

Formelsammlung Physik II

von Stephan Senn, D-ITET

Inhaltsverzeichnis

THERMODYNAMIK.....	3
<i>Physikalische Systeme.....</i>	3
<i>Zustandsgleichung idealer Gase.....</i>	3
<i>Thermische Ausdehnung.....</i>	3
Bei Festkörpern.....	3
Bei Flüssigkeiten.....	3
Bei Gasen.....	3
<i>Kinetische Gastheorie.....</i>	4
Eigenschaften des idealen Gases.....	4
Allgemeine Gesetze.....	4
Charakteristische Geschwindigkeiten.....	4
<i>Hauptsätze der Thermodynamik.....</i>	5
Allgemeiner oder nullter Hauptsatz.....	5
Erster Hauptsatz.....	5
Zweiter Hauptsatz.....	5
Dritter Hauptsatz oder Satz von der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts.....	5
<i>Berechnung der Wärmekapazitäten.....</i>	5
<i>Zustandsänderungen.....</i>	6
Isotherme Zustandsänderung: $T=\text{const.}, dT=0$	6
Isochore Zustandsänderung: $V=\text{const.}, dV=0$	6
Isobare Zustandsänderung: $p=\text{const.}, dp=0$	6
Isentrope Zustandsänderung: $S=\text{const.}, dQ=0, dS=0$	6
Polytrope Zustandsänderung.....	6
<i>Thermodynamische Zustandsgrößen.....</i>	7
Innere Energie U	7
Enthalpie H	7
Entropie S	7
<i>Thermodynamische Potentiale.....</i>	7
freie Energie F	7
Freie Enthalpie oder Gibbsches Potential G	8
<i>Carnot'scher Kreisprozess.....</i>	8
<i>Reversible und irreversible Prozesse.....</i>	8
Definition.....	8
Allgemeine Systeme.....	8
Adiabatische (abgeschlossene) Systeme.....	8
<i>Zustandsänderungen realer Gase.....</i>	9
Van-der-Waalsche Zustandsgleichung.....	9
Gasgemische.....	9
Dichte realer Gase.....	9
Joule-Thomson-Effekt.....	9
Clausius-Clapeyronsche Gleichung.....	9
Gibbsche Phasenregel.....	10
Partialdruck p_i	10
Absolute Luftfeuchtigkeit Relative Luftfeuchtigkeit.....	10
QUANTENPHYSIK.....	10

<i>Heisenberg'sche Unschärferelation</i>	10
Quantenoptik	10
Allgemeine Gesetze.....	10
Planck'sches Strahlungsgesetz.....	11
Beugung an einem Gitter mit Spaltabstand g	11
Beugung an einem Spalt der Breite b	11
Quantenmechanik	11
Zeitunabhängige Schrödingergleichung Normierungsbedingung.....	11
Zeitabhängige Schrödingergleichung.....	11
Elektronen: Gesetzmässigkeiten, Energie, Drehimpuls, Spin.....	11
Andere Teilchen: Gesetzmässigkeiten	12
Bohr'sche Frequenzbedingung.....	12
Ionisierungsenergie	12
Ausschlussprinzip von Pauli oder Pauli-Verbot.....	12
Rydberg-Ritz-Formel.....	12
Bohr'sches Modell des Wasserstoffatoms.....	12
Lösungen der Schrödinger-Gleichungen für einige Potentiale	12
Rechteckpotential oder Potentialkasten.....	12
Harmonischer Oszillator.....	13
Potentialschwelle oder Tunneleffekt.....	13
Das Periodensystem	13
Syntax.....	13
Elektronenkonfiguration.....	13
Auffüllschema.....	14
FESTKÖRPERPHYSIK	14
<i>Einteilung der Stoffe nach ihrer Leitfähigkeit</i>	14
<i>Bändermodell</i>	14
<i>Löcher-Modell</i>	14
<i>Energielücken</i>	14
<i>Modell des freien Elektronengases (Fermi, Sommerfeld)</i>	14
<i>Halbleiter</i>	15
Leitfähigkeit	15
Dichte der Elektronen bzw. Löcher im Leitungs- bzw. Valenzband	16
intrinsiche Trägerdichte: Dichte der freien Elektronen und Löcher.....	16
Elektrischer Widerstand Beweglichkeit von Elektronen und Löchern	16
Störstellenleitung: Einbau von Fremdatomen.....	16
pn-Übergang.....	17
Licht in Wechselwirkung mit Elektronen.....	18
WICHTIGE RELATIONEN	19
PHYSIKALISCHE KONSTANTEN	19

Thermodynamik

Physikalische Systeme

- **abgeschlossenes System:** kein Austausch
- **adiabatisches System:** Austausch von Arbeit (W)
- **geschlossenes System:** Austausch von Arbeit (W) und Wärmeenergie (Q)
- **offenes System:** Austausch von Arbeit (W), Wärmeenergie (Q) und Masse (m)

Zustandsgleichung idealer Gase

$$p \cdot V = \text{const}$$

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const} \Rightarrow \frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_n \cdot V_n}{T_n} \quad \nu = \frac{m}{M}$$

$$p \cdot V = \nu \cdot R_m \cdot T = N \cdot k \cdot T \quad N = \nu \cdot N_A$$

individuelle Gaskonstante:

$$R_i = \frac{p_n}{T_n \cdot \rho_n} \Rightarrow p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

$$R_i = \frac{R_m}{M}$$

universelle Gaskonstante:

$$R_m = \frac{p_n \cdot V_{mn}}{T_n} \Rightarrow p \cdot V = \nu \cdot R_m \cdot T$$

p: Druck in [Pa]

ν : Teilchenmenge in [mol]

m: Masse in [kg]

ρ : Dichte in [kg/m³]

M: Molmasse in [kg/mol]

N: Teilchenzahl

V: Volumen in [m³]

T: Temperatur in [K]

