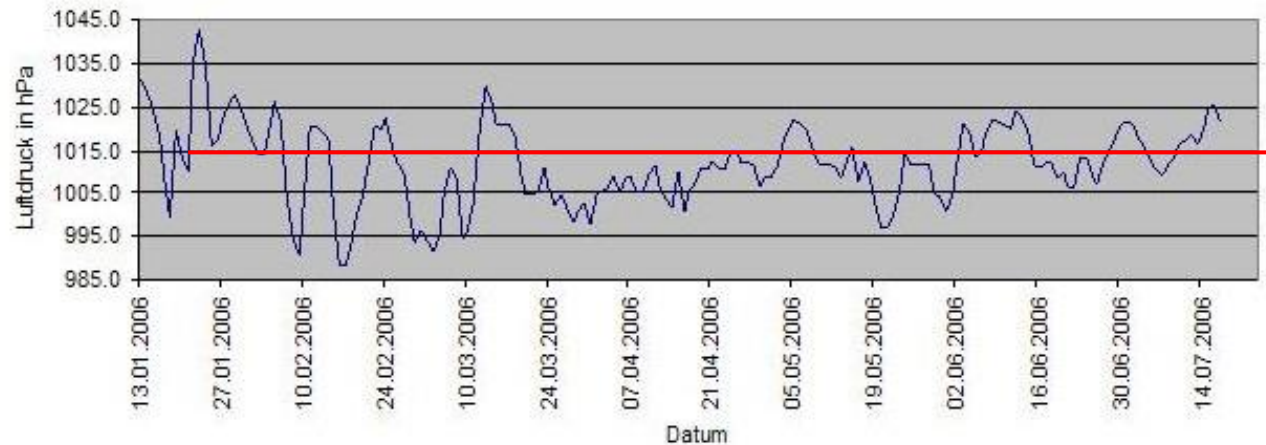
- Die **Gasteilchen** bewegen sich aufgrund ihrer **thermischen Energie** in alle beliebigen Richtungen (thermische Energie wird in **kinetische Energie** umgewandelt).
- Dabei **prallen die Gasteilchen** auch **auf die Wände** des Behälters und es finden **elastische Stoßereignisse** statt.
- Wenn die Teilchen mit der Wand kollidieren, treten **Impulsänderungen** auf, die nach dem 2. newtonschen Gesetz zu kurzfristigen **Kraftänderungen** führen. Die bei diesen Stoßereignissen **auf die Wand ausgeübten Druckkräfte** ergeben den **Gasdruck**.
- Unter Berücksichtigung der großen Anzahl von Zusammenstößen ($N \sim 6 \cdot 10^{23}$) ergibt der Quotient aus der durchschnittlichen Kraft und der Oberfläche des Behälters den **Druck des Gases**.

Luftdruck

Das Experiment von Otto von Guericke:



