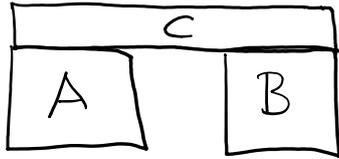


0. ter Hauptsatz der Thermodynamik



Steht ein Körper A mit C
und ein Körper B mit C
im thermischen Kontakt so gilt:

$$T_A = T_B = T_C \quad \text{TD-Gleichgewicht}$$

Vorschrift für T-Messung!

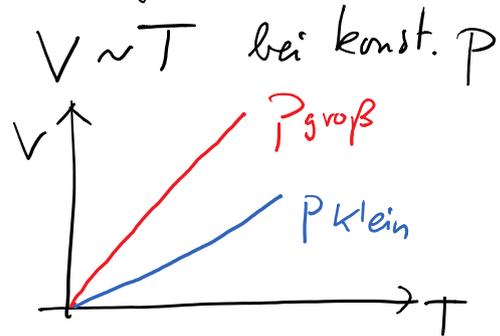
Ideales Gas

Punktförmig, keine WW

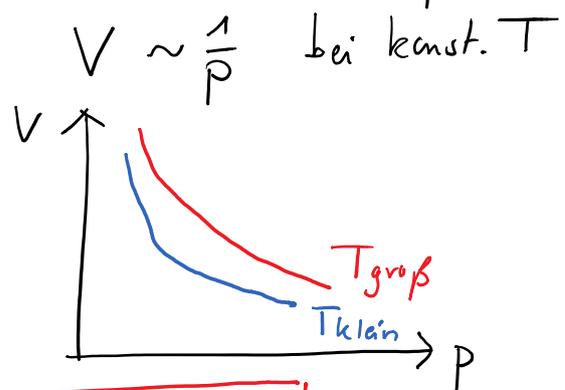
Satz von Avogadro (1811)

Gleiche Volumina V idealer Gase enthalten die gleiche Anzahl N von Molekülen (bei gleichem Druck p und Temperatur T)

Gay-Lussac-Gesetz (1802):



Boyle-Mariotte Gesetz (1664):



