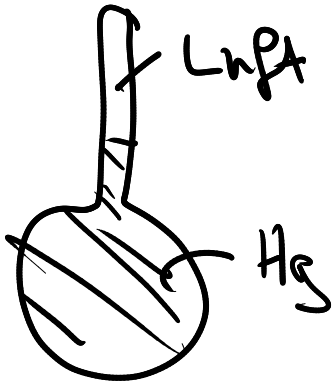


Definition der Temperatur

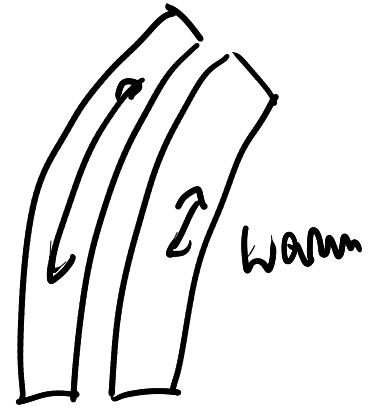
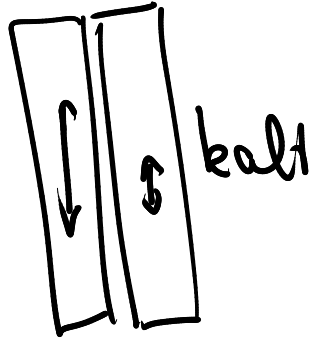
Mittels temperaturabhängiger Stoffeigenschaften

1) Ausdehnung



Thermometer

Bimetall



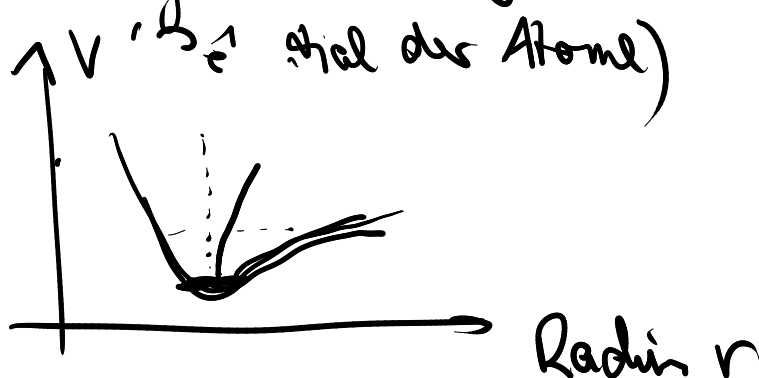
Volumenausdehnungskoeffizient $\alpha = \frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_{p=\text{const}}$

Gas: $10-40 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$

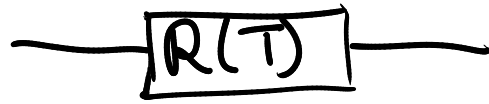
Verdünntes Gas: $\alpha = \frac{1}{273,15\text{K}}$ (bei 0°C)

Aha!

Ausdehnung ist kräftig: Bohnensprenger

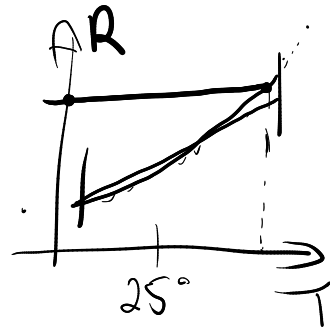


2) Widerstandsthermometer (Pt 100)