Thermische Ausdehnung

Bei Festkörpern

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow l_2 = l_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)] \quad (\text{Längenänderung})$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow V_2 = V_1 \cdot [1 + \gamma \cdot (T_2 - T_1)] \quad (\text{Volumenänderung})$$

$$\gamma = 3 \cdot \alpha$$

Bei Flüssigkeiten

$$\frac{\Delta V}{V} = \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow V_2 = V_1 \cdot [1 + \gamma \cdot (T_2 - T_1)]$$

Bei Gasen

$$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot T) \quad \text{mit} \quad \gamma = (273.15 \text{ K})^{-1} = 0.003661 \text{ K}^{-1}$$

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

$$V(T) = \frac{V_0 \cdot T}{T_0} \quad p(T) = \frac{p_0 \cdot T}{T_0} \quad \text{Volumen } V_0 \text{ bei } 0^\circ\text{C}, \quad T_0 = 273.15 \text{ K}$$

α, γ : Ausdehnungsfaktoren in [K⁻¹]

Kinetische Gastheorie

Eigenschaften des idealen Gases

- grosse Anzahl gleichartiger Teilchen (Moleküle)
- Teilchen als Massenpunkte auffassen (keine räumliche Ausdehnung)
- keine Wechselwirkungskräfte zwischen den Teilchen
- völlig elastische Stösse

Gültigkeit: geringe Teilchendichte, Temperatur wesentlich über der Siedetemperatur

Allgemeine Gesetze

- Grundgleichung: $p = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m_M \cdot \overline{v^2} = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \overline{v^2}$
- mittlere thermische Energie pro Teilchen: $\overline{E} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot T$
- mittlere kinetische Energie eines Moleküls mit f Freiheitsgraden: $\overline{E} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot T \cdot f$
- minimale Rotationsenergie eines Moleküls: $E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{min}^2}{J} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\hbar^2}{J}$
- molare Wärmekapazität von Festkörpern: $C_{mv} = 3 R_m = 24.9 \frac{J}{molK}$
- Boltzmann-Faktor: $\frac{N_2}{N_1} = \frac{n_2}{n_1} = e^{\frac{-E_2 - E_1}{k \cdot T}} = e^{\frac{-\Delta E}{k \cdot T}}$
- Barometrische Höhenformel: $p_h = p_0 \cdot e^{\frac{-\rho_0 T_0 g h}{p_0 T}} = p_0 \cdot e^{\frac{-m_M g h}{k T}}$
- Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung: $f(v) dv = 4 \pi v^2 \cdot \left(\frac{m_M}{2 \pi k T} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{-m_M v^2}{2 k T}} dv$
- Maxwell-Boltzmann-Energieverteilung: $f(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{1}{k T} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E} \cdot e^{\frac{-E}{k T}}$

Charakteristische Geschwindigkeiten

- mittlere Geschwindigkeit: $v_m = \sqrt{\frac{3 \cdot p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3 k T}{m_M}} = \sqrt{\frac{3 R_m T}{M}}$
- wahrscheinlichste Geschwindigkeit: $v_w = \sqrt{\frac{2 k T}{m_M}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot v_m$
- durchschnittliche Geschwindigkeit: $\overline{v} = \sqrt{\frac{8 k T}{\pi m_M}} = \sqrt{\frac{8}{3 \pi}} \cdot v_m$

m_M : Molekülmasse in [kg]

p_0 : Referenzdruck

ρ_0 : Referenzdichte

n : Teilchenzahldichte [m^{-3}]

T_0 : Referenztemperatur

Hauptsätze der Thermodynamik

Allgemeiner oder nullter Hauptsatz

Wärme ist Energie und fließt immer in Richtung der niedrigeren Temperatur. Der Wärmeübergang ist ein irreversibler Prozess.

$$c = \frac{C}{m} \quad C_m = \frac{C}{\nu} \quad \text{Masseinheiten: } [C] = \frac{J}{K}, \quad [c] = \frac{J}{kgK}, \quad [C_m] = \frac{J}{molK}$$
$$dQ = C \cdot dT \Rightarrow Q_{12} = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT = \nu \cdot \int_{T_1}^{T_2} C_m(T) dT$$

bei $c(T) = const$ gilt:

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = \nu \cdot C_m \cdot (T_2 - T_1)$$

Energiebilanz des Temperaturnausgleichsprozesses zwischen zwei Substanzen mit konstanten Wärmekapazitäten:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow m_1 \cdot c_1 \cdot (T_m - T_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_2 - T_m)$$

Erster Hauptsatz

In einem abgeschlossenen System bleibt der Gesamtbetrag der Energie konstant. Innerhalb des Systems können die verschiedenen Energieformen ineinander umgewandelt werden. Es gibt kein Perpetuum mobile erster Art.

Zweiter Hauptsatz

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die Wärme aus einer Wärmequelle entnimmt und vollständig in mechanische Arbeit umwandelt. Es gibt kein Perpetuum mobile zweiter Art.

Dritter Hauptsatz oder Satz von der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts

Der absolute Temperaturnullpunkt lässt sich nicht erreichen. Die Entropie reiner Stoffe ist am absoluten Temperaturnullpunkt null.

