

3. Wärmelehre

3.1 Temperatur und Wärme

Maßeinheit für die Temperatur T sind Fixpunkte, z.B. Gefrierpunkt (0°C) und Siedepunkt (100°C) von Wasser bei Normaldruck => „Celsius“-Skala

Dieselbe Unterteilung aber in Verbindung mit absoluten Nullpunkt bei $T = -273,16^\circ\text{C} \Rightarrow$ „Kelvin“-Skala, Maßeinheit K

$0\text{ K} = -273,16^\circ\text{C}$, Absoluter Nullpunkt der Temperatur $T = 0$

$273,16\text{ K} = 0^\circ\text{C}$

$373,16\text{ K} = 100^\circ\text{C}$

Temperaturmessung über:

1.) Ausdehnung von festen Körpern oder Flüssigkeiten mit dem

Ausdehnungskoeffizienten α :

Längenausdehnung: $L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$, L_0 Länge bei 0°C

Volumenausdehnung: $V = V_0(1 + 3\alpha \Delta T)$, V_0 Länge bei 0°C

2.) Thermospannung mit dem Thermospannungskoeffizienten β unterschiedlicher

Metalle $U_{th} = \beta \Delta T$

3.) **Wärmestrahlung:** $P_s = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4$

mit dem Abstrahlungskoeffizienten $\sigma = 5,7 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$, der Oberfläche A ,

der Emissivität ε und der Temperatur T in der **vierten Potenz!**

Wärme ist die mikroskopische Bewegung von Atomen und Molekülen: Brownsche

Molekularbewegung genannt.

- Bei Festkörpern schwingen die Atome um feste Gitterpositionen
- Bei Flüssigkeiten fluktuieren die Moleküle schnell zwischen unterschiedlichen Positionen
- Bei Gasen freie Flugbewegung mit Stößen

Maß für die Wärme ist die **Bewegungsenergie** pro **Freiheitsgrad** f :

$$U = \frac{1}{2} k_B T$$

Thermische (innere) Bewegungsenergie einer aus N Atomen/Molekülen bestehenden

Stoffmenge:

$$U = N \cdot f \cdot \frac{1}{2} k_B T$$

Mit der Boltzmannkonstante $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ und dem Freiheitsgrad f der Bewegung ($f=3$

für Atome, $f>3$ für Atome).

N ist große Zahl: „1 Mol“ eines Stoffes enthält $N_A = 6 \times 10^{23}$ Teilchen und entspricht der Masse des Molekulargewichts in Gramm: 1 mol $\text{H}_2\text{O} = 18 \text{ g}$, N_A ist die Avogadrokonstante. Eine

Temperaturänderung ΔT erfordert Zufuhr bzw. Abfuhr einer **Wärmemenge ΔQ**

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

mit der **Wärmekapazität C** :

$$C = \frac{1}{2} N \cdot f \cdot k_B$$

Die **spezifische Wärmekapazität c** pro Masse m als Materialeigenschaft:

$$c = C/m$$

Damit:

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

Bestimmung von c über die Erwärmung ΔT einer bestimmten Masse m mit Leistung P für

Zeitintervall ΔT :

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{P \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta T}$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_{\text{Pb}} = 0,128 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_{\text{Al}} = 0,900 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

3.2 Zustandsgleichung idealer Gase

Volumen- und Druckänderung eines Gases als Funktion der Temperatur:

$$p = p_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta T)$$

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

bei $V = \text{konst}$

bei $p = \text{konst}$

mit dem Volumenausdehnungskoeffizienten $\gamma = 1/273 \text{ K}^{-1}$ und p_0 und V_0 . Druck und Volumen

bei $T = 0^\circ\text{C}$. Zusammen mit dem Gesetz von Boyle Mariotte $pV = \text{konst}$ ergibt sich die

Zustandsgleichung idealer Gase:

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

Für 1 mol ($N = N_A = 6 \times 10^{23}$) ist

$$p \cdot V = R \cdot T \quad \text{mit} \quad R = N \cdot k_B \quad \text{der Gaskonstante} \quad R = 8,3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

(p, V, T) heißt Zustand eines Gases. Änderungen bei konstanter Teilchenzahl N heißen

Zustandsänderungen:

isotherme: $p \propto 1/V$ bei $T = \text{konst}$

isobare: $V \propto T$ bei $p = \text{konst}$

isochore: $p \propto T$ bei $V = \text{konst}$

Weitere Zustandsänderung z.B. **adiabatische** Zustandsänderung = kein Wärmeaustausch mit der Umgebung =>Erwärmung bei Kompression, z.B. Luftpumpe oder Druckfeuzug