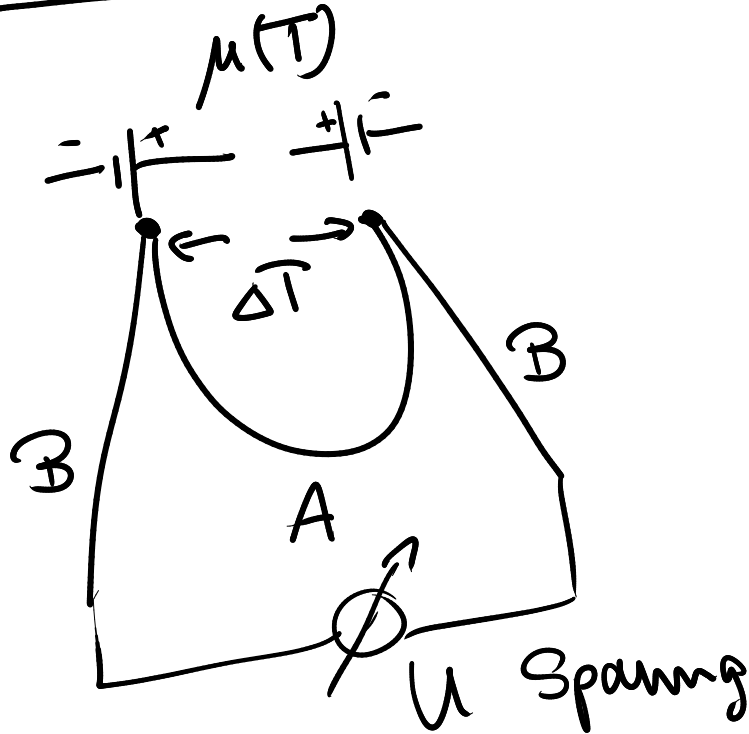
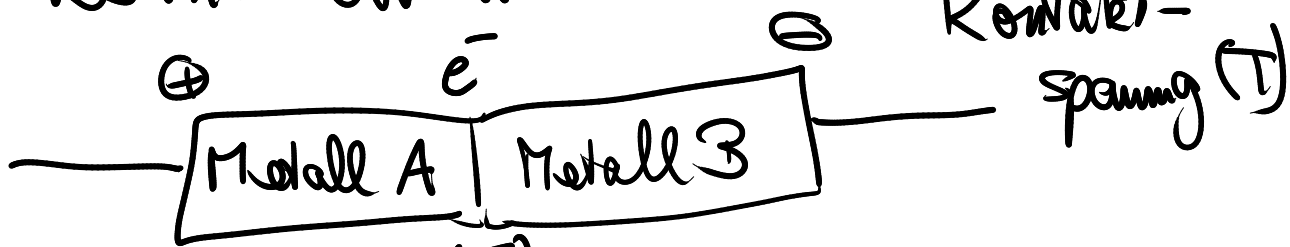