Berechnung der Wärmekapazitäten

isobare Zustandsänderung:

$$C_{mp} = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) \cdot R_m$$

$$c_p = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) \cdot R_i$$

isochore Zustandsänderung:

$$C_{mv} = \frac{f}{2} \cdot R_m$$

$$c_v = \frac{f}{2} \cdot R_i$$

allgemeiner Zusammenhang:

$$C_{mp} - C_{mv} = R_m$$

$$c_p - c_v = R_i$$

Isentropenexponent: $\chi = \frac{C_{mp}}{C_{mv}} = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{2}{f}$

Zustandsänderungen

Isotherme Zustandsänderung: $T=\text{const.}, dT=0$

$$dQ + dW = 0 \quad dU = 0$$

$$Q_{12} + W_{12} = 0 \quad Q_{12} = \nu \cdot R_m \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad W_{12} = \nu \cdot R_m \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Isochore Zustandsänderung: $V=\text{const.}, dV=0$

$$dU = dQ$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} \quad dQ = \nu C_{mv} dT \quad dW = 0$$
$$Q_{12} = \nu C_{mv} (T_2 - T_1) = \nu mc_v (T_2 - T_1) \quad W_{12} = 0$$

Isobare Zustandsänderung: $p=\text{const.}, dp=0$

$$dU = dQ + dW$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{12} \quad dQ = \nu C_{mv} dT \quad dW = p dV$$
$$Q_{12} = \nu C_{mv} (T_2 - T_1) = \nu mc_v (T_2 - T_1) \quad W_{12} = p (V_2 - V_1)$$

Isentrope Zustandsänderung: $S=\text{const.}, dQ=0, dS=0$

$$dU = dW$$

$$U_2 - U_1 = W_{12} \quad dQ = 0 \quad dW = \nu C_{mv} dT$$
$$Q_{12} = 0 \quad W_{12} = \nu C_{mv} (T_2 - T_1) = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\chi - 1}$$

Isentropengleichungen:

- $p_1 V_1^\chi = p_2 V_2^\chi$ mit $p V^\chi = \text{const}$
- $T_1 V_1^{\chi-1} = T_2 V_2^{\chi-1}$ mit $T V^{\chi-1} = \text{const}$
- $p_1^{1-\chi} T_1^\chi = p_2^{1-\chi} T_2^\chi$ mit $p^{1-\chi} T^\chi = \text{const}$

Polytrope Zustandsänderung

Es gelten die Isentropengleichungen. Anstelle von χ steht der Polytropenexponent n . Es gilt dann:

- $n \rightarrow 1$: isotherme Zustandsänderung
- $n = \chi$: isentrope Zustandsänderung
- $n = 0$: isobare Zustandsänderung
- $n \rightarrow \infty$: isochore Zustandsänderung

$$Q_{12} = \nu R_m (T_2 - T_1) \cdot \left(\frac{1}{\chi - 1} - \frac{1}{n - 1} \right) \quad W_{12} = \nu \frac{R_m}{n - 1} (T_2 - T_1) = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{n - 1}$$

Thermodynamische Zustandsgrößen

Innere Energie U

$$dU = dQ + dW$$

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad \Delta Q > 0 : \text{zugeführte Wärme, } \Delta W > 0 : \text{zugeführte Arbeit}$$

bei idealen Gasen gilt:

$$U = N \cdot E_{kin} = N \cdot \frac{f}{2} \cdot k \cdot T = \nu \cdot \frac{f}{2} \cdot R_m \cdot T$$

$$dU = \nu C_{mv} dT = m c_v dT \Rightarrow \Delta U = U_2 - U_1 = \nu \cdot \int_{T_1}^{T_2} C_{mv}(T) dT = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT = Q_{12} + W_{12}$$

für die Volumenänderungsarbeit gilt: $dW = -p \cdot dV \Rightarrow W_{12} = - \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$

Enthalpie H

$$H = U + p \cdot V \quad \text{bei isobarer Zustandsänderung: } dH = dQ = \nu \cdot C_{mp} \cdot dT = m \cdot c_p \cdot dT$$

Entropie S

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \Rightarrow \Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ_{rev}}{T}$$

bei idealen Gasen gilt:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \nu \cdot C_{mv} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \nu \cdot R_m \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \nu \cdot C_{mp} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - \nu \cdot R_m \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

statistische Deutung: Entropie als Mass für die Unordnung eines Systems

$$\Delta S = S_{II} - S_I = k \cdot \ln(w) \quad \text{mit} \quad w = \frac{P_{II}}{P_I} = \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^N \quad S = k \cdot \ln(P)$$

P_{II} : Wahrscheinlichkeit, dass sich N-Teilchen im Volumen V_2 aufhalten

P_I : Wahrscheinlichkeit, dass sich N-Teilchen im Volumen V_3 aufhalten

Thermodynamische Potentiale

freie Energie F

$$F = U - T \cdot S$$

$$\text{Es gilt: } p = \frac{-\partial F}{\partial V}, \quad V = \frac{-\partial F}{\partial p}$$

Allgemein gilt: $-dW \leq -dF$ und $-dW_{irr} < -dW_{rev}$

Freie Enthalpie oder Gibbsches Potential G

$$G = H - T \cdot S = U + p \cdot V - T \cdot S$$

$$\text{Es gilt: } V = \frac{\partial G}{\partial p}, \quad S = -\frac{\partial G}{\partial T}$$

Carnot'scher Kreisprozess

Die je Umlauf nach aussen abgegebene Nutzarbeit entspricht dem Flächeninhalt der vom Kreisprozess eingeschlossenen Fläche des p-V-Diagramms. Es gilt:

$$W = \oint dW = -\oint p dV$$

Der thermische Wirkungsgrad ist nur von den Temperaturen der beiden Wärmebäder abhängig:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad \text{mit } T_2 > T_1$$

Für die Leistungszahl bei Kältemaschinen, die die Wärmemenge Q dem kalten Reservoir entnehmen und bei denen man die Arbeit W hineinstecken muss, gilt:

$$c_L = \frac{Q}{W}$$

- rechtsläufiger Prozess (Uhrzeigersinn): Quelle (T_2, Q_{zu}) \gg Senke (T_1, Q_{ab}), $Q_{zu} = Q_{ab} + W$
- linksläufiger Prozess (Gegenuhrzeigersinn): Quelle (T_1, Q_{zu}) \gg Senke (T_2, Q_{ab}), $Q_{ab} = Q_{zu} + W$

Reversible und irreversible Prozesse

Definition

Ein Prozess ist reversibel, wenn bei seiner Umkehr der Ausgangszustand wieder erreicht wird, ohne dass Änderungen in der Umgebung zurückbleiben. Er ist irreversibel, wenn seine Umkehr zum Ausgangszustand nur unter äusserer Einwirkung möglich ist, wobei eine Veränderung in der Umgebung zurückbleibt.