3.3 Energieerhaltung und 1. Hauptsatz

Bringt man zwei feste Körper oder Flüssigkeiten verschiedener Temperatur in **Kontakt**, dann gleichen sich die Temperaturen an. Dabei gilt Energieerhaltung:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2$$

und für die Temperatur T_m ergibt sich:

$$T_m = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot T_1 + c_2 \cdot m_2 \cdot T_2}{c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2}$$

mit den spezifischen Wärmen $c_{1,2}$, den Massen $m_{1,2}$ und den dazugehörigen Temperaturen $T_{1,2}$. (siehe Beispiele Badewasser bzw. Bleigießen)

Bei Gasen ist die mit der Temperaturerhöhung verbundene Erhöhung von Druck bzw. Volumen mit zu berücksichtigen.

Wärmekapazität eines **Gases** bei Erwärmung unter **konstantem Volumen**:

$$C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = f/2 \cdot N \cdot k_B$$

Wärmekapazität eines **Gases** bei Erwärmung unter **konstantem Volumen**. Hier muss noch Volumenänderungsarbeit $\Delta W = p \cdot \Delta V$ geleistet werden, was zu einer höheren Wärmekapazität führt:

$$C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = (f/2 + 1) \cdot N \cdot k_B$$

Insgesamt muss immer Energieerhaltung gelten:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad \mathbf{1. \text{Hauptsatz der Thermodynamik}}$$

Wobei ΔQ die zur Verfügung gestellte Wärmemenge, ΔU die Erhöhung der inneren Energie (Temperaturerhöhung) und ΔW die geleistete (Volumenänderungs)- Arbeit ist. Der

Wirkungsgrad $\Delta W/\Delta Q$ einer **Wärmekraftmaschine** ist immer kleiner als eins!

3.4 Schmelz- und Verdampfungswärme

Zum **Schmelzen** eines Stoffes (Phasenübergang vom festen zum flüssigen Aggregatzustand) wird Energie zum **Brechen der Bindungen** zwischen den Atomen/Molekülen benötigt, die sogenannte **Schmelzwärme** bzw. latente Wärme beim Schmelzen.

$$\Delta Q_s = c_s \cdot m \quad \text{mit der Maßeinheit kJ/kg}$$

Die Temperatur des Stoffes bleibt beim Schmelzvorgang trotz Wärmezufuhr solange konstant, bis alles aufgeschmolzen ist.

Wird die Flüssigkeit weiter erhitzt, verdampft ein Teil. Die Atome / Moleküle gehen in die Gasphase über. Die **Bindungen** werden **vollständig gebrochen**. Hierfür ist die Verdampfungswärme notwendig. Da das entstehende Gas ein wesentlich größeres Volumen als die Flüssigkeit einnimmt wird auch **Volumenänderungsarbeit** $\Delta W = p \cdot \Delta V$ notwendig. Dies zusammen wird durch die **Verdampfungsenthalpie** beschrieben:

$$\Delta Q_v = c_v \cdot m \quad \text{mit der Maßeinheit kJ/kg}$$

Für Wasser bei Luftdruck gilt:

$$c = 4,18 \text{ kJ/kg}, \quad c_s = 333,5 \text{ kJ/kg} \quad c_v = 2257 \text{ kJ/kg}$$

In einem abgeschlossenen System stellt sich nun zu jeder Temperatur durch Verdampfung und Kondensation ein bestimmter Gasdruck p_D ein: der sogenannte Sättigungsdampfdruck $p_D(T)$, der von der Temperatur abhängt.

Bei Wasserdampf bestimmt das Verhältnis von **Dampfdruck** $p_D(T)$ zu tatsächlich vorhandenem Partialdruck p_{H_2O} die relative **Luftfeuchtigkeit** F :

$$F = \frac{p_{H_2O}}{p_D(T)}$$

Falls das System nicht abgeschlossen ist, führt die Verdampfung nicht zu einer merklichen Druckerhöhung, dann kommt es zur Bildung von Gasblasen im Volumen der Flüssigkeit, wenn der Dampfdruck größer wird als der Luftdruck über der Flüssigkeit:

Kochen!

Aus der Dampfdruckkurve $p_D(T)$ kann die Siedetemperatur für $p_D(T) = p_{Luft}$ ermittelt werden. (Auf den Alpen kochen Eier länger!)