

I. Mechanik

§1) Translation	§2) Rotation
Weg: x [m]	Winkel: α
Geschwindigkeit: $v = dx/dt$ [m/s]	Winkelgeschwindigkeit: $\omega = d\alpha/dt$ [s^{-1}] $\omega = v / r = 2 \pi v = 2 \pi / T$
Beschleunigung: $a = dv/dt$ [m/s^2]	Winkelbeschleunigung: $\dot{\omega} = d\omega/dt$ [s^{-2}] Radialbeschleunigung (zentripetal): $a_{rad} = -\omega^2 r = -v^2 / r$ Trägheitsbeschleunigung (zentrifugal): $\dot{a}_{ZF} = \omega^2 \dot{r}$ (Scheinbeschl.)
Masse: $m = \rho V$ [kg]	Trägheitsmoment: $\theta_S = \int r^2 dm$ [$m^2 kg$] Steiner: $\theta_A = \theta_S + m s^2$ Rad, Ring, Hantel: $\theta_S = mR^2$ Scheibe, Walze (mass.): $\theta_S = \frac{1}{2} mR^2$ Hohlzylinder: $\theta_S = \frac{1}{2} m(R_1^2 + R_2^2)$ Kugel: $\theta_S = \frac{2}{5} mR^2$
Impuls: $\dot{p} = m\dot{v}$ [Ns] Impulserhaltung: $\sum m_i v_i = \text{konst.}$	Drehimpuls: $\dot{L} = \theta \dot{v}$ [$m^2 kg/s$] Drehimpulserhaltung: $\sum \dot{L}_i = \text{konst.}$
Kraft (Newton'sche Axiome): i) $\sum \dot{F} = 0 \Rightarrow v = \text{konst}$ ii) $\dot{F}_{12} = \dot{F}_{21}$ iii) $\dot{F} = m \dot{a} = d\dot{p}/dt$ [$N = mkg/s^2$]	Drehmoment: $\dot{M} = \theta d\dot{v}/dt = d\dot{L}/dt$ $\dot{M} = \dot{r} \times \dot{F}$ [Nm] $M = F r \sin \alpha$
kin. Energie: $E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$ [$J = Nm$] Energieerhaltung: $E = E_{kin} + E_{pot} + \dots = \text{konst.}$	rotat. Energie: $E_{rot} = \frac{1}{2} \theta \omega^2$ [J]
Arbeit: $W = F \cos \alpha \Delta x$ [Nm] Leistung: $P = dE/dt = F v$ [W]	
Hangabtrieb: $F = m g \sin \alpha$ Reibung: $F_R = \mu F_N$ Luftreibung: $F_R = \frac{1}{2} c_w A \rho v^2$	Corrioliskraft (auf bewegte Masse): $\dot{F}_{Cor} = m \dot{a}_c = 2 m (\dot{v} \times \dot{v})$ $F_{Cor} = 2 m v \omega \sin(v, \omega)$
schiefen Wurf: $W = v_0^2 \sin(2\alpha) / g$; $H = v_0^2 \sin^2(\alpha) / 2g$ $v_x(t) = v_0 \cos \alpha$; $v_y(t) = v_0 \sin \alpha - g t$	Foucault Pendel: $\omega_{FP} = \omega \sin \phi$

Elastizität: $F = \Delta l \epsilon A / l$

§3) Gravitation:

- Gravitationswechselwirkung: $\dot{F}_{grav} = -\gamma (m M / r^2) (\dot{r} / r)$
- Satelliten: $|\dot{a}_G| = |\dot{a}_{ZF}| \Leftrightarrow \gamma M_E / x^2 = \omega^2 x$
geostationäre Bahn: $\omega_s = \omega_E \Rightarrow x \approx 42\,000 \text{ km}$

- **Kepler Gesetze:**
 - i) Planetenbahnen: Ellipsen; Zentrum: Sonne
 - ii) Flächengeschwindigkeit = $dA/dt = \text{konst.}$
 - iii) $T_1^2 / T_2^2 = r_1^3 / r_2^3$

