

# Klassische Experimentalphysik B

## Aufgaben und Lösungen

Aufschrieb von Levin, dem Ewig Schwingenden

Sommersemester 2017

Tutoriumsmitschrieb des Moduls Klassische Experimentalphysik B.

Vollständigkeit und Korrektheit kann nicht gewährleistet werden, ich habe jedoch nach bestem Wissen und Gewissen gearbeitet.

Grafiken wurden nach Vorlage meines Mitschriebs mit Tikz und Inkscape erstellt.

Die Energie wird hier mit  $W$  bezeichnet, um sie vom elektrischen Feld  $E$  zu unterscheiden.

---

## Übungsblatt 1

### A1: Anziehung zwischen Proton und Elektron

Gravitationskraft:  $F_G = -\gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = -\gamma \frac{m_e \cdot m_p}{a_0^2} = -3,61 \cdot 10^{-47} \text{ N}$

Elektr. Anziehungskraft:  $F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(-e) \cdot e}{a_0^2} = -8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$

Verwendete Konstanten:  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\gamma = 6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

Verhältnis:  $\frac{F_G}{F_C} = 4,4 \cdot 10^{-40}$

### A2: Teilchen im E-Feld

a)  $F = q \cdot E = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 6 \text{ mN}$

b)  $W_{\text{kin}} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} = Q \cdot \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{s} = Q \cdot E \cdot (r_2 - r_1)$   
 $= 3 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 4 \text{ m} = 24 \text{ mJ}$

c) Energieerhaltung:  $W_{\text{pot}} \rightarrow W_{\text{kin}}$  (bzw. umgekehrt)

Also:  $\Delta W_{\text{pot}} = -W_{\text{kin}} = -24 \text{ mJ}$

d)  $U = \Delta\varphi = \varphi(r_2) - \varphi(r_1)$

mit  $\varphi(\vec{r}) = \frac{W_{\text{pot}}}{Q}$

also  $\Delta\varphi = \frac{\Delta W_{\text{pot}}}{Q} = \frac{-24 \text{ mJ}}{3 \mu\text{C}} = -8 \text{ kV}$

e)  $\Delta\varphi = -E\Delta x$  (siehe d))

Also:  $\varphi(x) = \varphi_0 - E \cdot x$

Hier:

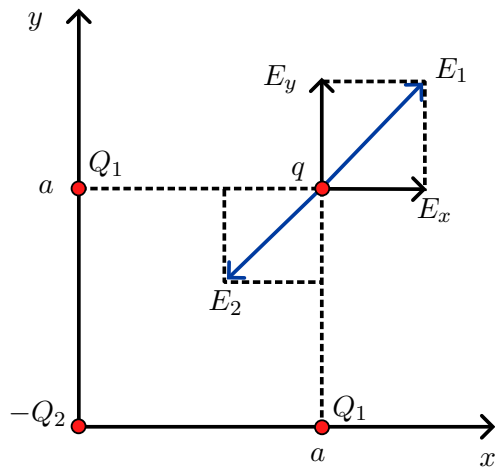
$$\varphi(1) = \varphi_0 - E \cdot 1 \text{ m} = 0$$

$$\Rightarrow \varphi_0 = 2 \frac{\text{kN}}{\text{C}} \cdot 1 \text{ m} = 2 \frac{\text{kV}}{\text{m}} \cdot 1 \text{ m} = 2 \text{ kV}$$

Potential:  $\varphi = \underbrace{2 \text{ kV}}_{\varphi_0} - \underbrace{2 \frac{\text{kV}}{\text{m}}}_{E} \cdot x$

### A3: Kräftegleichgewicht beim Ladungsviereck

a)



Damit Ladung  $q$  im Punkt  $(a, a)$  keine Kraft erfährt, muss gelten:

$$|\text{Anziehung}| = |\text{Abstoßung}|$$

$$\text{Also: } E_1 + E_2 = 0$$

$$\text{Gesamtladung: } Q = Q_1 + Q_1 + Q_2$$

$$\text{Kraft auf } q: F_c(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot Q}{r^2}$$

$$\text{Feldstärke: } E = \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Nun soll auf  $q$  keine Kraft wirken:

$$F_c(a, a) = 0 \Rightarrow E(a, a) = 0$$

$$E_x = E_1 \cdot \underbrace{\cos(45^\circ)}_{1/\sqrt{2}} = E_1 \cdot \underbrace{\sin(45^\circ)}_{1/\sqrt{2}} = E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{a^2}$$

$$\Rightarrow E_1 = \sqrt{2} \cdot E_x$$

Abstand zwischen Nullpunkt und  $(a, a)$ :  $\sqrt{2}a$  (durch Satz des Pythagoras)

$$\Rightarrow E_2 = \frac{-1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{2a^2}$$

$$\text{Gesamt: } E_1 + E_2 = \frac{\sqrt{2}}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{a^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{2a^2}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0 a^2} \left( \sqrt{2} Q_1 - \frac{Q_2}{2} \right) = 0$$

$$\sqrt{2} Q_1 = \frac{Q_2}{2}$$

$$Q_2 = 2\sqrt{2} Q_1$$

$$\begin{aligned} \text{b) } \varphi(r) &= - \int_{\infty}^r E(r) dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \\ \varphi(a, a) &= \underbrace{2}_{\substack{\text{für } x \\ \text{und } y}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{a} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{\sqrt{2}a} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \underbrace{\left( 2 - \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \right)}_0 \frac{Q_1}{a} = 0 \end{aligned}$$

## A4: Elektrischer Quadrupol

Potential einer Ladung  $q$  im Abstand  $r$ :

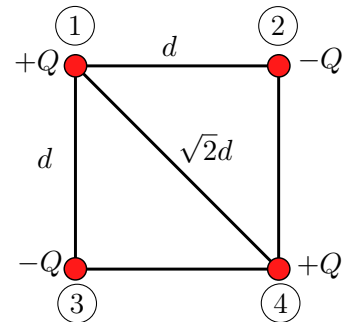
$$\varphi_i(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r}$$

Nun wirkt das Potential von  $q_i$  auf eine Ladung  $q_j$ :

$$W_{ji} = q_j \cdot \varphi_i(r_{ij}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

Nun fügt man eine Ladung nach der anderen hinzu:

$$W = \sum_{j=2}^N \left( \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^{j-1} \frac{q_i}{r_{ij}} \right) \quad \text{Hier: } N = 4$$



Sieht komplizierter aus, als es ist. Wir fügen eine Ladung nach der anderen hinzu, und schauen jeweils, wie sie sich auf die bereits vorhandenen Ladungen auswirkt.

