

Temperatur

Wärme ist Form von mechanischer Energie.

Umwandlung Wärme \leftrightarrow mechanische Energie ist möglich!

Thermometer

Messung der absoluten Temperatur ist aufwendig.

Menschliche Sinnesorgane sind schlechte "Thermometer" !

- Ausdehnung fester oder flüssiger Körper
- Änderung des elektrischen Widerstands
- Änderung der Kontaktspannung
- Strahlungsleistung (Farbe)

E. Riedle

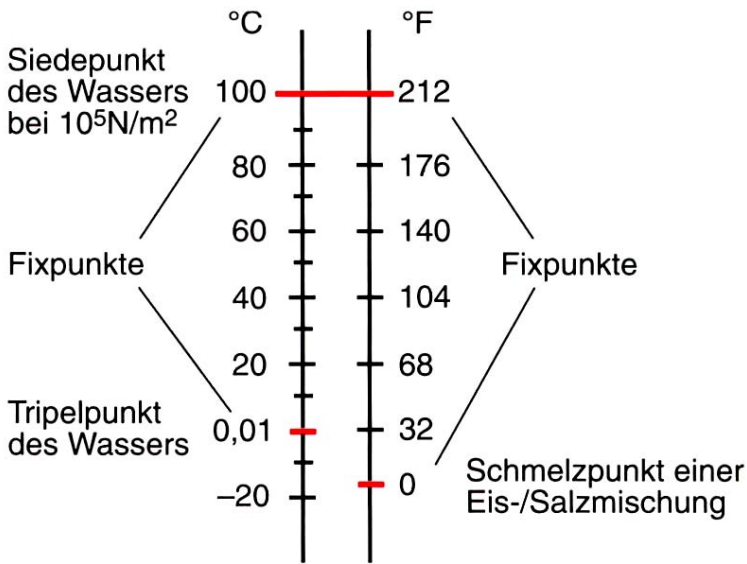
Physik^{LMU}

Gebräuchliche Thermometer

| Thermometertyp | Temperaturbereich / °C | Meßprinzip | Fehlergrenzen |
|--------------------------------|--|---|--|
| <i>Flüssigkeitsthermometer</i> | | | |
| Quecksilber | - 38 bis + 800 | thermische Ausdehnung der Flüssigkeit in einer Glas-Kapillare | je nach Skaleneinteilung 0,1 bis 1 °C |
| Alkohol | - 110 bis + 210 | | |
| Pentangemisch | - 200 bis \approx + 30 | | |
| <i>Festkörperthermometer</i> | | | |
| Metallstab | - 150 bis + 1000 vom Metall abhängig | thermische Ausdehnung von Metallen | 1 bis 2 % des Skalenbereichs |
| Bimetall | - 150 bis + 500 von Metallen abhängig | Differenz der thermischen Ausdehnung | |
| <i>Widerstandsthermometer</i> | | | |
| Metalldraht | - 250 bis + 1000 | Temperaturabhängigkeit des elektr. Widerstandes | 0,1 bis 1 °C |
| Halbleiter | - 273 bis + 400 | | |
| <i>Thermoelemente</i> | | | |
| Fe-CrNi | - 270 bis + 1000 | Temperaturabhängigkeit der Thermospannung | 0,01 bis 1 °C |
| Ni-CrNi | - 200 bis + 1370 | | |
| Pt-PtRh | - 50 bis + 1700 | | |
| W-WMo | - 200 bis + 3000 | Wärmestrahlung | 2 bis 20 °C |
| Pyrometer | + 800 bis + 3000 | | |

E. Riedle

Physik^{LMU}



Celsiuskala (1742)

Ausdehnung von Hg-Säule

$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ Schmelzpunkt von Wasser

$T = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ Siedepunkt von Wasser bei Normaldruck

Fahrenheitkala

$T_F = 0 \text{ } ^\circ\text{F}$ Schmelzpunkt von Eis-Wasser-Ammoniumchlorid-Kältemischung

$T_F = 100 \text{ } ^\circ\text{F}$ normale Körpertemperatur

$$0 \text{ } ^\circ\text{C} = 32 \text{ } ^\circ\text{F} \quad 100 \text{ } ^\circ\text{C} = 212 \text{ } ^\circ\text{F}$$

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

$$T_F = \left(\frac{9}{5} T_C / ^\circ\text{C} + 32 \right) \text{ } ^\circ\text{F}$$

E. Riedle

Physik ^{LMU}

Temperaturmessung ist abhängig von Flüssigkeit und Glas !

