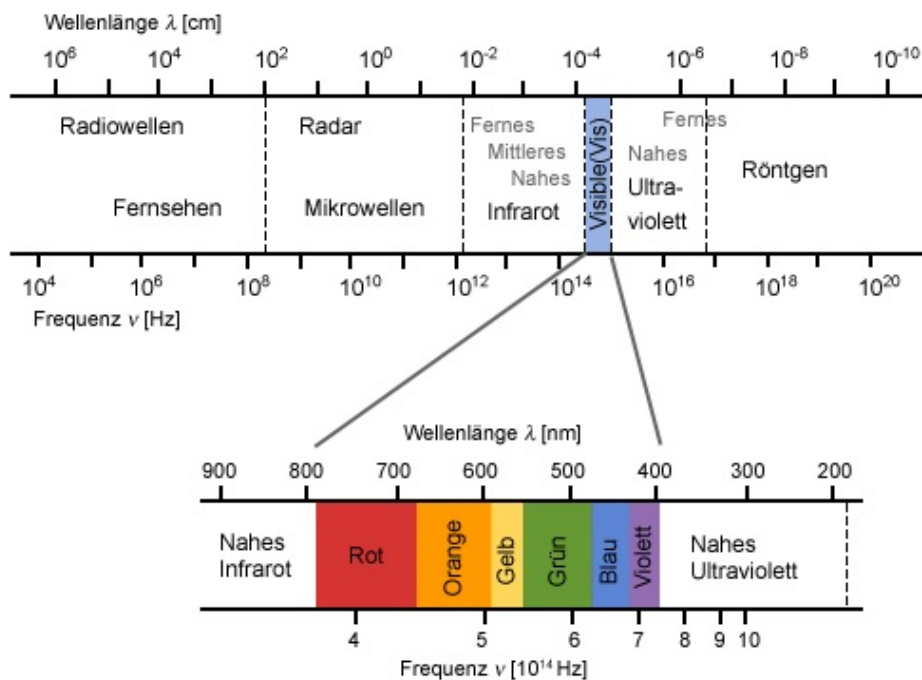


A Konstanten

Avogadrokonstante	N_A	$6.022 \cdot 10^{23}$	1/mol
Lichtgeschwindigkeit	c_0	$2.99792458 \cdot 10^8$	m/s
Elementarladung	e	$1.60218 \cdot 10^{-19}$	C
Elektronenmasse	m_e	$9.10939 \cdot 10^{-31}$	kg
Elektronenvolt	eV	$1.60218 \cdot 10^{-19}$	J
Protonenmasse	m_p	$1.672622 \cdot 10^{-27}$	kg
Dielektrizitätskonstante des Vakuums	ε_0	$8.8542 \cdot 10^{-12}$	As/(Vm) = F/m
magnetische Feldkonstante	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	N/A ²
Planck'sches Wirkungsquantum	h	$6.626 \cdot 10^{-34}$	J s
	$\hbar$	$\frac{h}{2\pi}$	
Boltzmann Konstante	k_B	$1.38065 \cdot 10^{-23}$	J/K
Thermische Energie @ 300 K	$k_B \cdot T$	0.0259	eV
Temperaturspannung @ 300 K	$\frac{k_B \cdot T}{e}$	25.9	mV
Universelle Gaskonstante	$R = N_A \cdot k_B$	8.31451	J/K mol
Photonwellenlänge	λ	1240 nm eV/E	



B Grundlagen

Atome

Schale	Hauptquantenzahl	Nebenquantenzahl	Magnetquantenzahl	Bezeichnung	Max Elektronenbelegung
	n	l	m		
		0 bis (n-1)	von -l bis +l		2(2l+1)
K-Schale	1	0	0	1s	2
L-Schale	2	0	0	2s	2
L-Schale	2	1	-1,0,1	2p	6
M-Schale	3	0	0	3s	2
M-Schale	3	1	-1,0,1	3p	6
M-Schale	3	2	-2,-1,0,1,2	3d	10
N-Schale	4	0	0	4s	2
N-Schale	4	1	-1,0,1	4p	6
N-Schale	4	2	-2,-1,0,1,2	4d	10
N-Schale	4	3	-3,-2,-1,0,1,2,3	4f	14

Stoffmasse	m in kg	$m = n \cdot M_{at}$	
Molmasse=Atomare Masse	M_{at} in kg/mol	$M_{at} = \frac{m}{n}$	(siehe Periodensystem)
Masse eines Atoms	m_{at} in kg	$m_{at} = \frac{M_{at}}{N_A}$	
Stoffmenge	n in mol		
Teilchenzahl	N	$N = n \cdot N_A$	

Kristallstrukturen von Feststoffen

Gitterkonstante	a in m		Seitenlänge der Elementarzelle
Atomradius	R in m		
Koordinationszahl	KZ		Anzahl nächsten Nachbarn einer Struktureinheit
Anzahl Atome / Einheitszelle	x		
Atomare Konzentration	n_{at} in m^{-3}	$n_{at} = \frac{x}{V} = \frac{x}{a^3}$	Anzahl At. pro Volumeneinheit
Massendichte	ρ in kg/m^3	$\rho = \frac{n_{at} \cdot M_{at}}{N_A} = n_{at} \cdot m_{at}$	unabhängig von Kristallstruktur
Atomic Packing Factor	APF	$APF = \frac{V_{Atome}}{V_{Einheitszelle}} = \frac{x \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot R^3}{a^3}$	

Thermische Eigenschaften

Temperatur T in Kelvin

Druck P in Pascal

Volumen V in m^3

Gasgleichung $P \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T =$

$$N \cdot k_B \cdot T$$

Kinetische Gastheorie

$$P = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$$

Mittlere Teilchengeschwindigkeit

$$\bar{v} \approx \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi M}}$$

Mittlere quadratische Geschwindigkeit

$$v_{rms} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{M}}$$

Thermische Energie pro voll angeregtem Freiheitsgrad

$$E = \frac{1}{2} \cdot k_B \cdot T$$

Äquipartitionstheorem

Thermische Energie pro Atom

$$E = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T$$

Molare Wärmekapazität der idealen Gase

$$C_m = 3/2 \cdot R$$

3 Freiheitsgrade

Molare Wärmekapazität des Festkörpers

$$C_m = 3 \cdot R = 25 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

Dulong-Petit Regel, 6 Freiheitsgrade

Maxwell-Boltzmann Verteilung

$$\frac{dN}{N} = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi k_B \cdot T} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Bruchteil der Teilchen mit Geschwindigkeit zwischen v und $v + dv$.