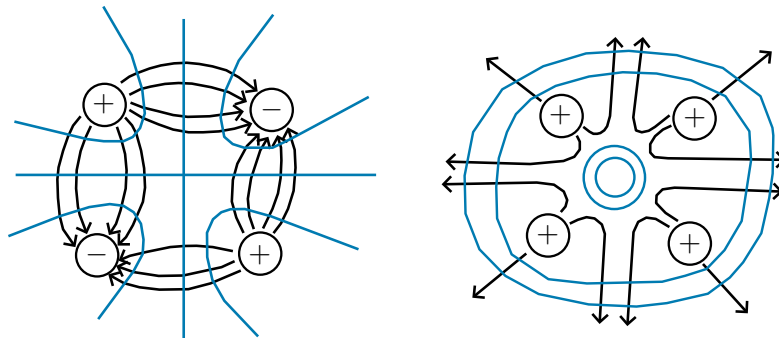
$$\text{a) } W = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d} \left( \underbrace{-1}_{(1)+(2)} + \underbrace{\left(-1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)}_{(1)+(2)+(3)} + \underbrace{\left(-1 + 1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)}_{(1)+(2)+(3)+(4)} \right)$$

$$= -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d} (4 - \sqrt{2}) = -1,19 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

b) Alle Vorzeichen gleich:

$$W = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d} (4 + \sqrt{2}) = 2,49 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

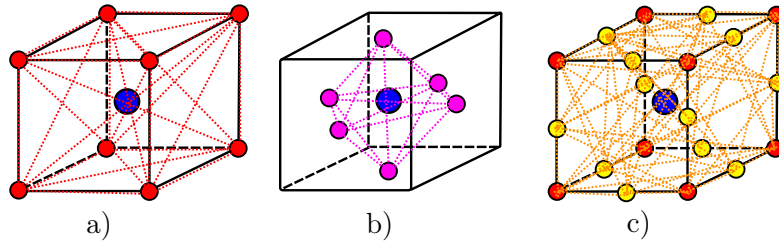
c) Feldlinien (schwarz) und Äquipotentiallinien (blau) in Fall a) (unterschiedliche Ladungen) und Fall b) (gleiche Ladungen)



Überlegungen:

- Symmetrie
- Feldlinien zeigen von + zu -
- Feldlinien schneiden sich nicht
- Äquipotentiallinien  $\perp$  Feldlinien

## A5: Ladung im Würfel



Potential der Punktladung  $q$  im Abstand  $r$ :

$$\varphi_i(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \underbrace{\frac{1}{\epsilon_r}}_{\text{optional}} \frac{q}{r}$$

Spannung: Potentialdifferenz, also  $\varphi(r_1) - \varphi(r_2)$

a) Würfel: Alle Ecken gleich weit vom Mittelpunkt entfernt, also  $|r_1| = |r_2|$ .  
 $\Rightarrow U = \varphi(r_1) - \varphi(r_2) = 0 \text{ V}$ .

b) Analog für die Seitenflächen:  
 Gleiche Entfernung zum Mittelpunkt, und somit  $U = 0 \text{ V}$ .

c) Kantenlänge:  $a$   
 $\rightarrow r(\text{Seite}) = \frac{a}{2}$  und  $r(\text{Ecke}) = \frac{a}{2}\sqrt{3}$  (Pythagoras)  
 $\hookrightarrow U = \varphi(\text{Seite}) - \varphi(\text{Ecke}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \frac{2}{a} - \frac{2}{a\sqrt{3}} \right) = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r a} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$

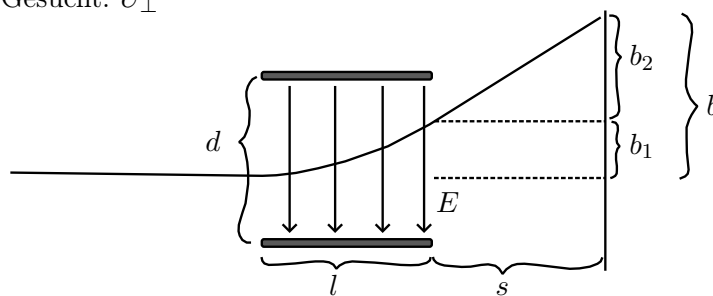
## A6: Braunsche Röhre

a)  $W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_e v_0^2 = eU_0$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m_e}} = 2,65 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b)  $v_{\parallel} = \text{const.} = v_0$  ,  $t_a = \frac{l}{v_{\parallel}}$  ,  $E = \frac{U_{\perp}}{d}$

Gesucht:  $U_{\perp}$



- 
- Ablenkungsbeschleunigung:  $F = eE = m_e a_{\perp} \Rightarrow a_{\perp} = \frac{eE}{m_e} = \frac{eU_{\perp}}{m_e d}$

- Weg durch geladene Platten: Parabel (vgl. schiefer Wurf)

$$\text{Austrittshöhe: } b_1 = \frac{1}{2} a_{\perp} t_a^2 = \frac{1}{2} a_{\perp} \frac{l^2}{v_{\perp}^2}$$

- Weg zwischen Platten und Schirm: unbeschleunigt

$$b_2 = v_{\perp} t_s = s \cdot \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} = s \cdot \frac{a_{\perp} \cdot t_a}{v_{\parallel}} = s a_{\perp} \frac{l}{v_{\parallel}^2}$$

- $b = b_1 + b_2 = \frac{a_{\perp} l}{v_{\parallel}^2} \left( \frac{1}{2} l + s \right) = \frac{eU_{\perp}}{m_e \cdot d} \cdot \underbrace{\frac{m_e}{2eU_0}}_{\text{siehe a)}} l \left( \frac{1}{2} l + s \right) = \frac{1}{2} \frac{l}{d} \frac{U_{\perp}}{U_0} \left( \frac{1}{2} l + s \right)$

- Aufgelöst:  $U_{\perp} = \frac{2bd}{l(\frac{1}{2}l+s)}$

- c) Es ändert sich nichts, da sich die Platten- und Anodenspannung gegenseitig ausgleichen.

$$b \sim \frac{a_{\perp}}{v_{\parallel}^2} \sim \frac{U_{\perp}}{U_0}$$

---

## Übungsblatt 2

### Was ist eigentlich der Satz von Gauß?

Elektr. Fluss  $\Phi$  gibt an, wie viel Elektrizität durch eine Fläche strömt.

