

Grundlagen der medizinischen Biophysik

5. Vorlesung 23. 09. 2021.

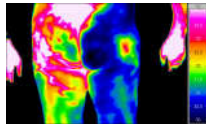
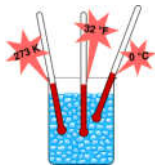
Ádám Orosz

1. Mechanik – Druck, Hydrostatik



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

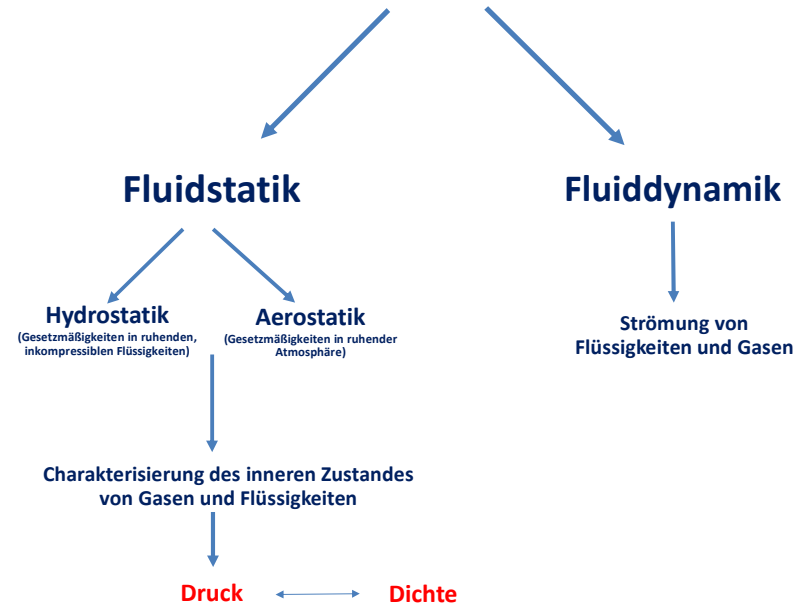
2. Wärmelehre



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

1

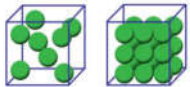
Fluidmechanik (Strömungsmechanik)



2

Dichte

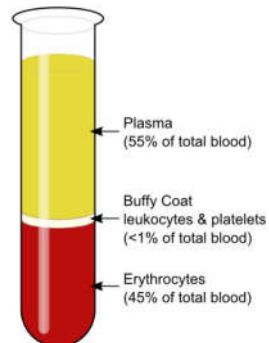
Dichte (ρ): $\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$



$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

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

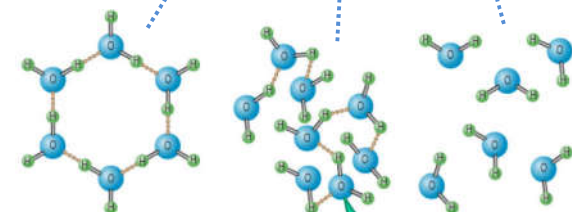
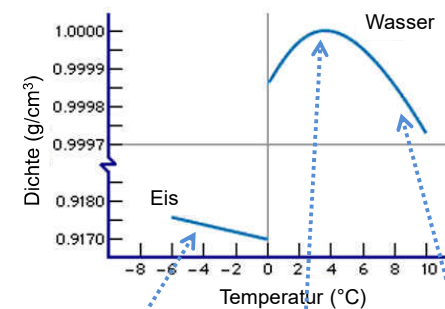
Zentrifugiert man Blut, so erhält man aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Blutbestandteile drei sichtbare Fraktionen: Erythrozyten, Leukozyten und Thrombozyten, Plasma



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
Körpergewebe (Mittelwert)	≈ 1,04
Gold (Au)	19,3
Quecksilber (Hg)	13,6

3

Dichte des Wassers



4

Wiederholung - Druck

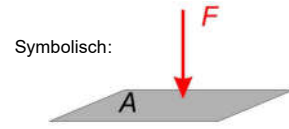


- Die Deformation eines Körpers hängt nicht nur von der auf ihn wirkenden Kraft ab, sondern auch davon, auf welche Fläche die Kraftwirkung konzentriert oder verteilt ist.
- Die Kraft reicht also nicht aus die Wechselwirkung völlig beschreiben zu können. Man braucht **eine neue Größe, die auch die Fläche berücksichtigt** → „Druck“.