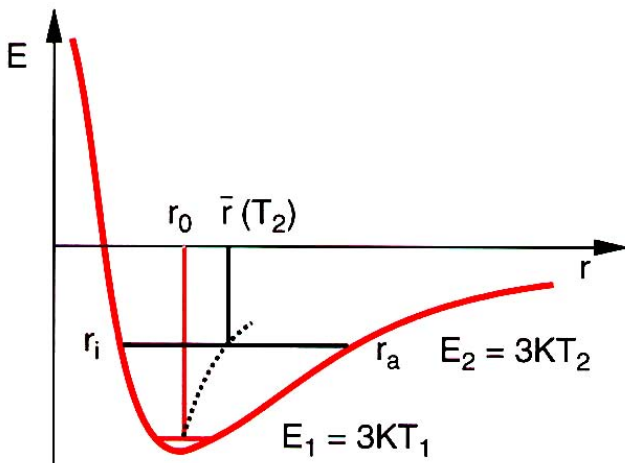
besser: **Gasthermometer**

Thermische Ausdehnung

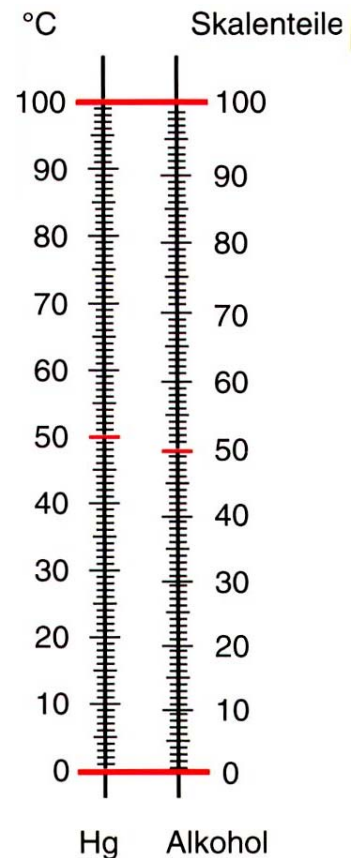
linearer Ausdehnungskoeffizient

$$L(T_C) = L(0) (1 + \alpha \cdot T_C)$$

$$\alpha = \frac{L(T_C) - L(0)}{L(0) \cdot T_C} = \frac{\Delta L}{L \cdot T_C}$$



α hängt von der Temperatur ab, d.h. $\alpha(T)$



E. Riedle

Physik ^{LMU}

Tabelle 10.2. Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe bei $T = 293\text{ K} \hat{=} T_C = 20\text{ }^\circ\text{C}$

| Feste Stoffe | Linearer Ausdehnungskoeffizient $\alpha/(10^{-6}\text{ K}^{-1})$ | Flüssige Stoffe | Räumlicher Ausdehnungskoeffizient $\gamma/(1/\text{K})$ |
|--------------|--|--|---|
| Aluminium | 23,8 | Wasser | $2,07 \cdot 10^{-4}$ |
| Eisen | 12 | Äthylalkohol | $1,1 \cdot 10^{-3}$ |
| Kupfer | 16,8 | Benzol | $1,06 \cdot 10^{-3}$ |
| Natrium | 71 | Quecksilber | $1,8 \cdot 10^{-4}$ |
| Wolfram | 4,3 | Glyzerin | $5 \cdot 10^{-4}$ |
| Invar | 1,5 | n-Pentan | $1,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Cerodur | $< 0,1$ | Wasser ($T_C = 0\text{ }^\circ\text{C}$) | $-0,7 \cdot 10^{-4}$ |
| Hartgummi | 75–100 | | |

$$V(T_C) = V_0(1 + \gamma \cdot T_C) = V_0(1 + \alpha \cdot T_C)^3 \approx V_0(1 + 3\alpha \cdot T_C) \quad [\alpha \cdot T_C \ll 1]$$

