

Lösungen zu  
Physik für Ingenieure  
*Bachelor Basics*

3. Auflage 2016

Edition Harri Deutsch bei Europa-Lehrmittel

Europa-Nr.: 58577, ISBN 978-3-8085-5857-7

**Bernd Baumann**

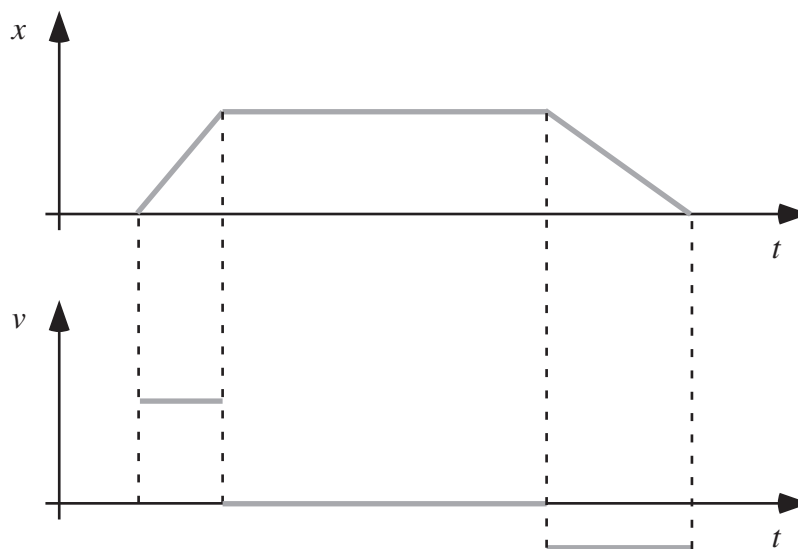
Letzte Änderung am 24.12.2019

# Mechanik

## Kinematik

### Bewegung entlang einer Geraden

#### Aufgabe 1.1.1-1



**Abbildung 1:** Eine reale Bewegung kann bestenfalls näherungsweise durch ein Weg-Zeit-Diagramm in der Form eines Trapezes beschrieben werden. Der abknickende Funktionsverlauf hat nämlich Sprünge im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm zur Folge. Diese würden eine unendlich große Beschleunigung erfordern. Die Kurve im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm muss an den Sprungstellen unterbrochen werden, da es sich sonst nicht um eine Funktion handeln würde.

#### Aufgabe 1.1.1-3

$$a(t) = \dot{v}(t) = -v_0\omega \sin \omega t \quad \Rightarrow \quad a(t_1) = -5,96 \text{ m/s}^2 \quad (\text{Achtung, Bogenmaß!})$$

$$x(t) = \int v(t) dt = v_0 \int \cos \omega t dt = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t + c$$

$$x(t_0) = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t_0 + c = x_0 \quad \Rightarrow \quad c = x_0 - \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t_0 = -0,395 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \quad x(t_1) = -2,21 \text{ cm}$$

**Aufgabe 1.1.1-5**

$$v(t) = a_0 t + v_0 \quad \Rightarrow \quad v_1 = a_0 t_1 + v_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad v_0 = -a_0 t_1$$

$$x(t) = \frac{1}{2} a_0 t^2 + v_0 t \quad \Rightarrow \quad x_1 = \frac{1}{2} a_0 t_1^2 + v_0 t_1$$

Einsetzen von  $v_0$  (erste Zeile) liefert

$$x_1 = -\frac{1}{2} a_0 t_1^2 = 45 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad t_1 = 3,72 \text{ s}$$

(die beiden Minuszeichen heben sich weg). Einsetzen ergibt  $v_0 = 24,2 \text{ m/s}$ .

**Bewegung im Raum****Aufgabe 1.1.2-3**

$$x(t) = v_{0x} t, \quad z(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{0z} t + h$$

Landung:

$$x(t_1) = v_{0x} t_1 = s \quad \Rightarrow \quad v_{0x} = \frac{s}{t_1} = 5,00 \text{ m/s}$$

$$z(t_1) = \left( v_{0z} - \frac{1}{2} g t_1 \right) t_1 + h = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{0z} = \frac{1}{2} g t_1 - \frac{h}{t_1} = 29,52 \text{ m/s}$$

Damit:

$$v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0z}^2} = 29,94 \text{ m/s}, \quad \tan \alpha = \frac{v_{0z}}{v_{0x}} \quad \Rightarrow \quad \alpha = 80,4^\circ$$

**Aufgabe 1.1.2-9**

$0 \leq t \leq t_1$ :

$$\omega(t) = \alpha_0 t \quad \Rightarrow \quad \alpha_0 = \frac{\omega_1}{t_1}$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \alpha_0 t^2 = \frac{1}{2} \frac{\omega_1}{t_1} t^2 \quad \Rightarrow \quad \varphi(t_1) = \frac{1}{2} \omega_1 t_1$$

$t_1 \leq t \leq t_2$ :

$$\varphi(t) = \omega_1 (t - t_1) + \varphi(t_1) \quad \Rightarrow \quad \varphi(t_2) = \omega_1 (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} \omega_1 t_1 = \omega_1 \left( t_2 - \frac{1}{2} t_1 \right)$$

$$\Rightarrow \quad \omega_1 = \frac{\varphi(t_2)}{t_2 - \frac{1}{2} t_1} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{\omega_1}{2\pi} = 37,3 \text{ Hz}$$

**Aufgabe 1.1.2-10**

Richtige Lösung:

$$\vec{a}(t_1) = \begin{pmatrix} -0,3652 \\ 0,6000 \end{pmatrix} \text{ m/s}^2$$

**Dynamik****Newtonsche Axiome****Aufgabe 1.2.1-6**Dieses Problem stellt ein typisches Beispiel für die *Hauptaufgabe der Mechanik* dar.

$$F_{\text{Res}} = -cv^2 = ma = m \frac{dv}{dt} \Rightarrow \frac{dv}{v^2} = -\frac{c}{m} dt \quad (\text{Trennung der Variablen})$$

Integration

$$\int \frac{dv}{v^2} = -\frac{c}{m} \int dt \Rightarrow -\frac{1}{v} = -\frac{c}{m}t + c_1 \Rightarrow v(t) = \frac{1}{\frac{c}{m}t - c_1}$$

1. Anfangsbedingung

$$v(t_0) = v_0 = -\frac{1}{c_1} \Rightarrow -\frac{1}{v_0}$$

$$\Rightarrow v(t) = \frac{mv_0}{v_0ct + m} \Rightarrow v(t_1) = 21,7 \text{ m/s}$$

Jetzt ist  $v$  als Funktion von  $t$  bekannt, und damit ergibt sich  $x(t)$  wie in Abschnitt *Kinematik* dargestellt:

$$x(t) = \int v(t) dt = mv_0 \int \frac{dt}{v_0ct + m} = \frac{m}{c} \ln(v_0ct + m) + c_2$$

(vgl. eine Mathematik Formelsammlung)

2. Anfangsbedingung

$$x(t_0) = \frac{m}{c} \ln m + c_2 = 0 \Rightarrow c_2 = -\frac{m}{c} \ln m$$

$$\Rightarrow x(t) = \frac{m}{c} \ln\left(1 + \frac{v_0c}{m}t\right) \Rightarrow x(t_1) = 534 \text{ m}$$

## Dynamik der Kreisbewegung

### Aufgabe 1.2.2-3

$$J = \frac{1}{12}ml^2, \quad J' = \frac{1}{12}m'l'^2 = 2J = \frac{1}{6}ml^2$$

$$\rho = \frac{m}{Al} = \frac{m'}{Al'} \Rightarrow m = Al\rho, \quad m' = Al'\rho \Rightarrow \frac{1}{12}Al'\rho l'^2 = \frac{1}{6}Al\rho l^2$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}l'^3 = l^3 \Rightarrow l' = \sqrt[3]{2}l = 94,5 \text{ cm} \Rightarrow \Delta l = 19,5 \text{ cm}$$