$$R(T) = R_0 [1 + \alpha T + \beta T^2]$$

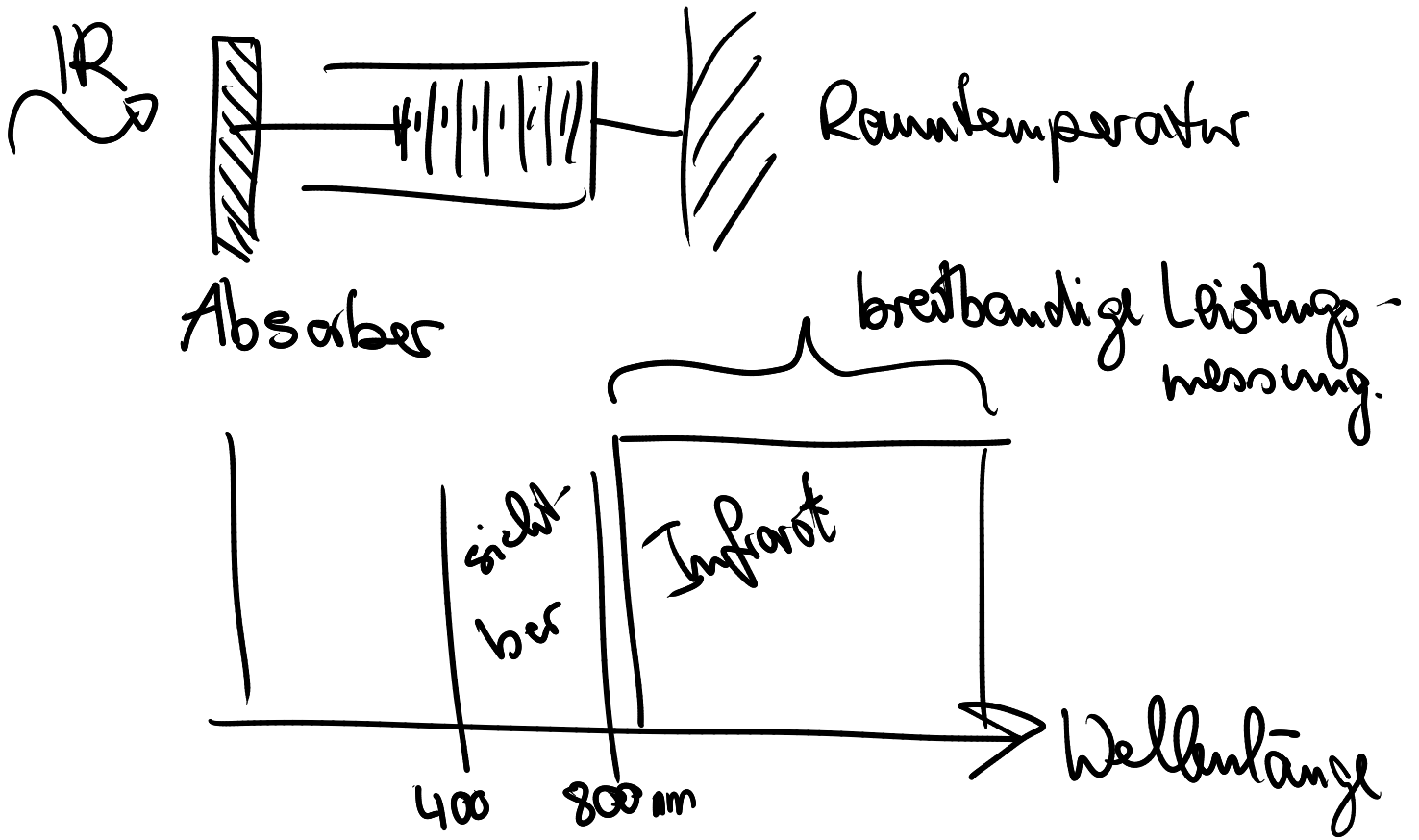
↳ Umkehrung: $T(R)$.



3) Thermoelement



4) Thermosäule



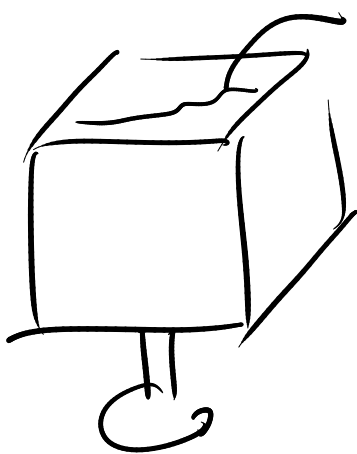
→ Fieberthermometer

→ Thermographie

Problem:
Emissivität.

H₂O 100°C

$\epsilon_n \perp$



Holz: 0,94

Sand: 0,76

Eisen 0,61

(0,13 bei 150°C)