Mit anderen Worten: „Wie viele Feldlinien gehen durch ein Flächenelement?“

E-Feld muss nicht konstant über ganze Fläche sein, daher differentielle Betrachtung:

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{A} = E \cdot \cos(\varphi) dA$$

Bedeutung des Flusses:

$$\Phi = 0$$

$$\Phi \neq 0$$

Grafik 1 „So viel, wie reingeht, geht wieder raus“

Grafik 2 „Es geht mehr / weniger raus“

↳ Es muss eine elektr. Quelle / Senke geben

Wir integrieren ( $\vec{E}$  sei das Feld einer Punktladung):

$$\begin{aligned}\Phi &= \oint \vec{E} d\vec{A} = \oint E \cdot \cos(\varphi) dA \\ &= \oint \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} dA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \oint dA \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 \\ &= \frac{q}{\epsilon_0}\end{aligned}$$

hier:  $\cos(\varphi) = 1$ , da  $\vec{E}$  und  $\vec{A}$  die gleiche Richtung haben

### A1: Spannung am Draht

$$\begin{aligned}r_1 &= 0,01 \text{ m} & \epsilon_0 &= 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \\ r_2 &= 0,05 \text{ m} & \lambda &= 2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{C}}{\text{m}}\end{aligned}$$

Draht  $\hat{=}$  Zylinder (bzw. Zylindermantel: keine Feldlinien durch Seitenflächen)

$$\text{Satz von Gauß: } \oint \vec{E} d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\text{Fläche eines Zylindermantels: } A_{\text{Mantel}} = 2\pi r \cdot l$$

$$\Rightarrow \oint \vec{E} d\vec{A} = \oint E(r) d\vec{A} = E(r) 2\pi r l \stackrel{\text{Gauß}}{=} \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\lambda l}{\epsilon_0}$$

$$\text{Aufgelöst nach } E: E(r) = \frac{\lambda l}{2\pi r l \epsilon_0} = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} \frac{1}{r}$$

Für die Spannung benötigen wir zunächst das Potential:

$$\varphi(r) = - \int_{r_0}^r E(r') dr' = - \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} \int_{r_0}^r \frac{1}{r'} dr' = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right)$$

---


$$U = \varphi(r_1) - \varphi(r_2) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left( \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) - \ln\left(\frac{r_0}{r_2}\right) \right)$$

$$= \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r_0/r_1}{r_0/r_2}\right) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = 578,6 \text{ V}$$

## A2: Feld der Isolatkugel

Warum muss die Kugel nichtleitend sein?

↳ Ladungen auch im Innern und nicht nur auf der Oberfläche.

Satz von Gauß:  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint_{\text{Kugel}} E(r) dA$

$$= E(r) 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Kugelsymmetrie:  $\vec{E} = E(r)\vec{e}_r$

$$\Rightarrow E(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \int \rho dV$$

a)  $E_a(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \rho \int_0^R 4\pi r'^2 dr'$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \rho \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$= \frac{\rho}{3\epsilon_0} \frac{R^3}{r}$$

$$\varphi_a(r) = - \int_{\infty}^r E_a(r') dr' \quad (\text{Potential soll im Unendlichen 0 sein})$$

$$= \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0} \int_{\infty}^r \frac{1}{r'^2} dr' = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0} \left[ -\frac{1}{r'} \right]_{\infty}^r$$

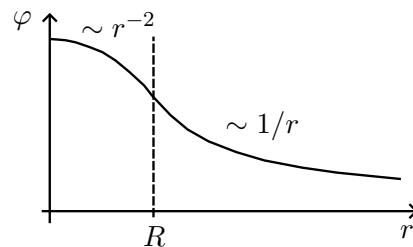
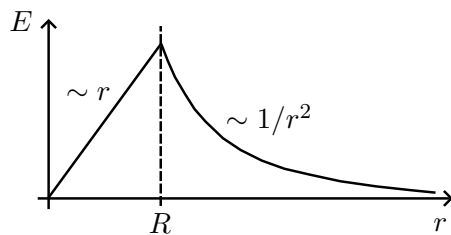
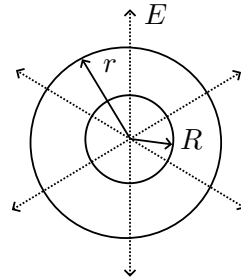
$$= \frac{\rho}{3\epsilon_0} \frac{R^3}{r}$$

Kugel wird wie Punktladung in „großer“ Kugel betrachtet.

b)  $E_i(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \rho \int_0^r 4\pi r'^2 dr' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \rho \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{\rho}{3\epsilon_0} r$

$$\varphi_i(r) = \varphi_a(R) - \int_R^r E(r') dr' = \frac{\rho}{3\epsilon_0} \cdot \frac{R^3}{R} - \left[ \frac{\rho}{6\epsilon_0} r'^2 \right]_R^r$$

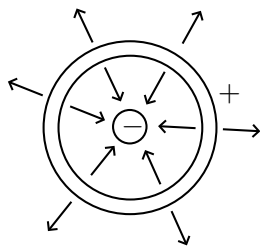
$$= \frac{\rho}{6\epsilon_0} (2R^2 - r^2 + R^2) = \frac{\rho}{6\epsilon_0} (3R^2 - r^2)$$