Thermisches Gleichgewicht

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

N_i Dichte der Teilchen im Zustand der Energie E_i . g_i Entartungsfaktor für Niveau i .

Table 1.3 Properties of some important crystal structures

Crystal Structure	a and R (R is the Radius of the Atom)	Coordination Number (CN)	Number of Atoms per Unit Cell X	Atomic Packing Factor	Examples
Simple cubic	$a = 2R$	6	1	0.52	No metals (Except Po)
BCC	$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$	8	2	0.68	Many metals: α -Fe, Cr, Mo, W
FCC	$a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$	12	4	0.74	Many metals: Ag, Au, Cu, Pt
HCP	$a = 2R$ $c = 1.633a$	12	2	0.74	Many metals: Co, Mg, Ti, Zn
Diamond	$a = \frac{8R}{\sqrt{3}}$	4	8	0.34	Covalent solids: Diamond, Ge, Si, α -Sn
Zinc blende (ZnS)		4	8	0.34	Many covalent and ionic solids. Many compound semiconductors. ZnS, GaAs, GaSb, InAs, InSb
NaCl		6	4 cations 4 anions	0.67 (NaCl)	Ionic solids such as NaCl, AgCl, LiF, MgO, CaO Ionic packing factor depends on relative sizes of ions.
CsCl		8	1 cation 1 anion		Ionic solids such as CsCl, CsBr, CsI

C Klassische Theorie

Leitfähigkeit

Widerstand	R in Ω		
Spezifischer Widerstand	ρ_{el} in $\Omega \cdot m$		
Drahtwiderstand		$R = \rho_{el} \frac{L}{A} = \rho_{el} \frac{L}{\sigma \cdot A}$	Länge L , Querschnittsfläche A
”Ohmsches Gesetz”	$U = RI$		Spannung U in V, Strom I in A
elektrischer Leitwert	G in Ω^{-1}	$G = \frac{1}{R}$	
elektrische Leitfähigkeit	σ in $(\Omega \cdot m)^{-1} = S/m$		
elektrische Feldstärke	E	$E = U/L$	Leiterlänge L
elektrische Stromdichte	j	$j = \frac{I}{A}$	
Ohm’sches Gesetz		$j = \sigma E$	Leitfähigkeit $\times$ elektrische Feldstärke

Das freie Elektronengas (Drude)

Driftgeschwindigkeit	v_d in m/s	$v_d = -\mu_d \cdot E$	
Trägerbeweglichkeit	μ_d in $m^2/(Vs)$	$\mu = \frac{e \cdot \tau}{m_e}$	
Leitfähigkeit	σ in $(\Omega \cdot m)^{-1}$	$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_d$	
Dichte der Leitungselektronen	n in cm^{-3}		
Matthiessensche Regel		$\rho_{el}(T) = \rho_T + \rho_R = AT + B$	
Spez. Widerstand Metalle		$\rho_{el}(T) = \rho_0(T/T_0)^n$	Potenzgesetz
Elektronenbeweglichkeit		$\mu = \frac{\sigma}{e \cdot n}$	
Leitfähigkeit		$\sigma = \frac{n \cdot e^2 \cdot \tau}{m_e}$	
Relaxationszeit	τ in s	$\tau = \frac{\sigma \cdot m_e}{e^2 \cdot n}$	mittlere Zeit zw. 2 Streuungen
Mittlere freie Länge	l in m	$l = v\tau$	v mittlere Geschwindigkeit
Hallkonstante	R_H in $m^3 A^{-1} s^{-1}$	$R_H = \frac{E_y}{j_x B_z}$	
Hallkonstante in Metalle		$R_H = -\frac{1}{n \cdot e}$	$n = \frac{-I \cdot B}{e \cdot d \cdot U_H}$
Hallkonstante in Halbleiter		$R_H = \frac{p \cdot \mu_h^2 - n \cdot \mu_e^2}{e(p \cdot \mu_h + n \cdot \mu_e)^2}$	
Hallspannung	in V	$U_H = R_H \frac{IB}{d} = v \cdot B \cdot w$	
Thermische Leitfähigkeit	κ in $W/(mK)$	$\kappa = \frac{1}{3} c_v l_v$	
Wiedemann-Franz Gesetz		$C_{WFL} = \frac{\kappa}{\sigma T}$	Lorenz number $C_{WFL} = 2.44 \cdot 10^{-8} W\Omega/K^2$
Hallbeweglichkeit		$\mu_H = \sigma \cdot R_H $	$\approx$ Driftbeweglichkeit
Stossrate		$1/\tau$	

Skineffekt	Eindringtiefe in m	$\delta = (0.5 \cdot \omega \sigma \mu)^{-0.5} = \sqrt{\frac{2\rho_{el}}{\omega \mu}}$	ρ_{el} spez. Widerstand des Leiters, σ Leitfähigkeit, $\omega = 2\pi f$ Kreis- frequenz, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ absolute Permeabilität des Leiters, welche das Produkt aus der Permeabi- litätskonstanten und der relati- ven Permeabilitätszahl des Lei- ters ist.
	Stromdichte	$J = J_s \cdot e^{-z/\delta}$	J_s Stromdichte am Rand, z Ab- stand vom Rand
	1 Skinstiefe	= 37% Abschirmung	
	AC-Widerstand	$R_{AC} \approx \frac{\rho_{el} L}{2\pi a \delta}$	a Radius, L Länge vom Draht, Widerstand nimmt zu

