

# Kap. 8 Thermodynamik



1. Temperatur und Wärmeenergie
2. Wärmeleitung und Diffusion
3. Hauptsätze der Thermodynamik
4. Reale Gase

# 8.1. Temperatur

**Wärmeenergie** = kinetische Energie der **ungeordneten** Atombewegung

**Temperatur**  $\leftrightarrow$  **mittlere** kinetische Energie dieser Atombewegung

Definition: Seien  $m$  die Masse,  $\langle v^2 \rangle$  die mittlere quadratische Geschwindigkeit einer Population von Atomen (Molekülen, ...).

Dann ist die **Temperatur T** des Systems definiert durch

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT \quad [T] = 1 \text{ K} = 1 \text{ Kelvin}$$

**Boltzmann-Konstante:**  $k \equiv k_B = 1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

**Nachteil:** Ungeeignet als Messvorschrift

# 8.1. Temperaturmessung

a) Wärmeausdehnung → Quecksilber- / Alkoholthermometer

b) T-abhängiger elektrischer Widerstand

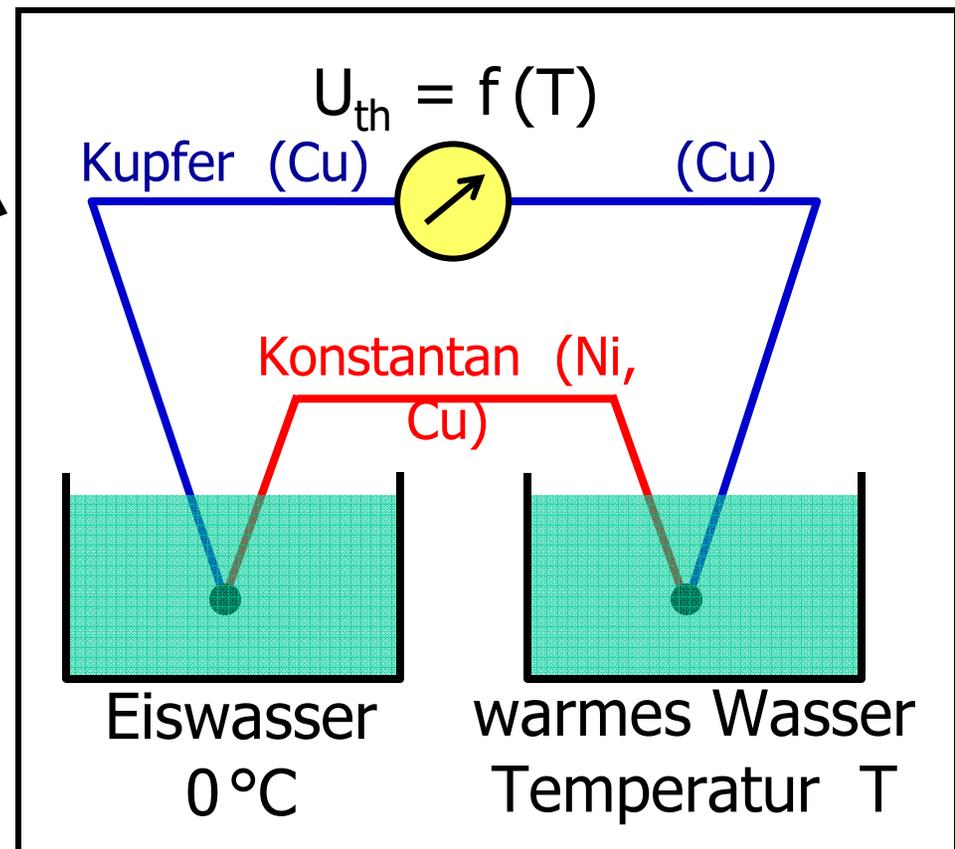
c) Thermospannung  
→ Thermoelement

d) Wärmestrahlung

Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$P \propto T^4$$

→ Pyrometer



# 8.1. Thermische Ausdehnung



$$r = r(T)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta r}{r} = \frac{r(T + \Delta T) - r(T)}{r(T)}$$

$$\Delta T \ll T \Rightarrow \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$$