§4) Schwingungen:

- i) $d^2x/dt^2 + \omega_0^2 x = 0$ (Federpendel: $\omega_0^2 = D/m$)
- ii) $d^2\alpha/dt^2 + \omega_0^2 \alpha = 0$ (Torsionspendel: $\omega_0^2 = D^*/\theta$; physikalisches Pendel $\omega_0 = mgs/\theta_A$)
- iii) $d^2\alpha/dt^2 + \omega_0^2 \alpha = 0$ (Fadenpendel (mathematisches P.): $\omega_0^2 = g/l$)
- iv) gedämpft: $\dots + \gamma dx/dt = 0$
Lösungsansatz: $x(t) = x_0 \cos(\omega t + \delta)$ oder $x(t) = x_0 e^{-\lambda t}$
reduzierte Pendellänge: $l_{\text{red}} = s_1 + s_2$

§5) Flüssigkeits Mechanik:

- Schweredruck: $p = G / A = \rho_{\text{Fl}} g h$
- Kompressibilität: $k = - (1/V) (dV/dp)$
- Auftrieb: $F_A = \rho_{\text{Fl}} g V_K = m_{\text{Fl}} g$ (verdrängte Flüssigkeit)
- Viskosität: $v = \text{konst} \Rightarrow F_R = 6 \pi \eta_{\text{Fl}} r_K v$
- ideale Flüssigkeit: $\eta_{\text{Fl}} \rightarrow 0$; $A_1 v_1 = A_2 v_2$
- Bernoulli: $p_{\text{ges}} = p_{\text{stat}} + p_{\text{Stau}} = \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2$

II. Wärmelehre:

§1) Kalorimetrie und Ausdehnung:

- Wärme: $\Delta W_{\text{therm}} = c m \Delta T$ [Nm] mit $c = \text{spez. Wärme}$ in [Ws/kgK]
- Mischtemperatur: $c_1 m_1 (T_1 - T_M) = c_2 m_2 (T_M - T_2)$
- Dulong Petite: alle Festkörper: $c^* \approx 6 R \approx 25 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $f \approx 6$

§2) Zustandsänderungen:

- **isobar:** $p = \text{konst.}$ $\Delta V = \alpha V \Delta T$
- **isochor:** $V = \text{konst.}$ $p_t = p_0 (1 + \gamma \Delta T)$
- **isotherm:** $T = \text{konst.}$ $pV = \text{konst.}$ (ideales Gas), $\Delta W_{\text{mech}} = - n R T \ln(V_2/V_1)$
- **adiabatisch:** $\Delta W_{\text{therm}} = 0$, $pV^\kappa = \text{konst.}$, $\Delta W_{\text{mech}} = - n c_v^* \Delta T = (p_2 V_2 - p_1 V_1) / (\kappa - 1)$
Schallausbreitung: $c_{\text{Schall}} = \sqrt{(\kappa p / \rho)}$; $\kappa = c_p^* / c_v^*$; $T V^{\kappa-1} = \text{konst.}$
- allgemein: $pV = n R T = (m/M) R T$, $p = n k_b T = n (R/L) T$, $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

§3) kinetische Gastheorie:

- Druck: $p = 1/3 n m \bar{v}^2$
- kinetische Energie der Teilchen: $\bar{E}_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k_b T$
- **spez. Wärme:** $c_v = dU/dT$ (bei konst. Volumen)
für 1 mol: $c_v^* = (f/2) k_b$, $L = (f/2) R$, $R = c_p^* - c_v^*$

§4) Hauptsätze:

- **1.HS:** innere Energie: $\Delta U = \Delta W_{\text{therm}} + \Delta W_{\text{mech}} = c m \Delta T - \int p dV = 3/2 n R T = 3/2 p V$
- **2.HS:** Umwandelbarkeit von Wärme in mech. Arbeit bei einem Kreisprozess ist begrenzt!
- Wirkungsgrad: $\eta = \text{Nutzen/Aufwand} = \frac{\text{Carnot-Pr o z e s s } T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\text{Wärmepumpe } T_1}{T_1 - T_2} = \frac{\text{Kühlschrank } T_2}{T_1 - T_2}$