Allgemeine Systeme

- bei reversiblen Prozessen gilt: $\oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0$
- bei irreversiblen Prozessen gilt: $\oint \frac{dQ_{irr}}{T} < 0$

Adiabatische (abgeschlossene) Systeme

- bei reversiblen Prozessen gilt: $dS = 0$
- bei irreversiblen Prozessen gilt: $dS > 0$
- bei reversiblen Prozessen in einem isotherm-isochoren System: $dF = 0$
- bei irreversiblen Prozessen in einem isotherm-isochoren System: $dF < 0$
- bei reversiblen Prozessen in einem isotherm-isobaren System: $dG = 0$

- bei irreversiblen Prozessen in einem isotherm-isobaren System: $dG < 0$
- Vorgänge können nur von selbst ablaufen, bei denen die Entropie ansteigt.
- Der maximale Arbeitsbetrag, den ein isothermes System nach aussen abgeben kann, ist gleich der Abnahme der freien Energie.

Zustandsänderungen realer Gase

Van-der-Waalsche Zustandsgleichung

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) \cdot (V_m - b) = R_m T \quad \text{mit dem Kovolumen } b \text{ und dem Binnendruck } \frac{a}{V_m^2}$$

Mit Hilfe des kritischen Punktes (Wendepunkt) gilt:

$$V_{mk} = 3b, \quad T_k = \frac{8a}{27bR_m}, \quad p_k = \frac{a}{27b^2}, \quad \frac{p_k V_{mk}}{T_k} = \frac{3}{8} R_m, \quad Z_k = \frac{3}{8}$$

Gasgemische

$$\rho_G = \frac{\sum \rho_i \cdot V_i}{V}$$

Dichte realer Gase

$$\rho = \frac{p}{ZR_i T} \quad \text{mit dem Realgasfaktor } Z$$

Joule-Thomson-Effekt

Wird ein reales Gas adiabatisch (ohne Wärmeübertragung) und ohne Arbeitsverrichtung entspannt (Drosselung), so erfolgt eine Abkühlung oder Erwärmung des Gases. Ist die Raumtemperatur T tiefer als die Inversionstemperatur T_i , so kühlt sich das Gas ab (Normalfall). Im umgekehrten Fall erfolgt eine Erwärmung des Gases. Verantwortlich für diesen Effekt sind die zwischenmolekularen Anziehungskräfte, die dafür sorgen, dass die innere Energie grösser ist als bei idealen Gasen, wo keine Anziehungskräfte angenommen werden.

$$T < T_i: \text{ Abkühlung} \quad T_i \approx \frac{2a}{R_m b} \quad T_i \approx 6.75 \cdot T_k$$

$T > T_i$: Erwärmung

Clausius-Clapeyronsche Gleichung

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{\Delta H_{mv}}{(V_m^D - V_m^{Fl})T}, \quad \frac{dp_f}{dT} = \frac{\Delta H_{ms}}{(V_m^{Fl} - V_m^{Fe})T}$$

p_s : Sättigungsdampfdruck

p_f : Schmelzdruck

V_m^D : molares Volumen in Dampfphase

V_m^{Fe} : molares Volumen in fester Phase

V_m^{Fl} : molares Volumen in flüssiger Phase

ΔH_{mv} : molare Verdampfungsenthalpie

ΔH_{ms} : molare Schmelzenthalpie

Gibbsche Phasenregel

$$f = k + 2 - P$$

f: Anzahl Freiheitsgrade

k: Anzahl unabhängiger chemischer Komponenten

P: Anzahl Phasen

Partialdruck p_i

$$p_{tot} = \sum p_i$$

Absolute Luftfeuchtigkeit

$$\phi_a = \frac{m_D}{V_{Fl}}$$

m_D : Masse des Wasserdampfes

V_{Fl} : Volumen der feuchten Luft

Relative Luftfeuchtigkeit

$$\phi = \frac{p_D}{p_s}$$

p_D : Partialdruck des Wasserdampfes

p_s : Sättigungsdampfdruck

Quantenphysik

Heisenberg'sche Unschärferelation

Bei einer genauen Ortsmessung eines Teilchens ist sein Impuls unscharf; und umgekehrt. Dasselbe gilt auch für die Energie-Zeit-Relation. Für eine genaue Energiemessung eines Teilchens müsste eine lange Zeitspanne gewählt werden. Somit wird die Zeit unscharf. Damit gilt:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad , \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Quantenoptik

Allgemeine Gesetze

- Energie eines Photons: $E_{ph} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \hbar \cdot \omega$ mit $c = f \cdot \lambda$
- äusserer Photoeffekt: $E_{kin} = E_{ph} - W_A = hf - W_A$ mit der Austrittsarbeit W_A
- Impuls eines Photons: $p = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$ De-Broglie-Beziehung: $\lambda = \frac{h}{p}$
- Compton-Effekt: $\Delta = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} \cdot (1 - \cos(\vartheta))$
- Wien'sches Verschiebungsgesetz: $\lambda_{max} \cdot T = b$ mit $b = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$
- Rayleigh-Jeans-Gesetz: $L(\lambda, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot k \cdot T}{\lambda^4}$ für $\lambda > 10 \mu m$
- Gesetz von Stefan-Boltzmann über die totale Abstrahlungsleistung:
 $L(T) = e \cdot \sigma A T^4 \approx T^4 \cdot \sigma$ mit $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$
e: Emissionsgrad (0...1) A: Oberfläche