### A3: Hohlkugel

- a) Kugelsymmetrie:  $\vec{E} = E(r) \cdot \vec{e}_r$

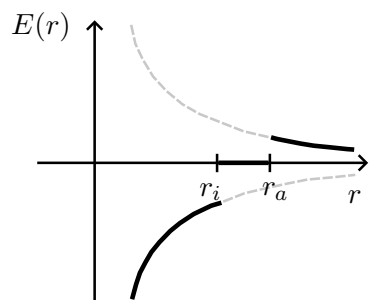


b)  $E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$

Innen:  $Q = -q \quad \rightarrow \quad E(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$

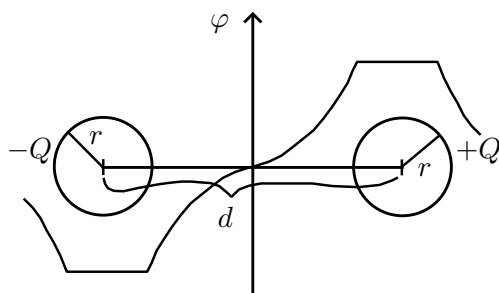
Metall:  $E = 0$  (Influenzladungen schirmen Felder ab)

Außen:  $Q = 2q - q = q \quad \rightarrow \quad E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$



### A4: Zwei geladene Kugeln

- a)



Außenfeld  $\hat{=}$  Punktladung in Kugelmitte

---

**b)** Superpositionsprinzip:

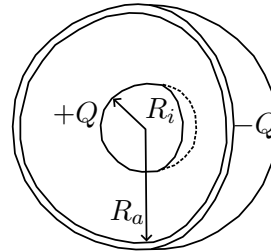
$$\varphi_{\Sigma}(x) = \varphi_{Q-} + \varphi_{Q+} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Q}{|x-\frac{d}{2}|} - \frac{Q}{|x+\frac{d}{2}|} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{\frac{d}{2}-x} - \frac{1}{\frac{d}{2}+x} \right)$$

Hier weitermachen!

## Übungsblatt 3

### A1: Kugelkondensator

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad U &= \int_{r_i}^{r_a} E \, dr = \int_{r_i}^{r_a} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \, dr \\
 &= \left[ -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \right]_{r_i}^{r_a} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_a} \right) \\
 &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r_a - r_i}{r_a \cdot r_i}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{b)} \quad C &= \frac{Q}{U} = \frac{Q \cdot 4\pi\epsilon_0}{Q \cdot \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_a} \right)} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_a}} \\
 &= \frac{4\pi\epsilon_0 r_a r_i}{r_a - r_i}
 \end{aligned}$$

c) Wir betrachten nun einen Zylinder.

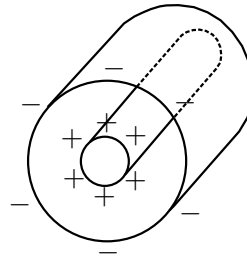
$$\text{Oberfläche: } A = 2\pi r l$$

$$\text{Gauß: } E \cdot 2\pi r l = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\Rightarrow E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \frac{1}{r}$$

$$U = \int_{r_i}^{r_a} E \, dr = \int_{r_i}^{r_a} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \frac{1}{r} \, dr = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2\pi\epsilon_0 l}$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}$$



### A2: Plattenkondensator

$$\text{a)} \quad \text{Gauß: } Q = \epsilon_0 E A = \epsilon_0 \frac{U}{d} A$$

$$\hookrightarrow C_0 = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{d} = 26,6 \text{ pF}$$

$$Q_0 = C_0 \cdot U_0 = \frac{\epsilon_0 A U_0}{d} = 3,19 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

$$W_0 = \frac{1}{2} C_0 U_0^2 = 1,91 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

b) Spannungsquelle getrennt:  $Q$  kann nicht abfließen  $\rightarrow Q = Q_0$

$$\text{Spannung: } U = \frac{Q d}{\epsilon_0 A} \xrightarrow{d=2d_0} U = 2 U_0$$

$$\text{E-Feld: } E = \frac{U}{d} = \frac{2 U_0}{2 d_0} = E_0$$

$$\text{Verschiebungsdichte: } D = \frac{Q}{A} = \epsilon_0 E_0 = D_0$$

$$\text{Kapazität: } C = \frac{\epsilon_0 A}{d} = \frac{\epsilon_0 A}{2 d_0} = \frac{1}{2} C_0$$

$$\text{Energie: } W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} C_0 \cdot (2 U_0)^2 = C_0 U_0^2$$

---

c)  $W(\text{vorher}) = \frac{1}{2} C_0 U_0^2$

$W(\text{nachher}) = C_0 U_0^2$

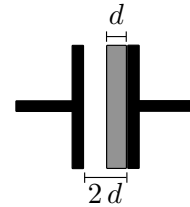
Energieerhaltungssatz:

$$\Delta W = C_0 U_0^2 - \frac{1}{2} C_0 U_0^2 = \frac{1}{2} C_0 U_0^2 = 1,91 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

Metallplatte: feldfrei (kein Dielektrikum)

↳ „halbiert“ den Kondensator:

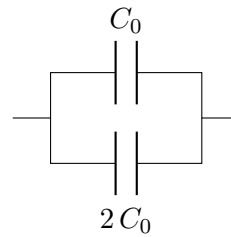
$$U = E_0 \cdot (2 d_0 - d_0) = U_0 = 12 \text{ V}$$



d) Parallelschaltung:

$$C_{\text{ges}} = C_0 + 2 C_0 = 3 C_0$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{3 C_0} = \frac{1}{3} U_0 = 4 \text{ V}$$



e) Spannung wird nicht abgeklemmt → U bleibt gleich

$C = \frac{1}{2} C_0$  (nicht von Spannung abhängig)

$$Q = C \cdot U = \frac{1}{2} C_0 \cdot U_0 = \frac{1}{2} Q_0$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{U_0}{2 d_0} = \frac{1}{2} E_0$$

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} C_0 \cdot U_0^2 = \frac{1}{4} C_0 U_0^2$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} C_0 U_0^2 - \frac{1}{4} C_0 U_0^2 = \frac{1}{4} C_0 U_0^2$$