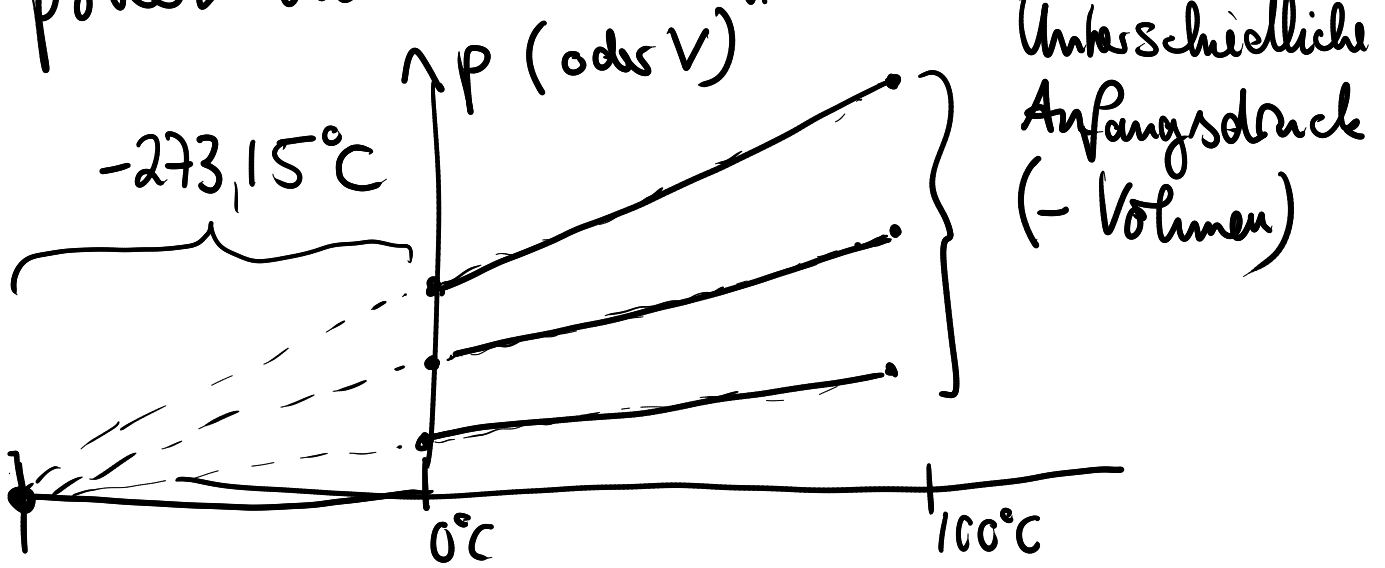
Empirische Temperaturskalen

Willkürlich festgelegte Fixpunkte: Fahrenheit
Celsius.

Körper in einem thermodynamischen Gleichgewicht \Leftrightarrow T des Körpers identisch ist.

Thermodynamischen Temperaturskala

Ideales Gasthermometer: man misst $p(T)|_{V=\text{const}}$ oder $V(T)|_{p=\text{const}}$ über $T = 0^\circ\text{C} \dots 100^\circ\text{C}$. Unabhängig von der Gasart ergeben sich lineäre Kurven, welche zu $T = -273,15^\circ\text{C}$ extrapoliert werden können:



→ Gay-Lussac'sche Gesetze:

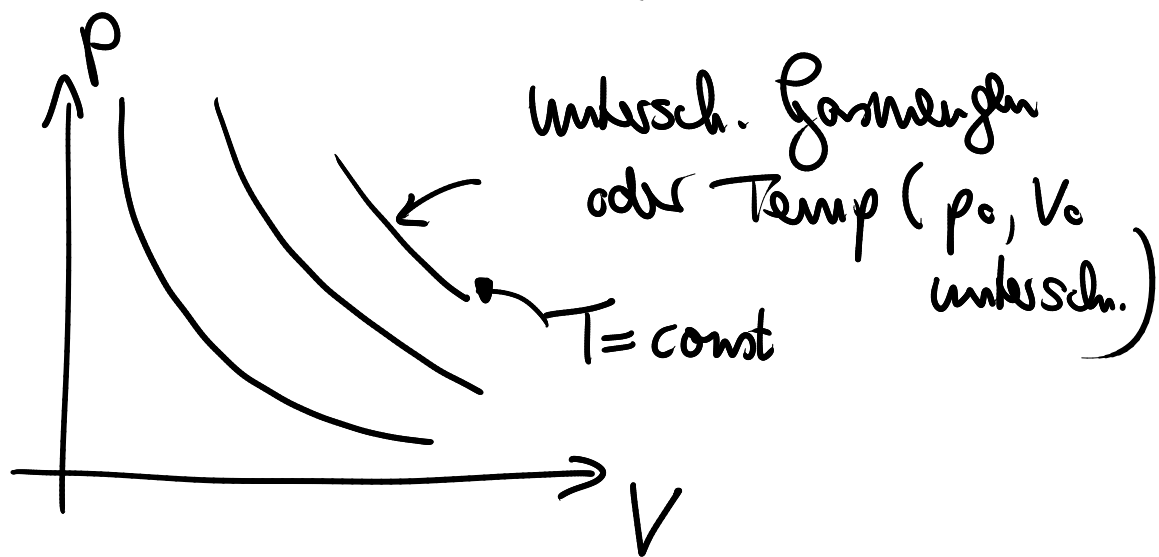
$$V = V_0 \frac{T}{273K} \Big|_{p=\text{const}} ; p = p_0 \frac{T}{273K} \Big|_{V=\text{const}}$$