Planck'sches Strahlungsgesetz

Für die Energiedichte u gilt:

$$u(f, T) = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

Für die Strahlungsintensität L gilt:

$$L(f, T) df = \frac{2hf^3}{c^2 \Omega} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} df \quad L(\lambda, T) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \Omega} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda$$

Für den Raumwinkel Ω gilt:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad \text{mit } \Omega_0 = 1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2 \quad \text{Ist } \Omega \text{ nicht gegeben, so wird meist der Wert von } \Omega_0 \text{ verwendet.}$$

Beugung an einem Gitter mit Spaltabstand g

Hauptmaxima bei: $\sin(\alpha_n) = \pm n \cdot \frac{\lambda}{g}$

Beugung an einem Spalt der Breite b

Beugungsminima bei: $\sin(\alpha_n) = \pm n \cdot \frac{\lambda}{b}$ Nebenmaxima bei: $\sin(\alpha_n) \approx \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{b}$

Quantenmechanik

Zeitunabhängige Schrödingergleichung

$$\left(\frac{-\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{r}) \right) \psi(\vec{r}) = E \cdot \psi(\vec{r})$$

Normierungsbedingung

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi \cdot \bar{\psi} dV = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 dV = 1$$

Zeitabhängige Schrödingergleichung

$$\left(\frac{-\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{r}) \right) \psi(\vec{r}, t) = i \hbar \cdot \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t)$$

Elektronen: Gesetzmässigkeiten, Energie, Drehimpuls, Spin

- Hauptquantenzahlen: $n = 1, 2, 3, \dots \Rightarrow$ Schalen K, L, M, N, \dots
- Bahndrehimpulsquantenzahl (Nebenquantenzahl): $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$
- magnetische Quantenzahl (Nebenquantenzahl): $m_l = -l, -l+1, -l+2, \dots, +l \Rightarrow m_l \leq |l|$
- Notation: z.B. $1s \Rightarrow n=1, l=0$; $2p \Rightarrow n=2, l=1$

s	p	d	f	g	h	...
0	1	2	3	4	5	...

- Drehimpuls: $L^2 = (l+1) \cdot l \cdot \hbar^2$ mit $L_z = m_l \cdot \hbar$

- magnetisches Moment: $\mu = -\frac{e}{2m_e} \cdot L$, $\mu_z = \frac{-g \cdot \mu_B \cdot L_z}{\hbar} = \frac{-\gamma \cdot L_z}{\hbar}$ mit $\gamma = g \mu_B$
 g: Landésche g-Faktor γ : gyromagn. Verhältnis
- Für die Energie gilt (Zeeman-Effekt): $E = -\mu \cdot B$
- Bohr'sches Magneton: $\mu_B = \frac{e \hbar}{2m_e}$
- Spin: $S_z = m_s \cdot \hbar$ mit $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$

Andere Teilchen: Gesetzmässigkeiten

Für andere Teilchen ergibt sich ein analoges Vorgehen wie bei den Elektronen. Protonen können gleich behandelt werden wie Elektronen. Der g-Faktor und die Masse sind aber verschieden.

Bohr'sche Frequenzbedingung

$$h \cdot f = E_2 - E_1 \quad \text{mit} \quad E_2 > E_1$$

Ionisierungsenergie

Die Energie, die nötig ist, um ein Elektron auf der äussersten Schale vollständig aus dem Atom zu entfernen, heisst Ionisierungsenergie.

Ausschlussprinzip von Pauli oder Pauli-Verbot

In einem Atom könne niemals zwei Elektronen denselben Quantenzustand einnehmen, d.h. Sie können nicht in allen vier Quantenzahlen n, l, ml und ms übereinstimmen.

Rydberg-Ritz-Formel

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot Z^2 \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad \text{mit der Rydberg-Konstanten} \quad R = 1.097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Bohr'sches Modell des Wasserstoffatoms

- Bahnradien: $r_n = \frac{n^2 \hbar^2 4 \pi \epsilon_0}{Z e^2 m_e} = \frac{n^2 \hbar^2 \epsilon_0}{\pi Z e^2 m_e}$ n: Hauptquantenzahl Z: Kernladungszahl
- Energieniveaus: $E_n = \frac{-Z^2 e^4 m_e}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} = \frac{-Z^2 e^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} = -hc \cdot R \cdot \frac{1}{n^2}$

Lösungen der Schrödinger-Gleichungen für einige Potentiale

Rechteckpotential oder Potentialkasten

$$\text{Potential: } V(x) = 0 \quad \text{für} \quad x = (-l/2, l/2)$$

$$V(x) \rightarrow \infty \quad \text{sonst}$$

$$\text{Energieniveaus: } E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} \quad \text{mit} \quad k_n = \frac{\pi}{l} \cdot n$$

Lösungen: $\psi_n(x) = 2A \cos(k_n x)$ für $n=1,3,5,\dots$
 $\psi_n(x) = 2A \sin(k_n x)$ für $n=2,4,6,\dots$

Harmonischer Oszillator

Potential: $V(x) = \frac{1}{2} \cdot D \cdot x^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot x^2$ mit $\omega^2 = \frac{D}{m}$

Energieniveaus: $E_n = \hbar \cdot \omega \cdot \left(n + \frac{1}{2}\right)$

Potentialschwelle oder Tunneleffekt

Potential: $V(x) = 0$ für $x < -a$ und $x > a$

$V(x) = V_0$ für $x = (-a, a)$

Transmissionskoeffizienten: $T = \frac{|A_{out}|^2}{|A_{in}|^2}$, $T \approx \exp\left[\frac{-2}{\hbar} \cdot \sqrt{2m(V_0 - E)} \cdot 2a\right]$ mit $\kappa 2a \gg 1$

• für $E < V_0$: $T = \left[1 + \frac{V_0^2}{V_0^2 - (2E - V_0)^2} \cdot \sinh^2(\kappa 2a)\right]^{-1}$ mit $\kappa^2 = \frac{2m}{\hbar^2} \cdot (V_0 - E)$