E. Riedle

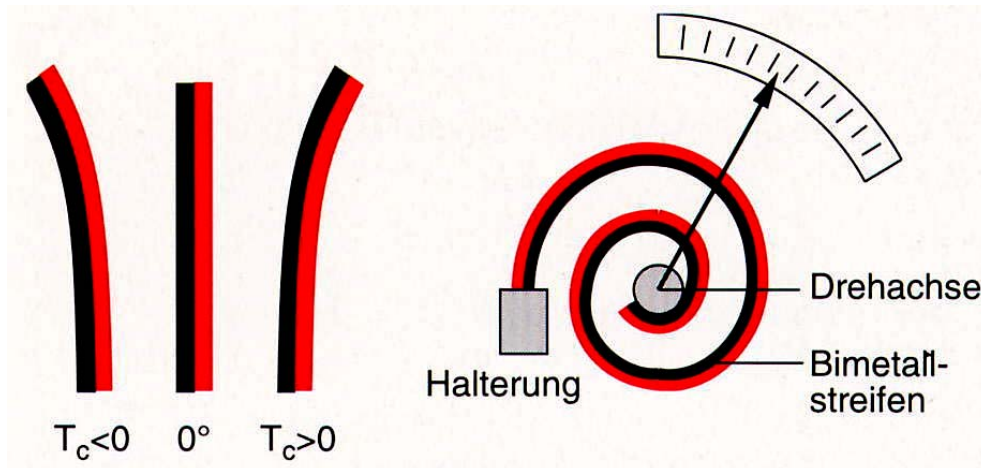
Physik ^{LMU}

Tabelle 10.3. Abhängigkeit des mittleren Ausdehnungskoeffizienten $\alpha/10^{-6}\text{ K}^{-1}$ von der Temperatur (in K)

| T/K | Al | Cu | Fe | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ |
|-----|------|------|------|--------------------------------|------------------|
| 50 | 3,5 | 3,8 | 1,3 | 0,0 | -0,86 |
| 100 | 12,0 | 10,5 | 5,7 | 0,2 | -0,80 |
| 150 | 17,1 | 13,6 | 8,4 | 1,0 | -0,45 |
| 200 | 20,2 | 15,2 | 10,1 | 2,8 | -0,1 |
| 250 | 22,4 | 16,1 | 11,1 | 4,0 | +0,2 |
| 300 | 23,8 | 16,8 | 12,0 | 5,0 | +0,4 |
| 350 | 24,1 | 17,3 | 12,6 | 6,0 | +0,5 |
| 400 | 24,9 | 17,6 | 13,2 | 6,4 | +0,55 |
| 500 | 26,5 | 18,3 | 14,3 | 7,2 | +0,58 |

E. Riedle

Physik ^{LMU}



Bimetallthermometer

Unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizient zweier Metalle führt zu Verbiegung eines "doppelten" Streifens.

E. Riedle

Physik ^{LMU}

Gasthermometer

Experiment: $V(T_C) = V_0(1 + \gamma_V \cdot T_C)$

$$\gamma_V = \frac{V(T_C) - V_0}{V_0 \cdot T_C} \quad (p \text{ const.})$$

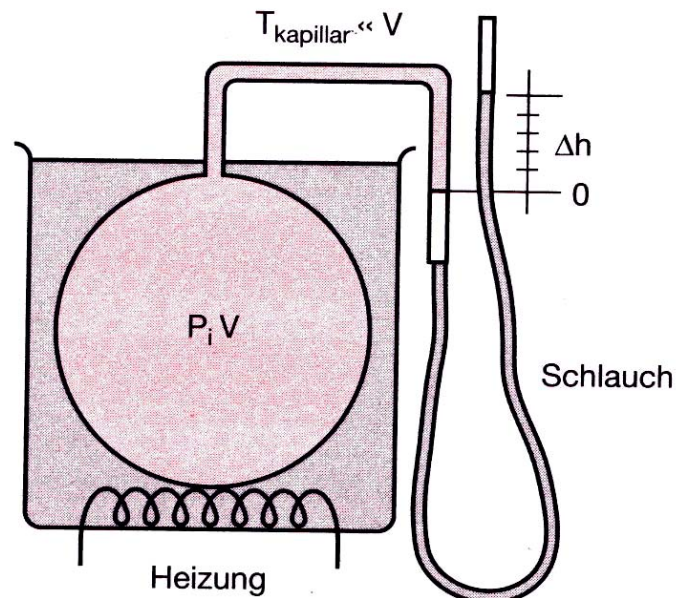
für He gilt:

$$\gamma_V = \frac{1}{273,15} \text{ °C}^{-1} = 3,660 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$$

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

$$\gamma_p = \gamma_V \equiv \gamma$$

Für Gasthermometer: $V = \text{const.}$



$$T_C = \frac{1}{\gamma} \frac{p - p_0}{p_0} = 273,15 \frac{\Delta p}{p_0} \text{ °C}$$