Die Zustandsgleichung idealen Gase

Obige Gesetze kombiniert:

$$p \cdot V = \frac{p_0 \cdot V_0}{273K} \cdot T$$

(Boyle-Mariotte-Gesetz)



Definition der Konstanten: Bei $p_0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$
und $T = 0^\circ \text{C}$ und $V_0 = 22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$ einer Gasmenge
von $1 \text{ mol} \equiv N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ Moleküle.

$$\frac{p_0 V_0}{273,15K} = R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$$

Es gilt: $pV = nRT$ (n Teilchenzahl in mol)

bzw.: $pV = NkT$ (N : echte Teilchenzahl)

d.h.: $N = n \cdot N_A$ und $k = \frac{R}{N_A} = 1,318 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

Mikroskopische Bild

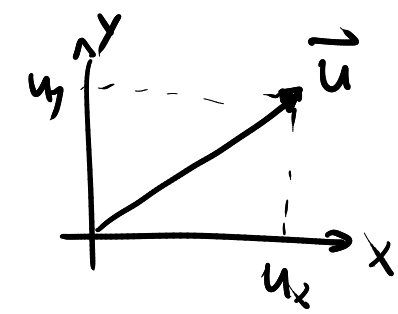
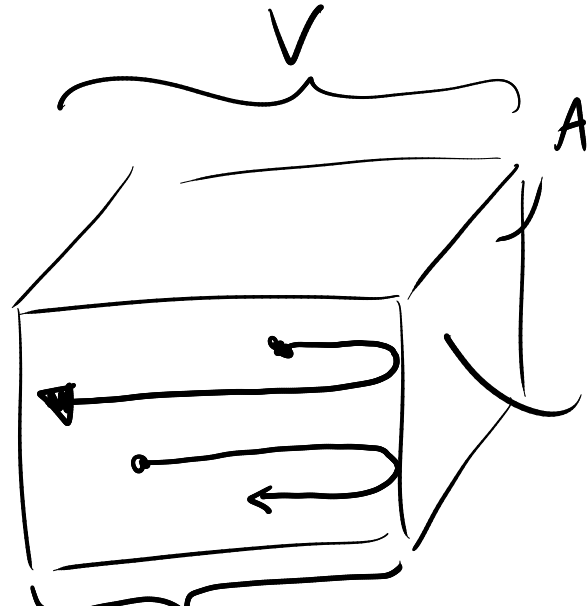
(oft: mikroskopische, atomares Bild ergibt erstannliche Systematik \rightarrow Statistische Mechanik)

Der Gasdruck entsteht durch Stöße der Moleküle (Masse m) auf die Wand. Die Moleküldichtedichte $\rho = N/V$ unterteilen wir in Geschwindigkeitsklassen mit Geschwindigkeit u_i . D.h. $\rho = \sum \rho_i$

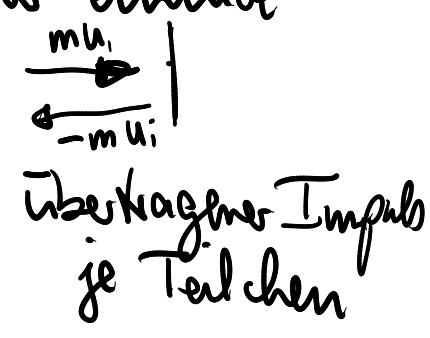
(Wie wir unterteilen wird keine Rolle spielen - fein genug!)

$$\text{Druck } p = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} = \frac{\text{übertragener Impuls } \Delta(m \cdot u_i)}{\text{Zeit } \Delta t \cdot \text{Fläche } A}$$