• für $E > V_0$: $T = \left[1 + \frac{V_0^2}{V_0^2 - (2E - V_0)^2} \cdot \sin^2(k 2a)\right]^{-1}$ mit $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$

Das Periodensystem

Syntax

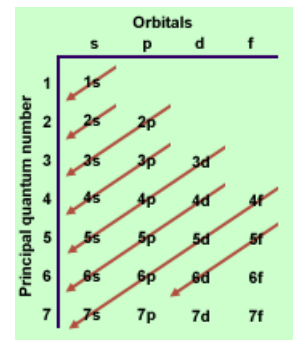
(Hauptquantenzahl [1,2,3,...])(Bahndrehimpuls [s,p,d,f,g,h,...])(Anzahl Elektronen)

z.B. $1s^2$: Hauptquantenzahl $n=1$, Bahndrehimpuls $l=0$, 2 Elektronen

Elektronenkonfiguration

n	l	m_l	m_s	Bezeichnung	Anzahl Elektronen
1	0	0	$\pm 1/2$	$1s^2$	2
2	0	0	$\pm 1/2$	$2s^2$	2
2	1	0,1,-1	$\pm 1/2$	$2p^6$	6
...

Auffüllschema



Festkörperphysik

Einteilung der Stoffe nach ihrer Leitfähigkeit

- **Leiter:** $\sigma < 10^{-5} \Omega m$ verbotene Zone sehr klein
- **Halbleiter:** $10^{-5} \Omega m < \sigma < 10^7 \Omega m$ verbotene Zone $E \leq 3 eV$
- **Isolatoren:** $\sigma > 10^7 \Omega m$ verbotene Zone gross $E > 3 eV$

Bändermodell

Elektronen halten sich in Festkörpern innerhalb erlaubter Energiebänder auf, die durch verbotene Zonen (VZ) voneinander getrennt sind. Das oberste vollständig gefüllte Band heisst Valenzband (VB). Das darüber liegende entweder teilweise gefüllte oder auch leere Band wird als Leitungsband (LB) bezeichnet. Bei elektrischen Leitern sind die Energiebänder daher nur teilweise besetzt.

Löcher-Modell

Die fehlenden Elektronen im Valenzband werden Defektelektronen oder Löcher bezeichnet. Sie verhalten sich im See der negativen Elektronen wie positive Teilchen. Neben dem Elektronenstrom lässt sich also auch ein Löcherstrom definieren. Für die Elektronendichte n und die Löcherdichte p gilt stets: $n = p$

Energielücken

- direkte Energielücke: Die Extrema des Valenzbandes und des Leitungsbandes liegen bei derselben Wellenzahl k .
- indirekte Energielücke: Die Extrema des Valenzbandes und des Leitungsbandes liegen bei unterschiedlichen Wellenzahlen.

Modell des freien Elektronengases (Fermi, Sommerfeld)

- Energie eines freien Elektrons: $E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$
- Fermi-Energie bzw. Fermi-Niveau: $E_F = \frac{\hbar^2}{2m} \cdot (3\pi^2 \cdot n)^{\frac{2}{3}}$ mit $n = \frac{N}{V}$

Merke: Das höchste besetzte Energieniveau hat die Energie E_F .

- Fermi-Geschwindigkeit: $v_F = \frac{\hbar}{m} \cdot (3\pi^2 \cdot n)^{\frac{1}{3}}$
- Fermi-Wellenzahl: $k_F = (3\pi^2 \cdot n)^{\frac{1}{3}}$
- Fermi-Temperatur: $T_F = \frac{E_F}{k}$
- Zustandsdichte: $D(E) = \frac{1}{2\pi^2} \cdot \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E}$

Dichteverteilung der besetzbaren Zustände

- Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion: $f(E) = \left(e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1 \right)^{-1}$

Wahrscheinlichkeit, dass Zustände besetzt sind

Die Fermi-Dirac-Verteilung kann durch die Boltzmannverteilung approximiert werden.

- Besetzungswahrscheinlichkeit: $n(E) = D(E) \cdot f(E)$
- Relaxationszeit: $\tau = \frac{\sigma m}{e^2 n}$ mittlere freie Weglänge: $l = v_F \cdot \tau$
- Leitfähigkeit: $\sigma = e n \mu$
- Beweglichkeit der Elektronen: $\mu = \frac{e}{m} \cdot \tau$
- Driftgeschwindigkeit der Elektronen: $\vec{v}_{d,e} = \frac{-e}{m} \cdot \tau \cdot \vec{E}_0$
- mittlere Beschleunigung der Elektronen: $\vec{a}_{b,e} = \frac{-e \vec{E}}{m} - \frac{\vec{v}_d}{\tau}$ mit $\vec{v}_d = \vec{v}_{d,e} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$
- Stromdichte: $\vec{j} = -e n \vec{v}_{d,e}$
- molare Wärmekapazität von Metallen: $C_m = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot R_m \cdot \frac{T}{T_F}$

Halbleiter

Die elementaren Halbleiter sind in der IV. Gruppe des Periodensystems zu finden (4 Valenzelektronen). Die meisten Halbleiter sind aber Legierungen, die durch Dotierungsvorgänge (Beschichten, Einschleusen von Fremdatomen) erzeugt werden.