E. Riedle

Physik ^{LMU}

| Gas | $\gamma/(10^{-3}/K)$ |
|-----------------|----------------------|
| ideales Gas | 3,661 |
| He | 3,660 |
| Ar | 3,671 |
| O ₂ | 3,674 |
| CO ₂ | 3,726 |

Absolute Temperatur

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T$$

$$p_0 \cdot V_0 = N \cdot k \cdot T_0 \quad \text{mit} \quad T_0 = 0^\circ\text{C} \quad p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

$$p = p_0 \frac{V_0}{V} \frac{T}{T_0} = p_0 \frac{T}{T_0} \quad (V \text{ const.}) \quad \Rightarrow \quad p_0 \frac{T}{T_0} = p = p_0 (1 + \gamma \cdot T_C)$$

$$T = T_0 (1 + \gamma \cdot T_C) = T_0 + \frac{T_0}{273,15} \cdot T_C$$

Skalen werden so gewählt, daß gilt: $\Delta T = 1 \text{ K}$ entspricht $\Delta T_C = 1 \text{ Grad}$

$$\Rightarrow \quad T_0 = 273,15 \text{ K} \quad T / \text{K} = 273,15 + T_C / ^\circ\text{C} \quad T \text{ immer positiv !}$$

E. Riedle

Physik^{LMU}

Wärmemenge und spezifische Wärme

Zugeführte Energie ΔW führt zu proportionaler Erwärmung ΔT

- Tauchsieder (elektrische Energie) $\Delta W = I U \Delta t$
- Sonnenstrahlung (optische Energie = Licht)

ΔT abhängig von Material und Masse M

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

c spezifische Wärme

ΔQ Änderung der **Wärmemenge** Q

Definition: 1 kcal = Wärmemenge die benötigt wird, 1 kg H₂O = 1 große Kalorie von 14,5 °C auf 15,5 °C zu erwärmen

Messung für elektrische Energie ergibt: $W \ddot{A}_{el} = \frac{\Delta Q}{\Delta W_{el}} = 4,186 \text{ kWs} / \text{kcal}$

Mechanische Arbeit + Reibung → **Wärme**

E. Riedle

Physik^{LMU}

Innere Energie und spezifische Molwärme idealer Gase

$$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ Teilchen / Mol}$$

$$V_M = 22,4 \text{ dm}^3 \text{ Molvolumen}$$

$$p \cdot V_M = N_A \cdot k \cdot T = R \cdot T$$

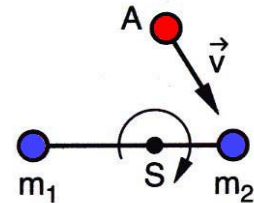
$$R = N_A \cdot k = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \text{ allgemeine Gaskonstante}$$

$$\Delta Q = c \cdot M_M \cdot \Delta T = C \cdot \Delta T$$

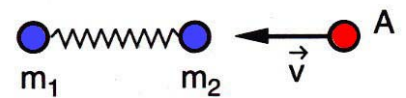
M_M molare Masse C spezifische Molwärme

für konstantes Volumen:

- innere Energie = gesamte Energie der Moleküle
- z.B. kinetische und potentielle Energie, Rotation, Schwingung
- Zahl der **Freiheitsgrade** f $U = \frac{1}{2} f \cdot N_A \cdot k \cdot T = \frac{1}{2} f \cdot R \cdot T$
- gleichmäßige Verteilung durch Stöße



Rotations-Anregung



Schwingungs-Anregung

E. Riedle

Physik ^{LMU}

$$\Delta U = \Delta Q \quad (\text{zugeführte Wärme}) \quad C_V \cdot \Delta T = \Delta Q = \Delta U = \frac{1}{2} f \cdot R \cdot \Delta T$$

$$C_V = \frac{1}{2} f \cdot R$$

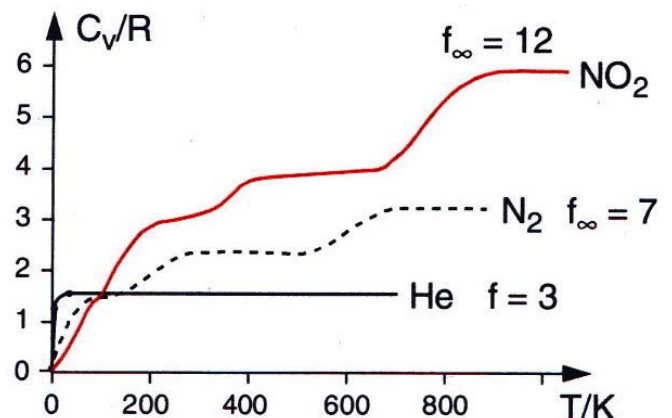
spezifische Molewärme bei konstantem Volumen