### Aufgabe 1.2.2-4

$$M = J\alpha \quad \text{mit} \quad J = \frac{1}{2}mR^2$$

Mit

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi}{4}d^2l \Rightarrow J = \frac{\pi}{32}\rho ld^4$$

$$\alpha = \frac{\omega_1}{t_1} \quad \text{mit} \quad \omega_1 = 2\pi f$$

$$F = \frac{M}{r} = 24,0 \text{ N}$$

## Kräfte - ein Überblick

### Nichtfundamentale Kräfte

#### Aufgabe 1.3.2-2

$$F_H = mg \sin \alpha, \quad F_R = \mu F_N = \mu mg \cos \alpha$$

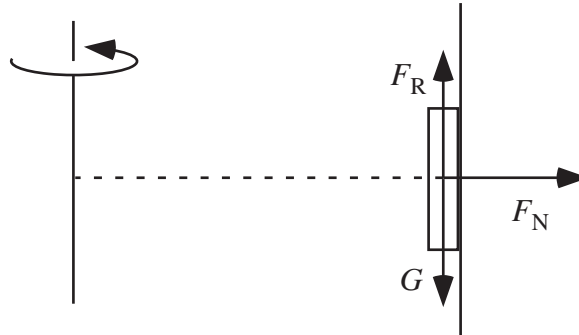
$$F_{\text{res}} = F_H - F_R = ma$$

$$\Rightarrow a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \Rightarrow \begin{cases} a_1 = 0,3664 \text{ m/s}^2 \\ a_2 = 0,5863 \text{ m/s}^2 \end{cases}$$

$$x_1 = \frac{1}{2}a_1t_1^2, \quad x_2 = \frac{1}{2}a_2t_2^2 = \frac{1}{2}a_2(t_1 - \Delta t)^2$$

$$x_1 = x_2 \Rightarrow \frac{1}{2}a_1t_1^2 = \frac{1}{2}a_2(t_1 - \Delta t)^2 \Rightarrow \pm\sqrt{a_1}t_1 = \pm\sqrt{a_2}(t_1 - \Delta t)$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{\Delta t}{1 - \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}} = 4,77 \text{ s}, \quad x_1 = \frac{1}{2}a_1t_1^2 = 4,18 \text{ m}$$

**Scheinkräfte****Aufgabe 1.3.3-5****Abbildung 2:** Seitenansicht

Kräftegleichgewicht:

$$F_R = G \quad \text{mit} \quad G = mg \quad \text{und} \quad F_R = \mu_H F_N$$

$$F_N = F'_{ZF} = m\omega^2 R = 2\pi^2 m f^2 D$$

Damit

$$\mu_H = \frac{g}{2\pi^2 f^2 D} = 0,303$$

**Aufgabe 1.3.3-7**

$$\vec{F}'_C = 2m \vec{v}' \times \vec{\omega} \quad \Rightarrow \quad \vec{a}'_C = \frac{\vec{F}'_C}{m} = 2 \vec{v}' \times \vec{\omega} \quad \Rightarrow \quad a'_C = 2\omega v' \sin \angle(\vec{v}', \vec{\omega})$$

$$S \rightarrow N : \quad \angle(\vec{v}', \vec{\omega}) = \varepsilon \quad a'_C = \begin{cases} 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2 \text{ für } \varepsilon = 50^\circ \\ 0 \text{ für } \varepsilon = 0^\circ \end{cases}$$

(Ostablenkung)

$$N \rightarrow S : \quad \angle(\vec{v}', \vec{\omega}) = 180^\circ - \varepsilon \quad a'_C = \begin{cases} 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2 \text{ für } \varepsilon = 50^\circ \\ 0 \text{ für } \varepsilon = 0^\circ \end{cases}$$

(Westablenkung)

$$O \rightarrow W : \quad \angle(\vec{v}', \vec{\omega}) = 90^\circ \quad a'_C = 1,62 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2 \text{ für } \varepsilon = 0^\circ/50^\circ$$

(Ablenkung zur Erdachse)

$$W \rightarrow O : \quad \text{wie } O \rightarrow W \quad (\text{Ablenkung weg von der Erdachse})$$

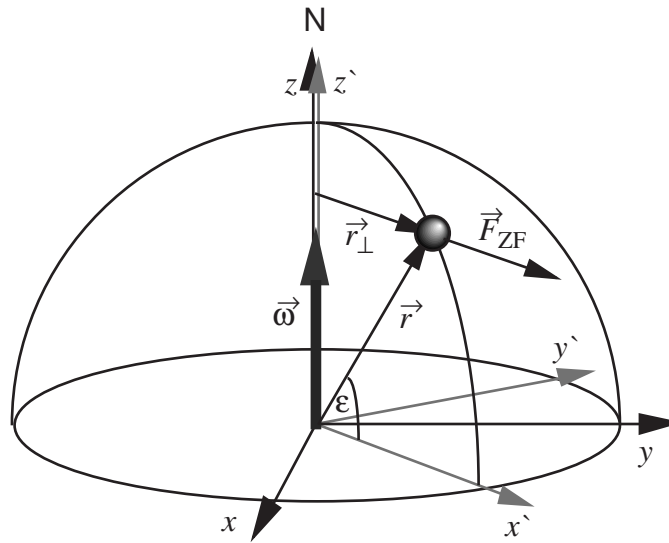


Abbildung 3: Nordhalbkugel der Erde

## Erhaltungssätze

### Aufgabe 1.4.1-4

$$\Delta E_{\text{Lage}} = mgh = mgs \sin \varphi \quad (s \text{ zurückgelegte Strecke})$$

Energiesatz:

$$\Delta E_{\text{Lage}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{rot}} \quad \Rightarrow \quad mgs \sin \varphi = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2$$

Erfolgt das Rollen ohne Schlupf gilt  $v = \omega R$  und damit

$$v = \sqrt{\frac{2mgs \sin \varphi}{m + \frac{J}{R^2}}}$$

Mit  $J = \frac{1}{2}mR^2$  (Tabelle 1.1,  $r = 0$ ) folgt

$$v = \sqrt{\frac{4}{3}gs \sin \varphi}$$

### Aufgabe 1.4.1-5

Trägheitsmoment eines dünnen Stabes, der um seinen Schwerpunkt rotiert (vgl. Tabelle 1.2):

$$J_S = \frac{1}{12}ml^2$$

Rotation um Stabende (Steinerscher Satz):

$$J = J_S + ma^2 = J_S + m(l/2)^2 = \frac{1}{3}ml^2$$

Lageenergie des aufrecht stehenden Stabes ( $h$  ist die Höhe des Schwerpunktes):

$$E_L = mgh = mg\frac{l}{2}$$

Rotationsenergie des Stabes:

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{6}m(l\omega)^2$$

Aus dem Energiesatz folgt

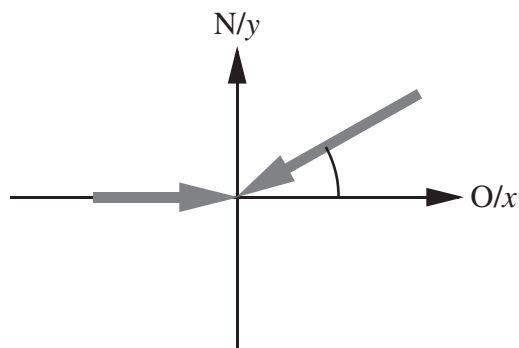
$$\omega = \sqrt{\frac{3g}{l}} \Rightarrow v = \omega l = \sqrt{3gl} = 8,58 \text{ m/s}$$

#### Aufgabe 1.4.1-6

$$W = \int_R^0 F dr = \int_R^0 -m\omega^2 r dr = 2m \left(\frac{\pi}{T}R\right)^2 = 1990 \text{ J}$$

## Impuls und Drehimpuls

#### Aufgabe 1.4.2-3



**Abbildung 4:** Der Stoßprozess, dargestellt in einem Koordinatensystem, dessen  $x$ -Achse nach Osten und dessen  $y$ -Achse nach Norden zeigt.

$$\vec{v}_1 = \begin{pmatrix} 5,00 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{v}_2 = - \begin{pmatrix} 17,32 \\ 10,00 \end{pmatrix}$$