Leitfähigkeit

$$\sigma = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$$

n: Elektronendichte p: Löcherdichte μ_n : Beweglichkeit der Elektronen μ_p : Beweglichkeit der Löcher

Dichte der Elektronen bzw. Löcher im Leitungs- bzw. Valenzband

$$n = \int_{E_L}^{\infty} D_e(E) \cdot f(E) dE \Rightarrow n(T) = N_L \cdot e^{-\frac{E_L - E_F}{kT}} \quad N_{L,V} = 2 \cdot \left(\frac{2\pi m_d kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} D_h(E) \cdot (1 - f(E)) dE \Rightarrow p(T) = N_V \cdot e^{-\frac{E_V - E_F}{kT}}$$

N_L, N_V : effektive Zustandsdichten

m_d : effektive Zustandsdichtemasse

intrinsische Trägerdichte: Dichte der freien Elektronen und Löcher

$$n_i(T) = \sqrt{N_L N_V} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} = n_{i0} T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad \text{mit} \quad n_i = n = p$$

Massenwirkungsgesetz: $np = n_i^2$

Elektrischer Widerstand

$$R(T) \approx R_0 e^{\frac{E_g}{2kT}}$$

Beweglichkeit von Elektronen und Löchern

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{-3}{2}} \quad (\text{nur bei reinen Halbleitern})$$

μ_0 ist nicht zu verwechseln mit der Permittivität!

Störstellenleitung: Einbau von Fremdatomen

- Dotieren:

Einlagerung von Atomen in einen anderen Stoff mit dem Ziel, deren Eigenschaften gezielt zu verändern. Die eingelagerten Atome werden als Störatome bezeichnet. Zum Dotieren werden meist Elemente aus der V. Gruppe (Donatoren) und aus der III. Gruppe (Akzeptoren) verwendet.

- n-leitender Halbleiter (n-Typ):

Die elektrische Leitung beruht auf den Elektronen (Majoritätsträger). Durch das Dotieren kommen freie Elektronen hinzu. Man bezeichnet derartige Störatome auch als Donatoren, da sie Elektronen an den Atomverband abgeben können.

- p-leitender Halbleiter (p-Typ):

Die elektrische Leitung beruht auf den positiven Elektronen bzw. den Löchern (Minoritätsträger). Durch das Dotieren werden freie Elektronen gebunden, da das Störatom zu wenig Elektronen mitbringt. Man bezeichnet derartige Störatome auch als Akzeptoren, da sie Elektronen aufnehmen können.

- Ionisierungsenergie E_D und E_A :

Die Energie, die nötig ist, um den Donatoren überschüssige Elektronen zu „entreissen“ und dem Leitungsband zuzuführen, wird Ionisierungsenergie E_D genannt. Dasselbe gilt für Akzeptoren. Die Energie, die nötig ist, um den Akzeptoren Elektronen aus dem Valenzband zuzuführen, wird Ionisierungsenergie E_A genannt. Man könnte im zweiten Fall auch von Löchern sprechen, die dem Valenzband zugeführt werden. Dabei wird eine bestimmte Energie E_A gebraucht.

Merke: Die Energiezustände der Elektronen der Störatome sind entweder direkt unterhalb des Leitungsbandes (Donatoren) oder direkt über dem Valenzband (Akzeptoren).

- Konzentration der freien Elektronen:

$$n(T) = \sqrt{\frac{n_D N_L}{2}} \cdot e^{\frac{-E_D}{2kT}} \quad p(T) = \sqrt{\frac{n_A N_V}{2}} \cdot e^{\frac{-E_A}{2kT}}$$

n_D : Konzentration der Donatoratome

n_A : Konzentration der Akzeptoratome

N_L : effektive Zustandsdichte im Leitungsband

N_V : effektive Zustandsdichte im Valenzband

- Störstellenerschöpfung: Alle Störstellen sind ionisiert.

$$n = \frac{n_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{n_D}{2} \right)^2 + n_i^2} \quad p = \frac{n_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{n_A}{2} \right)^2 + n_i^2}$$

Merke: Ist nur ein Teil der Störstellen ionisiert, spricht man von Störstellenreserve.

Für $n_D \gg n_i$ sowie $n_A \gg n_i$ gilt bei Raumtemperatur:

	n-Typ-Halbleiter:	p-Typ-Halbleiter:
Majoritätsträgerdichte	$n = n_D$	$p = n_A$
Minoritätsträgerdichte	$p = \frac{n_i^2}{n_D}$	$n = \frac{n_i^2}{n_A}$
elektr. Leitfähigkeit	$\sigma = e \cdot \mu_n \cdot n_D$	$\sigma = e \cdot \mu_p \cdot n_A$

pn-Übergang

Infolge des grossen Konzentrationsunterschieds diffundieren Elektronen aus dem n- ins p-Gebiet und Löcher vom p- ins n-Gebiet. Wegen der positiven und negativen Raumladungszone entstehen ähnlich wie beim Plattenkondensator ein Potentialgefälle und ein elektrisches Feld zwischen dem n- und p-Gebiet. Im Kontaktbereich ist n und p stark reduziert. Man bezeichnet diesen Bereich auch Verarmungsbereich (depletion region). Dieser Bereich ist daher sehr hochohmig.

- Diffusionsspannung:

$$\frac{n_p}{n_A} = \frac{n_i^2}{n_A n_D} = e^{\frac{-eU_d}{kT}} \Rightarrow U_d = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A n_D}{n_i^2}\right) = e^{\frac{-eU_d}{kT}} = 59.6 \text{ mV} \cdot \log\left(\frac{n_A n_D}{n_i^2}\right)$$

mit der Temperaturspannung $U_T = \frac{kT}{e}$

- Nettostrom:

$$I_{tot} = I_{Drift} + I_{Diffusion} = q \mu_n n E - q D_n \frac{dn}{dx} = q \mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad \text{mit} \quad D_{n,p} = \mu_{n,p} \cdot \left(\frac{kT}{e}\right)$$

Mit E ist hier das elektrische Feld gemeint.

Merke: Im Gleichgewicht fliesst kein Nettostrom.