III. Elektrizitätslehre

§1) Elektrostatik

- **Coulomb Gesetz:** $\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{s}_{12} = -q \text{ grad } \phi = q \vec{E}$ (vgl. $\vec{F}_G = m \vec{g}$)
 Ladungserhaltung: $\epsilon q^+ + \epsilon q^- = \text{konst.}$
- **elektrischer Fluß:** $\Phi_{\text{el}} = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} = q_{\text{ges}} / \epsilon_0$ (vgl. $\Phi_{\text{grav}} = \int g dA = 4 \pi \gamma m_{\text{ges}}$)
- **Kapazität:** $C = q / U$ [$F = \text{Cb/V}$]
 Berechnung: i) $\Phi_{\text{el}} = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \rightarrow \vec{E}$ ii) $U = \int E ds$ iii) $C = q / U$
 Serienschaltung: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$ (vgl. $R = R_1 + R_2$)
 Parallelschaltung: $C = C_1 + C_2$ (vgl. $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$)
 Kugel: $C_K = 4 \pi \epsilon_0 r_K$; Plattenkondensator: $C_{PK} = \epsilon_0 \epsilon_r A / d$
- Energiegehalt des el. Feldes: $W_{\text{el}} = 1/2 C U^2$ (vgl. $W_{\text{feder}} = 1/2 D x^2$)
- Polarisation: $\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon - 1) \vec{E}$
- **Potential(differenz):** $\Delta\phi = \phi_B - \phi_A = \Delta E_{\text{pot}} / q_0 = \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$

§2) Elektrischer Strom

- **Spannung:** $U = R I = E l = \text{Arbeit} / \text{Ladung} [V]$
- **Stromstärke:** $I = \rho_{\text{el}} v A = N/V I_0 v A = n I_0 v A$
 Ohm'sches Gesetz: $U / I = \text{konst.}$
- **Stromdichte:** $J = I / A = \sigma E$ mit $\sigma = \text{el. Leitfähigkeit}$
- **Widerstand:** $R_{\text{Cu-Draht}} = \rho l / A = l / (A \sigma)$
- **Kirchhoff'sche Regeln:**
 i) $I = I_1 + I_2$ (für alle Maschen)
 ii) $I_1 / I_2 = R_2 / R_1$
 iii) $\sum U_{\text{batt}} = I R_{\text{ges}}$
- **Energie:** $W_{\text{strom}} = I U t$ (Vorsicht! el. Feldenergie: $W_{\text{el}} = 1/2 C U^2 = 1/2 Q U = 1/2 I U t$)
- **Leistung:** $P = W / t = I U$
- **Kondensatorentladung:** $U(t) = U_0 e^{-t/(RC)}$; $I(t) = I_0 e^{-t/(RC)}$
- **Ampèremeter:** $R_a = 1 / (z-1) R_i$ für $I = z I_{\text{max}}$

§3) Magnetfelder und Induktion:

- **Ampère'sches Gesetz:** $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$ oder: **magnetische Feldstärke:** $B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$
Spule (innen): $B = \mu_0 N I / l$ mit N = Zahl der Windungen
- **Lorentz Kraft:** bewegte Ladung: $\vec{F}_L = q (\vec{v} \times \vec{B})$; Leiter: $\vec{F}_L = I (\vec{l} \times \vec{B})$
Zyklotronfrequenz: $\omega = q B / m$
- **Induktion** nach Faraday: $\mathcal{O}_{\text{mag}} = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B A \cos \alpha$
 $U_{\text{ind}} = \int \vec{E}_{\text{ind}} \cdot d\vec{s} = I_{\text{ind}} / R = - d\mathcal{O} / dt$ (Lenz'sche Regel)
- **Selbstinduktion:** $\mathcal{O}_{\text{mag}} = L I$ mit L = Induktivität; $U_{\text{ind}} = - L dI / dt$
 $L_{\text{Spule}} = - \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$
- **Mag. Feldenergie:** $W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L I_0^2$ (vgl. $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$)
- **Energieerh.:** $W_{\text{el}} + W_{\text{mag}} = \text{konst.} \Rightarrow \frac{1}{2} Q^2 / C + \frac{1}{2} L I^2 = \text{konst.} \Rightarrow d^2 I / dt^2 + I / LC = 0$