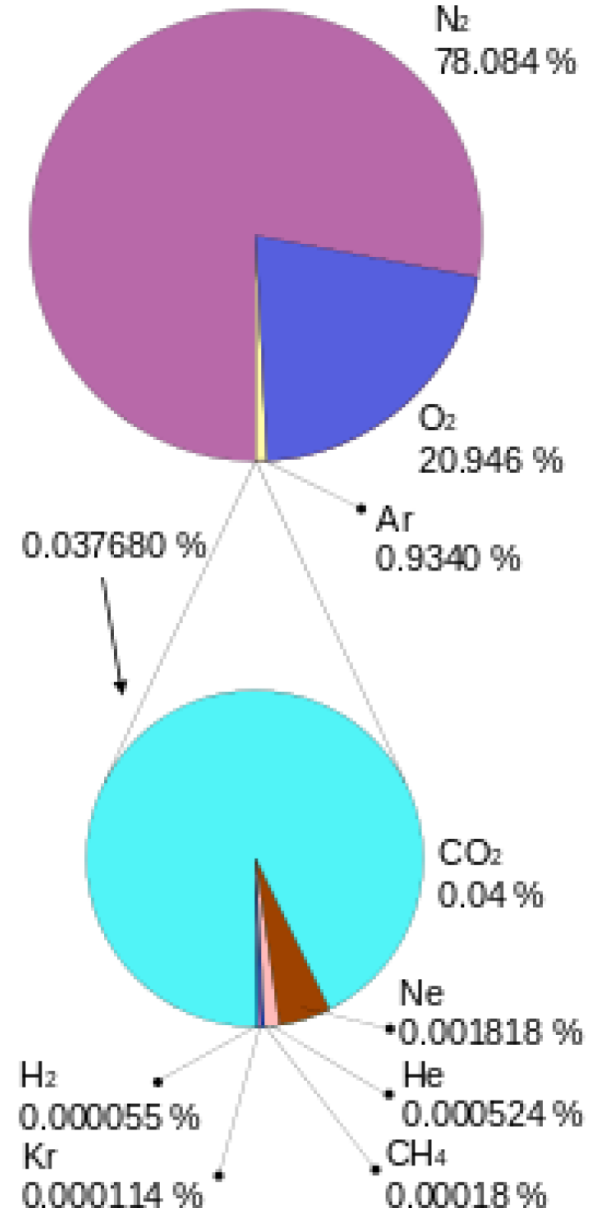
Mittelwert Luftdruck



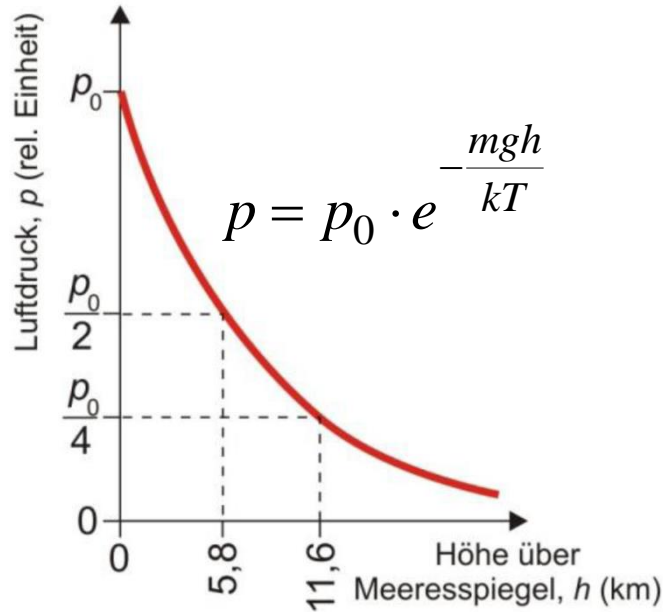
Normdruck = 101 kPa =
= 1010 hPa

Partialdruck (Teildruck)

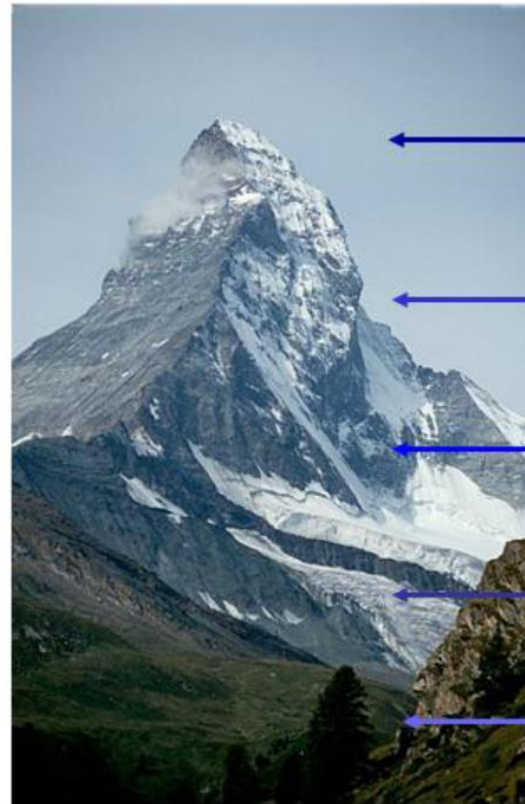
- Ein Begriff für **Gasgemische**.
- Jedes einzelne Gas in dem Gasgemisch trägt zu einem gewissen Teil zum Gesamtdruck bei.
- Der **Partialdruck** entspricht dem Druck, den eine einzelne Gaskomponente eines Gasgemisches bei alleinigem Vorhandensein im betreffenden Volumen ausüben würde.
- Die Summe der Partialdrücke der Komponenten ergibt den Druck des Gases.
- Luft besteht aus einem Gasgemisch (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid,...).
Beispiel: Der Anteil von O_2 in der Luft beträgt ~ 21%. Vom Gesamtdruck 101 kPa ist 21,2 kPa der Partialdruck von O_2 .



