

# Experimental Physics II

Luca Cordes

SS 2023/2024

## Contents

<b>1</b>	<b>Thermodynamik</b>	<b>1</b>
1.1	I. Hauptsatz . . . . .	1
1.2	II. Hauptsatz . . . . .	2
1.3	III. Hauptsatz . . . . .	2
1.4	Wärmetransport . . . . .	2
1.4.1	Diffusion . . . . .	2
1.4.2	Konduktion . . . . .	2
1.4.3	Wärmestrahlung . . . . .	2
1.5	Zustandsänderungen . . . . .	2
1.5.1	Isotherm . . . . .	2
1.5.2	Isobar . . . . .	2
1.5.3	Isochor . . . . .	2
1.5.4	Adiabatisch . . . . .	3
1.6	Schallgeschwindigkeit . . . . .	3
1.7	Wärmekraftmaschine / Carnot - Kreisprozess . . . . .	3
1.8	Energien . . . . .	3
1.9	Entropie . . . . .	3
1.10	Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten . . . . .	4
1.10.1	Clausius-Clapeyron-Gleichung . . . . .	4
1.10.2	Zustandsgleichung des realen Gases . . . . .	4
1.10.3	Boltzmann-Faktor . . . . .	4
1.11	Formeln . . . . .	4

## Contents

### 1 Thermodynamik

#### 1.1 I. Hauptsatz

Die gesamt Energie ist in einem geschlossenen System zeitlich konstant.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

$\Delta U$  = die Änderung der (gesamten) inneren Energie eines geschlossenen Systemes

$\Delta Q$  = von außen zugeführte Wärmeenergie

$\Delta W$  = von außen zugeführte mechanische Energie

## 1.2 II. Hauptsatz

Wärme fließt von selbst immer nur vom wärmeren zum kälteren Körper, nicht umgekehrt.  
In einem abgeschlossenen System nimmt die Entropie nicht ab  $\Delta S \geq 0$ .

## 1.3 III. Hauptsatz

Es ist prinzipiell nicht möglich, den absoluten Temperaturnullpunkt ( $T = 0 \text{ K}$ ) zu erreichen.

## 1.4 Wärmetransport

### 1.4.1 Diffusion

Netto-Teilchenstromdichte bei Diffusion:

$$\vec{j} = -D \cdot \vec{\nabla} n$$

### 1.4.2 Konduktion

Wärmestromdichte bei Konduktion:

$$\vec{j}_Q = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T$$
$$\frac{|dQ|}{S \cdot dt} = \lambda \frac{|\Delta T|}{d}$$

### 1.4.3 Wärmestrahlung

Gesamtstrahlungsleistung (nach Stefan-Boltzmann-Gesetz):

$$P = \varepsilon \sigma A T^4$$

## 1.5 Zustandsänderungen

### 1.5.1 Isotherm

$$\Delta T = 0$$

### 1.5.2 Isobar

$$\Delta p = 0$$

### 1.5.3 Isochor

$$\Delta V = 0$$

#### 1.5.4 Adiabatisch

$$\Delta Q = 0$$

$$\begin{aligned}\Delta U &= \frac{f}{2} N k \Delta T = -p \Delta V = -\frac{N k T}{V} \Delta V \\ \frac{f}{2} \frac{\Delta T}{T} &= -\frac{\Delta V}{V} \\ T V^{\kappa-1} &= \text{const} \\ p V^{\kappa} &= \text{const} \\ p^{1-\kappa} T^{\kappa} &= \text{const}\end{aligned}$$

#### 1.6 Schallgeschwindigkeit

Für niedrige Frequenzen:

$$v_s = \sqrt{\frac{p}{\rho}}$$

Für hohe Frequenzen

$$v_s = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$$

#### 1.7 Wärmekraftmaschine / Carnot - Kreisprozess

#### 1.8 Energien

Im Gas:

$$\langle E_{tot} \rangle = \frac{f}{2} k_B T$$

Allgemein:

$$\Delta E = c M \Delta T$$

#### 1.9 Entropie

Klassischer, thermischer Entropiebegriff:

$$\begin{aligned}dS &= \frac{dQ_{rev}}{T} \\ \Delta S &= \int_K \frac{dQ_{rev}}{T}\end{aligned}$$