D Quantenphysik

Photonen ($m_0 = 0$)

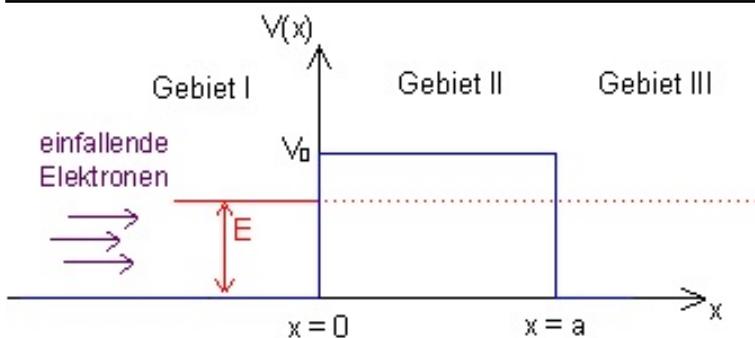
Lichtgeschwindigkeit	in m/s	$c = \frac{c_0}{n}$	n Medium mit Brechungsindex n
Lichtgeschwindigkeit		$c = \lambda \cdot f$	λ Wellenlänge, f Frequenz
Bragg Bedingung (Reflexion)		$2d \sin \theta = n \cdot \lambda$	Maxima der Ordnung n , Netzebenenabstand d
Energie eines Photons	in J	$E = h \cdot f = \hbar \omega = \frac{hc}{\lambda}$	Frequenz f , Kreisfrequenz ω
Impuls eines Photons	in Ns	$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c} = \frac{E}{c} = \hbar k$	Lichtwellenlänge λ , Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$
Photoeffekt	Energie der freien Elektronen	$E_{kin} = hf - W_A$	$W_A = hf_0$ = Austrittsarbeit (materialabhängig)
Intensität	Leistung pro Fläche in W/m ²	$I = \Gamma_{ph} \cdot E = \frac{\Delta N_{ph}}{A \Delta t} \cdot hf$	Γ_{ph} =Photonenfluss in 1/(m ² s), ΔN_{ph} =Anzahl Photonen durch Fläche A in der Zeit Δt
Photonenfluss	Γ_{ph} in 1/(m ² s)	$\Gamma_{ph} = \frac{I}{E}$	
Photostromdichte	J in A/m ²	$J = QE \cdot e \cdot \Gamma_{ph}$	Quantenausbeute QE = Elektronenfluss / Photonenfluss

Elektronen

Materiewellen	de Broglie Wellenlänge	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$	Teilchens mit Masse m und Geschwindigkeit v
Wellenfunktion	stationäre ebene Welle	$\Psi(x, t) = \psi(x) \exp(-\frac{iEt}{\hbar})$	Betragsquadrat bestimmt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens.
Schrödinger-Gleichung	stationär	$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)$	1D, zeitunabhängig. Teilchen mit Energie E im Potential V
Potential	V		beschreibt alle externen Kräfte auf das Teilchen
freies Teilchen	$V(x, t) = 0$	$E = p^2/2m$	alle Energiewerte möglich
1D unendlich hohen Potentialtopf		$E_n = \frac{\hbar^2 n^2}{8ma^2}$	diskrete Energiewerte, a = Kastenlänge, $n = 1, 2, 3, \dots$
3D unendlich hohen Potentialtopf	Energieabstände	$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{\hbar^2(2n+1)}{8ma^2}$ $E_{n_1, n_2, n_3} = \frac{\hbar^2}{8m} \cdot (\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} + \frac{n_3^2}{c^2})$	3 Quantenzahlen, Zustände degeneriert
Wasserstoffähnliches Atom	Z Protonen und 1 Elektron	$E_n = -\frac{me^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} = -\frac{Z^2 E_I}{n^2}$	$n = 1, 2, 3, \dots$ Quantenzahl
	mit	$E_I = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} = 13.6 \text{ eV}$	Ionisationsenergie Wasserstoff (Grundzustand)

4 Quantenzahlen	Hauptquantenzahl $n = 1, 2, 3, \dots$ Nebenquantenzahl $l = 0, 1, \dots, (n - 1)$ Magnetquantenzahl $m_l = -l, \dots, 0, \dots, +l$ Spinquantenzahl $m_s = \pm 1/2$	Schale K,L,M, Unterschalen s,p,d,f räumliche Ausrichtung Eigendrehimpuls (Spin)
Pauliprinzip	Zwei gleiche Teilchen können sich in einem System nicht im gleichen Quantenzustand befinden	
Hundsche Regel	Die Spins stehen solange parallel wie dies nur möglich ist.	
Transitionen	beim Übergang vom Niveau $E_2 > E_1$ nach E_1	$hf = E_2 - E_1$ Energie des abgestrahlten Photons

Tunneleffekt



Transmissions- wahrscheinlichkeit	$[T] = 1$	$T = \left(1 + \frac{V_0^2 \sinh^2(\alpha a)}{4E(V_0 - E)}\right)^{-1}$	Teilchenmasse m in kg, Barri- renhöhe V_0 in J, Barrierenbreite a in m, Teilchenenergie E in J
Näherung für breite oder hohe Barriere	$[\alpha] = m^{-1}$	$\alpha = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$	
Reflexionskoeffizient		$T \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} \exp(-2\alpha a)$	für $\alpha \cdot a \gg 1$
		$R = 1 - T$	