**A3: Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren**

**A4: Halbes Dielektrikum**

## Übungsblatt 4

### A1: Gesamtwiderstand

$R$  jeweils  $3\Omega$

$R_{\text{ges}}?$

- $R_a, R_b, R_c$ : Reihe

$$R_{abc} = R_a + R_b + R_c = 3R = 9\Omega$$

- $R_{abc}, R_d$ : Parallel

$$\frac{1}{R_{abcd}} = \frac{1}{R_{abc}} + \frac{1}{R_d} = \frac{R_d + R_{abc}}{R_{abc} \cdot R_d}$$

$$\hookrightarrow R_{abcd} = \frac{R_{abc} \cdot R_d}{R_d + R_{abc}} = \frac{9\Omega \cdot 3\Omega}{3\Omega + 9\Omega} = \frac{9}{4}\Omega$$

- $R_{abcd}, R_e, R_f$ : Reihe

$$R_{abcde} = R_{abcd} + R_e + R_f = \frac{9}{4}\Omega + 3\Omega + 3\Omega = \frac{33}{4}\Omega$$

- $R_{abcde}, R_g$ : Parallel

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_{abcde}} + \frac{1}{R_g} = \frac{R_g + R_{abcde}}{R_{abcde} \cdot R_g}$$

$$\hookrightarrow R_{\text{ges}} = \frac{R_{abcde} \cdot R_g}{R_g + R_{abcde}} = \frac{\frac{33}{4}\Omega \cdot 3\Omega}{3\Omega + \frac{33}{4}\Omega} = \frac{11}{5}\Omega = 2,2\Omega$$

### A2: Würfel aus Widerständen

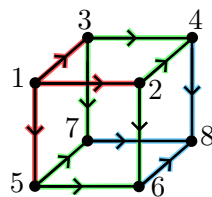
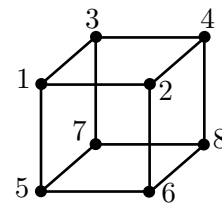
Alle Kanten des Würfels bestehen aus gleichartigen Widerständen.

Gesucht: Gesamtwiderstand zwischen den Punkten

① und ⑧.

Wie kann der Strom fließen?

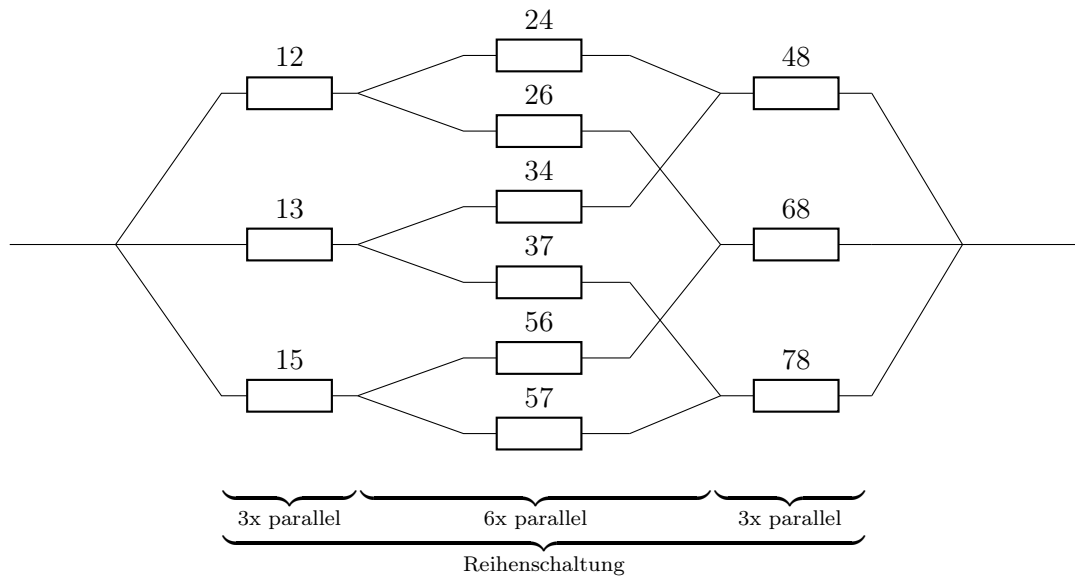
- ↳ Drei Schritte – jeweils einer in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung –, sodass pro Schritt mehrere Wege möglich sind.



1. Schritt: 3 Möglichkeiten

2. Schritt: 6 Möglichkeiten

3. Schritt: 3 Möglichkeiten



$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m} \cdot \frac{0,1 \text{ m}}{\pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$\text{Erste Parallelschaltung: } \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{3}{R} \Rightarrow R_1 = \frac{1}{3}R$$

$$\text{Analog dazu: } R_2 = \frac{1}{6}R, \quad R_3 = \frac{1}{3}R$$

$$\text{Reihenschaltung: } R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{5}{6}R = 1,70 \text{ m}\Omega$$

### A3: Lampe und Tauchsieder

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Welchen Widerstand haben die beiden Geräte?

$$\text{Lampe: } R_L = \frac{U_0^2}{P_L} = \frac{(115 \text{ V})^2}{60 \text{ W}} = 220,4 \Omega$$

$$\text{Tauchsieder: } R_T = \frac{U_0^2}{P_T} = \frac{(115 \text{ V})^2}{500 \text{ W}} = 26,45 \Omega$$

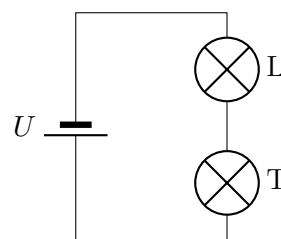
a) L und T in Reihe:  $R_{LT} = R_L + R_T = 246,9 \Omega$

Reihe bedeutet:  $I$  bei beiden gleich.

$$I = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{230 \text{ V}}{246,85 \Omega} = 0,932 \text{ A}$$

$$U_L = R_L \cdot I = 205,4 \text{ V}$$

$$P_L = U_L \cdot I = 191,4 \text{ W} \gg 60 \text{ W} \text{ (Kawumm!)}$$



$$U_T = R_T \cdot I = 24,7 \text{ V}$$

$$P_T = U_T \cdot I = 23,0 \text{ W} \ll 500 \text{ W} \text{ (Nichts passiert!)}$$

Fazit: Lampe und Tauchsieder lassen sich nicht in Reihe betreiben.  
Die Lampe brennt durch, der Tauchsieder wird nicht warm.

