1. Optische Abbildung mit Linsen

konvex) (Sammellinse):

hinter der Linse in Brennpunkt F

Brechkraft $D = \frac{1}{f}$ $[D] = dpt = \frac{1}{m}$ Dioptrie $\beta = -1$

Parallelstrahl, Zentralstrahl, Brennstrahl

Spezieller Fall: **Lupe**

konkav][(Zerstreuungslinse):

Abbildungsmaßstab / Lateralvergrößerung $\beta = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$ $\frac{\text{Bildgröße}}{\text{Gegenstandsgröße}}$

$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$

↳ nur bei scharfem Bild!

Bildweite $b = \frac{g \cdot f}{g - f}$

zwei dünne Linsen:

$$\frac{1}{f_{ges}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{l}{f_1 f_2} \rightarrow f_{ges} = \frac{f_1 f_2}{f_2 + f_1 - l}$$

$$D_{ges} = D_1 + D_2 - l \cdot D_1 \cdot D_2$$

Abbildungsfehler:

- chromatische Abberation (Farbfehler)
- sphärische Abberation (Öffnungsfehler)
- Astigmatismus
- Koma
- Verzeichnung
- Bildfeldwölbung

Bestimmung der **Brennweite** f einer Sammellinse

Abschätzen durch Schirm / Spiegel aufstellen $f = \frac{d^2 - e^2}{4d}$

Besselverfahren $d > 4f$ $d = b_i + g_i$

2. Interferenz am Gitter, Beugung am Spalt

Elektrisches Feld $\vec{E}$ und magnetisches Feld $\vec{B}$ schwingen phasengleich und senkrecht zueinander

↳ elektromagnetische Welle = Transversalwelle

↳ momentane Ausrichtung der Felder = Polarisation

Radiowellen bis hochenergetische Gammastrahlung

Ausbreitungsgeschw. im Vakuum: $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

$E(x,t) = E \cdot \sin(kx - \omega t)$

mit Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

und Kreisfrequenz $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

$c = \lambda f$

Superpositionsprinzip

Huygens'sches Prinzip: Kugel- / Kreiswelle

Beugung von Licht am Doppelspalt: $d_2 - d_1 = \Delta = d \cdot \sin(\theta)$

Gangunterschied $\times \lambda \Rightarrow$ konstruktiv

Gangunterschied $\frac{\times \lambda}{2} \Rightarrow$ destruktiv

$n \cdot \lambda = d \cdot \sin(\theta)$ MAXIMA

$\left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda = d \sin(\theta)$ MINIMA

Beugung am Einzelspalt:

$d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda$ $n \neq 0$ MAXIMA $\quad d \cdot \sin(\theta) = 0$

$\frac{d}{2} \cdot \sin(\theta) = \frac{\lambda}{2} \rightarrow d \sin(\theta) = \lambda$ MINIMA $\quad d \cdot \sin(\theta) = \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda$

$u = \pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta)$

Beugung am Gitter

$g \sin(\theta) = n \cdot \lambda$

$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin p\delta}{\sin \delta}\right)^2$ mit $\delta = \pi \frac{g}{\lambda} \cdot \sin(\theta)$

3. optische Geräte: Mikroskop und Fernrohr

- kleinster Abstand für scharfe Sicht ≙ deutliche Sehweite, Bezugssehweite, Normalsehweite ~ 25cm
- in der Seh- / Netzhautgrube: nur Zapfen

LUPE:

$$M = \frac{\beta_{mit}}{\beta_{ohne}} = \frac{\tan\varphi_{mit}}{\tan\varphi_{ohne}}$$