Impulserhaltung:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$$



$$\Rightarrow \vec{v} = \frac{1}{m_1 + m_2} (m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2) = \begin{pmatrix} 1,28 \\ -1,67 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 2,10 \text{ m/s} \quad \varphi = \arctan \frac{v_y}{v_x} = -52,5^\circ \quad (\text{Richtung SO})$$

#### Aufgabe 1.4.2-4

a) Energieerhaltung ( $E_{\text{Lage}} = E_{\text{kin}}$ ) impliziert:

$$v = \sqrt{2gh} = 6,26 \text{ m/s}$$

b) Unmittelbar nach dem Stoß ist die bremsende Wirkung des Erdreichs noch nicht wirksam. Der Impulssatz lautet

$$(m + m_1)v' = mv \quad \Rightarrow \quad v' = 4,08 \text{ m/s}$$

c) Unter der Annahme einer gleichförmig-beschleunigten Bewegung folgt

$$\Delta x = \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad \text{und} \quad a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0 - v'}{\Delta t}$$

Nach  $\Delta t$  umstellen und gleichsetzen führt auf

$$a = \frac{v'^2}{2\Delta x} = 833 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

d)  $F = (m + m_1)a = 383 \text{ kN}$

#### Aufgabe 1.4.2-6

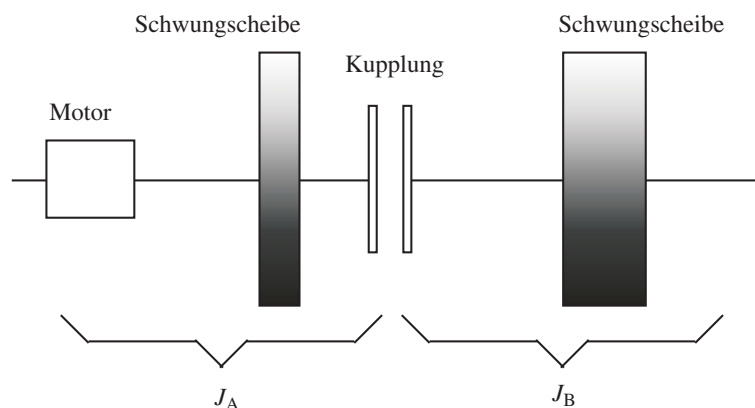


Abbildung 5: Schematische Skizze des Kupplungsprüfstandes

Energieinhalt Welle 1 vor dem Kupplungsvorgang:

$$E_1 = \frac{1}{2} J_A \omega_1^2$$

Energieinhalt Welle 1 und 2 nach dem Kupplungsvorgang:

$$E_1 = \frac{1}{2}(J_A + J_B)\omega_2^2$$

Dabei berechnet sich  $\omega_2$  aus dem Drehimpulserhaltungssatz:

$$\omega_2 = \frac{J_A}{J_A + J_B}\omega_1$$

Reibungswärme:

$$W = E_1 - E_2 = 23,9 \text{ kJ}$$

# Wärme

## Ideale Gase

### Aufgabe 2.1-1

$$pV = mN\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}mN\overline{v^2} \quad \text{und} \quad m_{\text{Gas}} = mN = \rho V \quad \Rightarrow \quad \overline{v} := \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$$

## Temperatur

### Aufgabe 2.2-3

$$n = \frac{pV}{R_m T} = 6,13 \text{ mol} \quad (T = (25,00 + 273,15) \text{ K})$$

## Wärmeleitung

### Aufgabe 2.3-1

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} = \frac{Q}{t} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} t$$

$$R_{\text{th}} = \rho_{\text{th}} \frac{l}{A} = \frac{1}{\lambda} \frac{l}{A} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{\lambda A \Delta T t}{l} = 83,7 \text{ MJ}$$

## Zustandsänderungen

### Aufgabe 2.4-3

Isothermer Ersatzprozess:

$$\Delta Q = nR_m T_0 \ln \frac{V_B}{V_A} \quad \Rightarrow \quad \Delta S = \frac{\Delta Q}{T_0} = nR_m \ln \frac{V_B}{V_A} = R_m \ln 2 = 5,76 \text{ J/K}$$

**Aufgabe 2.4-4**

Die innere Energie des Gesamtsystems beträgt am Anfang

$$U = U_1 + U_2 \quad \text{mit} \quad U_1 = 3n_1 R_m T_1 \quad \text{und} \quad U_2 = 3n_2 R_m T_2$$

Im thermischen Kontakt gleichen sich die Temperaturen an und es gilt

$$U = U'_1 + U'_2 = 3R_m(n_1 + n_2)T' \quad \Rightarrow \quad T' = \frac{n_1 T_1 + n_2 T_2}{n_1 + n_2} = 320 \text{ K}$$

Für die Entropieänderung der beiden Bestandteile gilt

$$\Delta S_i = 3n_i R_m \ln \frac{T'}{T_i}$$

(vgl. Kapitel 2.4, p38). Man erhält

$$\Delta S_1 = +2,28 \text{ kJ/K} \quad \text{und} \quad \Delta S_2 = -1,87 \text{ kJ/K}$$

Die Gesamtänderung der Entropie ergibt sich damit zu

$$\Delta S = +0,412 \text{ kJ/K}$$

**Aufgabe 2.4-5**

Die Definition des Wirkungsgrads der Carnot-Maschine lautet

$$\eta := \frac{\Delta W}{\Delta Q_{\text{zu}}}$$

Die bei einem vollständigen Umlauf verrichtete Arbeit ist

$$\Delta W = \Delta W_{\text{AB}} + \Delta W_{\text{CD}}$$

(die beiden anderen Terme heben sich weg (vgl. Kapitel 2.4, p42)). Da es sich bei beiden Teilprozessen um isotherme Prozesse handelt gilt

$$\Delta W_{\text{AB}} = \Delta Q_{\text{AB}} \quad \text{und} \quad \Delta W_{\text{CD}} = \Delta Q_{\text{CD}}$$

Eingesetzt in die Formel für den Wirkungsgrad und umstellen liefert

$$\Delta Q_{\text{CD}} = (\eta - 1)\Delta Q_{\text{AB}} = -0,8 \text{ kJ}$$

Die gesuchte Temperatur ergibt sich aus

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \Rightarrow \quad T_2 = T_1(1 - \eta) = 360 \text{ K}$$

# Elektrizität und Magnetismus

## Elektrostatik

### Coulombsches Gesetz

#### Aufgabe 3.1.2-2

$$F_{\text{Res}} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Q_1}{d_1^2} - \frac{Q_2}{d_2^2} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_1 d_2^2 = Q_2 d_1^2$$
$$\Rightarrow \quad Q_1 (d - d_1)^2 = Q_2 d_1^2, \quad \text{da} \quad d = d_1 + d_2$$
$$\Rightarrow \quad \sqrt{Q_1} (d - d_1) = \sqrt{Q_2} d_1 \quad \Rightarrow \quad d_1 = \frac{\sqrt{Q_1}}{\sqrt{Q_1} + \sqrt{Q_2}} d = 10 \text{ mm}$$

#### Aufgabe 3.1.2-3

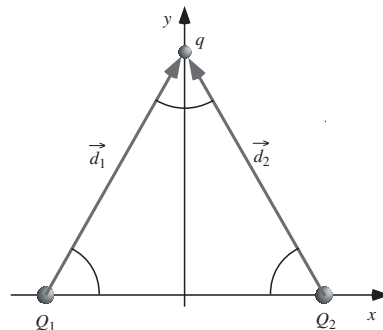


Abbildung 6: Punktladungen sitzen an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks

$$Q_1 = Q_2 =: Q = 9 \mu\text{C}, \quad d_1 = d_2 =: d = 30 \text{ cm}$$

$$\vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{d^3} \vec{d}_i$$

$$\vec{d}_1 = d \begin{pmatrix} +\cos 60^\circ \\ +\sin 60^\circ \end{pmatrix}, \quad \vec{d}_2 = d \begin{pmatrix} -\cos 60^\circ \\ +\sin 60^\circ \end{pmatrix}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{d^3} (\vec{d}_1 + \vec{d}_2) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{d^2} \begin{pmatrix} 0 \\ \sin 60^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4,67 \end{pmatrix} \text{ N}$$