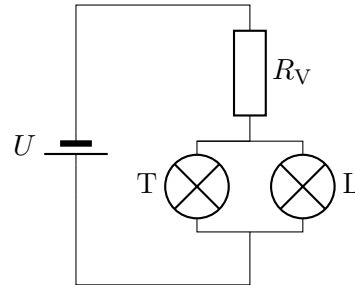
b) L und T parallel:

$$R_{LT} = \frac{R_L \cdot R_T}{R_L + R_T} = 23,62 \Omega$$

An  $R_V$  sollen 115 V abfallen.

$$I = \frac{\overbrace{U - U_0}^{U_0}}{R_V} = \frac{U_0}{R_{LT}}$$

$$\Rightarrow R_V = \frac{U - U_0}{U_0} R_{LT} = \frac{U_0}{U_0} R_{LT} = 23,62 \Omega$$



c)  $P_V = U_0 \cdot I = P_{LT}$

$$= U_0(I_L + I_T)$$

$$= P_L + P_T$$

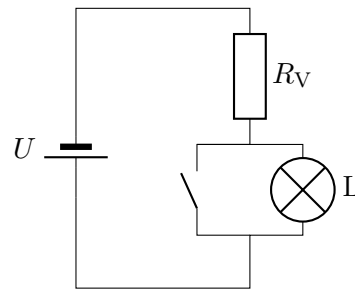
$$= 60 \text{ W} + 500 \text{ W} = 560 \text{ W}$$

d) Reihenschaltung:

$$I = \frac{U}{R_V + R_L} = \frac{230 \text{ V}}{244 \Omega} = 0,94 \text{ A}$$

$$P_L = U_L \cdot I = R_L \cdot I^2 = 194,8 \text{ W} \gg 60 \text{ W}$$

$\Rightarrow$  Birne brennt wieder durch



**A4: Autobatterie I**

**A5: Autobatterie II**

**A6: Strommessgerät mit Widerstand**

---

## Übungsblatt 5

### A1: Wheatstone-Brücke

Parallelschaltung:  $\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_X}$  (1)

Bedingung: Brückenstrom = 0

Voraussetzung:  $U_{\text{Brücke}} = 0$

$$\Rightarrow \frac{U_3}{U_2} = \frac{U_{\ell-y}}{U_y} \Rightarrow \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_{\ell}-R_y}{R_y} \quad | : R_3$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{R_{\ell}-R_y}{R_3 \cdot R_y} \stackrel{(1)}{=} \frac{1}{R_1} + R_X$$

Aufgelöst nach  $R_X$ :

$$\frac{1}{R_X} = \frac{R_{\ell}-R_y}{R_3 \cdot R_y} - \frac{1}{R_1} \quad \begin{array}{l} R_1 = R_3 = R_{\ell} = 1 \text{ k}\Omega \\ R_y = 0,3 \text{ k}\Omega \end{array}$$

$$R_X = \left( \frac{R_{\ell}-R_y}{R_3 \cdot R_y} - \frac{1}{R_1} \right)^{-1} = 750 \Omega$$

### A2: Elektronen im Autokabel

### A3: Kreisbahn beim Wasserstoffatom

### A4: Elektronengeschwindigkeit im Feld

### A5: Ionen im Magnetfeld

### A6: Magnetfeld zwischen Drahtlingen



## Übungsblatt 6

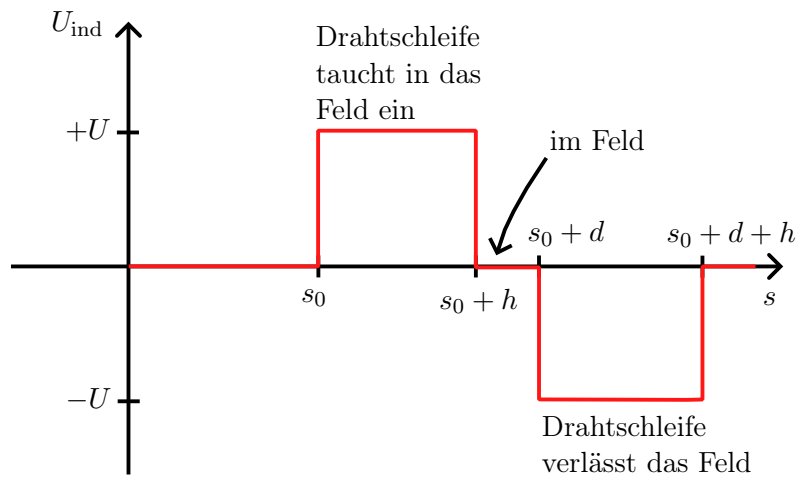
A1: Drehspulmessgerät

A2: Hallsonde

A3: Induktionsspannung zwischen Schienen

A4: Drahtschleife durchläuft Feld

a)



b)  $U_{\text{ind}}$  bei Änderung von  $A$ :

$$\begin{aligned} |U_{\text{ind}}| &= N \cdot \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} \\ &= N \cdot B \cdot l \cdot v \\ &= 1 \cdot 1,5 \text{ T} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ &= 7,5 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } A &= l \cdot b, \\ N &= 1 \text{ (Anzahl der Windungen)}, \\ v &= \frac{db}{dt} \end{aligned}$$

---

c)  $I = \frac{U}{R} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{3 \cdot 10^{-3} \Omega} = 2,5 \text{ A}$