Atmung in großer Höhe



Höhenluft bzw. „Hypoxie“

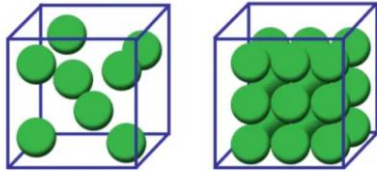


Höhe (m)	p Luft (hPa)	p O ₂ (hPa)	O ₂ Vol %
4.000	616	129	20,9
3.000	701	147	20,9
2.000	795	166	20,9
1.000	898	188	20,9
NN	1.013	212	20,9

- Die **prozentuale Zusammensetzung der Luft verändert sich nicht** (kaum) mit zunehmender Höhe im Bereich von für den Menschen relevanten Höhen
- Trotzdem bekommen wir mit zunehmender Höhe Probleme mit der Atmung und unsere Leistungsfähigkeit nimmt ab (→ Höhenttraining)
- Ursächlich dafür ist der **abnehmende Luftdruck** und somit **auch Partialdruck von Sauerstoff**, der maßgeblich die Sauerstoffaufnahme und -abgabe des Körpers beeinflusst.
- Der Körper kann sich anpassen – erhöhte Produktion von Hämoglobin und roten Blutkörperchen

Dichte

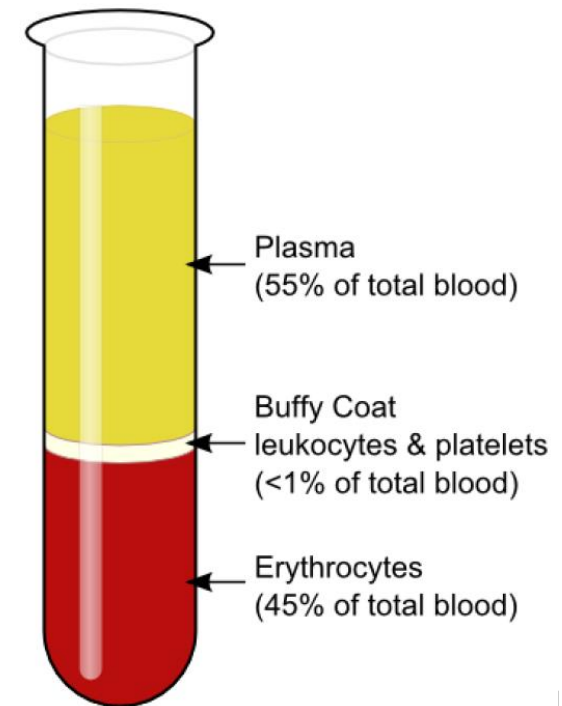
$$\text{Dichte } (\rho): \quad \rho = \frac{m}{V} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$