- 2 Freiheitsgrade pro Schwingung, da kinetische Energie + potentielle Energie
- 2 oder 3 Freiheitsgrade für Rotation
- 3 Freiheitsgrade für Translation

$$f = f_{\text{trans}} + f_{\text{rot}} + f_{\text{vib}}$$

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{1}{2} f_{\text{eff}} \cdot R$$

Quantisierung macht nicht alle Freiheitsgrade zugänglich

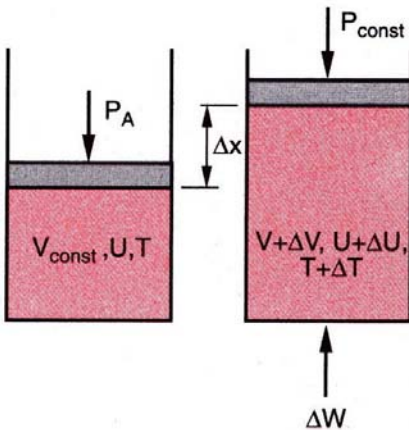


E. Riedle

Physik ^{LMU}

Spezifische Wärme bei konstantem Druck

ΔT ergibt Δp für p konstant ΔV



Verschiebung des Stempels um Δx gegen $F = p \cdot A$

Arbeit $\Delta W = F \cdot \Delta x = p \cdot A \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V$

$$\Rightarrow \Delta Q = C_V \cdot \Delta T + p \cdot \Delta V$$

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

$$p \cdot (V + \Delta V) = R \cdot (T + \Delta T)$$

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

$$\Rightarrow \Delta Q = (C_V + R) \Delta T = C_p \cdot \Delta T$$

$$C_p = C_V + R = \frac{1}{2}(f + 2) \cdot R$$

spezifische Wärme bei konstantem Druck

Adiabatenindex κ

$$\kappa = \frac{C_p}{C_V} = \frac{f + 2}{f}$$

Spezifische Wärme fester Körper

Bei sinkender Temperatur werden
alle Stoffe flüssig und fest (außer He)

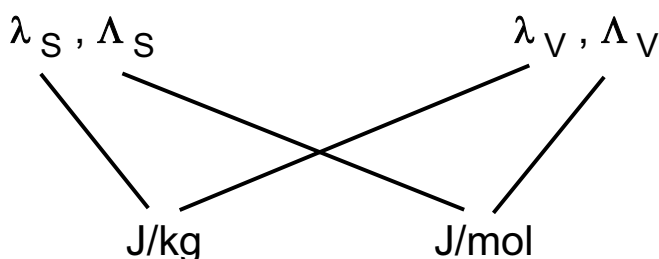
Zahl der Freiheitsgrade ? $f_{\text{trans}} = f_{\text{rot}} = 0$

nur Schwingungen im "Kristall" (longitudinal und transversal)