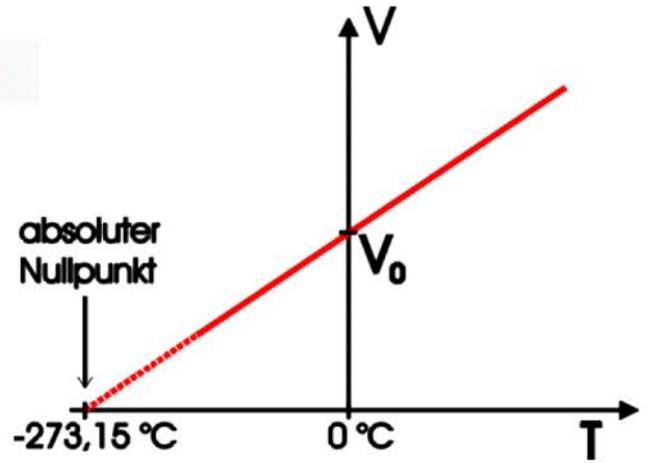
Ideales Gasgesetz

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

n : Molzahl

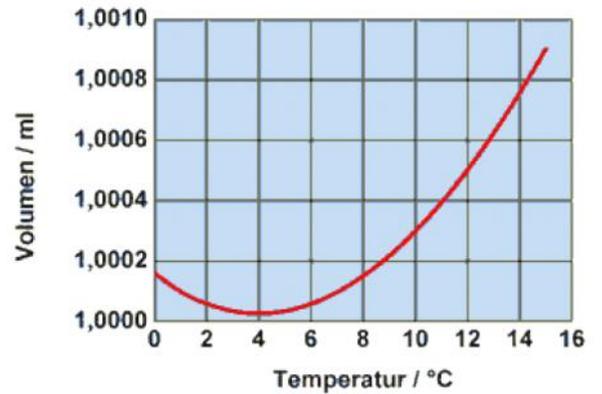
Wärmeausdehnung von idealen Gasen

$$V \sim T$$



Anomalie des Wassers

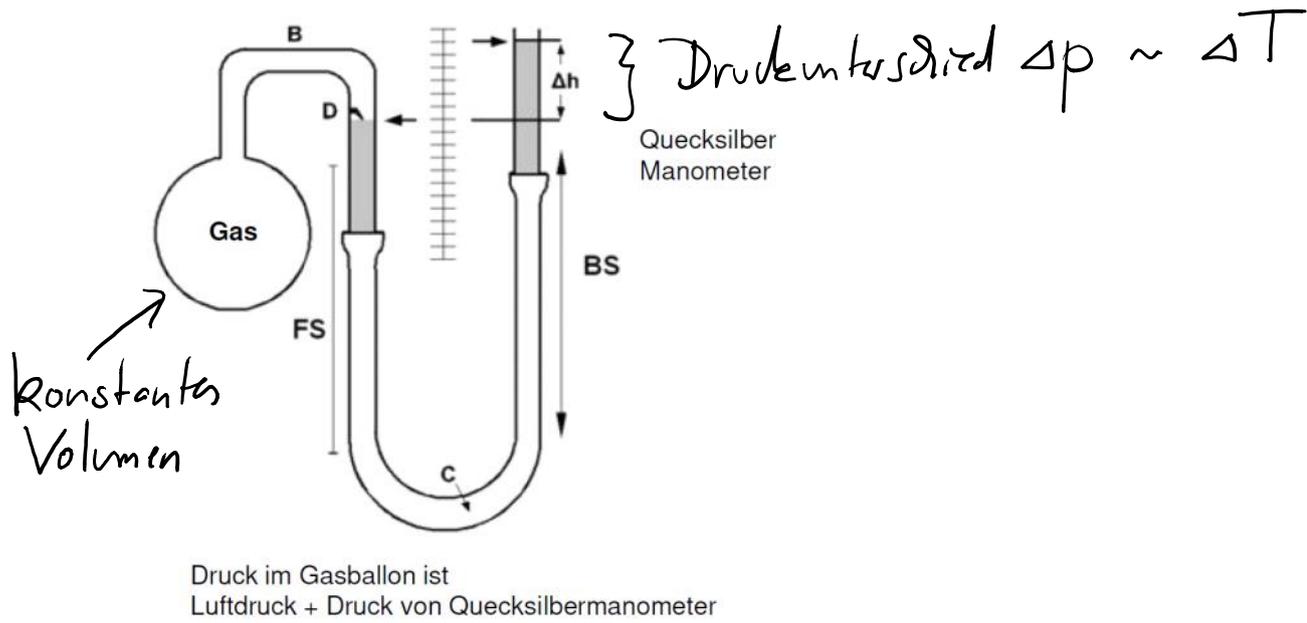
für Flüssigkeiten nur
in kleinen ΔT -Bereichen
gut!



Gasthermometer

Das Gasthermometer

(nach Jolly)



Ausdehnungs-Thermometer

Längen-Ausdehnung von Metallen:

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad \text{Ausdehnung-Koeffizient}$$

$$\alpha dT = \frac{1}{L} dL$$

$$\int_{T_0}^T \alpha dT = \int_{L_0}^L \frac{1}{L} dL$$

falls $\alpha \neq f(T)$:

$$\alpha \cdot \underbrace{(T - T_0)}_{\Delta T} = \ln \frac{L}{L_0} \rightarrow \frac{L}{L_0} = e^{\alpha \Delta T} \rightarrow L = L_0 \cdot e^{\alpha \Delta T}$$

falls $\alpha \cdot \Delta T \ll 1$:

$$L(T) \approx L_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad \text{oder} \quad \frac{L(T) - L_0}{L_0} = \alpha \Delta T = \frac{\Delta L}{L_0}$$

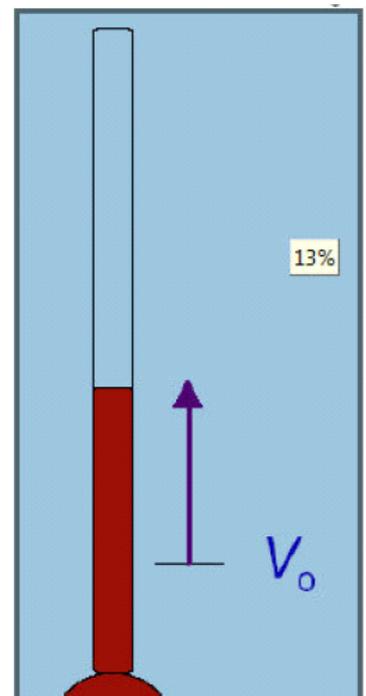
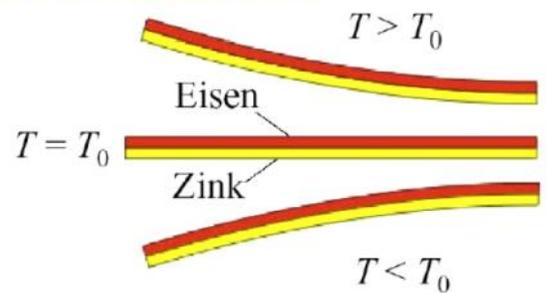
Volumenänderung $V(T) = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta T)$