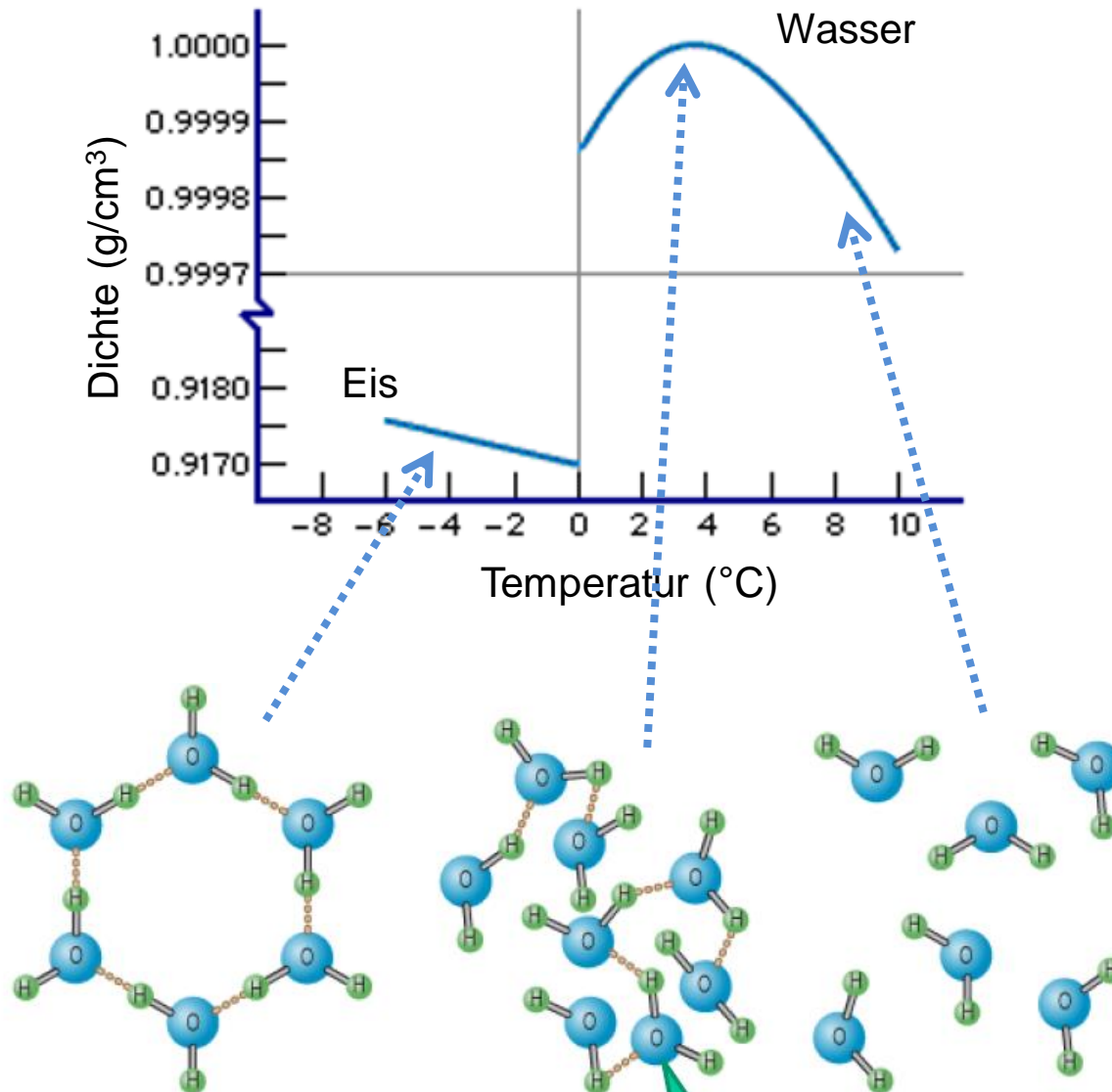
- Die **Dichte** eines Körpers ist **abhängig von**:
 - **Material**
 - **Druck**
 - **Temperatur**

Stoff	ρ (g/cm ³)
Luft (0°C, 101 kPa)	0,00129
Wasser (4°C)	1
Fettgewebe	≈ 0,9
Blut	≈ 1,05
Knochen	≈ 1,8
Körporgewebe (Mittelwert)	≈ 1,04
Gold (Au)	19,3
Quecksilber (Hg)	13,6