Kraft auf stromdurchflossenen Leiter:  $F = I \cdot B \cdot s$  (Merkspruch: „Fibs“)

bzw. hier:  $F = I \cdot B \cdot l = 2,5 \text{ A} \cdot 1,5 \text{ T} \cdot 0,05 \text{ m} = 187,5 \text{ mN}$

d) Maximale Geschwindigkeit wird erreicht, wenn  $F_G = F_L$ :

$$m \cdot g = I \cdot l \cdot B$$

$$= \frac{U}{R} \cdot l \cdot B \quad | \text{ mit } U = B \cdot l \cdot v \text{ (siehe Teil b)) folgt:}$$

$$= \frac{B \cdot l \cdot v}{R} \cdot l \cdot B$$

$$m \cdot g = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v}{R}$$

Aufgelöst nach v:

$$v = \frac{m \cdot g \cdot U}{B^2 \cdot l^2} = \frac{0,002 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \Omega}{(1,5 \text{ T})^2 \cdot (0,05 \text{ m})^2}$$

$$= 1,05 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,05 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

## A5: Drehende Spule

---

## Übungsblatt 7

### A1: Induktion im Stromkabel

- a) Satz von Stokes: (Kreis mit Abstand  $r$  um das Kabel)

$$I = \oint \vec{H} d\vec{s} = H \cdot 2\pi r \quad \Rightarrow \quad H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$\text{Magnetische Flussdichte: } B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 50 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,5 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

- b) Induktionsgesetz:

$$U_{\text{ind}} = \frac{d}{dt} (\vec{A} \times \vec{B}) = \frac{d}{dt} (A \cdot B \cdot \cos(\alpha))$$

$$U_{\text{ind}} \text{ maximal} \Leftrightarrow \alpha = 0^\circ, \text{ d.h. } A \parallel B$$

Feldlinien senkrecht zum Strom ( $B \perp I$ ), also ( $A \perp I$ ).

- c) 
$$\begin{aligned} U_{\text{ind}} &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \\ &= -N \cdot A \cdot \frac{d}{dt} (B_0 \cdot \sin(\omega t)) \\ &= -N \cdot A \cdot \omega \cdot B_0 \cdot \cos(\omega t) \\ &= 1,88 \text{ mV} \end{aligned}$$

### A2: Spule in Spule

- a) Magnetische Erregung:

$$H = I \cdot \frac{N}{l} = \frac{10 \text{ A} \cdot 2000}{0,2 \text{ m}} = 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- b)  $U_{\text{ind}} = -\frac{d}{dt} \Phi$  | integrieren

$$\begin{aligned} \int U_{\text{ind}} dt &= -\Delta \Phi = -\Delta B \cdot A \\ &= -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \cdot A \\ &= -4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ &= -1,26 \cdot 10^{-4} \text{ Vs} \end{aligned}$$

Beim Ausschalten mit umgekehrtem Vorzeichen:

$$\int U_{\text{ind}} dt = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ Vs}$$

- c) 
$$\begin{aligned} \int U_{\text{ind}} dt &= -(B_{\text{Mat}} - B_{\text{Luft}}) A \\ &= -(\mu_r - 1) H \cdot A \cdot \mu_0 \end{aligned}$$

Aufgelöst nach  $\mu_r$ :

$$-\frac{\int U_{\text{ind}} dt}{\mu_0 H \cdot A} = \mu_r - 1 \quad | +1$$

$$\mu_r = 1 - \frac{\int U_{\text{ind}} dt}{\mu_0 H \cdot A} \quad | \text{ Hier die Werte aus Teil b) einsetzen}$$

$$= 1 - \frac{1 \cdot 10^{-8} \text{ Vs}}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 0,99992 < 1. \Rightarrow \mu_r < 1 \text{ bedeutet diamagnetisch.}$$

---

### A3: Zylindrische Spule

a)  $H = \frac{N \cdot I}{l} \Rightarrow l = \frac{N \cdot I}{H} = \frac{5000 \cdot 60 \text{ A}}{6 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}} = 0,5 \text{ m}$

Energie = Energiedichte · Volumen

$$W = w \cdot V$$

$$= \frac{1}{2} \underbrace{\mu_0 \mu_r}_{w} H^2 \cdot V = \frac{1}{2} H \cdot B \cdot V$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \left(6,0 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 1 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$= 226,2 \text{ J}$$

b)

c)

### A4: Transformator

a)

b)

---

## Übungsblatt 8

A1: Lichtwelle im Medium

A2: Lichtkegel in Plexiglas

A3: Turm wirft Schatten

A4: Angler und Taucher

A5: Scheinwerfer im Wasser

---

## Übungsblatt 9

A1: Wölbspiegel

A2: Sammellinse

A3: Abbildung auf Schirm

A4: Krümmungsradius der Linse

A5: Linse beim Fotoapparat

---

# Übungsblatt 10

## Allgemeines

Wichtige Begriffe zur Interferenz:

Überlagerung von zwei oder mehr kohärenten Wellenzügen führt zu

- **konstruktiver Interferenz** = Verstärkung, wenn Phasendifferenz geradzahliges Vielfaches von  $\pi$  ist
- **destruktiver Interferenz** = Auslöschung, wenn Phasendifferenz ungeradzahliges Vielfaches von  $\pi$  ist

**Kohärenz:** feste Phasenbeziehung zwischen Wellenzügen; nahezu monochromatisches (frequenzgleiches) Licht

## A1: Vergütungsschicht

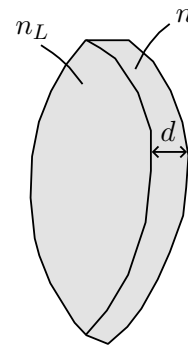
- a) Gangunterschied  $\Delta s \rightarrow$  wie weit sind die Wellen gegeneinander verschoben?