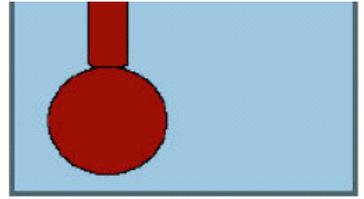
$$V(T) - V_0 = \Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

$$\Delta V = A \cdot \underline{\Delta l} = \gamma \cdot V_0 \cdot \underline{\Delta T}$$

$$\Delta l \sim \Delta T$$

Bimetallthermometer





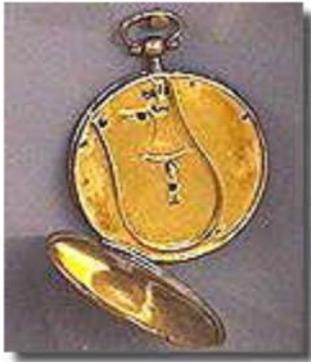
Weitere Thermometer

Weitere Thermometer

Galileo Thermometer

Dichte der Flüssigkeit ändert sich mit der Temperatur

$$\left(\text{Metalle} \sim 4 \cdot 10^{-3} / \text{K} \right)$$



Dänisches Bimetall-Taschenthermometer
(Rückseite geöffnet, Dt. Museum, München)

Widerstandsthermometer

Widerstand von Metallen ändert sich mit der Temperatur
(Platin: -160°C bis 660°C)



Celsius



Anders Celsius (1701-1744)

Professor in Uppsala für Astronomie

1736 Expedition nach Lappland

1741 Celsius Observatorium erstellt

Temperaturskala, Helligkeit der Sterne, Polarlicht

Absolute Temperatur T

Kelvin-Skala:

Einheit 1K = 1 Kelvin, „absolute thermodynamische Temperaturskala“
 absoluter Nullpunkt $T = 0 \text{ K}$

Celsius-Skala:

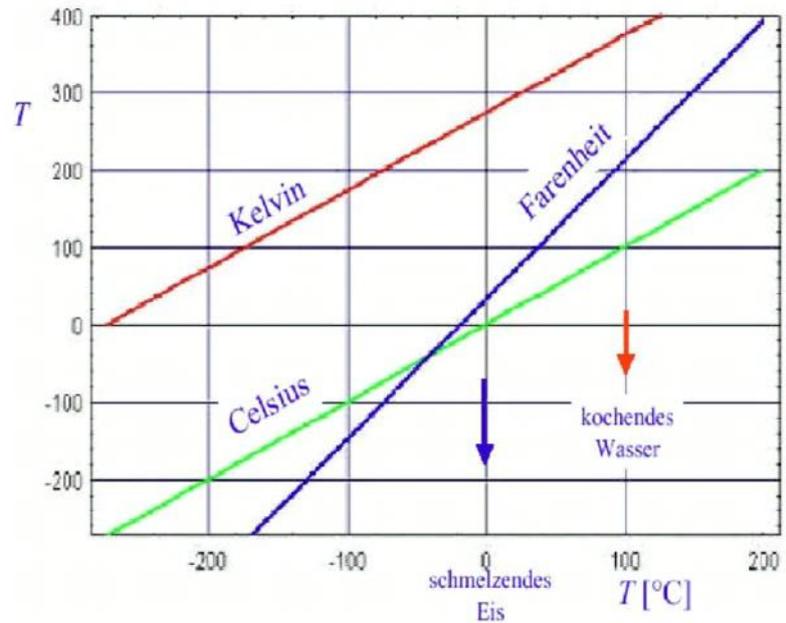
$\vartheta [^{\circ}\text{C}]$ mit $[^{\circ}\text{C}] = \text{„Celsius“}$:
 $0 [^{\circ}\text{C}] : T_m (\text{H}_2\text{O})$
 $100 [^{\circ}\text{C}] : T_s (\text{H}_2\text{O})$

Fahrenheit-Skala:

$\vartheta [^{\circ}\text{F}]$ mit $[^{\circ}\text{F}] = \text{„Fahrenheit“}$:
 $0 [^{\circ}\text{F}] : \text{Salmiak/Schnee Mischung}$
 $100 [^{\circ}\text{F}] : \text{Körpertemperatur}$