§4) Wechselströme

- nur R - Kreis: $U(t) = U_0 \sin \omega t = \omega B A \sin \omega t \Rightarrow I(t) = (U_0 / R) \sin(\omega t)$
- nur L - Kreis: $I(t) = (U_0 / \omega L) \cos(\omega t)$; $R_L = i \omega L$;
- nur C - Kreis: $I(t) = - U_0 \omega C \cos(\omega t)$; $R_C = 1 / (i \omega C)$
- **R,L,C - Kreis:**

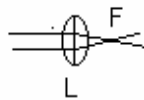
$$R_{\text{ges}} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

- Phasenwinkel: $\tan \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ bei $\varphi < 0$: Strom vor Spannung
- Effektivstrom (durchschnittlich): $I_{\text{eff}} = I_0 / \sqrt{2}$

IV. Optik

§1) Geometrische Optik

- **Reflexion:** $\alpha_E = \alpha_A$
Totalreflexion für $\alpha > \alpha_G$ mit $\sin \alpha_G = 1 / n = n_1 / n_2$
- **Brechung:** $\sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1 = c_1 / c_2$
- Lichtgeschwindigkeit im Medium: $c_M = c / n_M$
- lineare Polarisierung bei $\alpha = 90^\circ - \beta$: $\tan \alpha = n = n_2 / n_1$
z.B. durch Reflexion, Streuung, Absorption, Doppelbrechung
- **Abbildungen:** Sammellinse:
 - Gleichung: $1/g + 1/b = 1/f$
 - Linsensystem: $1/f_{\text{ges}} = 1/f_1 + 1/f_2$
 - bei Zerstreuungslinsen: $f_Z < 0$!!!
- Prisma: $\delta \propto (n_p - 1) \gamma$
- **Vergrößerung:** $V = \alpha_1 / \alpha_0 = B / G = b / g$



- Lupe (kleines f): $V_L = s_0 / f_L$
- Kepler Fernrohr: $V_F = f_1 / f_2$
- Mikroskop: $V_N = s_0 l / (f_1 f_2)$ mit $l =$ Tubuslänge

§2 Wellenoptik:

- Licht ist elektromagnetische Welle
- Ausbreitungsrichtung: $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{B}$ [W / m^2]
- Wellengleichung: $d^2E/dx^2 = (1/c^2) d^2E/dt^2$
Lösungsansatz: $E(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx)$ mit $\omega = 2\pi / T$ und $k = 2\pi / \lambda$
 $\Rightarrow c = \lambda v = \omega / k$
allg. Ansatz: $E(r,t) = E_0 e^{i(\omega t - kr)}$
- Energiemaßstab: $E_{\text{photon}} = h v = h c / \lambda$
- Überlagerung:
 - Verstärkung bei Gangunterschied: $\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$; Phasendifferenz: $0, \pi, 2\pi$
 - Auslöschung bei $\Delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$; Phasendifferenz: $\pi/2, 3\pi/2, \dots$
- Reflexion:
 - opt. dichteres Medium: $\vec{E}_r = \vec{E}_0 \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$ oder: $I_r = I_0 \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$
Gangunterschied: $\lambda / 2$; Phasendifferenz: π
 - opt. dünneres Medium: kein Phasensprung