## Kondensatoren

### Aufgabe 3.1.5-3

$$Q = C_1 U = 60 \text{ nC}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 U' + C_2 U' = (C_1 + C_2) U'$$

$$\Rightarrow U' = \frac{Q}{C_1 + C_2} = 857 \text{ V}$$

$$\Rightarrow Q_1 = C_1 U' = 17,1 \text{ nC} \quad \text{und} \quad Q_2 = C_2 U' = 42,9 \text{ nC}$$

$$E = \frac{1}{2} C_1 U^2 = 90,0 \text{ } \mu\text{J} \quad \text{und} \quad E' = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) U'^2 = 25,7 \text{ } \mu\text{J}$$

### Aufgabe 3.1.5-4

$$Q = CU = 25 \text{ nC} \quad \text{und} \quad E = \frac{U}{s} 125 \text{ kV/m}$$

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{s}, \quad C' = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{s'} \quad \Rightarrow \quad C' = \epsilon_r C \frac{s}{s'} = 600 \text{ pF}$$

## Stationäre elektrische Ströme

### Elektrischer Widerstand

#### Aufgabe 3.2.2-5

$$U_K = U_0 - R_i I = 5,4 \text{ V}$$

$$R_{\text{ges.}} = R_i + R_{\text{Leitungen}} + R_{\text{Anlasser}} = \frac{U_0}{I}$$

$$\Rightarrow R_{\text{Anlasser}} = \frac{U_0}{I} - R_i - R_{\text{Leitungen}} = 80 \text{ m}\Omega$$

$$U_{\text{Anlasser}} = U_K - U_{\text{Leitungen}} = U_K - R_{\text{Leitungen}} I = 4,8 \text{ V}$$

**Aufgabe 3.2.2-6**

$$P_V = R_V I^2 \quad \text{mit} \quad I = \frac{U_0}{R_V + R_i} \quad \Rightarrow \quad P_V = U_0^2 \frac{R_V}{(R_V + R_i)^2}$$

$$\frac{dP_V}{dR_V} = U_0^2 \frac{(R_V + R_i)^2 - 2R_V(R_V + R_i)}{(R_V + R_i)^4} = 0$$

$$\Rightarrow (R_V + R_i)^2 = 2R_V(R_V + R_i)$$

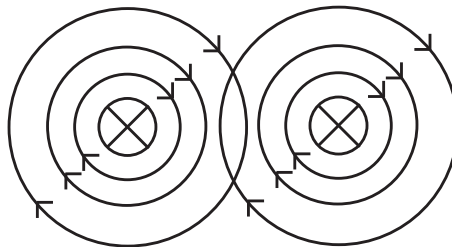
Lösung:  $R_V = R_i$  (Leistungsanpassung)

Außerdem:  $R_V \gg R_i$  (Spannungsanpassung)

und  $R_V \ll R_i$  (Stromanpassung)

**Magnetostatik****Magnetfelder****Aufgabe 3.3.1-2**

(Vgl. Abb. 7)



**Abbildung 7:** Der Strom in den beiden Leitern fließt in die Zeichenebene hinein

$$B_1 = -\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r_1}, \quad B_2 = -\mu_0 \frac{I_2}{2\pi r_2}$$

$$B_1 + B_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{r_1}{I_1} = \frac{r_2}{I_2}$$

Unter Berücksichtigung von  $r_1 + r_2 = a$  folgt

$$r_1 = a \frac{I_1}{I_1 + I_2} = 30 \text{ mm}$$

**Aufgabe 3.3.1-3**

$C_1$ : konzentrischer Kreis mit Radius  $r_1 = 10 \text{ mm} > d/2 = 2 \text{ mm}$

$$B(r_1) = \mu_0 \frac{I}{2\pi r_1} = 0,40 \text{ mT}$$

$C_2$ : konzentrischer Kreis mit Radius  $r_2 = 1 \text{ mm} < d/2 = 2 \text{ mm}$ . Nach dem Verkettungsgesetz trägt nur der durch  $C_2$  hindurchfließende Strom zum Magnetfeld bei. Unter der Annahme einer homogenen Stromdichte folgt

$$j = \frac{I}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{I'}{\pi r_2^2} \quad \Rightarrow \quad I' = I \left( \frac{2r_2}{d} \right)^2$$

$$\Rightarrow \quad B(r_2) = \mu_0 \frac{I'}{2\pi r_2} = \mu_0 \frac{2r_2 I}{\pi d^2} = 1,00 \text{ mT}$$

**Kraftwirkung von Magnetfeldern****Aufgabe 3.3.2-3**

Alle Vektoren stehen senkrecht zueinander, daher:

$$F_{\text{el}} = eE \quad \text{mit} \quad E = \frac{U}{d}, \quad F_{\text{mag}} = evB \quad \text{mit} \quad B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

Kräftegleichgewicht:

$$F_{\text{el}} = F_{\text{mag}} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{Ul}{\mu_0 d v N} = 20 \text{ A}$$

**Aufgabe 3.3.2-4**

Das Magnetfeld steht überall senkrecht auf dem Draht der Schwingspule. Daher

$$F = IlB = 0,363 \text{ N} \quad \text{da} \quad l = N\pi D$$

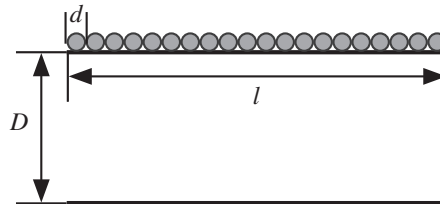
**Elektromagnetische Induktion****Induktionsgesetz****Aufgabe 3.4.1-3**

$$\phi_m = BA = \mu_0 \frac{NI}{l} \frac{1}{4} \pi D^2$$

Unter Verwendung von  $I = U/R$  folgt

$$U = \frac{4lR\phi_m}{\mu_0\pi ND^2}$$



Abbildung 8: Drahtdurchmesser  $d$  und Spulenlänge  $l$ 

Die Windungszahl ist  $N = l/d$  und für den Widerstand kann man schreiben

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{\pi l \frac{D}{d}}{\frac{1}{4} \pi d^2} = \frac{4 \rho l D}{d^3} \quad \text{da für die Drahtlänge} \quad L = \pi D N = \pi l \frac{D}{d}$$

gilt. Daher

$$U = \frac{16 \rho l \phi_m}{\mu_0 \pi d^2 D} = 7,21 \text{ V}$$

#### Aufgabe 3.4.1-4

$x$ -Achse: In der Zeichenebene und senkrecht zum Leiter nach rechts.

$y$ -Achse: Im Leiter nach oben.

$$\phi_m := \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dA = \int_S B n \cos \angle(\vec{B}, \vec{n}) dA$$

$n$  ist als Betrag eines Einheitsvektors immer Eins und der Normalenvektor der von dem Drahtrahmen aufgespannten Fläche und das Magnetfeld sind parallel (oder antiparallel):  $\angle(\vec{B}, \vec{n}) = 0$ . Daher

$$\phi_m = \int_S B dA.$$

Das Magnetfeld hängt in der Zeichenebene nur von  $x$  ab:

$$B(x) = \mu_0 \frac{I}{2\pi x}.$$

Daher

$$\begin{aligned} \phi_m &= \int_d^{d+a} dx \int_0^b dy B(x) = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \int_0^b dy \int_d^{d+a} \frac{dx}{x} \\ &= \mu_0 \frac{I}{2\pi} y|_0^b \cdot \ln x|_d^{d+a} = \mu_0 \frac{Ib}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{a}{d} \right) \end{aligned}$$

**Selbstinduktion****Aufgabe 3.4.2-1**

$$L = \mu_0 \frac{AN^2}{l} \quad \text{mit} \quad l = Nd \quad (\text{Drahtdurchmesser } d)$$

$$\text{und} \quad A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (\text{Spulendurchmesser } D)$$

Einsetzen und Umstellen liefert

$$N = \frac{4Ld}{\mu_0 \pi D^2} = 1267 \quad \Rightarrow \quad l = 127 \text{ mm}$$

**Aufgabe 3.4.2-2**

$$\phi_m = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \left( \frac{d+a}{d} \right) = \frac{\mu_0 c t b}{2\pi} \ln \left( \frac{d+a}{d} \right)$$