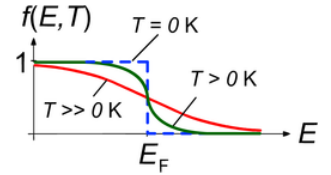
E Moderne Theorie (Bändermodell)

Fermi-Temperatur

$$T_F = \frac{E_F}{k}$$

Fermi-Dirac-Verteilung

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp((E - E_F)/kT)}$$



beschreibt die statistische Verteilung der Elektronen auf die verfügbaren Zustände

Fermi-Energie

at 0 K

$$f(E_F) = 0.5$$

$$E_{F0} = \frac{\hbar^2}{8m_e} (3n/\pi)^{2/3}$$

$$E_F(T) = E_{F0} \left(1 - \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{E_{F0}}\right)^2\right)$$

Mittlere Energie

at 0K

$$E_{av}(0) = \frac{3}{5} E_{F0}$$

Mittlere Energie

at T

$$E_{av}(T) = \frac{3}{5} E_{F0} \left(1 + \frac{5\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{E_{F0}}\right)^2\right)$$

Elektronengeschwindigkeit
at Fermilevel

$$v_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m_e}}$$

rms Elektronengeschwindigkeit

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{6E_F}{5m_e}}$$

effektive Elektronenmasse

 m_e^*

effektive Löchermasse

 m_h^*

Zustandsdichte

$$D(E) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 \frac{N}{V})^{2/3}$$

Energilücke

 E_g in eVHalbleiter: $E_g \leq 3\text{eV}$ Isolator: $E_g > 3\text{eV}$

Boltzmannstatistik

$$P(E) = A \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

Wahrscheinlichkeit ein Teilchen zu finden mit Energie E bei fester Temperatur. Boltzmannstatistik ist gültig, falls viel mehr Energieniveaus vorhanden sind, wie Teilchen die auf die Niveaus verteilt werden (klassisch oder Leitungsband).

Besetzung der Energieniveaus
(Boltzmann) Elektronenmit $E_2 > E_1$
und $N_2 < N_1$

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$$

Besetzung der Energieniveaus
(Boltzmann) Löchermit $E_2 > E_1$
und $N_2 > N_1$

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$$

höheres Niveau schwächer besetzt

höheres Niveau stärker besetzt. Löcher wie "Luftblasen im Energiesee", wollen aufsteigen, "Defektelektronen"

Kontaktspannung ΔV in VMetal-Metal
Kontakt

$$e\Delta V = \Phi_1 - \Phi_2$$

Seebeck Effekt

Seebeck Koeffizient S in V/K

$$S = \frac{dV}{dT}$$

Differenz der Elektronen-Austrittsarbeit

Materialkonstante, Potentialdifferenz dV in Abhängigkeit von der vorherrschenden Temperaturdifferenz dT .

Mott Jones
Gleichung

$$S \approx -\frac{\pi^2 k^2 T}{3e E_{F0}} x$$

Thermoelement

$$V_{AB} = \int_{T_0}^T (S_A - S_B) dT$$

Thermoelement

$$V_{AB} = V_{A-Pt} - V_{B-Pt}$$

Referenz Platin für EMF

F Halbleiter

intrinsischer Halbleiter

Leitfähigkeit von Halbleitern

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

Löcherdichte p [cm^{-3}], Elektronendichte n [cm^{-3}]
verschiedene Trägerbeweglichkeiten für die Löcher und die Elektronen

$$\mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h^*}$$

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*}$$

mittlere Zeit zwischen zwei Streuungen τ_e, τ_h [s]
Elektronenkonzentration im Leitungsband n [cm^{-3}]

$$n = N_C \exp \left[-\frac{E_C - E_F}{k_B T} \right]$$

Löcherkonzentration im Valenzband p [cm^{-3}]

$$p = N_V \exp \left[-\frac{E_F - E_V}{k_B T} \right]$$

effektive Dichte N_C [cm^{-3}] an der Leitungsbandkante

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

effektive Masse (b) aus Tabelle nehmen

effektive Dichte N_V [cm^{-3}] an der Valenzbandkante

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Massenwirkungsgesetz, gültig im thermischen Gleichgewicht, für den intrinsischen und den extrinsischen Halbleiter

$$n_i^2 = np \quad (2)$$

intrinsische Teilchendichte n_i [cm^{-3}]

intrinsische Teilchendichte

$$n_i = \sqrt{N_C \cdot N_V} \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right)$$

Table 5.1 Selected typical properties of Ge, Si and GaAs at 300 K. Effective mass related to conductivity (labeled a) is different than that for density of states (labeled b).

	E_g (eV)	χ (eV)	N_c (cm ⁻³)	N_v (cm ⁻³)	n_i (cm ⁻³)	μ_e (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	μ_h (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	m_e^*/m_e	m_h^*/m_e	ϵ_r
Ge	0.66	4.13	1.04×10^{19}	6.0×10^{18}	2.4×10^{13}	3900	1900	0.12 a 0.56 b	0.23 a 0.40 b	16
Si	1.10	4.01	2.8×10^{19}	1.04×10^{19}	1.45×10^{10}	1350	450	0.26 a 1.08 b	0.38 a 0.56 b	11.9
GaAs	1.42	4.07	4.7×10^{17}	7×10^{18}	1.8×10^6	8500	400	0.067 a,b 0.50 b	0.40 a	13.1

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)
<http://Materials.usask.ca>

extrinsischer Halbleiter (dotiert)

Ionisierungsenergie eines Dotierungsatoms in Silizium (Beispiel) mit ϵ_r

$$E_b^{Si} = \frac{m_e^* e^4}{8 \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 h^2}$$

effektive Masse (a) aus Tabelle nehmen

n-Typ: Donatordotierung N_d [cm⁻³], $N_d \gg n_i$, Majoritätsträger $n_{n0} \approx N_d$,
 Minoritätsträger p_{n0}