- Breite der Raumladungszone:

$$d = d_n + d_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0 U_d}{e} \cdot \frac{n_A + n_D}{n_A n_D}} \quad \text{Ladungsträgerneutralität: } d_n n_D = d_p n_A$$

- Zusätzliche Spannung U am pn-Übergang anlegen: $U_d' = U_d - U$, $\Delta E = e \cdot U$

- $U < 0$: Sperrichtung, Raumladungszone wird grösser, Sperrstrom I_s fliesst noch
- $U > 0$: Flussrichtung, Raumladungszone wird kleiner

- Gesetz von W. Shockley: $I = I_s \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1\right)$

- Zener-Effekt:

Infolge der grossen Feldstärke im Innern des pn-Übergangs werden Elektronen aus dem Valenzband des p-Materials über die verbotene Zone ins Leitungsband des n-Materials gezogen (Durchtunneln).

- Avalanche-Effekt (Lawineneffekt):

Ein Elektron bewegt sich bei grosser elektrischer Feldstärke so schnell, dass es bei einem Zusammenstoss mit dem Gitter einen Teil seiner Energie abgeben und ein neues freies Elektron-

Loch-Paar erzeugen kann. Diese Ladungsträger werden wiederum beschleunigt und es bilden sich erneut Elektron-Loch-Paare (Lawineneffekt).

Licht in Wechselwirkung mit Elektronen

- Definitionen:
 - **Absorption und Emission:** Ein Photon mit der Energie $h\nu > E_2 - E_1$ bewirkt, dass ein Elektron vom Energiezustand E_1 nach E_2 gelangt. Ist die Energie des Photons gerade $E_2 - E_1$, dann kann das Elektron nicht im Zustand E_2 verweilen, sondern fällt direkt in den Ausgangszustand E_1 zurück und es wird dieselbe Energie wieder freigesetzt (Resonanzabsorption). Ist die Energie ungefähr der Ionisierungsenergie, dann wird sogar ein Elektron freigesetzt (Photoeffekt). Oberhalb der Ionisierungsenergie wird zum Elektron noch ein Photon freigesetzt (Compton-Streuung).
 - **Spontane Emission:** Ein Elektron gelangt spontan in ein tieferes Energieniveau (von E_2 nach E_1) und emittiert dabei ein Photon der Energie $h\nu_{21}$. Gelangt ein Elektron in ein hohes Energieniveau dann kann es über etliche Energieniveaus zum Ausgangszustand zurückkommen und wird dabei bei jeder Energieschwelle ein Photon mit unterschiedlicher Frequenz emittieren (Fluoreszenz).
 - **Stimulierte Emission:** Ein Elektron besetzt ein höheres Energieniveau E_2 . Ein Photon werde nun absorbiert und trage ein Elektron von Energieniveau E_1 nach E_2 . Dieses Energieniveau ist aber bereits besetzt. Deshalb wird das Elektron wieder emittiert. Zusätzlich wird aber auch das Elektron des Energieniveau E_2 zum Ausgangsniveau E_1 gebracht, da es mit dem anderen Elektron wechselwirkt. Dabei wird wieder ein Photon mit der gleichen Wellenlänge und in Phase frei. Es entsteht kohärentes Licht. LASER versuchen mittels optischem Pumpen hohe Energiezustände besetzt zu halten, damit sie nachher in einer stimulierten Emission kohärentes Licht ausstrahlen können (Besetzungsinversion).
- Für die Raten gilt im Gleichgewicht: $R_{Absorption} = R_{spontane Emission} + R_{stimulierte Emission}$

- Weiter gilt:

Absorptionsrate: $n_1 \cdot B_{12} \cdot \rho(h\nu_{12})$

Rate für stimulierte Emission: $n_2 \cdot B_{21} \cdot \rho(h\nu_{21})$

Rate für spontane Emission: $n_2 \cdot A_{21}$

$$\frac{R_{stimulierte Emission}}{R_{spontane Emission}} = \frac{B_{21}}{A_{21}} \cdot \rho(h\nu_{12})$$

$$\frac{R_{stimulierte Emission}}{R_{Absorption}} = \frac{B_{21}}{B_{12}} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

n_1 : Besetzungswahrscheinlichkeit von Energieniveau E_1

ρ : Dichte des Photonenfeldes

n_2 : Besetzungswahrscheinlichkeit von Energieniveau E_2

B_{12}, B_{21}, A_{21} : Koeffizienten

Wichtige Relationen

Temperaturumrechnung von Kelvin nach Grad Celsius: $[T \text{ in } ^\circ\text{C}] = [T \text{ in } \text{K}] - 273.15$

Energieumrechnung von Joule nach Elektronenvolt: $1 \text{ eV} \cong 1.60219 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Energieumrechnung von Joule nach Kilokalorien: $1 \text{ kcal} \cong 4.1868 \text{ kJ}$

Druckumrechnungen: $1 \text{ bar} \cong 10^5 \text{ Nm}^{-2} = 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ atm} \cong 101325 \text{ Pa}$,
 $1 \text{ Torr} \cong 1/760 \text{ atm} \approx 1.333 \text{ mbar}$

Widerstand einer Leitung: $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$ mit dem spezifischen Widerstand ρ [Ωm]

Leitfähigkeit: $\sigma = \frac{1}{\rho}$ mit der Einheit [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]

Physikalische Konstanten

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2.99792458 \cdot 10^{11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

Elementarladung: $e = 1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Planksches Wirkungsquantum: $h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05457266 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

elektrische Feldkonstante: $\epsilon_0 = 8.85418782 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1} \text{ m}^{-1}$

magnetische Feldkonstante: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ VsA}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Avogadro-Konstante: $N_A = 6.0221367 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

universelle Gaskonstante: $R_m = 8.3145 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Boltzmann-Konstante: $k = \frac{R_m}{N_A} = 1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

Ruhemasse des Elektrons: $m_e = 9.1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Ruhemasse des Protons: $m_p = 1.6726231 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Ruhemasse des Neutrons: $m_n = 1.6749286 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Gravitationskonstante: $\gamma = 6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

Tripelpunkt des Wassers: $T_{Tr} = 273.16 \text{ K}$