Übergang von einem optisch dünnerem zum optisch dichterem Medium ( $n \rightarrow n_L$ ):

$$\Delta s = 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)}$$

Senkrechter Einfall:  $\alpha = 0^\circ$  ;  $\sin(0^\circ) = 0$

$$\Delta s = 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2} = 2 \cdot d \cdot n$$



- b) Destruktive Interferenz, wenn  $\Delta s = 2nd \stackrel{!}{=} \frac{\lambda_g}{2}$

$$\hookrightarrow d = \frac{\lambda_g}{4n} = \frac{550 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{4 \cdot 1,2} = 114,6 \text{ nm}$$

- c) Formel aus Teil b) durch  $\lambda_r$  teilen:

$$\frac{\Delta s}{\lambda_r} = \frac{\lambda_g}{2 \cdot \lambda_r} = \frac{11}{28} \approx 0,393$$

## A2: Interferenz-Draht

## A3: Doppelspaltexperiment

## A4: Beugungsgitter

## A5: Polarisiertes Licht

---

## Übungsblatt 11

### A1: Rakete

a) Relativistische Gleichung:  $m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

$\Rightarrow$  Daraus folgt das Massenverhältnis:  $\frac{m(v)}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,99)^2}} \approx 7,09$

b) Zeitdilatation („bewegte Uhren gehen langsamer“)

Beobachter misst (analog zu a)):

$$\Delta t_{\text{Beo}} = \frac{\Delta t_{\text{Rakete}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 7,09 \text{ Jahre}$$

c) Längenkontraktion:

Längen parallel zur Bewegungsrichtung erscheinen aus Sicht des Beobachters verkürzt. An den anderen Längen ändert sich nichts.

$$\Delta x_{\text{Beo}} = \Delta x_{\text{Rakete}} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{\Delta x_{\text{Rakete}}}{7,09}$$

$$\Delta y_{\text{Beo}} = \Delta y_{\text{Rakete}}$$

$$\Delta z_{\text{Beo}} = \Delta z_{\text{Rakete}}$$

d) Dichte:  $\rho = \frac{m}{V}$ .

Es zählen die Masse der bewegten Rakete (siehe a)) sowie die Länge, die der Beobachter misst (siehe c)), d.h.  $m$  und  $x_{\text{Beo}}$ .

$$\rho = \frac{m}{V_{\text{Beo}}} = \frac{m}{x_{\text{Beo}} \cdot y \cdot z} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \frac{1}{x_{\text{Beo}} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot y \cdot z} = \frac{\rho_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 50,25 \rho_0$$

### A2: Relativistisches Elektron

### A3: Protonenbeschleuniger



---

## Übungsblatt 12

### A1: Photoelektronen

a)  $E_{\text{Photon}} = h \cdot \nu = \underbrace{e \cdot U}_{\substack{\text{elektr.} \\ \text{Energie}}} + \Phi$

$\Phi$ : Auslöseenergie; nur vom Material und nicht von der Frequenz abhängig, also in beiden Fällen gleich

$$\Phi = h \cdot \nu - e \cdot U$$

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \Rightarrow \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\hookrightarrow h \frac{c}{\lambda_1} - eU_1 = h \frac{c}{\lambda_2} - eU_2 \quad | : e$$

$$\frac{h}{e} \frac{c}{\lambda_1} - U_1 = \frac{h}{e} \frac{c}{\lambda_2} - U_2$$

$$\frac{h}{e} \left( \frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2} \right) = U_1 - U_2 \quad | \text{ aufgelöst nach } h/e:$$

$$\frac{h}{e} = \frac{U_1 - U_2}{c \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

b)  $\Phi = h\nu_i - eU = h \frac{c}{\lambda_i} - eU \quad (i \in 1, 2)$

c) Energie der Photonen  $\hat{=}$  Auslöseenergie

$$\Phi = h \frac{c}{\lambda_{\max}} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\max} = \frac{h \cdot c}{\Phi}$$

### A2: Paarbildung

a)  $E_{\text{Photon}} = E_{e^+} + E_{e^-}$

$$\hookrightarrow h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = m_e \cdot c^2 + m_e \cdot c^2 = 2 \cdot m_e \cdot c^2$$

Aufgelöst nach  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{2 \cdot m_e \cdot c^2} = \frac{h}{2 \cdot m_e \cdot c} \approx 1,21 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 1,21 \text{ pm}$$

mit  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

b)  $2m_e c^2 = e \cdot U$

$$\hookrightarrow U = \frac{2m_e \cdot c^2}{e} = 1,024 \cdot 10^6 \text{ V}$$

$$= 1024 \text{ kV bzw. } 1,024 \text{ MV}$$

- 
- c) De-Broglie-Wellenlänge:  $\lambda = \frac{h}{p}$

Wo bekommen wir jetzt den Impuls her?  $\Rightarrow$  Energie-Impuls-Beziehung:

$$E^2 - p^2 c^2 = \underbrace{m^2 \cdot c^4}_{E_0^2}; \quad \text{hier: } E^2 = \underbrace{2 \cdot E_0}_{\substack{\text{durch} \\ \text{Beschleun.}, \\ \text{siehe b)}}} + E_0 = 3E_0 \quad E_0: \text{ Ruheenergie}$$

$$p^2 = \frac{E^2 - E_0^2}{c^2} = \frac{(3 \cdot E_0)^2 - E_0^2}{c^2} = \frac{8E_0^2}{c^2} = \frac{8m_0^2 c^4}{c^2} = 8m_0^2 c^2$$

$$\hookrightarrow p = \sqrt{p^2} = \sqrt{8} m_0 c$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{8} m_0 c} = 8,58 \cdot 10^{-13} \text{ m}$$

### A3: Quantenmechanische Teilchen

- a) Anders als bei einer klassischen Betrachtung müssen wir den Impuls nur einmal ausrechnen, da die de-Broglie-Wellenlänge bei allen dreien gleich ist.

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{0,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,315 \cdot 10^{-24} \text{ kg m/s}$$

- b) Nichtrelativistisch:  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$

$$\text{Quantenmechanisch: } E_{\text{kin}} = h \cdot \nu$$

$$\text{mit } p = m \cdot v \Rightarrow v = \frac{p}{m}$$

$$\text{und } c = \lambda \cdot \nu \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\hookrightarrow E_{\text{kin}, e^-} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m_e} = 6,03 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

$$E_{\text{kin}, p^+} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m_p} = 3,29 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$E_{\text{kin}, \gamma} = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 9,94 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

- c) Geschwindigkeit der  $e^-$ : viel langsamer als Lichtgeschwindigkeit.  
Bewegungsenergie daher kleiner als Ruheenergie:

$$E_{\text{kin}} \ll E_0 = m c^2$$

### A4: Energieunschärfe

$$\Delta E \approx \frac{h}{\Delta t} = 6,63 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

### A5: Bohrsches Atommodell

### A6: Photonische Anregung

### A7: Alpha-Zerfall