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} \approx \frac{n_i^2}{N_d}$$

Elektronenleitung

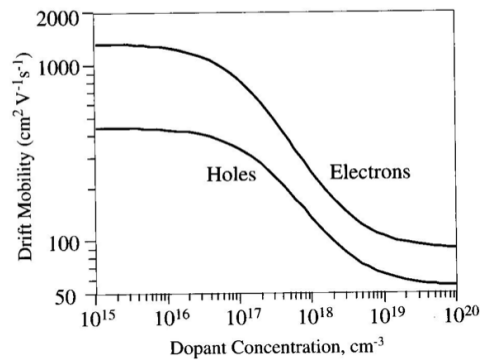
$$\sigma = e p_{n0} \mu_h + e n_{n0} \mu_e \approx e \frac{n_i^2}{N_d} \mu_h + e N_d \mu_e \approx e N_d \mu_e$$

p-Typ: Akzeptordotierung N_a [cm⁻³], $N_a \gg n_i$, Majoritätsträger $p_{p0} \approx N_a$,
 Minoritätsträger n_{p0}

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} \approx \frac{n_i^2}{N_a}$$

Löcherleitung

$$\sigma = e p_{p0} \mu_h + e n_{p0} \mu_e \approx e N_a \mu_h + e \frac{n_i^2}{N_a} \mu_e \approx e N_a \mu_h$$



Diffusion

Diffusionskonstanten	D in m^2/s		
Einsteinbeziehung		$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{k_B T}{e}$ $\frac{D_h}{\mu_h} = \frac{k_B T}{e}$	
Verschiebung	Δx in m	$\Delta x = \sqrt{2D\Delta t}$	Brownsche Bewegung im Medium mit Diffusionskonstante D , mittlere Verschiebung durch Diffusion Δ (in m) während der Zeitspanne Δt (in s)

Schottky Junction

Built-in voltage	$eV_0 = \Phi_m - \Phi_n$	=Diffusionsspannung U_D
Schottky Barrier Höhe	$\Phi_B = \Phi_m - \chi = eV_0 + (E_C - E_{Fn})$	für Metal/n-Halbleiter
Schottky Diode	$J(V) = J_0(\exp(\frac{eV}{k_B T}) - 1)$ $J_0 = \dots$	Strom-Spannung-Kennlinie J_0 Sättigungsstromdichte (materialabhängig)

Peltiereffekt

tritt nur auf am ohmschen Metall-Halbleiterkontakt

Peltiereffekt	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \Pi \cdot I$	Wärmeabgabe ΔQ + und Wärmeaufnahme - sind proportional zu dem durch den Kontakt fließenden Strom I .
Peltierkoeffizient	Π in V	$\Pi = \frac{1}{e} (E_C - E_{Fn} + 2k_B T)$

G Halbleiter-Devices

pn-Übergang

ohne äussere Spannung

W_n [m] Anteil der Verarmungszone auf der n-Typ Seite, W_p [m] Anteil der Verarmungszone auf der p-Typ Seite
Ladungsneutralität in der Verarmungszone

$$0 = -eN_aW_p + eN_dW_n$$

oder

$$N_aW_p = N_dW_n$$

$\rho_{\text{net}}(x)$ [C/cm³] Raumladungsdichte in der Verarmungszone
Maxwellgleichung für das innere elektrische Feld $\mathcal{E}_x(x)$ [V/m] (eindimensional)

$$\varepsilon \frac{d\mathcal{E}_x(x)}{dx} = \rho_{\text{net}}(x)$$

Maximalwert des inneren elektrischen Feldes $\mathcal{E}_0$ [V/m]

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_x(x=0) = -\frac{eN_aW_p}{\varepsilon} = -\frac{eN_dW_n}{\varepsilon}$$

das elektrische Feld ist der negative Gradient des elektrischen Potentials φ [V]

$$\mathcal{E}_x(x) = -\frac{d\varphi(x)}{dx}$$

innere Spannung V_0 [V]

$$V_0 = -\frac{1}{2}\mathcal{E}_0W_0 = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

W_0 [m] Breite der Verarmungszone

$$W_0 = \left[\frac{2\varepsilon(N_a + N_d)V_0}{eN_a N_d} \right]^{\frac{1}{2}}$$

mit Vorwärtsspannung $V > 0$

Breite der Verarmungszone W [m] als Funktion der äusseren Spannung

$$W = \left[\frac{2\varepsilon(N_a + N_d)(V_0 - V)}{eN_a N_d} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Gesetz des Übergangs

$$p_n(0) = p_{n0} \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right)$$

$$n_p(0) = n_{p0} \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right)$$

Minoritätsträgerkonzentrationsverlauf in den neutralen Gebieten wird beschrieben durch zwei Prozesse: Diffusion und Rekombination. Der Gradient der Diffusionsstromdichte und die Rekombination heben sich gegenseitig auf. Es gilt im stationären Fall (Löcher)

$$-\frac{1}{e} \frac{dJ_{D,hx}(x)}{dx} - \frac{\Delta p_n(x)}{\tau_p} = 0$$

Löcherkonzentrationsüberschuss $\Delta p_n(x) = p_n(x) - p_{no}$

Differentialgleichung für den Löcherkonzentrationsüberschuss Δp_n

$$\frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} = \frac{\Delta p_n}{L_h^2}$$

Diffusionslängen L_h, L_e [m] der Minoritätsträger in den neutralen Gebieten

$L_h = \sqrt{D_h \tau_p}$ (Löcher) $L_e = \sqrt{D_e \tau_n}$ (Elektronen)