Linearer Ausdehnungskoeffizient  $\rightarrow \alpha \approx \frac{r'(T)}{r(T)}$

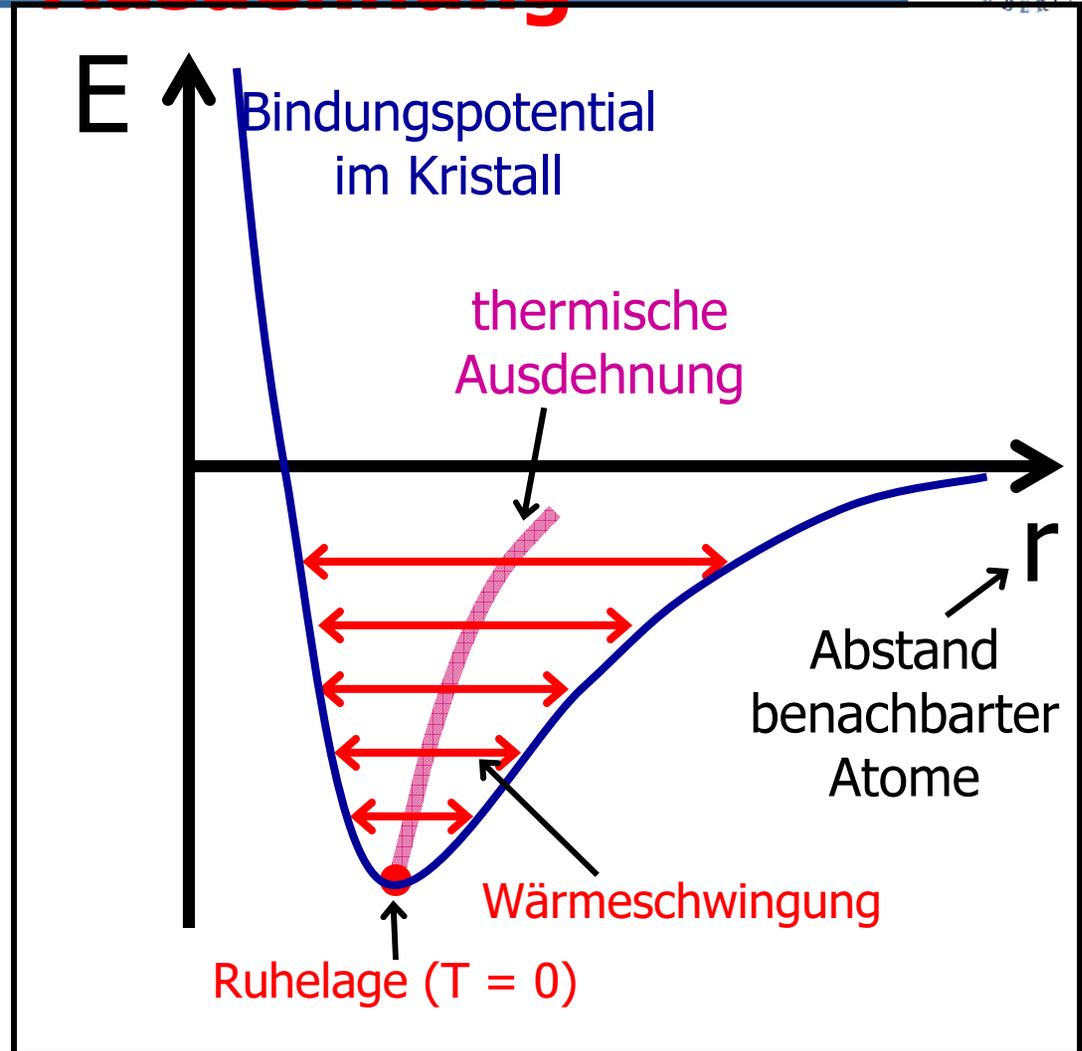
$[\alpha] = 1^\circ\text{C}^{-1}$

Volumenausdehnung:

$$V \propto L^3 \Rightarrow \frac{dV}{V} = 3 \frac{dL}{L}$$

$$\Rightarrow \frac{dV}{V} = \gamma \cdot \Delta T$$

$$\gamma = 3\alpha = \text{linearer Raumausdehnungskoeffizient}$$



## 8.1. Gasthermometer

Ideale Gase (s.u.)  $\Rightarrow$

a)  $V(T_C) = V_0 (1 + \gamma_V T_C)$  bei  $p = \text{const.}$

$T$  in  $^{\circ}\text{C}$

$V$  bei  $T_C = 0^{\circ}\text{C}$

b) **Gay-Lussac-Gesetz**

$p(T_C) = p_0 (1 + \gamma_p T_C)$  bei  $V = \text{const.}$

$p$  bei  $T_C = 0^{\circ}\text{C}$

Experimenteller Befund  $\gamma_V = \gamma_p \equiv \gamma = \frac{1}{273,15^{\circ}\text{C}}$

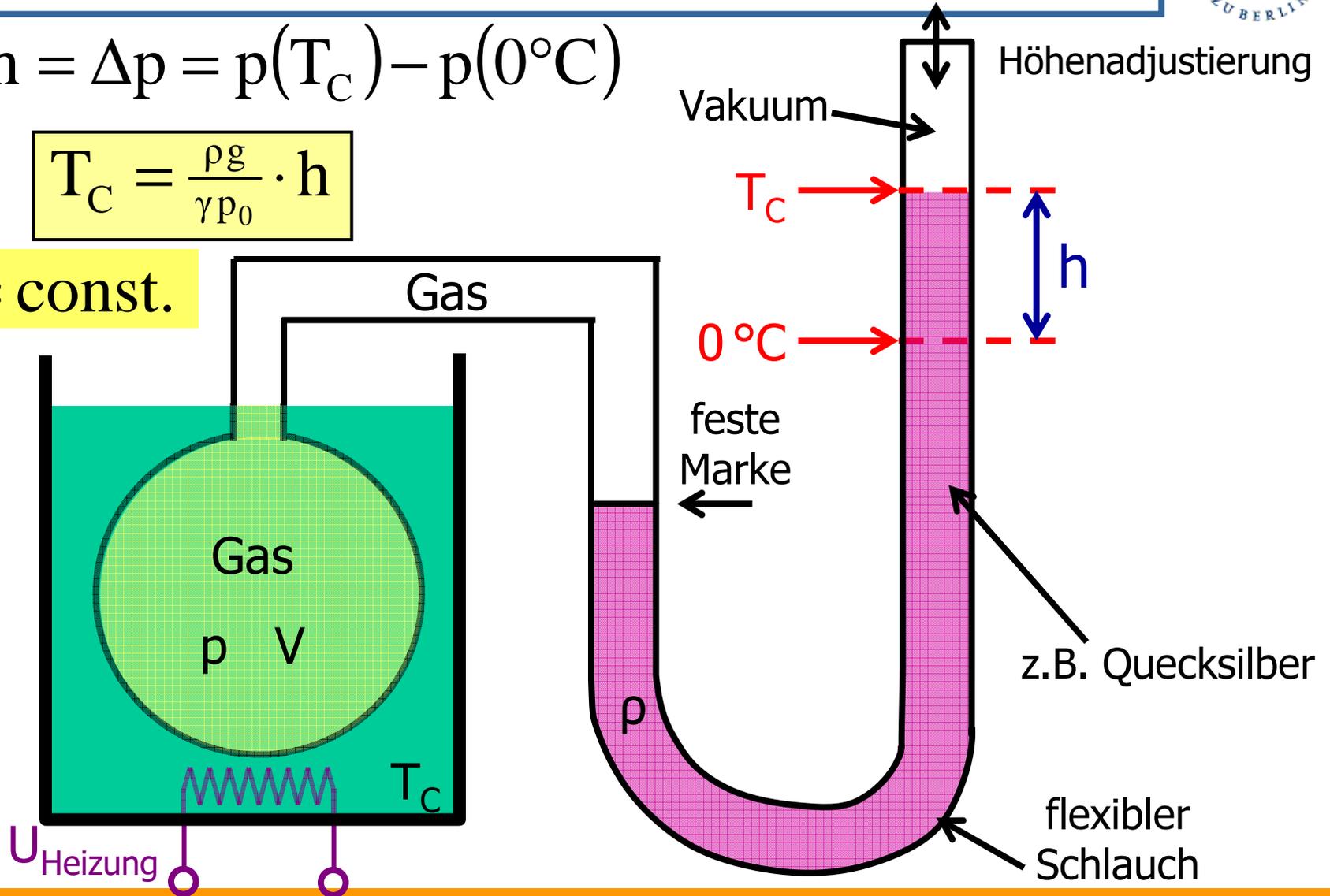
Gasthermometer:  $V = \text{const.} \Rightarrow T_C = \frac{1}{\gamma} (p(T_C) - p_0)$