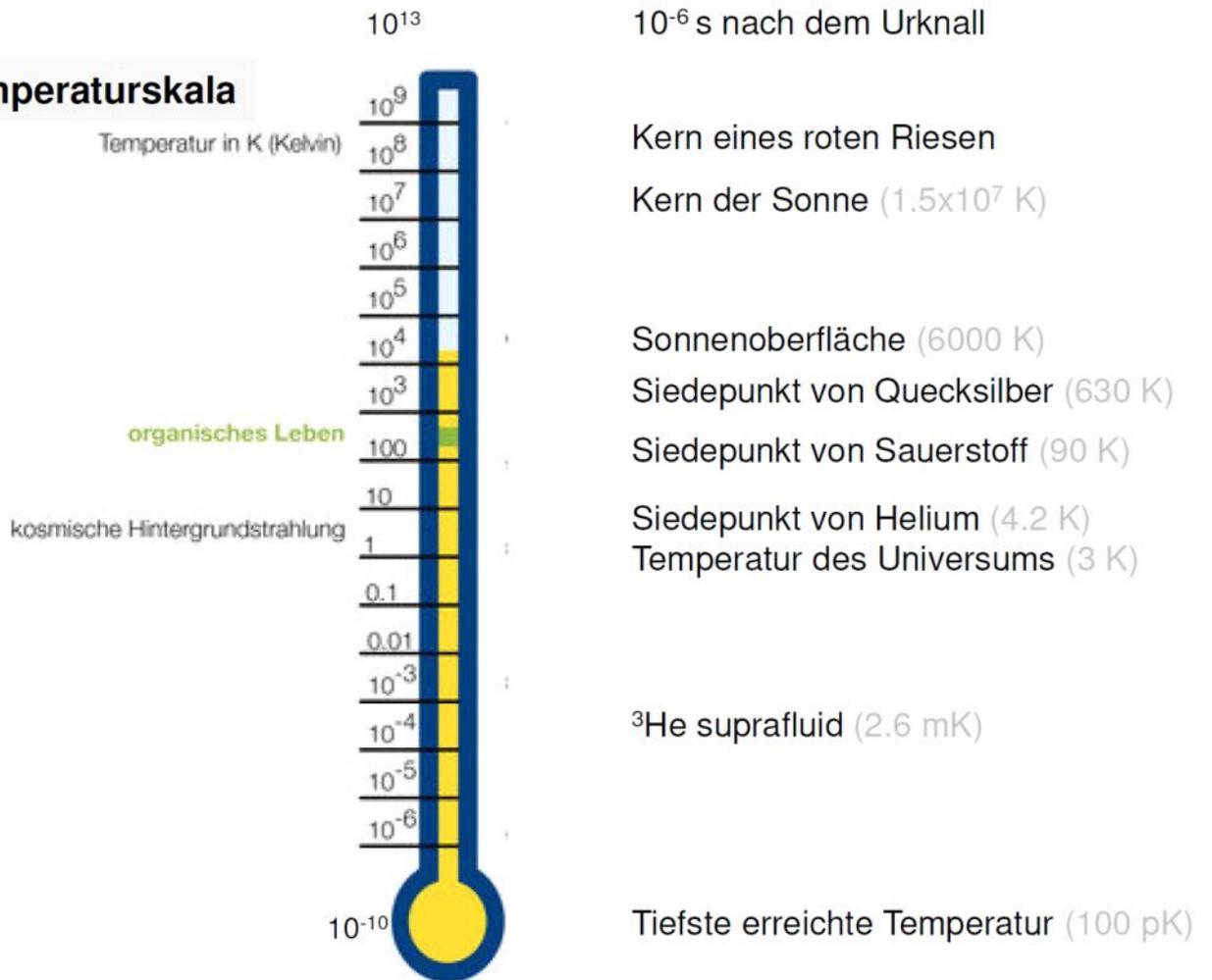
$$\frac{T_F}{[^{\circ}\text{F}]} = \frac{9}{5} \times \frac{T_C}{[^{\circ}\text{C}]} + 32$$

$$\begin{array}{ll} 0^{\circ}\text{F} \leftrightarrow -17.8^{\circ}\text{C} & 0^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 32^{\circ}\text{F} \\ 100^{\circ}\text{F} \leftrightarrow 37.8^{\circ}\text{C} & 100^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 212^{\circ}\text{F} \end{array}$$