Netto-Stromdichte J_x [A/m²] (Shockley-Gleichung)

$$J_x = J_S \left[\exp \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

und die Sperrstromdichte J_S [A/m²]

$$J_S = \left(\frac{eD_e}{L_e N_a} + \frac{eD_h}{L_h N_d} \right) n_i^2$$

Strom-Spannungskennlinie

$$I = I_S \left[\exp \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

Diodenstrom $I = AJ_x$ [A], Sperrstrom $I_S = AJ_S$ [A]

Kennlinie mit Rekombination in der Verarmungszone

$$J_x = J_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{\eta k_B T} \right) - 1 \right]$$

J_0 [A/m²] ist eine modifizierte Sperrstromdichte und η [1] ist der Formfaktor

Diffusionsspannung = innere Spannung

$$V = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)$$

mit Rückwärtsspannung $V = -V_r < 0$

Rückwärtsstromdichte $J_{\text{rev},x}$ für $|V| > k_B T / e$

$$J_{\text{rev},x} = -J_S + J_{\text{gen},x}$$

$J_S > 0$ ist die Sperrstromdichte $J_{\text{gen},x}$ ist die thermisch erzeugte Stromdichte

$$J_{\text{gen},x} = -\frac{eWn_i}{\tau_g}$$

die Breite der Verarmungszone hängt von der Spannung V ab $W = W(V)$

Kleinsignalersatzschaltbild des pn-Übergangs

Kennlinie der Diode für $V \gg k_B T/e$

$$I(V) \approx I_S \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right)$$

differentieller Widerstand r_d [Ω]

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{\bar{V}} = \frac{eI(\bar{V})}{k_B T}$$

Sperrschichtkapazität C_S [F]

$$C_S = \left| \frac{dQ}{dV} \right| = \frac{\varepsilon A}{W(V)} = \frac{A}{(V_0 - V)^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{e\varepsilon N_a N_d}{2(N_a + N_d)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

A [m^2] Querschnitt der Diode

Diffusionskapazität C_D [F]

$$C_D = \tau_p \left. \frac{dI}{dV} \right|_{\bar{V}} = \tau_p \frac{eI(\bar{V})}{k_B T}$$

LED

Leistungseffizienz	$\eta_{Leistung} = \frac{P_{optical}}{IV}$	Optische Leistung im Verhältnis zur aufgenommenen elektrischen Leistung
Interne Quanteneffizienz (IQE)	$\eta_{int} = \frac{P_{int}/hf}{I/e}$	Anzahl Photonen emittiert pro Sekunde im Verhältnis zur Anzahl Elektronen injiziert pro Sekunde
Extraktionseffizienz	$\eta_{Extraktion} = \frac{P_{optical}}{P_{int}}$	Anzahl Photonen emittiert in den freien Raum pro Sekunde im Verhältnis zur Anzahl Photonen emittiert pro Sekunde
Externe Quanteneffizienz (EQE)	$\eta_{external} = \eta_{int} \cdot \eta_{extraktion} = \frac{P_{optical}/hf}{I/e}$	Anzahl Photonen emittiert in den freien Raum pro Sekunde im Verhältnis zur Anzahl Elektronen injiziert pro Sekunde
Linienbreite	Δf oder $\Delta \lambda$ $\Delta(hf) \approx 3k_B T$	Breite des Frequenz- oder Wellenlängenintervalls = Full Width at Half Maximum (FWHM)

Solarzelle / Photodiode

I-U Kennlinie	$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{\eta k_B T}\right) - 1 \right) - I_{ph}$	Photostrom I_{ph} Einstrahlung abhängig, η diode ideality faktor
Punkt maximaler Leistung	I_{MPP} und U_{MPP}	maximum power point MPP
Füllfaktor	$FF = \frac{P_{MPP}}{U_0 \cdot I_K} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_0 \cdot I_K} < 1$	Mass für die Qualität einer Solarzelle. Quotient aus maximaler Leistung und Produkt aus Leerlaufspannung U_0 und Kurzschlussstrom I_K . $FF = 100\% =$ Rechteck
Leistung des eingestrahlten Lichts pro Fläche	$P_{Licht} = A \cdot E$	Bestrahlungsstärke E in W/m^2
Wirkungsgrad	$\eta = \frac{P_{abgegeben}}{P_{aufgenommen}} = \frac{P_{elektrisch}}{P_{Licht}} = \frac{U \cdot I}{P_{Licht}}$ $\eta = \frac{P_{MPP}}{FF \cdot U_0 \cdot I_K} = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{P_{Licht}}$	wieviel Leistung von der eingestrahlten Leistung in brauchbare elektrische Leistung umgesetzt wurde. Wirkungsgrad ist am MPP definiert
Quanteneffizienz	$QE = \frac{N_{photoelektron}}{N_{Photonen}} = \frac{I/e}{P/E_{Photon}}$	$SR = I/P$ spektrale Empfindlichkeit