§3 Beugung und Auflösung

- **Fraunhofer'sche Beugung** am Spalt: $\Delta = d \sin \alpha_1$
1. Minimum: $\sin \alpha_1 = \lambda / d$; 1. Maximum: $\sin \beta_1 = 3/2 \lambda / d$
- Doppelspalt: umgekehrte Min/Max zu Einzelspalt
- Beugung am **Gitter**: $I = I_0 \sin^2(N\gamma) / \sin^2\gamma$ mit $\gamma = (\pi g \sin \theta) / \lambda$
allg. Maxima: $m \lambda = g \sin \varphi_m$
- Interferenz an dünnen Schichten: $\Delta_{1,2} = 2 d n + \lambda / 2$
 \rightarrow Dunkelheit $\Leftrightarrow 2dn + \lambda / 2 = 2(m+1) \lambda / 2$
 \rightarrow Helligkeit: $\Leftrightarrow 2dn + \lambda / 2 = m \lambda$
- **Amplitude**: $A = A_0 \sin \alpha / \alpha$
- **Intensität**: $I = A^2$
- **Ralleigh - Kriterium**: min. Auflösungsvermögen opt. Instrumente: $\alpha_K = 1.22 \lambda / d$
 $d =$ Linsendurchmesser
- **Spektrallinien** am Gitter: $\lambda / \Delta\lambda = m N$ mit $m =$ Ordnung, $N =$ Zahl der Spalten

V. Atom- und Kernphysik

§1 Atommodell:

- **Bohr'sche Postulate**:
(a) Elektronen bewegen sich in **stationären Bahnen**:

Physik Formelsammlung

Energie in der n-ten Schale: $E_{\text{ges, n}} = -\frac{1}{2} \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{e^4 m}{\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -R_Y \frac{1}{n^2}$

mit $R_Y = \text{Rydbergkonstante}$

(b) **Übergang** Bahn a \rightarrow b: Emission / Absorption von Energie (elektromagn. Wellen)

Energieabgabe beim Übergang: $E = h \nu = R_Y \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$

Impuls: $p = h \nu / c$

Rückstoßenergie: $E_{\text{kin}} = p^2 / 2m_{\text{Atom}}$

(c) **Drehimpuls:** $L = n \hbar = n h / 2 \pi = r m v$

mit $n = \text{Hauptquantenzahl}$, $h = \text{Plank'sches Wirkungsquantum}$

Klassische GG-Bedingung: $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \omega^2 r = m v^2 / r$

- Bohr'scher **Atomradius:** $r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m} n^2$
- **Energiebilanz** (H -Atom): $E_{\text{ges}} = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$ (im gebundenen Zustand)
- **Ionisierungsenergie:** $W_{\text{ionisierung}} = R_Y \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right)$

§2 Strahlung:

- **Röntgenstrahlung:** $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v_e^2 = e_0 U = h \nu_{\text{max}} = h c / \lambda_{\text{max}}$
- **Photoeffekt:** $h \nu = W_{\text{Austritt}} + E_{\text{kin}}$ mit $E_{\text{kin}} \geq 0$
- **Radioaktivität:** $-dN/dt = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$ mit $\lambda = 1 / \tau$
Halbwertszeit: $T_H = \tau \ln 2$
 α - Zerfall: He^{2+} Kerne ; β - Zerfall: Positronen (e^+) ; γ - Zerfall: Photonen
- **Massendefekt:** $\Delta m = \Delta E / c^2$

§3 Relativitätstheorie

- **relativistische Masse:** $m_r = m(v) = \gamma m_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} m_0$ mit $m_0 = \text{Ruhemasse}$
- **rel. Energie:** $E_{\text{rel}} = m_r c^2 = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4}$
 $E_{\text{kin}} = E_{\text{rel}} - E_0 = (m_r - m_0) c^2$
- **Energie des Photons:** $E_{\text{rel, Photon}} = c p = h \nu = h c / \lambda \Rightarrow p = h c / \nu$
(gilt auch für Elektronen)

Diese Formelsammlung entstand analog zu den Vorlesungen Experimentalphysik A,B für Wirtschaftswissenschaftler (Prof. Weiß) und Physik Crash Kurs (Dr. Köhnlein). Alle Angaben ohne Gewähr. © 1995 by Mike Ullrich.