Zentrifugiert man Blut, so erhält man aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Blutbestandteile drei sichtbare Fraktionen: Erythrozyten, Leukozyten und Thrombozyten, Plasma

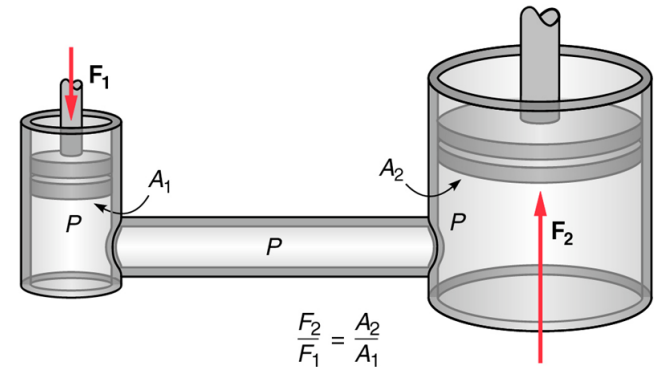


Dichte des Wassers

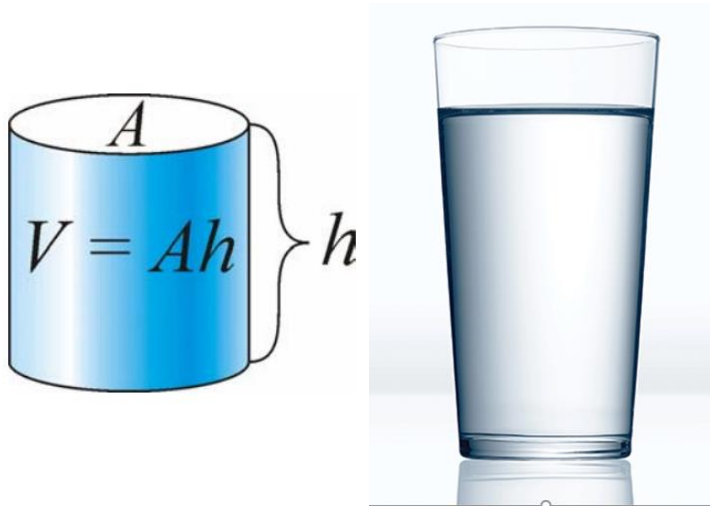


Ruhende Fluide - Hydrostatik

Pascalsches Gesetz : Bei Flüssigkeiten in einem geschlossenen Raum breitet sich der durch eine äußere Kraft erzeugte Druck ungehindert in alle Richtungen aus, da sie "inkompressibel" sind. ($\kappa_{\text{wasser}} = 0,5 \text{ GPa}^{-1}$)
(Hydraulik, Betrieb der Bremsen)



Hydrostatischer Druck (Schweredruck): Er ergibt sich aus dem Gewicht der Flüssigkeit.
In Ruhe, unter Erdbedingungen (im einfachsten Fall):



Hydrostatisches Paradoxon: Hydrostatischer Druck ist nur von der Dichte der Flüssigkeit und der jeweiligen Tiefe (Füllhöhe) abhängig. **Er hängt also nicht von der Form des Gefäßes ab.**



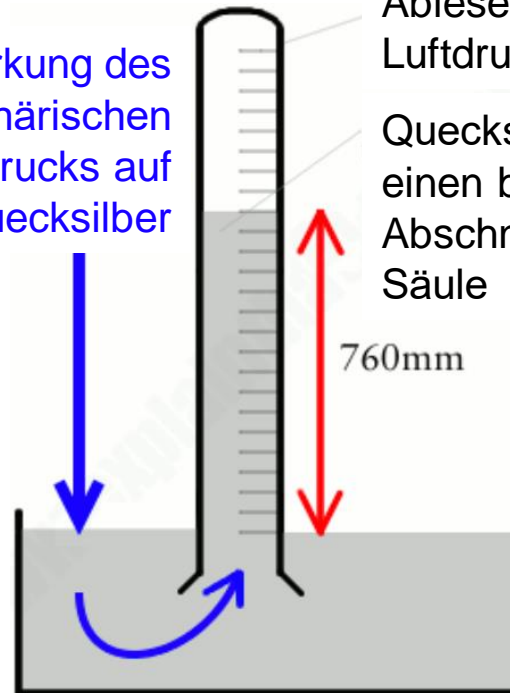
Hydrostatischer Druck (Schweredruck)