T-Bereiche

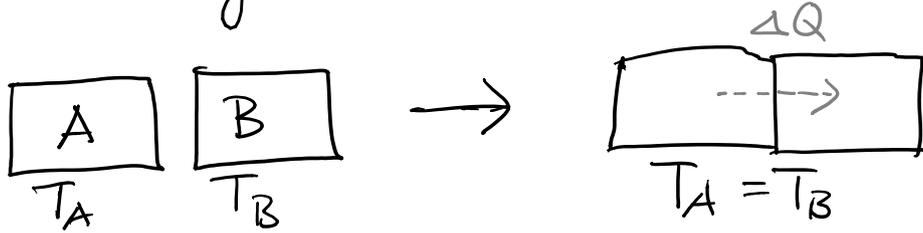
Temperaturskala



Wärme Q

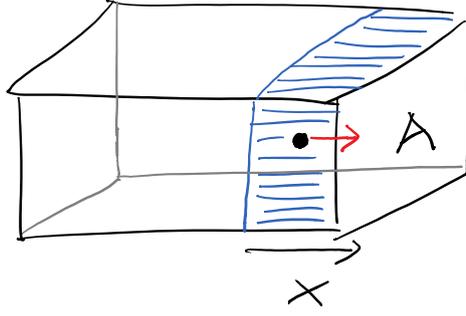
Energieform [J] oder [kJ/mol]

ist im Gegensatz zu T keine Zustandsfunktion!



Wärmemenge ΔQ fließt vom wärmeren zum kälteren Körper ist aber keine Zustandsgröße, da sie auch in Arbeit W umgewandelt werden kann!

Betrachte ideales Gas
in einer Box



$\frac{1}{3}$ der Teilchen in $\pm x$ -Richtung

$\frac{1}{6}$ der Teilchen in $+x$ -Richtung

Stöße auf Wand A in der Zeit dt : $\frac{1}{6} N \cdot A \cdot \underbrace{\bar{v} \cdot dt}_{\text{Moleküle die Wand erreichen}}$

$$N: \frac{\text{Teilchen}}{\text{Volumen}}$$

Berechnung des Druckes auf die Wand:

Impuls eines Moleküls $p_M = m\bar{v}$

Impulsübertrag auf Wand $p_W = 2m\bar{v}$

Gesamtimpuls auf Wand A während der Zeit dt :

$$dp_W = 2 \cdot m\bar{v} \cdot \frac{1}{6} N \cdot A \bar{v} dt$$

Kraft auf die Wand:

$$F = \frac{dp_W}{dt} = \frac{1}{3} m\bar{v}^2 \cdot N \cdot A$$

Druck auf Wand

$$p = \frac{F}{A} = \frac{1}{3} m\bar{v}^2 N$$

Unter Normalbedingungen

$$N = N_L \quad \text{und} \quad V = V_{\text{mol}} \\ (6 \cdot 10^{23}) \quad (22.4 \text{ l})$$

$$p = \frac{1}{3} m\bar{v}^2 \frac{N_L}{V_{\text{mol}}}$$

oder

$$p \cdot V_{\text{mol}} = \frac{1}{3} m\bar{v}^2 N_L$$

Vergleiche mit idealem Gasgesetz

$$p \cdot V_{\text{mol}} = R \cdot T$$

Vergleiche mit idealem Gasgesetz $p \cdot v_{\text{mol}}$

$$\hookrightarrow T = \frac{1}{3} m \bar{v}^2 \frac{N_L}{R} \quad T \sim \bar{v}^2$$

mit $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$ folgt $\frac{R}{N_L} T = \frac{2}{3} E_{\text{kin}}$
 k_B : Boltzmann Konstante $1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

$$\frac{3}{2} k_B T = E_{\text{kin}}$$

Zusammenhang zw. kin. E
und T

Reale Gase

Eigenvolumen + Anziehung zw. Molekülen

Anziehungskräfte \rightarrow vermindertes Außendruck

$$P_{\text{ideal}} = P_{\text{real}} + P_{\text{Anzichg}}$$

$$P_{\text{Anzichg}} \sim c^2 \equiv \frac{a}{V_{\text{mol}}^2}$$

Ausdehnung der Moleküle \rightarrow vermindertes Volumen

$$V_{\text{ideal}} = V_{\text{real}} - V_{\text{eigen}}$$

$$V_{\text{eigen}} = \frac{4\pi}{3} (2r)^3 \equiv b$$

$$\left(P + \frac{a}{V_{\text{mol}}^2} \right) \cdot (V_{\text{mol}} - b) = RT$$

van der Waals Gleichung

a, b : van-der-Waals
Parameter
(Molekülspezifisch)

vanderWaals



Johannes Diderik van der Waals
(1837-1923)

1861-1877 Grundschullehrer
1873 Promotion
1877 Professor in Amsterdam
1891 Professor in Leiden
1910 Nobelpreis für Physik

Reale Gase
Gas/Flüssig Phasenübergang
Van der Waals Kräfte
Verflüssigung von Edelgasen
(zusammen mit
Kammerlingh Onnes)
Mischphasen
Kapillarkräfte