3 Raumrichtungen
+ je 2 Vorzeichen



Alle Teilchen in V stoßen nur einmal



übertragener Impuls je Teilchen

$$P = \frac{1}{\Delta t \cdot A} \cdot \sum_i \underbrace{\frac{1}{6} \rho_i A \cdot u_i \Delta t}_{\# \text{ Teilchen, die treffen}} \cdot 2m u_i$$

$$= \frac{1}{3} \rho \cdot m \cdot \frac{1}{\rho} \sum \rho_i u_i^2$$

| | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| u_i^2 | 1 | 3 | 5 | 8 |
| ρ_i | 0,1 | 0,5 | 0,3 | 0,2 |

$\rho = N/V$ Definition eines Mittelwerts, hier von u^2

$$pV = \frac{N}{3} \cdot m \overline{u^2} \quad \text{mittlere kin. Energie.}$$

wenn wir annehmen: $\frac{1}{2} m \overline{u^2} = \frac{3}{2} kT$

$$pV = NkT$$

Gleichverteilungssatz

Auf jedem Freiheitsgrad eines Moleküls wird im Mittel dieselbe Energie $\frac{1}{2} kT$ verteilt.

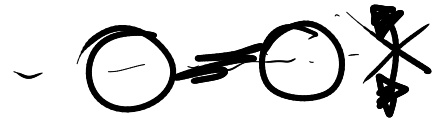
Freiheitsgrad \equiv quadratischer Energie Term
 (\rightarrow stat. Thermodyn.)

z.B.: $E_{kin} = \frac{1}{2} m (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) : f=3$

Rotation: $\frac{1}{2} \Theta (\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2) : f=3$

ABER: 2 atomiges Molekül kann entlang der Symmetrieachse nicht rotieren.

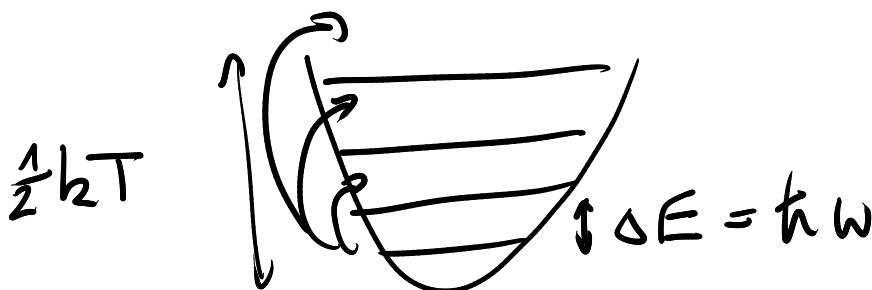
$f=2$



Schwingung: $\rightarrow r$

$\frac{1}{2} k r^2 + \frac{1}{2} m v^2 : f=2$
 | |
 potenz. kin. Energie
 Energie

Aber: Freiheitsgrad muß aus dem quantenmechanischen Grundzustand mit $\frac{1}{2} kT$ auch anregbar sein ($\Delta E \ll \frac{1}{2} kT$)



Beispiel: Bei Raumtemperatur $\frac{1}{2} kT = 25 \text{ meV}$
Optische Anregungen (e^- springt innerhalb
eines Atoms und absorbiert/emittiert Photonen)
typischerweise $\gtrsim 1 \text{ eV}$.

\sim Eis im heißen Plasma der Sonne sind
optische Anregungen gleichverteilt.

Thermodynamische Potential eines idealen Gases

Innere Energie: $U = \frac{3}{2} N kT = U(S, V, N)$

Freie Energie: $F = \mu N - NkT$

Enthalpie: $H = \frac{5}{2} NkT$

Freie Enthalpie: $G = \mu \cdot N = G(T, p, N)$

mit $\mu = -kT \ln \left(\frac{V}{N \cdot \Lambda^3} \right)$

$$\Lambda = \frac{h}{(2\pi m kT)^{1/2}}$$

= thermische de Broglie Wellenlänge