Berechnen Sie den Druck, den eine Quecksilbersäule der Höhe 1 mm ausübt.

$$1 \text{ mmHg} = 133 \text{ Pa}$$



die Wirkung des
atmosphärischen
Drucks auf
Quecksilber



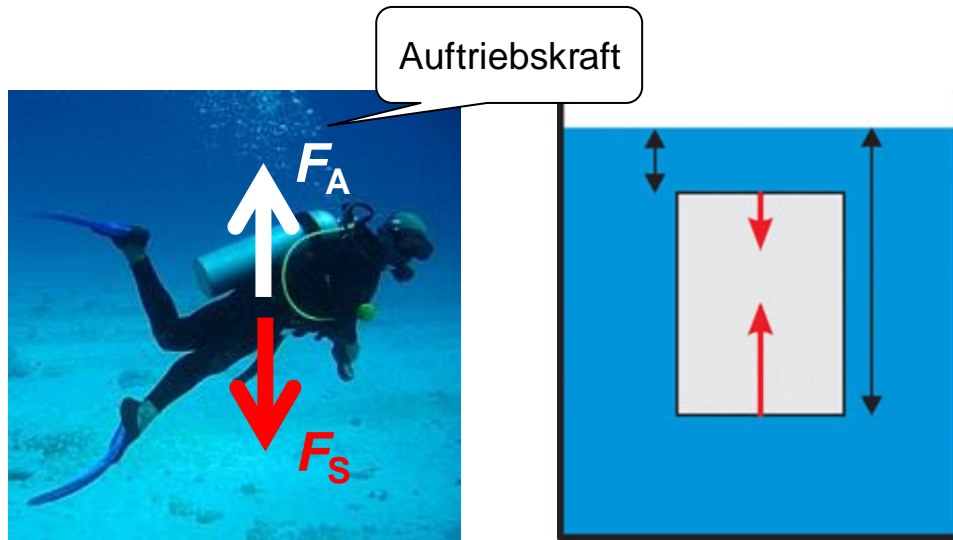
Skala zum
Ablesen des
Luftdrucks

Quecksilber füllt
einen bestimmten
Abschnitt der
Säule

**Evangelista Toricelli
Barometer (1643)**

Das Ergebnis des hydrostatischen Drucks: Auftriebskraft

Archimedisches Prinzip: Der statische Auftrieb eines Körpers in einem Medium ist genauso groß wie die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums. Jeder in Wasser getauchte Körper verliert so viel Gewicht, wie das Gewicht des Wassers, das er verdrängt.



Voraussetzung:
Schweben
($v = 0$)