Statistischer Entropiebegriff:

Die Entropie ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes, d.h. für die Anzahl der mikroskopischen Realisierungsmöglichkeiten eines vorgegebenen makroskopischen Zustandes.

$$S = k_B \ln n_{RM}$$

$n_{RM} \hat{=}$  mikroskopische Realisierungsmöglichkeiten für einen makroskopischen Zustand

## 1.10 Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten

### 1.10.1 Clausius-Clapeyron-Gleichung

$$Q(T) = T \cdot \frac{dp_S}{dT} \cdot (V_G - V_L)$$

$Q$  ist die Verdampfungswärme für eine vorgegebene Stoffmenge (z.B. ein Mol),  $V_G$  bzw.  $V_L$  sind die entsprechenden Volumina falls sich die Substanz vollständig in der Gasphase bzw. im flüssigen Aggregatzustand befindet (Liquid), für die gleiche Stoffmenge. Entsprechendes gilt für die anderen Phasenübergänge.

Mit den Approximationen  $V_G \ll V_L$  und  $Q = \text{const}$  (d.h. nicht T-abhängig) kann man aus der Clausius-Clapeyron-Beziehung die Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur näherungsweise berechnen:

$$W \frac{dT}{T} = dp_S \cdot V_G$$

Integration führt nun zu folgendem Ausdruck:

$$p_S = p_S^0 \cdot e^{-\frac{Q}{Nk} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

### 1.10.2 Zustandsgleichung des realen Gases

$$nRT = \left( p + \frac{an^2}{V^2} \right) \cdot (V - nb)$$

### 1.10.3 Boltzmann-Faktor

$$N(R) \propto e^{-\frac{R}{kT}}$$

## 1.11 Formeln

Zustandsgleichung des idealen Gases:

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

Zustandsgleichung des realen Gases:

$$nRT = \left( p + \frac{an^2}{V^2} \right) \cdot (V - nb)$$

Gesamte kinetische Energie, abhängig von Freiheitsgraden:

$$E_{kin}^{tot} = \frac{f}{2} kT$$

Expansionsarbeit:

$$|\Delta W| = p\Delta V$$

$$\langle E_{kin}^{atom} \rangle = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$$

$$\frac{\Delta V}{V} = 3\alpha \Delta T = \gamma \Delta T$$

Zeichen und ihre Bedeutung:

$p \iff$  Druck/Pressure

$V \iff$  Volumen

$T \iff$  Temperatur

$f \iff$  Zahl der Freiheitsgrade

$n \iff$  Stoffmenge (in mol)

$N \iff$  Stoffmenge

$U \iff$  innere Energie

$Q \iff$  Wärmeenergie

$\vec{j} \iff$  Netto-Teilchenstromdichte bei Diffusion  $= -D \cdot \vec{\nabla} n$

$dR \iff$  Reduzierte Wärmemenge  $= \frac{dQ}{T}$

$dS \iff$  Entropie  $= \frac{dQ_{rev}}{T}$

$\kappa \iff$  Adiabatenindex  $= \frac{c_P}{c_V}$

$$= \frac{f+2}{f} = 1 + \frac{2}{f}$$

$\iff$

$\iff$

$\iff$

$N_A \iff$  Avogadro-Konstante

$R \iff$  allgemeine Gaskonstante

$k \iff$  Boltzmann-Konstante

$c \iff$  spezifische Wärmekapazität  $= \frac{\Delta Q}{M \Delta T}$

$D \iff$  Diffusionskonstante

$\sigma \iff$  Stefan-Boltzmann-Konstante  $= 5.77 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

$\varepsilon \iff$  Absorptionsgrad  $\leq 1$

$\iff$