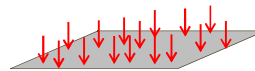
Druck (p): $p = \frac{F}{A} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \right)$

Pascal

Symbolisch:



Tatsächlich:



(gleichmäßig verteilt)

Andere häufig gebrauchte Einheiten sind:
Bar (bar), Atmosphäre (atm), Millimeter Quecksilbersäule (mmHg)

5

Übung

Wie groß ist der Druck, den ein Mann ($m = 80 \text{ kg}$) beim Stehen auf die Unterstützung ausübt

a) barfuß $A = 200 \text{ cm}^2$
 \parallel
 $0,02$

$$F = m \cdot g = 80 \cdot 9,81 = 785 \text{ N}$$

$$p = \frac{785}{0,02} = 39250 \text{ Pa} \approx 40 \text{ kPa}$$

b) mit Ski $A = 3300 \text{ cm}^2$

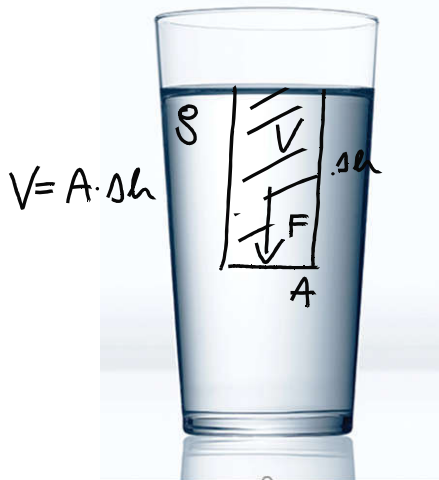
$$p = \frac{785}{0,33} = 2379 \text{ Pa} \approx 2,4 \text{ kPa}$$

c) auf Schlittschuhen $A = 4 \text{ cm}^2$

$$p = \frac{785}{0,0004} = 1962500 \text{ Pa} \approx 2 \text{ MPa}$$

6

Hydrostatischer Druck



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

$$F = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$$

$$F = \rho \cdot A \cdot \Delta h \cdot g$$

$$\frac{F}{A} = p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

$$p \sim \Delta h$$

wenn $\rho = \text{konstant}$

Hydrostatischer Druck (Schweredruck)

Der Druck, der sich innerhalb einer Flüssigkeit durch den Einfluss der Gravitation einstellt:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Bemerkung:
Der Druck nimmt also mit zunehmender Tiefe linear zu. Dies gilt jedoch nur, wenn die Dichte der Flüssigkeit konstant bleibt (inkompressible Flüssigkeit).



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

$$\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3 = 13600 \text{ kg/m}^3$$

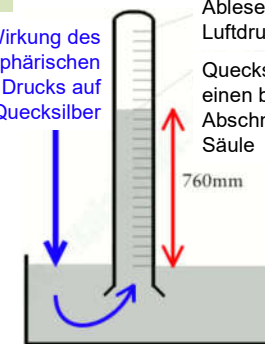
$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = 133 \text{ Pa}$$

$$\Delta h = 760 \text{ mm}$$

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

$$p = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,76 = 101,49 \text{ kPa}$$

die Wirkung des atmosphärischen Drucks auf Quecksilber



Skala zum Ablesen des Luftdrucks
Quecksilber füllt einen bestimmten Abschnitt der Säule

Evangelista Toricelli
Barometer (1643)

8

Hydrostatisches Paradoxon



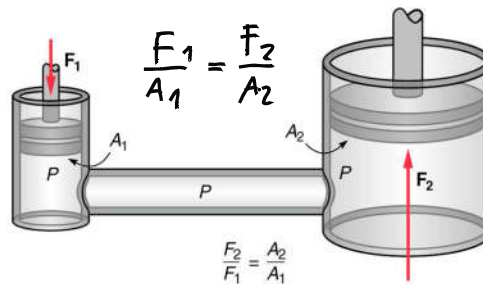
Hydrostatischer Druck ist nur von der Dichte der Flüssigkeit und der jeweiligen Tiefe (Füllhöhe) abhängig. **Er hängt also nicht von der Form des Gefäßes ab.**



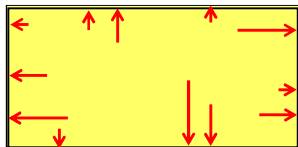
Blaise Pascal
1623 –1662

Gesetz der allseitigen Druckausbreitung: der hydrostatische Druck ist an jedem Punkt der Flüssigkeit gleich stark in jede Raumrichtung.