$$a = 0$$

$$\sum F = F_S - F_A = 0$$

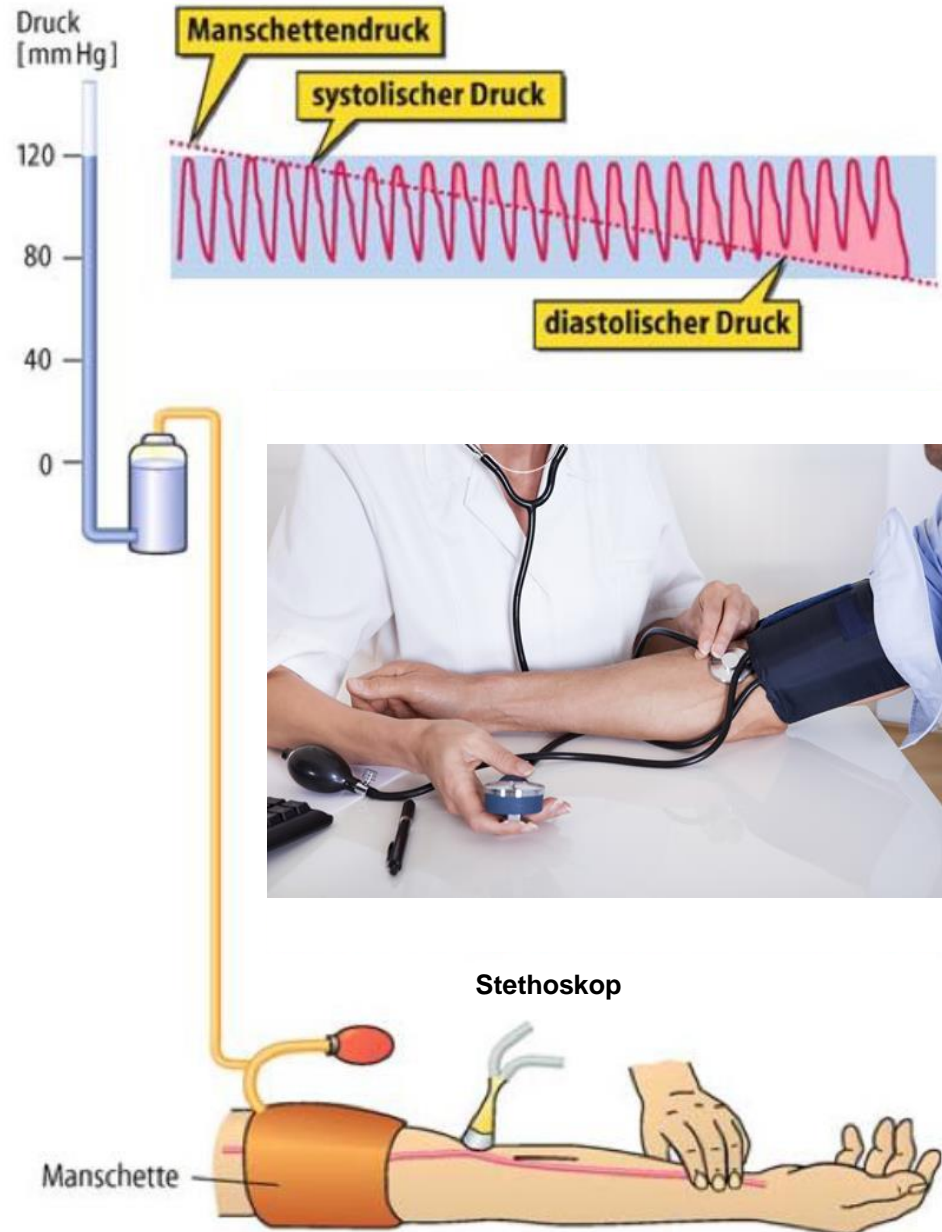
$$F_S = F_A$$

Blutdruck und seine Messung

- Manschette wird solange aufgeblasen, **bis Manschettendruck den Blutdruck** in der A. brachialis um ca. 20 mmHg **übersteigt**
- Es **fließt jetzt kein Blut** mehr in den Arm hinein (und auch nicht hinaus)
- Das Stethoskop wird über der A. brachialis positioniert und der Druck in **der Manschette wird langsam verringert**
- Sobald der Druck so gering ist, dass das Blut wieder zu fließen beginnt, sind Geräusche zu hören = **Korotkow-Geräusche**
- Solange der Manschettendruck zwischen dem systolischen und dem diastolischen Druck liegt, sind Geräusche zu hören, da **in diesem Bereich der Blutstrom turbulent** ist
- Sobald der diastolische Wert erreicht ist, hören die Geräusche - und die turbulente Strömung - auf

Bemerkung:

Der gemessene Druckwert ist als **Überdruck** zu verstehen (= überhalb des Luftdruckes).



Hausaufgaben: Grandskript Kapitel 6 und 9