Die induzierte Spannung ergibt sich als zeitliche Ableitung dieses Ausdrucks zu

$$U_{\text{ind}} = \frac{\mu_0 c b}{2\pi} \ln \left( \frac{d+a}{d} \right) = 1,39 \text{ nV}$$

# Schwingungen

## Freie harmonische Schwingungen

### Aufgabe 4.1-2

$$z(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad \Rightarrow$$

$$v(t) = \dot{z}(t) = -\omega A \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad a(t) = \dot{v}(t) = -\omega^2 A \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Für die Geschwindigkeitsamplitude ergibt sich daher

$$\hat{v} = \omega A = 942 \text{ m/s}$$

und für die Beschleunigungsamplitude

$$\hat{a} = \omega^2 A = 5,92 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2$$

Die Kraftamplitude hängt über das Dynamische Grundgesetz mit der Beschleunigungsamplitude zusammen<sup>1</sup>:

$$\hat{F} = m\hat{a} = kA \quad \Rightarrow \quad k = \frac{m\hat{a}}{A} = 395 \text{ kg/s}^2$$

### Aufgabe 4.1-4

$$v(t) = \omega(t)l \quad \text{mit} \quad \omega(t) := \dot{\beta}(t) \quad \text{und} \quad \beta(t) = \beta_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

1. Anfangsbedingung:

$$\beta(0) = \beta_0 \cos \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi = -\frac{\pi}{2} \quad \text{als eine mögliche Lösung}$$

Damit

$$\dot{\beta}(t) = -\omega_0 \beta_0 \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{2})$$

2. Anfangsbedingung:

$$v(0) = l\omega_0 \beta_0$$

---

<sup>1</sup>Das negative Vorzeichen spielt hier keine Rolle

$$\Rightarrow \beta_0 = \frac{v(0)}{\sqrt{gl}} \quad \text{da} \quad \omega_0 := \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$s_{\max} = \beta_0 l = \sqrt{\frac{l}{g}} v(0) = 71,4 \text{ cm}$$

(Einfacher geht's übrigens mit Hilfe des Energiesatzes)

### Aufgabe 4.1-5

Aus  $\omega_0 = \sqrt{\frac{amg}{J_A}}$  und  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$  erhält man

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_A}{amg}}$$

Man verwendet den Satz von Steiner

$$J_A = J_S + ma^2 \quad \text{mit} \quad a = \frac{L}{2} \quad \text{und} \quad J_S = \frac{1}{12}mL^2$$

(vgl. Tabelle 1.1). Damit

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{3g}} = 1,23 \text{ s}$$

### Aufgabe 4.1-7

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}, \quad \omega'_0 = 2\pi f' = \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}} = \frac{1}{2}\omega_0$$

Gleichsetzen

$$\frac{1}{\sqrt{LC_1}} = \frac{2}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}} \quad \Rightarrow$$

$$C_1 = \frac{1}{3}C_2 = 80,7 \text{ pF} \quad \text{und} \quad f = 408 \text{ kHz}$$

## Freie gedämpfte Schwingungen

### Aufgabe 4.2-2

$$z(t) = z_1 \frac{\omega_0}{\omega} \exp(-\delta t) \sin(\omega t + \varphi)$$

$$z(0) = z_1 \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\varphi) = 5 \text{ cm}$$

$$z(T) = z_1 \frac{\omega_0}{\omega} \exp(-\delta T) \sin(\omega T + \varphi) = z_1 \frac{\omega_0}{\omega} \exp(-\delta T) \sin(\varphi) = 4 \text{ cm}$$

$$\text{(da } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ und } \sin(2\pi + \varphi) = \sin(\varphi))$$

Damit

$$q = \frac{z_0}{z_1} = \exp(\delta T) = \frac{5}{4} \Rightarrow \delta = \frac{\ln 5/4}{T} = 9,62 \cdot 10^{-2} \text{ 1/s}$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad \text{und} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\Rightarrow k = m \left( \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 + \delta^2 \right) = 1,10 \text{ kg/s}^2$$

### Aufgabe 4.2-3

$$\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} = 3,96 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

Die Schwingfallformel kann natürlich auch auf die Spannung im Schwingkreise angewendet werden ( $\frac{\omega_0}{\omega} \approx 1$ ) und daher gilt

$$\frac{U(t=0)}{U(t=20T)} \approx \frac{\hat{U} \sin \varphi}{\hat{U} \exp(-\delta \cdot 20T) \sin(\omega \cdot 20T + \varphi)} = 3$$

$$\omega \cdot 20T = \frac{2\pi}{T} \cdot 20T = 40\pi \Rightarrow \sin(\omega \cdot 20T + \varphi) = \sin \varphi$$

Daraus folgt  $3 = \exp(\delta \cdot 20T)$ , woraus sich wiederum  $\delta$  berechnen läßt:

$$\delta = \frac{\ln 3}{20T} = f \frac{\ln 3}{20}$$

Mit Hilfe der Übersetzungsregeln aus Tabelle 4.3 läßt sich der Abklingkoeffizient durch  $L$  und  $R$  ausdrücken:

$$\delta = \frac{R}{2L} \Rightarrow R = 2\delta L = 3,48 \text{ } \Omega$$

**Aufgabe 4.2-4**

$$z(t) = z_1(1 + \delta t)e^{-\delta t} \Rightarrow$$

$$\frac{z(t = 1 \text{ s})}{z_1} = 0,0103 = 1,03\%$$

**Erzwungene Schwingungen****Aufgabe 4.3-4**

$$Z = \sqrt{X_L^2 + (R_L + R_1)^2} = \frac{U_1}{I} \Rightarrow R_1 = \sqrt{\left(\frac{U_1}{I}\right)^2 - X_L^2} - R_L = 83,4 \Omega$$

$$U_2 = R_1 I = 41,7 \text{ V}$$

# Wellen

## Wellenausbreitung entlang einer Linie

### Aufgabe 5.1-1

Bei dieser Aufgabe ist es wichtig, dass man numerisch exakt rechnet.

### Aufgabe 5.1-4

$$\xi_1(x, t) = \hat{\xi}_1 \sin(\omega t - kx + \varphi_{0,1}) \quad \text{und} \quad \xi_2(x, t) = \hat{\xi}_2 \sin(\omega t - kx + \varphi_{0,2})$$

An einem beliebig gewählten Ort  $x$  gilt: Die Phase von Welle 1 zur Zeit  $t$  stimmt mit der Phase von Welle 2 zum späteren Zeitpunkt  $t + \Delta t$  überein. Daher

$$\omega t - kx + \varphi_{0,1} = \omega(t + \Delta t) - kx + \varphi_{0,2} \quad \Rightarrow \quad \varphi_{0,1} - \varphi_{0,2} = 2\pi f \Delta t = 270^\circ$$

## Pegel

### Aufgabe 5.4-1

$$I = \frac{P}{A} = \frac{\eta P_0}{4\pi r^2} = 9,95 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$$

### Aufgabe 5.4-2

a)

$$L_{I_{\text{ges}}} = 10 \log (10^{0,1\cdot70} + 10^{0,1\cdot73} + 10^{0,1\cdot74}) \text{ dB} = 77,4 \text{ dB}$$

b)

$$L_{I_{\text{ges}}} = 10 \log (10^{0,1\cdot0} + 10^{0,1\cdot0}) \text{ dB} = 3,0 \text{ dB}$$

(Achtung, 0 dB bedeutet nicht  $I = 0$ !)