Grenzwert für T groß: Dulong-Petitsches Gesetz

$$C_V = 6 \cdot \frac{1}{2} N_A k = 3 R$$

Schmelzwärme und Verdampfungswärme



Erhöhung
der **potentiellen** Energie

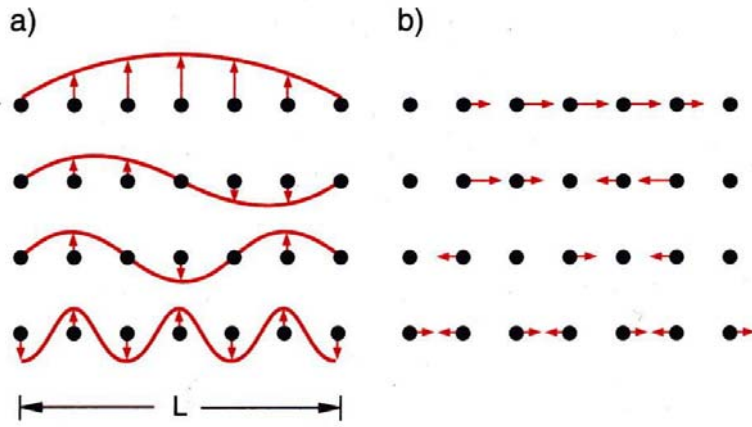
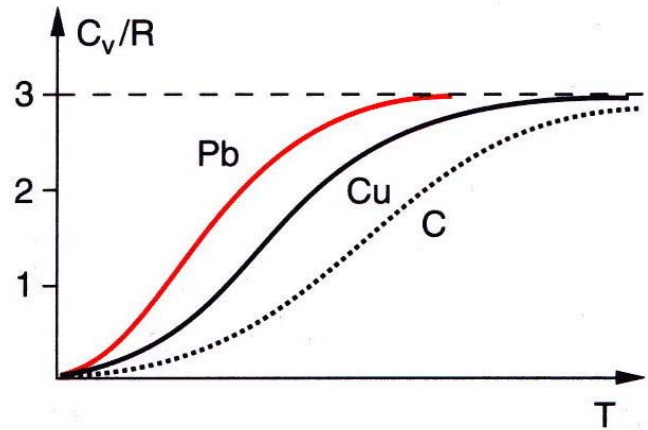
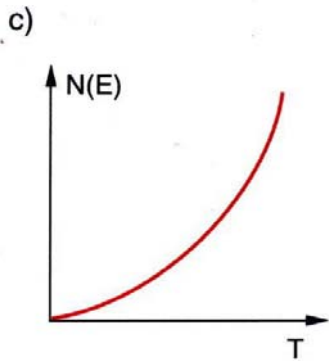
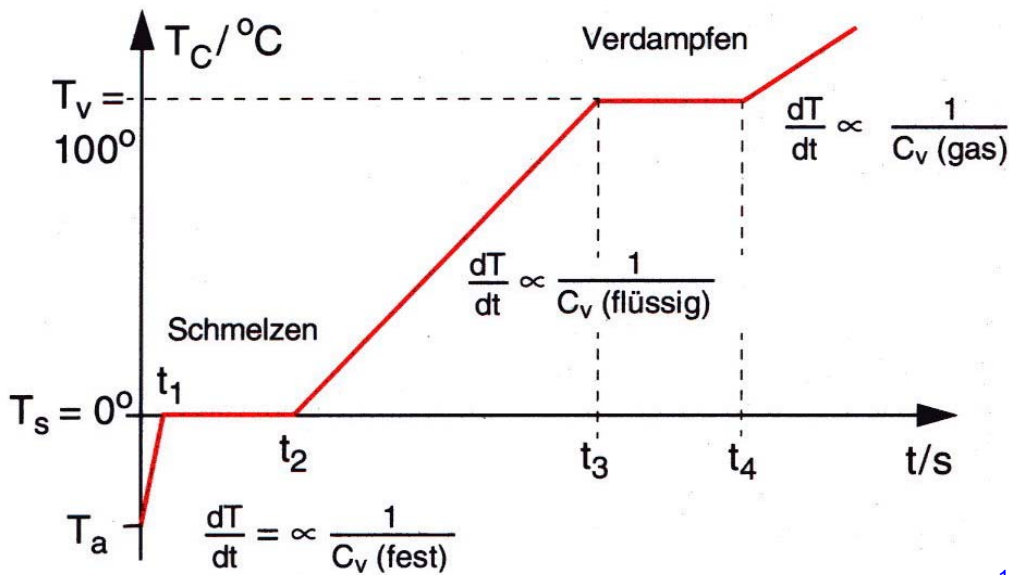


Abb. 10.16a–c. Mögliche stationäre Schwingungen einer eindimensionalen Anordnung von Teilchen (lineare Kette): (a) transversale; (b) longitudinale stehende Wellen; (c) Zahl der Schwingungen pro Energieintervall eines festen Körpers als Funktion der Temperatur



E. Riedle

Physik ^{LMU}



| Stoff | $C_p / \text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\lambda_s / \text{kJ kg}^{-1}$ | $\lambda_v / \text{kJ kg}^{-1}$ |
|--------------|---|---------------------------------|---------------------------------|
| Wasser | 4,182 | - | 2256 |
| Äthylalkohol | 2,43 | - | 840 |
| Quecksilber | 0,14 | - | 285 |
| Aluminium | 0,896 | 397 | 10900 |
| Eisen | 0,45 | 277 | 6340 |
| Gold | 0,13 | 65 | 1650 |
| Kupfer | 0,383 | 205 | 4790 |
| Eis (0°C) | 2,1 | 332,8 | - |

E. Riedle

Physik ^{LMU}