Pascalsches Gesetz



Druck in Gasen



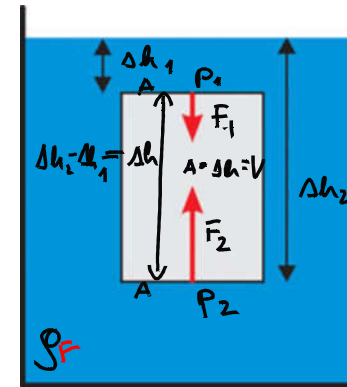
- Die Gasteilchen bewegen sich aufgrund ihrer **thermischen Energie** in alle beliebigen Richtungen (thermische Energie wird in **kinetische Energie** umgewandelt).
- Dabei **prallen die Gasteilchen auch auf die Wände** des Behälters, in dem sie sich befinden und es finden **elastische Stoßereignisse** 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.
- Der **Gasdruck** entsteht somit als **Summe aller** durch ein Gas oder Gasgemisch wirkenden **Kräfte** auf die Gefäßwand.

S. später:
 $pV = NkT$

Archimedisches Prinzip und Auftriebskraft

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.

Auftriebskraft: $\Sigma F \sim ?$

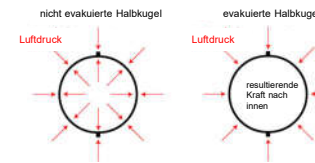


$$\begin{aligned}
 p_1 \cdot A &= F_1 = \rho \cdot g \cdot \Delta h_1 \cdot A \\
 p_2 \cdot A &= F_2 = \rho \cdot g \cdot \Delta h_2 \cdot A \\
 \Sigma F &= F_2 - F_1 = \rho \cdot g \cdot \Delta h_2 \cdot A - \rho \cdot g \cdot \Delta h_1 \cdot A \\
 \Sigma F &= \rho \cdot g \cdot A (\Delta h_2 - \Delta h_1) \\
 \Sigma F &= F_A = \rho \cdot g \cdot V_{\text{Körper}}
 \end{aligned}$$

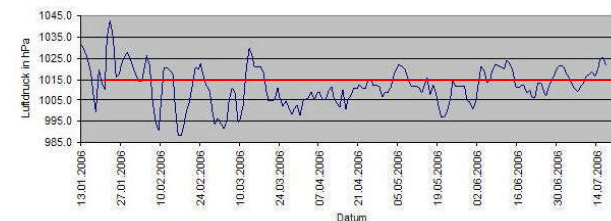
10

Luftdruck

Das Experiment von Otto von Guericke:



Mittelwert Luftdruck



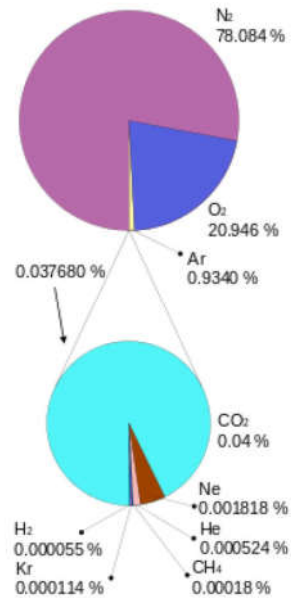
Normdruck = 101 kPa =
= 1010 hPa

11

12

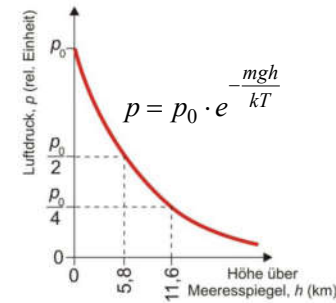
Partialdruck (Teildruck)

- Ein Begriff für Gasgemische.
- Luft besteht aus einem Gasgemisch (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid,...).
- 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.
- Beispiel: Der Anteil von O₂ in der Luft beträgt ~ 21%. Vom Gesamtdruck 101 kPa ist 21,2 kPa der Partialdruck von O₂.