## Signalausbreitung

### Aufgabe 5.5-1

a) Schwerewellen:

$$c(\lambda) = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \Rightarrow \frac{dc}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{g\lambda}{2\pi} \right)^{1/2} = \frac{1}{2} \left( \frac{g\lambda}{2\pi} \right)^{-1/2} \frac{g}{2\pi} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}}$$

$$c_G(\lambda_0) = c(\lambda_0) - \lambda_0 \left. \frac{dc}{d\lambda} \right|_{\lambda_0} = \sqrt{\frac{g\lambda_0}{2\pi}} - \lambda_0 \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda_0}} = \frac{1}{2} c(\lambda_0)$$

b) Kapillarwellen: analog

## Reflexion und Brechung

### Aufgabe 5.6-2

$$\text{a) } n_{\text{Luft,GaP}} = \frac{\sin 10^\circ}{\sin 3^\circ} = 3,32 \quad \text{b) } n_{\text{GaP,Luft}} = \frac{1}{n_{\text{Luft,GaP}}} = 0,301$$

## Beugung

### Aufgabe 5.7-3

Das mittlere Beugungsmaximum (Hauptmaximum) ist beidseitig durch Minima begrenzt. Daher gilt (z. B. für  $n = +1$ )

$$b \sin \vartheta_{+1} = \lambda \Rightarrow b = \frac{\lambda}{\sin \vartheta_{+1}}$$

Weiterhin ( $B$  Breite Hauptmaximum,  $D$  Abstand Spalt-Schirm)

$$\tan \vartheta_{+1} = \frac{\frac{1}{2}B}{D} \approx \sin \vartheta_{+1} \Rightarrow b \approx \frac{2D\lambda}{B} = 600 \mu\text{m}$$

## Stehende Wellen

### Aufgabe 5.8-1

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{mit} \quad A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad \Rightarrow \quad d = \sqrt{\frac{4F}{\pi\sigma}}$$

$$c = \sqrt{\frac{\sigma}{\varrho}} = 2Lf \quad \text{mit } f = \text{Grundfrequenz} \quad \Rightarrow \quad \sigma = 4\varrho L^2 f^2$$



Einsetzen:

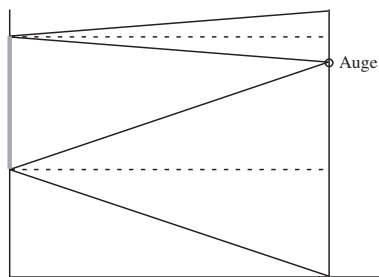
$$d = \frac{1}{Lf} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}} = 0,239 \text{ mm} \quad (\text{gilt nur für Saiten mit homogener Zusammensetzung})$$

# Optik

## Geometrische Optik

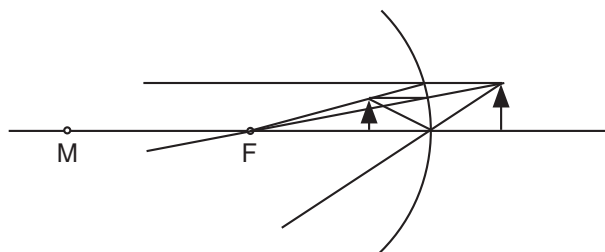
### Spiegel

#### Aufgabe 6.1.1-1



**Abbildung 9:** Aus dem Reflexionsgesetz folgt, dass, unabhängig von der Entfernung zwischen Spiegel und Betrachter, ein Spiegel von halber Körpergröße ausreicht. Er muss allerdings in der richtigen Höhe hängen.

#### Aufgabe 6.1.1-3



**Abbildung 10:** Bildkonstruktion unter Verwendung von Brennpunktstrahl, Scheitelstrahl und Parallelstrahl

$$g = -2 \text{ cm}, f = -6 \text{ cm}, B = +1 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \Rightarrow b = \frac{gf}{g-f} = +3 \text{ cm}$$

$$\beta = -\frac{b}{g} = +1,5 \Rightarrow B = \beta G = 1,5 \text{ cm}$$

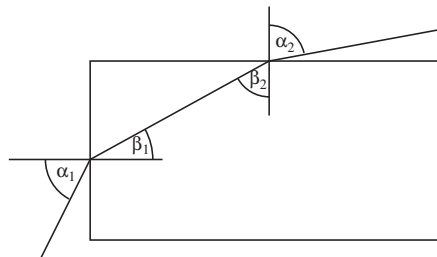
**Aufgabe 6.1.1-4**

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \Rightarrow b = \frac{gf}{g-f}$$

$$\beta = -\frac{b}{g} = -\frac{1}{g} \left( \frac{gf}{g-f} \right) = \frac{f}{f-g}$$

$$\Rightarrow g = f \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) = \frac{r}{2} \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) = -8/12 \text{ cm}$$

$$b = -\beta g = +40 / -60 \text{ cm}$$

**Lichtbrechung und Linsen****Aufgabe 6.1.2-1****Abbildung 11:** Lichtwellenleiter

$$n = \frac{\sin \alpha_i}{\sin \beta_i}$$

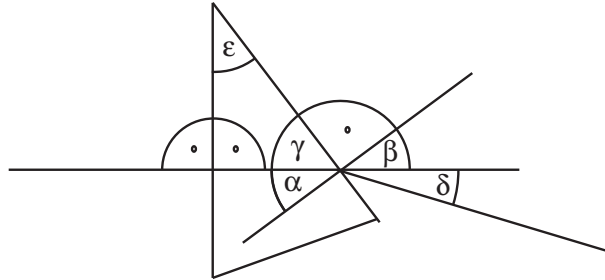
$$\text{a) Grenzwinkel: } \alpha_2 = 90^\circ \Rightarrow \sin \beta_2 = \frac{1}{n} \Rightarrow \beta_2 = \arcsin \frac{1}{n}$$

$$\beta_1 + \beta_2 = 90^\circ \Rightarrow \beta_1 = 90^\circ - \arcsin \frac{1}{n}$$

$$\Rightarrow \arcsin \left( \frac{\sin \alpha_1}{n} \right) = 90^\circ - \arcsin \frac{1}{n}$$

$$\text{Maximalwert von } \alpha_1 \text{ ist } 90^\circ \text{ und folglich: } \arcsin \frac{1}{n} = 90^\circ - \arcsin \frac{1}{n}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{n} = \sin 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow n = \sqrt{2} \approx 1,41$$

**Aufgabe 6.1.2-3****Abbildung 12:** Bei senkrechtem Einfall liefert das Brechungsgesetz keine Brechung

Aus Abbildung 12 entnimmt man

$$\varepsilon + 90^\circ + \gamma = \varepsilon + 90^\circ + (90^\circ - \alpha) = 180^\circ \quad \Rightarrow \quad \alpha = \varepsilon.$$

Aus der Abbildung entnimmt man ebenfalls  $\beta = \alpha$  und daher  $\beta = \varepsilon$ .

Damit ergibt sich

$$n = \frac{\sin(\beta + \delta)}{\sin \alpha} = \frac{\sin(\varepsilon + \delta)}{\sin \varepsilon} = 1,488.$$

**Aufgabe 6.1.2-5**

$$D' = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = 2,17 \text{ dpt}$$

unabhängig davon, ob man beide Radien positiv oder negativ ansetzt.

**Aufgabe 6.1.2-6**

Es gibt zwei Lösungen:  $r_1 = +150 \text{ mm}$ ,  $r_2 = +87 \text{ mm}$  und  $r_1 = -150 \text{ mm}$ ,  $r_2 = -543 \text{ mm}$ . Es handelt sich also um eine konvexkonkave Linse.

**Aufgabe 6.1.2-7**

$$g = -1 \text{ m}, r_1 = \infty, r_2 = -0,312 \text{ m} \quad \text{oder} \quad r_1 = +0,312 \text{ m}, r_2 = \infty$$

Einsetzen in die Linsenschleiferformel liefert  $f' = 60 \text{ cm}$ . Aus der Abbildungsgleichung ergibt sich dann

$$b = \frac{f' g}{f' + g} = +150 \text{ cm}$$

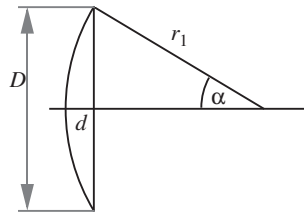


Abbildung 13: Plankonvexe Linse

**Aufgabe 6.1.2-9**

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{mit} \quad r_2 = \infty \quad \Rightarrow \quad r_1 = (n - 1)f' = 200 \text{ mm}$$

$$\sin \alpha = \frac{D/2}{r_1} \quad \Rightarrow \quad \alpha = 8,63^\circ$$

$$\tan \alpha = \frac{D/2}{r_1 - d} \quad \Rightarrow \quad d = r_1 - \frac{D}{2 \tan \alpha} = 2,26 \text{ mm}$$

**Optische Instrumente****Aufgabe 6.1.3-1**

Nach Voraussetzung soll  $|b| = s_0 = 250 \text{ mm}$  gelten. In diesem Fall ergibt sich die Winkelvergrößerung zu

$$v = 1 + \frac{s_0}{f'} = 3,5$$

Die Gegenstandsweite ergibt sich aus der Abbildungsgleichung:

$$g = -\frac{s_0 f'}{s_0 + f'} = -71 \text{ mm.}$$

Man beachte, dass die Gegenstandsweite außerhalb des Akkommodationsbereichs liegt. Ohne Lupe ließe sich der Gegenstand also nicht so nahe ans Auge führen.