# 8.1. Gasthermometer

$$\rho g h = \Delta p = p(T_C) - p(0^\circ\text{C})$$

$$\Rightarrow T_C = \frac{\rho g}{\gamma p_0} \cdot h$$

$V = \text{const.}$



# 8.1. Die Celsius-Skala

( bei Normaldruck von  $1 \text{ atm} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ Torr}$  )

$T_C$ -Skala:

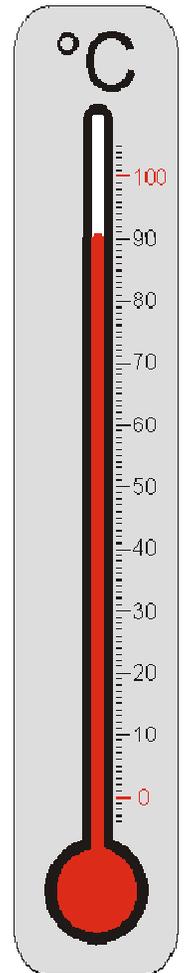
$$1^\circ\text{C} = \frac{1}{100} (T_S - T_F)$$

( z.B. auf Quecksilbersäule )



Definition: Fixpunkte der Celsius-Skala

Gefrierpunkt	von $\text{H}_2\text{O}$ :	$T_F = 0^\circ\text{C}$	} $^\circ\text{C} = \text{Grad Celsius}$
Siedepunkt	von $\text{H}_2\text{O}$ :	$T_S = 100^\circ\text{C}$	



Hierzu verwendet: Ausdehnung flüssiger / fester Körper

## 8.1. Absolute Temperatur

**Definition: Absolute Temperatur**  $T$ ,  $[T] = 1 \text{ K} = 1 \text{ Kelvin}$

$$\text{a) } T = 0 \text{ K} \iff p = 0$$

$$\text{b) } \Delta T = \Delta T_C$$

Aus Gay-Lussac-Gesetz

$$p(T_C) = p_0 (1 + \gamma_p T_C) \quad \text{bei } V = \text{const.}$$

folgt:  $p = 0 \iff T_C = -\frac{1}{\gamma_p} = -273,15^\circ\text{C}$

Folgerung:

$$T [\text{K}] = 273,15 + T_C [^\circ\text{C}]$$

# 8.1. Temperaturskalen

## Celsius Skala:

- 0.01°C: Trippelpunkt von Wasser
- 100°C: Siedepunkt von Wasser

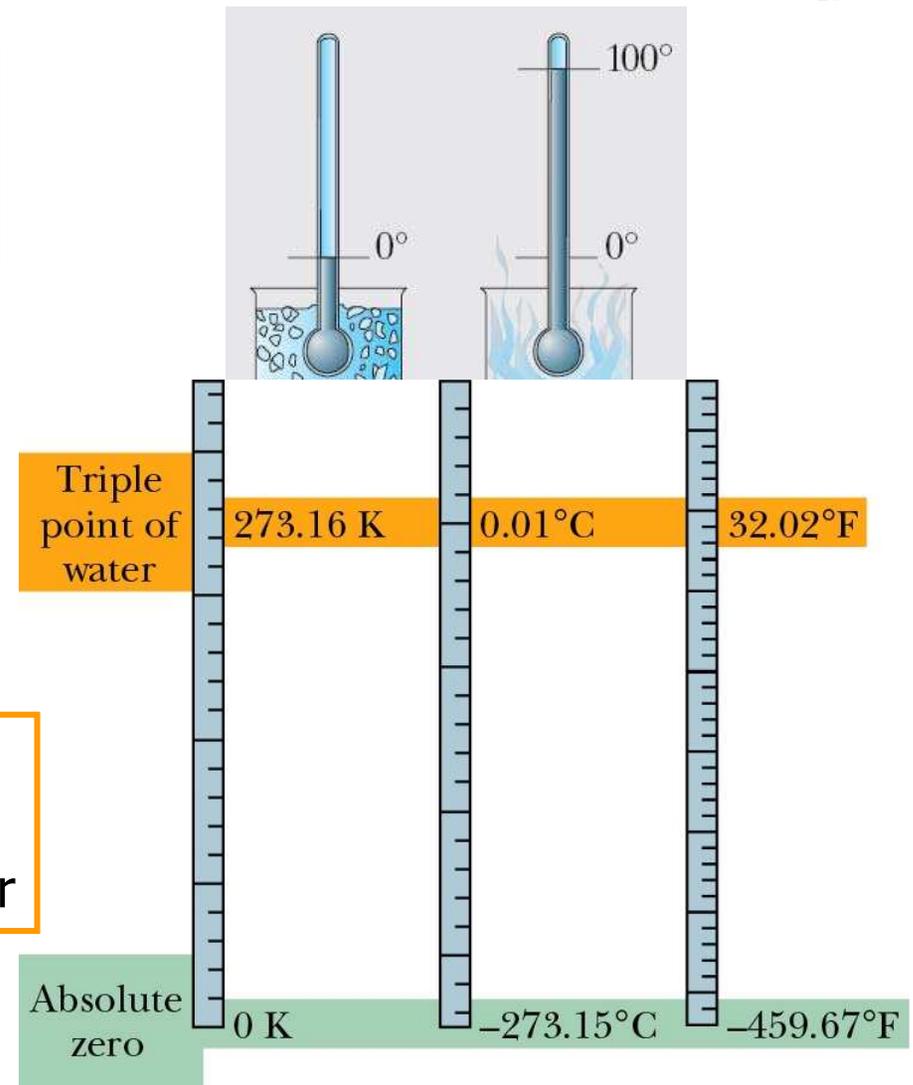
## Fahrenheit Skala:

- 0 °F: Eis / Salz Mischung
- 212°C: Siedepunkt von Wasser

$$T_C = \frac{5}{9} (T_F - 32^\circ)$$

## Kelvin Skala:

- 0 K: Absoluter Nullpunkt
- 273.15°C: Trippelpunkt von Wasser



## 8.1. Wärmemenge

Zuführung der Wärmemenge  $Q \Rightarrow$  Temperaturänderung  $\Delta T$

**Definition (alte Einheit):** 1 kcal = 1 Kilokalorie ist diejenige Wärmemenge, die benötigt wird, um 1kg Wasser bei Normaldruck von  $14,5^\circ\text{C}$  auf  $15,5^\circ\text{C}$  zu erwärmen.

Umwandlung elektrischer Energie in Wärme  $\Rightarrow$

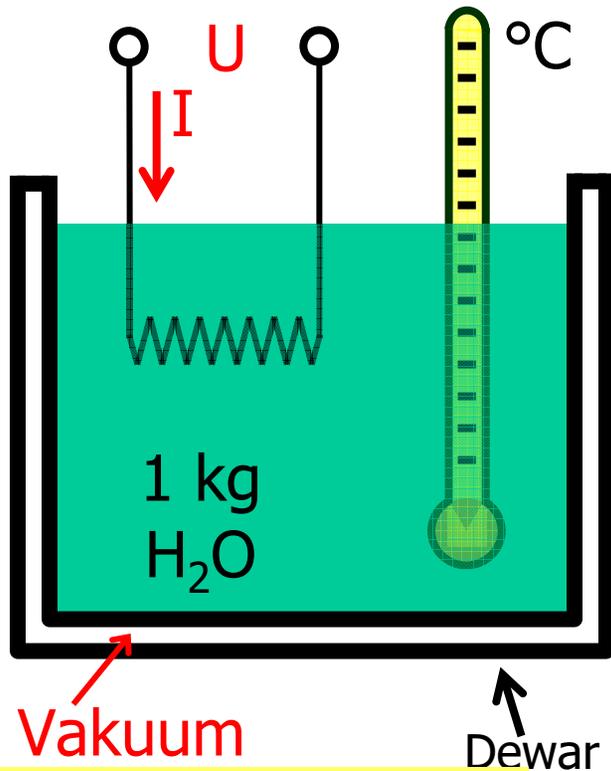
elektrisches Wärmeäquivalent  $1\text{kcal} = 4,186 \text{ kWs}$