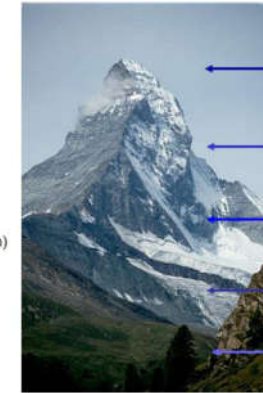


13

Atmung in großer Höhe



Höhenluft bzw. „Hypoxie“



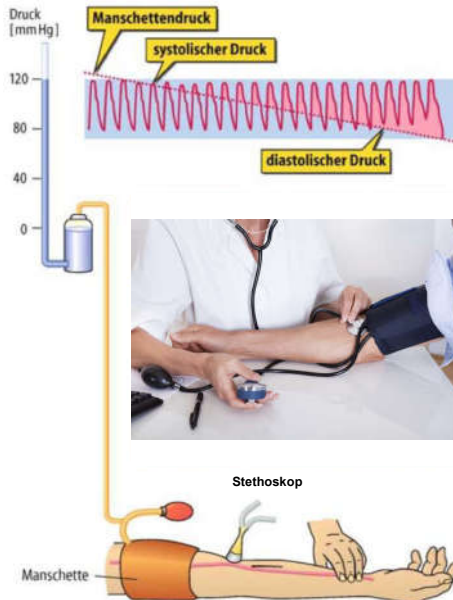
Höhe (m)	p Luft (hPa)	p O ₂ (hPa)	O ₂ Vol %
4.000	616	129	20,9
3.000	701	147	20,9
2.000	795	166	20,9
1.000	898	188	20,9
NN	1.013	212	20,9

- 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 (→ Höhentraining)
- 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

14

Blutdruck und seine Messung

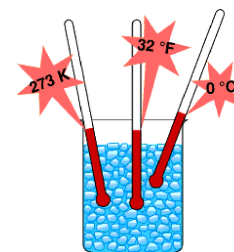
- Manschette wird solange aufgeblasen, **bis Manschettendruck den Blutdruck** in der A. brachialis um ca. 20 mmHg **übersteigt**
- Es **fließt jetzt kein Blut** mehr in den Arm hinein (und auch nicht hinaus)
- Das Stethoskop wird über der A. brachialis positioniert und der Druck in **der Manschette wird 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



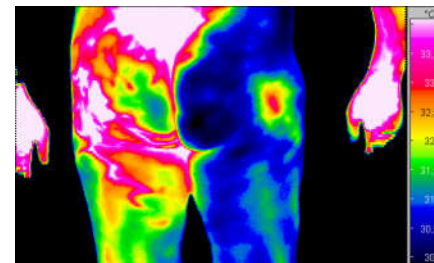
Bemerkung:
Der gemessene Druckwert ist als **Überdruck** zu verstehen (= überhalb des Luftdruckes).

15

2. Wärmelehre (Thermodynamik)



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



16

Thermische Wechselwirkung

Wiederholung: 1. Erhaltung der mechanische Energiearten

2. Der Arbeitssatz

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

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

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

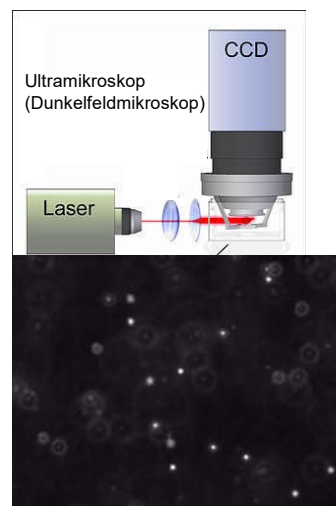
Neue makroskopische Wechselwirkung (zusätzlich zur mechanischen),
in Form von **Wärmeübertragung**:

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

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

17

Thermische Bewegung und thermische Energie



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

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

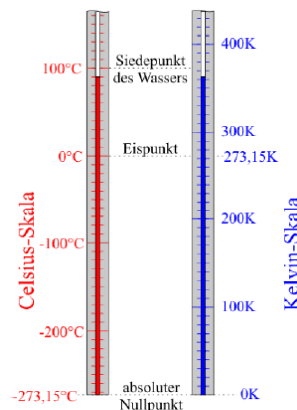
- Die **Temperatur** ist ein Maß für die **thermische Energie** des Körpers