**Aufgabe 6.1.3-2**

$$\frac{D_1}{f'_{\text{Ob}}} = \frac{D_2}{-f'_{\text{Ok}}} = \frac{D_2}{f'_{\text{Ok}}} \quad \Rightarrow \quad D_2 = \frac{f'_{\text{Ok}}}{f'_{\text{Ob}}} D_1 = \frac{D_1}{v} = 3,75 \text{ mm}$$

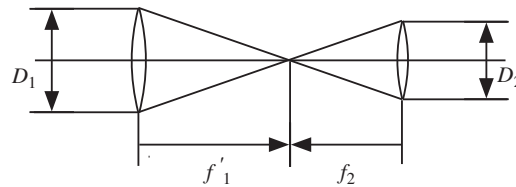


Abbildung 14: Strahlengang beim Astronomischen Fernrohr

**Aufgabe 6.1.3-4**

$$f'_{\text{Ok}} = \frac{f'_{\text{Ob}}}{v} = 33,3 \text{ mm}$$

Die maximale Bildweite bei der Abbildung am Objektiv ist um  $\Delta a = 4 \text{ mm}$  größer als die Brennweite:

$$b_{\text{max}} = f'_{\text{Ob}} + \Delta a.$$

Dies führt über die Abbildungsgleichung zu einer minimalen Gegenstandsweite von

$$g_{\text{min}} = -\frac{f'_{\text{Ob}}(f'_{\text{Ob}} + \Delta a)}{\Delta a} = -10,2 \text{ m}$$

**Aufgabe 6.1.3-6**

Die beiden in Abbildung 6.18 eingezeichneten Strahlen verlassen das Okular parallel, wenn das Zwischenbild in der Brennebene des Okulars liegt. Dies geschieht, wenn

$$b = f' + t$$

Daher

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{b} - \frac{1}{g} \Rightarrow g = \frac{f'b}{f' - b} = \frac{f'(f' + t)}{f' - (f' + t)} = \frac{f'(f' + t)}{-t} = -4,1 \text{ mm}$$

Hierbei gilt  $b = b_{\text{OB}}$ ,  $g = g_{\text{OB}}$  und  $f' = f'_{\text{OB}}$ . Das Objekt muss sich daher  $0,1 \text{ mm} = 100 \mu\text{m}$  links von der Brennebene des Objektivs befinden.

**Wellenoptik****Interferenz an dünnen Schichten****Aufgabe 6.2.2-2**

Reflektiertes Licht:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 2d\sqrt{1^2 - 0^2} = 2d = x\lambda$$

$$\Rightarrow x = 2 \frac{d}{\lambda} = 3 \quad \Rightarrow \quad \text{Dunkelheit}$$

Hinweis: Der Phasensprung findet hier an der zweiten Trennfläche statt. Dies macht aber formelmäßig keinen Unterschied zu einem Phasensprung an der ersten Trennfläche.

### Aufgabe 6.2.2-3

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = x\lambda$$

$$\Rightarrow x_{\min} = \frac{2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\lambda_{\max}} \quad \text{und} \quad x_{\max} = \frac{2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\lambda_{\min}}$$

Für  $\alpha = 45^\circ$  folgt:

$$x_{\min} = 1,98 \quad \text{und} \quad x_{\max} = 3,97.$$

Da  $x$  eine ganze Zahl sein muss, hat man  $x_{\min}$  auf 2 aufzurunden und  $x_{\max}$  auf 3 abzurunden. Damit erhält man für die Wellenlängen

$$\lambda = \frac{2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{2} = 794 \text{ nm} \quad \text{und} \quad \lambda = \frac{2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{3} = 529 \text{ nm}.$$

## Optische Gitter

### Aufgabe 6.2.3-2

$$400 \text{ Striche/mm} \quad \Rightarrow \quad a = 2,5 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\text{konstruktive Interferenz: } \vartheta = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{a}\right)$$

$m = 2$ :

$$\vartheta_{2,\min} = \arcsin\left(\frac{2 \cdot 0,4 \text{ } \mu\text{m}}{2,5 \text{ } \mu\text{m}}\right) = 18,7^\circ,$$

$$\vartheta_{2,\max} = \arcsin\left(\frac{2 \cdot 0,7 \text{ } \mu\text{m}}{2,5 \text{ } \mu\text{m}}\right) = 34,1^\circ$$

$m = 3$ :

$$\vartheta_{3,\min} = \arcsin\left(\frac{3 \cdot 0,4 \text{ } \mu\text{m}}{2,5 \text{ } \mu\text{m}}\right) = 28,7^\circ,$$

$$\vartheta_{3,\max} = \arcsin\left(\frac{3 \cdot 0,7 \text{ } \mu\text{m}}{2,5 \text{ } \mu\text{m}}\right) = 57,1^\circ$$

$$\text{Überlappung: } 28,7^\circ \leq \vartheta \leq 34,1^\circ$$

## Quantenoptik

### Wärmestrahlung

#### Aufgabe 6.3.1-2

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = 5796 \text{ K}$$

$$E = \sigma T^4 = 63,99 \text{ MW/m}^2 \quad \Rightarrow \quad P = AE = 4\pi R_S^2 E = 3,94 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

$$\text{Energieerhaltung: } A(R_S)E = A(d)E' \quad \Rightarrow \quad E' = E \left( \frac{R_S}{d} \right)^2 = 1,4 \text{ kW/m}^2$$

( $R_S$ : Sonnenradius,  $d$ : Abstand Sonne-Erde)

### Compton-Effekt

#### Aufgabe 6.3.3-3

a)

$$\Delta E = h(f - f') \quad \Rightarrow \quad f' = f - \frac{\Delta E}{h} \quad \Rightarrow \quad \lambda' = \frac{c}{\frac{c}{\lambda} - \frac{\Delta E}{h}} = 12,8 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

$$(c = \lambda f = \lambda' f')$$

b)

$$\lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos \vartheta) \quad \Rightarrow \quad \vartheta = \arccos \left( 1 - \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda_C} \right) = 69^\circ 57'$$

### Abschirmung von Röntgenstrahlung

#### Aufgabe 6.3.4-1

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d} = 0,01 I_0 \quad \Rightarrow \quad -\mu d = \ln 0,01 \quad \Rightarrow \quad d = 11,5 \text{ cm}$$

### Materiewellen

#### Aufgabe 6.3.5-3

$$\Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} \geq \frac{1}{m} \frac{h}{4\pi} \frac{1}{\Delta x} = 2,11 \cdot 10^{-32} \text{ m/s} \quad \text{bzw.} \quad = 5,79 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$



# Atome

## Atomhülle

### Stationäre Bahnen

#### Aufgabe 7.2.1-1

$$\Delta E = E_n - E_1 = -\frac{me^4}{8(\varepsilon_0 h)^2} \left( \frac{1}{n^2} - 1 \right) = 1,635 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 10,20 \text{ eV} \quad \text{etc.}$$

## LASER

#### Aufgabe 7.2.4-3

a)

$$L = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow n = 1,580 \cdot 10^6$$

b)

$$\Delta f = f_{n\pm 1} - f_n = \frac{c}{\lambda_{n\pm 1}} - \frac{c}{\lambda_n} = c \left( \frac{n \pm 1}{2L} - \frac{n}{2L} \right) = \pm 300 \text{ MHz}$$

## Röntgenstrahlung

#### Aufgabe 7.2.5-2

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{3}{4} R(Z-1)^2 \Rightarrow Z = \sqrt{\frac{4\Delta E}{3hR}} + 1 \approx 29$$

## Atomkerne

### Aufbau der Atomkerne

#### Aufgabe 7.3.1-2

$$m = A_r u \approx Au, \quad V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{m}{V} = \frac{3u}{4\pi R_0} \approx 4,5 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

## Kernprozesse

### Aufgabe 7.3.2-4

a)

$$A(t) = \lambda N(t) \Rightarrow \frac{A(t)}{A(0)} = \frac{N_0 \exp -\lambda t}{N_0} = \exp \left( -\ln 2 \frac{t}{T} \right) = 0,1599$$

b)

$$0,1 = \exp \left( -\ln 2 \frac{t}{T} \right) \Rightarrow t = -T \ln 0,1 / \ln 2 = 458 \text{ d}$$

### Aufgabe 7.3.2-6

$$A = \lambda N_{40\text{K}} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad \text{und} \quad N_{40\text{K}} = 1,2 \cdot 10^{-4} N_{\text{K}}$$

Mit  $N_{\text{K}} = m/A_r u$  folgt  $A = 4687 \text{ Bq}$ .