Umwandlung mechanischer Energie in Wärme  $\Rightarrow$

mechanisches Wärmeäquivalent  $1\text{kcal} = 4,186 \text{ kJ}$

# 8.1. Wärmeäquivalent

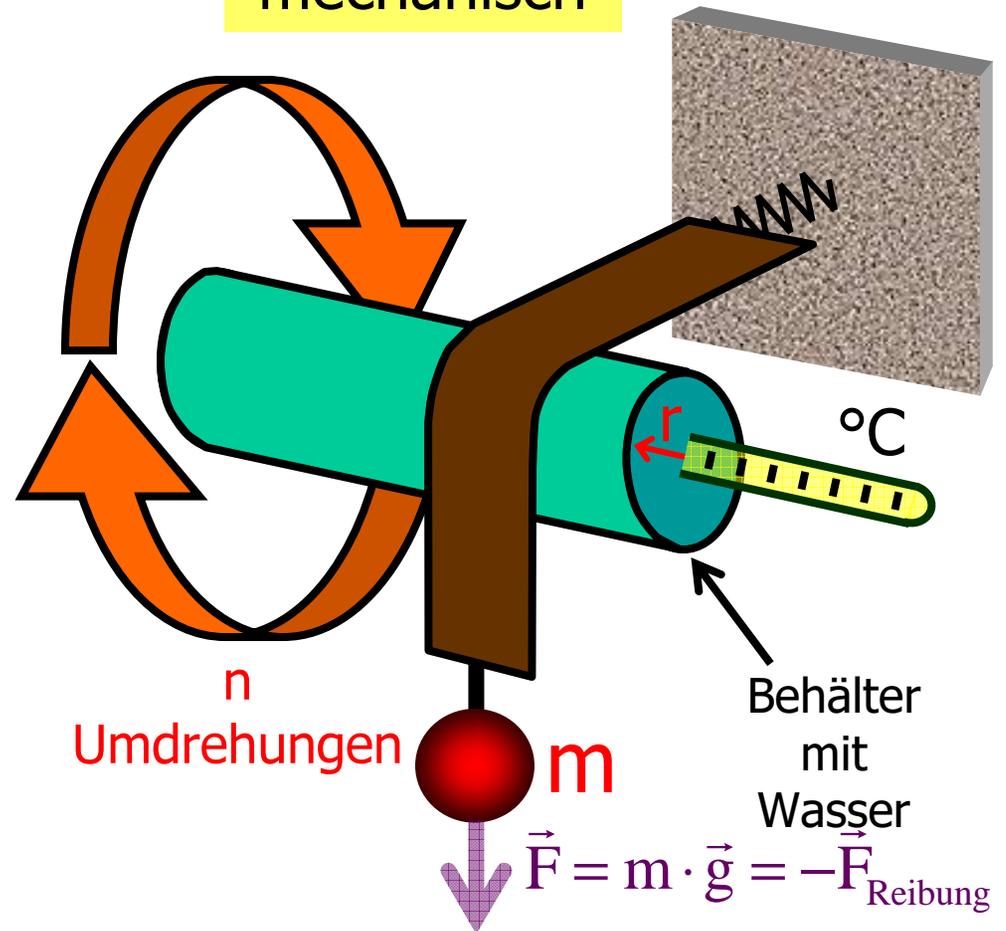
elektrisch



$$\Delta W = U \cdot I \cdot t = \Delta Q$$

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kWs} = 4,186 \text{ kJ}$$

mechanisch



$$\Delta W = n \cdot 2\pi r \cdot mg = \Delta Q$$

## 8.1. Spezifische Wärmekapazität

**Definition:** Spezifische Wärme  $c$  eines Materials:

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

$[c] = \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

Masse des Systems  
spezifische Wärme  
i.a. ist  $c = c(T)$

**Definition:** Wärmekapazität  $C$  eines Systems:

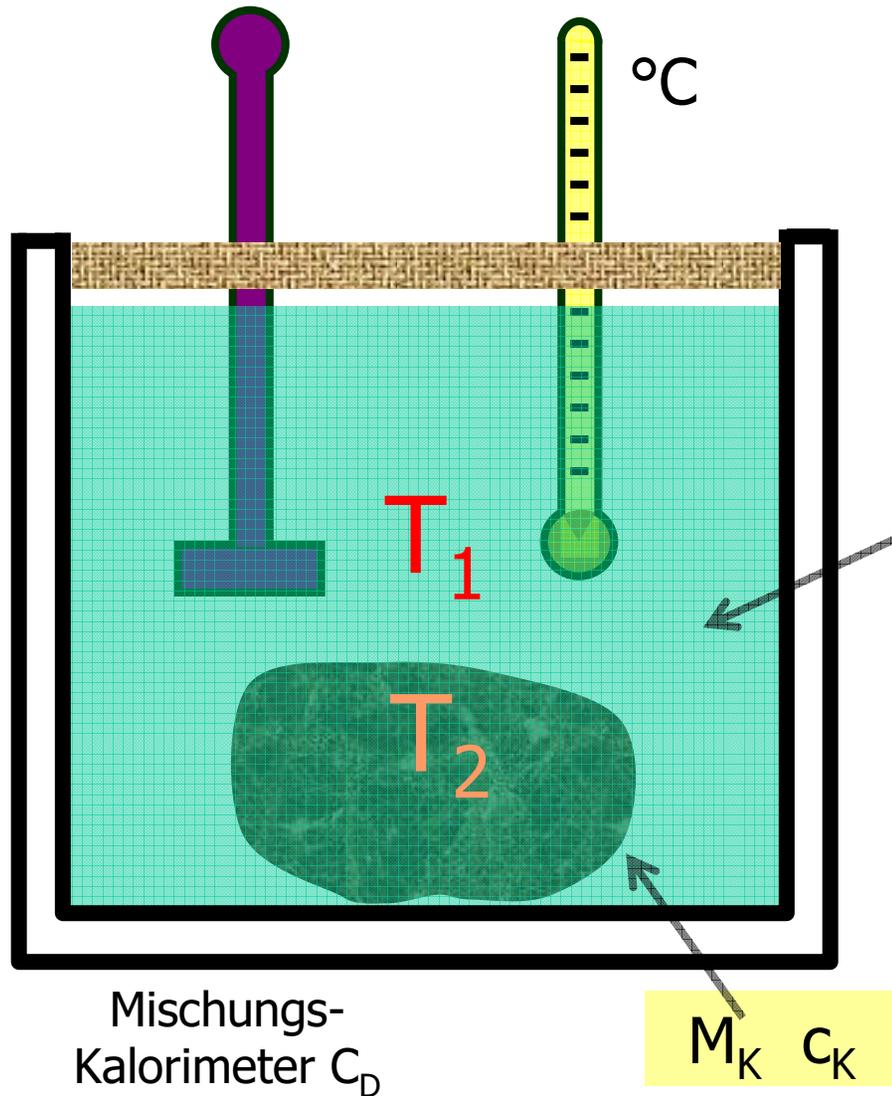
$$C = c \cdot M \quad [C] = \text{J K}^{-1}$$

**Definition:** Spezifische Molwärme  $C_{\text{mol}}$  eines Materials:

$$C_{\text{mol}} = c \cdot M_{\text{mol}}, \quad M_{\text{mol}} = \text{Masse von 1 Mol}$$

Die Anzahl der Moleküle in der Stoffmenge von 1 Mol ist gleich der Anzahl der  $^{12}\text{C}$ -Atome in 12 g des Kohlenstoff-Isotops  $^{12}\text{C}$ . Diese Zahl lautet: **Avogadro-Konstante**  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

# 8.1. Messung Spezifischer Wärmen



$$\Delta Q = M_K c_K (T_2 - T_M)$$

$$= (M_W c_W + C_D)(T_M - T_1)$$

$$\Rightarrow c_K = \frac{(M_W c_W + C_D)(T_M - T_1)}{M_K (T_2 - T_M)}$$

$H_2O$   
 $M_W$   $c_W$

Anfang:  $T_2 > T_1$

Ende:  $\tilde{T}_1 = \tilde{T}_2 = T_M$