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

18

Temperatur und Temperaturskalen

- Ein zentraler Begriff der Wärmelehre ist die **Temperatur** (SI-Basisgröße)
- Sie charakterisiert den Zustand des jeweiligen Körpers und 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



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

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

19

Wärme und Wärmekapazität

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

Eine alte Maßeinheit ist die Kalorie (cal): 1 cal = 4,186 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:

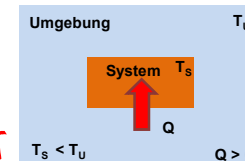
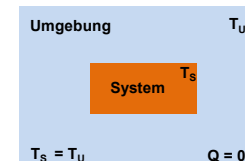
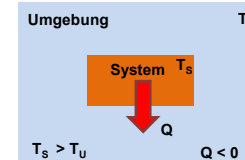
$$C = \frac{Q}{\Delta T} \left(\frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$$

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

$C = c \cdot m$ $c \cdot m = \frac{Q}{\Delta T} \rightarrow Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

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



20

Übung

Aufgabe:

Man möchte 2 dl Orangensaft von 23°C auf 8°C abkühlen. Wie viel Wärme muss entzogen werden? (Die Dichte des Saftes beträgt $1,02 \text{ g/cm}^3$.)

$$m = \rho \cdot V = 1,02 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 200 \text{ cm}^3$$

$$m = 204 \text{ g} = 0,204 \text{ kg}$$

$$\Delta T = -20^{\circ}\text{C}$$

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

$$Q = 4100 \cdot 0,204 \cdot -20 = \underline{\underline{-16788 \text{ J}}}$$



Material	Spez. Wärmekapazität, $c \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$
Saft	4100

21

Aggregatzustände

- Aggregatzustände sind Erscheinungsformen, in denen ein Stoff abhängig von den äußeren Bedingungen (z.B. Temperatur und Druck) vorliegen kann

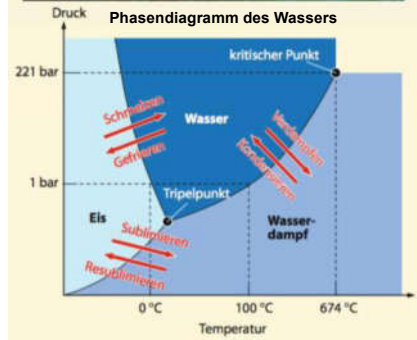
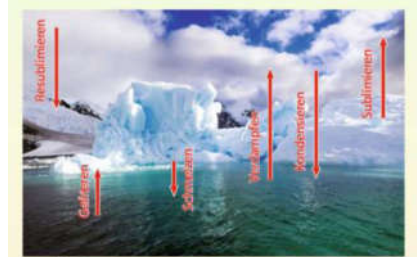
- Die Temperatur der Umwandlungen ändert sich in Abhängigkeit vom Druck - **Phasendiagramm**

- Man unterscheidet dabei zwischen den 3 Zuständen: **fest**, **flüssig** und **gasförmig**

- Wasser kann so in drei Zuständen auftreten: 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



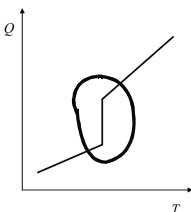
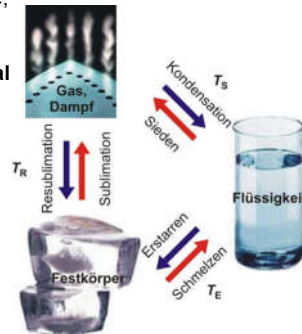
22

Phasenumwandlung und Umwandlungswärme

- 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 \rightarrow

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

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



Stoff	$q \text{ (kJ/kg)}$
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

23

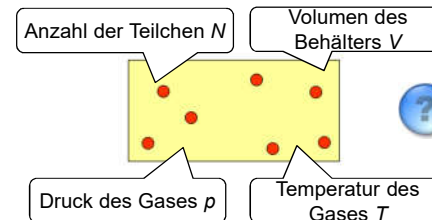
Ideales Gas

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.



$$\left. \begin{array}{l} p \sim T \\ p \sim N \\ p \sim \frac{1}{V} \end{array} \right\}$$

Allgemeine Zustandsgleichung eines idealen Gases:

$$pV = NkT$$

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

Alternativform:

$$pV = \nu RT$$

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

24

Hausaufgaben: Grundschrift Kapitel 6 und 9