## Moleküle

### Molekülanregung

#### Aufgabe 7.4.2-2

$$J = 2m (d/2)^2 = 5,3 \cdot 10^{-46} \text{ kg m}^2$$

$$E_{\text{rot}} = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2J} \approx \bar{E}_{\text{rot}} = kT \Rightarrow l(l+1) = \frac{2JkT}{\hbar^2}$$

$$l^2 + l - \frac{2JkT}{\hbar^2} = 0 \Rightarrow l = -1/2 + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2JkT}{\hbar^2}} = 19,4$$

(die andere Lösung führt auf ein negatives  $l$  und ist daher nicht sinnvoll). Etwas schneller kommt man näherungsweise zum Ziel:

$$l \gg 1 \Rightarrow l(l+1) \approx l^2 \Rightarrow l \approx \sqrt{\frac{2JkT}{\hbar^2}} = 19,9$$

**Aufgabe 7.4.2-3**

$$R \approx R_0 \sqrt[3]{A} \quad \text{mit} \quad A = 16$$

Trägheitsmoment Kugel (vgl. Tabelle 1.1):

$$J_{\text{Kugel}} = \frac{2}{5} m R^2$$

Trägheitsmoment Hantel (bei Rotation um Hantelachse):

$$J_{\text{Hantel}} = 2J_{\text{Kugel}} = \frac{4}{5} m R^2 = \frac{4}{5} u R_0^2 A^{5/3} = 2,64 \cdot 10^{-55} \text{ kg m}^2$$

Der erste angeregte Rotationszustand besitzt die Energie

$$E_{\text{rot}} = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2J_{\text{Hantel}}} = \frac{\hbar^2}{J_{\text{Hantel}}} = 263 \text{ keV}$$

# Festkörper

## Elektrische Leitfähigkeit

### Metalle und Nichtleiter

#### Aufgabe 8.2.1-1

$$\varrho_{\text{Masse}} = \frac{m}{V} \quad \text{mit} \quad m = A_r u N \quad \Rightarrow \quad n = \frac{N}{V} = \frac{\varrho_{\text{Masse}}}{A_r u}$$

$$j = \frac{I}{A} = en\mu E = en\bar{v} \quad \Rightarrow \quad \bar{v} = \frac{I}{enA} = \frac{IA_r u}{eA\varrho_{\text{Masse}}} = 0,294 \text{ mm/s}$$

#### Aufgabe 8.2.2-2

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad E_{\text{min}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = \Delta E$$

Daraus folgt

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{\Delta E} = 1,24 \text{ } \mu\text{m}$$

# Messen und Auswerten

## Fehlerrechnung und Messergebnisse

### Aufgaben

#### Aufgabe C-1

Die Messung des Elastizitätsmoduls von Stahl ergab die Werte (jeweils in  $\text{N/mm}^2$ ) 211000, 204000, 202000, 214000, 212000. Wie lautet das Messergebnis?

Mittelwert:	$\bar{E} = 208600,000000 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung:	$s_E = 5272,570531 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung des Mittelwerts:	$\Delta E = 2357,965225 \text{ N/mm}^2$
Rundung auf zwei signifikante Stellen:	$\Delta E = 2,4 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$

$$\text{Ergebnis: } E = (208,6 \pm 2,4) \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$$

#### Aufgabe C-2

Die Länge eines dünnen homogenen Stabes wird mit 21,3 cm bei einer Messunsicherheit von 0,1 cm angegeben, und für die Masse liegen die Messwerte 120,1 g, 119,9 g, 119,2 g, 121,1 g, 119,7 g, 120,7 g vor.

a) Wie lautet das Messergebnis für die Masse?

Mittelwert:	$\bar{m} = 120,1166667 \text{ g}$
Standardabweichung:	$s_m = 0,688234456 \text{ g}$
Standardabweichung des Mittelwerts:	$\Delta m = 0,28097054 \text{ g}$
Rundung:	$\Delta m = 0,28 \text{ g}$

$$\text{Ergebnis: } m = (120,12 \pm 0,28) \text{ g}$$

b) Bestimmen Sie das Massenträgheitsmoment bezüglich einer durch den Schwerpunkt und senkrecht zum Stab verlaufenden Drehachse und präsentieren Sie das Ergebnis einschließlich Messunsicherheit!

$$J = \frac{1}{12}ml^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial J}{\partial m} = \frac{1}{12}l^2 \quad \text{und} \quad \frac{\partial J}{\partial l} = \frac{1}{6}ml$$

$$\Delta J = \sqrt{\left(\frac{1}{12}l^2\Delta m\right)^2 + \left(\frac{1}{6}ml\Delta l\right)^2}$$

Ergebnis:  $J = (4541 \pm 44) \text{ g cm}^2$

### Aufgabe C-3

Eine Messreihe zur Bestimmung des Brewster-Winkels  $\alpha_B$  lieferte die Werte  $55.4^\circ$ ,  $60.1^\circ$ ,  $61.5^\circ$ ,  $56.9^\circ$ ,  $57.2^\circ$ ,  $59.1^\circ$ .

a) Wie lautet das zugehörige Messergebnis?

Mittelwert:	$\bar{\alpha}_B = 58,36666667^\circ$
Standardabweichung:	$s_{\alpha_B} = 2,265980288^\circ$
Standardabweichung des Mittelwerts:	$\Delta\alpha_B = 0,925082579^\circ$
Rundung:	$\Delta\alpha_B = 0,93^\circ$

Ergebnis:  $\alpha_B = (58,37 \pm 0,93)^\circ$

b) Bestimmen Sie die sich ergebende Brechzahl aus  $n = \tan \alpha_B$  und präsentieren Sie das Ergebnis einschließlich Messunsicherheit!

$$n = \tan \alpha_B \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial n}{\partial \alpha_B} = \frac{1}{\cos^2 \alpha_B}$$

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha_B}{\cos^2 \alpha_B}\right)^2} = \frac{\Delta \alpha_B}{\cos^2 \alpha_B}$$

Ergebnis:  $n = (1,624 \pm 0,059)$  (Achtung, Bogenmaß!)

### Aufgabe C-4

Sie befinden sich auf einer Party. Plötzlich bricht ein Gewitter los. Einige Partygäste beschließen, die Entfernung des Gewitters durch Zeitmessung abzuschätzen. Die von den Gästen ermittelten Zeiten zwischen Blitz und Donner sind (jeweils in Sekunden): 5,5, 5,7, 6,4, 6,4, 5,8, 6,0, 5,9. Geben Sie die Ergebnisse für Zeitmessung und Entfernung des Gewitters an! Nehmen Sie an, dass die Schallgeschwindigkeit  $340 \text{ m/s}$  beträgt und wegen der unübersichtlichen Temperaturverhältnisse in der Gewitterwolke mit einer Unsicherheit von  $20 \text{ m/s}$  behaftet ist!

Lösung:  $(5,96 \pm 0,13) \text{ s}$ ,  $(2,03 \pm 0,13) \text{ km}$