H Dielektrische Eigenschaften

Statische Eigenschaften

Kapazität	C in F=C/V	$C = \frac{Q}{U}$	Quotient aus Ladung Q und Spannung U
Kapazität eines Plattenkondensators (Vakuum)	C_0 in F	$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$	Plattenfläche A , Plattenabstand d
Kapazität eines Plattenkondensators (Dielektrikum)	C in F	$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{A}{d}$	
Feldenergie	E in J	$E = \frac{1}{2} C U^2$	
Permittivitätszahl = relative Dielektrizitätszahl	dimensionslos	$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$	für Vakuum $\varepsilon_r = 1$
Flächenladungsdichte	σ	$\sigma = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 E$	Flächenladungsdichte auf der Innenseite der Kondensatorplatten
elektrisches Dipolmoment	p in Cm	$\vec{p} = Q \cdot \vec{a}$	Ladungspaar $+Q$ und $-Q$ im Abstand a . Richtung von $-$ zu $+$.
Polarisierbarkeit	α in Cm ² /V	$p = \alpha \cdot E_{\text{lokal}}$	atomare Eigenschaft, lokale elektrische Feld am Ort des Atoms
Elektron. Polarisierbarkeit	α_e in Cm ² /V	$\alpha_e = \frac{Ze^2}{m_e \omega_0^2}$	Z =Anzahl Elektronen, $\omega_0 = 2\pi f_0$ =Oszillationsfrequenz in 1/s
Polarisationsmechanismus		elektronische Polarisation Ionische Polarisation Orientierungspolarisation	Verschiebung der Elektronenhülle relativ zum Kern Verschiebung der Ionen relativ zueinander permanente Dipole richten sich im lokalen Feld aus, stark T-abhängig
Polarisationsladung	Q_P in C		
Polarisation	P in C/m ²	$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i = n_{at} \cdot \vec{p}_{av} = \frac{Q_P}{A}$	mittleres Dipolmoment pro Volumeneinheit
Dielektrische Suszeptibilität	χ (dimensionslos)	$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E}$ $\chi = \varepsilon_r - 1$	verknüpft das makroskopische Feld mit der Polarisation. Im isotropen oder kubischen Medium
Lokales elektrisches Feld	$\vec{E}$	$\vec{E}_{\text{lokal}} = \vec{E} + \frac{\vec{P}}{3 \cdot \varepsilon_0}$	verknüpft das makroskopische Feld mit der Polarisation.
Clausius-Mosotti-Beziehung	gilt für unpolare Stoffe ohne permanentes Dipolmoment	$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{n_{at} \cdot \alpha_e}{3\varepsilon_0}$ $\varepsilon_r \approx 1 + \frac{n_{at} \cdot \alpha_e}{\varepsilon_0}$	Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstanten und der (atomaren) elektronischen Polarisierbarkeit. mit Teilchendichte n_{at}
Ladevorgang		$U(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$	Näherung für Gasen ($E = E_{\text{lokal}}$) $\tau = RC$ = Zeitkonstante des Kondensators
Entladevorgang		$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}$	

Materie im Wechselstromfeld

Komplexwertige relative Permittivität		$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'_r - i\varepsilon''_r$	$\omega = 2\pi f$ Kreisfrequenz in 1/s
Debye Gleichung	realer Teil	$\varepsilon'_r = 1 + \frac{\varepsilon_r(0) - 1}{1 + (\omega\tau)^2}$	$\varepsilon_r(0)$ = statische Permittivität, τ Relaxationszeit (nach der die Polarisation auf 1/e abgefallen ist)
	kompl. Teil	$\varepsilon''_r = \frac{(\varepsilon_r(0) - 1)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}$	
Verlustfaktor=dissipation factor	$\tan \delta$	$\tan \delta = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r}$	Verlustwinkels δ = Phasenverschiebung zwischen Polarisation und el. Feld
Dielektrische Verlustleistungsdichte	Verlustleistung W_{vol} in W/m^3	$W_{vol} = \omega \cdot E^2 \cdot \varepsilon_0 \varepsilon'_r \cdot \tan \delta$	bezogen auf das Materialvolumen

Piezoelektrizität

Direkter Piezoeffekt	$P_i = d_{ij} T_j = d_{ij} \frac{F}{A}$	Polarisation P_i (in C/m ²), T_j die mechanische Spannung (in N/m ²), d_{ij} piezoelektrische Koeffizienten (in m/V).
Inverser Piezoeffekt	$S_i = d_{ij} E_j$	Verformung $S_i = \Delta l/l$ (Dimensionslose Grösse), E_j die elektrische Feldstärke (in V/m).
Kopplungsfaktor	$k^2 = \frac{\text{Mechanische Energie}}{\text{Elektrische Energie}}$	

Pyroelektrizität

Eigenschaft einiger Kristalle, auf eine zeitliche Temperaturänderung mit Ladungstrennung zu reagieren.

Pyroelektrizität tritt nur bei piezoelektrischen Kristallen auf, jedoch nicht bei allen.

Pyro-Effekt	$\Delta P = p \Delta T$	Polarisationsänderung ΔP (in C/m ²), pyroelektrische Konstante p (in C/m ² K), Temperaturdifferenz ΔT (in K).
-------------	-------------------------	--

I Optische Eigenschaften

Brechzahl	$n = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} \approx \sqrt{\epsilon_r}$	
Optische Weglänge	$l = n \cdot l_0$	Produkt aus Brechzahl n und geometrischer Weglänge l_0
Wechselwirkung von Licht mit Materie	$I_0 = I_T + I_A + I_R + I_S$	
Gesetz von Snellius	$n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta)$	α = Einfallswinkel, β = Ausfallwinkel, n_1, n_2 = Brechzahlen
Absorption	$I = I_0 \cdot \exp(-\beta \cdot x)$	β = Absorptionskoeffizient
Reflektion an Grenzfläche	$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$	für senkrechter Einfall.
Gesetz von Malus	$I = I_0 \cdot \cos^2(\alpha)$	I = Intensität nach Polarisator, I_0 = Anfangsintensität einer linear polarisierten Welle, α = Winkel zwischen Transmissionsachsen der Polarisation und Einfallsrichtung des Lichtes (E-Feld).
Entspiegelung	$n_2 = \sqrt{n_1 \cdot n_3}$	Brechzahlen: n_1 Luft, n_2 AR-Schicht, n_3 Bulk
AR-Schichtdicke	$\frac{\lambda}{d} = 4\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin(\alpha)}$	d Dicke, λ Wellenlänge zu löschen, Brechzahlen: n_1 Luft, n_2 AR-Schicht, n_3 Bulk, α Einfallswinkel
Numerische Apertur	$NA = \sin(\theta_k) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$	Einkopplung von Licht in den LWL
Dämpfung	$A = 10 \log(P_0/P_L)$	P_0 eingekoppelte Lichtleistung und P_L die ausgekoppelte Lichtleistung, A in dB
Dämpfungskoeffizient	$\alpha = A/L$	in dB/km, L = Faserlänge in km
Transmission	$T = \frac{P_L}{P_0} = 10^{-\alpha \cdot L/10} = 10^{-A/10}$	T = relative Lichtübertragung, A = Dämpfung
Streuverluste (Rayleigh)	$\alpha \approx \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1)^2 \beta_T \cdot k_B \cdot T_f$	λ Wellenlänge, n Brechzahl, β_T isothermische Kompressibilität, T_f fiktive Temperatur (in K)

PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE

<http://www.periodni.com/de/>

PERIODEN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
GRUPPE	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	17A	18A
1	1 1.0079 H WASSERSTOFF	2 4.0026 He HELIUM																
2	3 6.941 Li LITHIUM	4 9.0122 Be BERYLLIUM	5 10.811 B BOR	6 12.011 C KOHLENSTOFF	7 14.007 N STICKSTOFF	8 15.999 O SAUERSTOFF	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NEON										
3	11 22.990 Na NATRIUM	12 24.305 Mg MAGNESIUM	13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILIZIUM	15 30.974 P PHOSPHOR	16 32.065 S SCHWEFEL	17 35.453 Cl CHLOR	18 39.948 Ar ARGON										
4	19 39.098 K KALIUM	20 40.078 Ca CALCIUM	21 44.956 Sc SCANDIUM	22 47.867 Ti TITAN	23 50.942 V VANADIUM	24 51.996 Cr CHROM	25 54.938 Mn MANGAN	26 55.845 Fe EISEN	27 58.933 Co KOBALT	28 58.693 Ni NICKEL	29 63.546 Cu KUPFER	30 65.38 Zn ZINK	31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSEN	34 78.96 Se SELEN	35 79.904 Br BROM	36 83.798 Kr KRYPTON
5	37 85.468 Rb RUBIDIUM	38 87.62 Sr STRONTIUM	39 88.906 Y YTRIUM	40 91.224 Zr ZIRKON	41 92.906 Nb NIOB	42 95.96 Mo MOLYBDÄN	43 (98) Tc TECHNETIUM	44 101.07 Ru RUTHENIUM	45 102.91 Rh RHODIUM	46 106.42 Pd PALLADIUM	47 107.87 Ag SILBER	48 112.41 Cd KADMIUM	49 114.82 In INDIUM	50 118.71 Sn ZINN	51 121.76 Sb ANTIMON	52 127.60 Te TELLUR	53 126.90 I IOD	54 131.29 Xe XENON
6	55 132.91 Cs CÄSIUM	56 137.33 Ba BARIUM	57-71 Lanthaniden Lanthan	72 178.49 Hf HAFNIUM	73 180.95 Ta TANTAL	74 183.84 W WOLFRAM	75 186.21 Re RHENIUM	76 190.23 Os OSMIUM	77 192.22 Ir IRIDIUM	78 195.08 Pt PLATIN	79 196.97 Au GOLD	80 200.59 Hg QUECKSILBER	81 204.38 Tl THALLIUM	82 207.2 Pb BLEI	83 208.98 Bi BISMUT	84 (209) Po POLONIUM	85 (210) At ASTAT	86 (222) Rn RADON
7	87 (223) Fr FRANCIUM	88 (226) Ra RADIUM	89-103 Actiniden Ac-Lr	104 (267) Rf RUTHERFORDIUM	105 (268) Db DUBNIUM	106 (271) Sg SEABORGIUM	107 (272) Bh BOHRRIUM	108 (277) Hs HASSIUM	109 (276) Mt MEITNERIUM	110 (281) Ds DARMSTADTIUM	111 (280) Rg ROENTGENIUM	112 (285) Cn COPERNICIUM	113 (...) Uut UNUNTRIUM	114 (287) Uup FLEROVIUM	115 (...) Uuq LIVERMORIUM	116 (291) Lv UNUNSEPTIUM	117 (...) Uus UNUNOCTIUM	118 (...) Uuo UNUNOCTIUM

57 138.91 La LANTHAN	58 140.12 Ce CER	59 140.91 Pr PRASEODYM	60 144.24 Nd NEODYM	61 (145) Pm PROMETHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.05 Yb YTTERIUM	71 174.97 Lu LUTETIUM
89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URAN	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMERICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKELIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELEVIUM	102 (259) No NOBELIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM

13 10.811 B BOR	14 12.011 C KOHLENSTOFF	15 14.007 N STICKSTOFF	16 15.999 O SAUERSTOFF	17 18.998 F FLUOR	18 20.180 Ne NEON
13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILIZIUM	15 30.974 P PHOSPHOR	16 32.065 S SCHWEFEL	17 35.453 Cl CHLOR	18 39.948 Ar ARGON

Metalle	Halbmetalle	Nichtmetalle
Alkalimetalle	Chalkogene	
Erdalkalimetalle	Halogene	
Ubergangselemente	Edeleise	
Lanthaniden		
Actiniden		

ZUSTAND (25 °C, 101 kPa)
Ne - gasförmig **Fe** - fest
Hg - flüssig **Tc** - künstliche

Copyright © 2012 Eri Generalic

(1) Pure Appl. Chem., 81, No. 11, 2131-2156 (2009)

Die relative atommasse wird auf fünf Stellen angegeben. Für elemente ohne stabile isotope ist die atommasse des stabilsten isotope in klammern gezeigt. isotope. Drei dieser elemente (Th, Pa und U) spielen eine bedeutende rolle aufgrund ihrer häufigkeit in der Erdkruste und ihre atomgewichte und werden deshalb aufgelistet.