Winkelvergrößerung der Lupe:

$$M_{Lupe} = \frac{\tan\varphi_{mit}}{\tan\varphi_{ohne}} = \frac{B \cdot s}{b \cdot G} = \frac{Bs}{Gb}$$

$$\tan\varphi_{ohne} = \frac{G}{s}$$

$$\tan\varphi_{mit} = \frac{B}{b}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

$$\beta = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$$

$$M_{Lupe} = \frac{s}{g} = s \cdot \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{b}\right)$$

$$M_{Lupe} \approx \frac{s}{f}$$

MIKROSKOP: zwei Sammellinsen: Objektiv + Okular
↳ beide im Tubus

je größer das virtuelle Bild, desto kleiner Auflösung

numerische Apertur NA: $n \cdot \sin\beta$

TEM (Transmissions-Elektronenmikroskop): noch feinere Objektdetails
nicht für lebende Objekte

FERNROHR: Objektivlinse + Okular

↳ Kepler'sches / astronomisches: zwei Sammellinsen

↳ Galilei'sches / terrestrisches: Okular = Zerstreuungslinse

$$\tan\varepsilon_{ohne} = \frac{B}{f_{Obj.}}$$

$$\tan\varepsilon_{mit} = \frac{B}{f_{Okn}}$$

$$M_{Fernrohr} = \frac{\tan\varepsilon_{mit}}{\tan\varepsilon_{ohne}} = \frac{f_{Obj}}{f_{Okn}}$$

Auflösungsvermögen wird durch Winkelauflösung θ_{min} angegeben

$$\theta_{min} = \frac{1{,}22\,\lambda}{D}$$

4. Saitenschwingungen

Ausbreitungsgeschw. hängt von der KOPPLUNGSSTÄRKE der schwingenden Systeme ab

↳ Schall breitet sich in Festkörpern schneller aus als in Gasen

$$y(x,t) = y_0 \sin(\omega t - kx) = y_0 \sin\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Bei reflektierter Welle: nur Richtung ändert sich! → festes / loses Ende!

Reflexion am festen Ende: Phasensprung von π / 180° + invertiert!

→ STEHENDE WELLE 2.B. Klavier

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

nur ein festes Ende 2.B. Blasinstrument

$$L = (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

Eigenschwingung ableiten:

$$f_n = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2L} \cdot n$$

$$f_n = f_1 \cdot n \qquad f_1 = \frac{c}{2L}$$

Massenbelegung $\mu = \frac{m}{L}$

$$c = \sqrt{\frac{F_{sp}}{\mu}}$$

5. Resonanz

harm. Schwingung: periodisch, sinus / cosinus,
rücktreibende Kräfte wirken

1. Freie ungedämpfte Schwingung:

- keine Reibungskräfte, keine Federmasse
- $F = m\ddot{x} = -kx$ $\quad k \hat{=}$ Federkonstante
- $x(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Wendepunkt: pot. Energie maximal
  kin. Energie = 0

  Mitte: pot. Energie = 0
  kin. Energie max

2. Freie gedämpfte Schwingung

- mit Reibung → Energie wird entzogen → Amplitude wird immer kleiner
- $F = m\ddot{x} = -R\dot{x} - kx$ → Reibungskonstante

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad \| \quad \beta = \frac{R}{2m}$$

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

- Schwingfall: $\beta^2 < \omega_0^2$ → Amplitude nimmt exponentiell ab
- Aperiodischer Grenzfall: $\beta^2 = \omega_0^2$ → Federpendel kehrt schnellstmöglich in Ruhelage zurück
- Kriechfall: $\beta^2 > \omega_0^2$ → wie aperiodischer Grenzfall, aber langsamer
  keine Differenzialgleichung

3. Erzwungene Schwingung, Resonanz

- äußere zeitlich periodische Kraft
- Resonanzkatastrophe: Schwingungsamplitude A_0 beliebig groß

6. Ohm'sches Gesetz

Spannung: Druck / Kraft auf freie Elektronen, Ursache des elektr. Stroms

Stromstärke: Menge des in einer best. Zeit durch einen Leiter fließenden Stromes

Widerstand: welche Spannung U ist erforderlich, um eine bestimmte Stromstärke I fließen zu lassen

---

Widerstand $R = \frac{U}{I}$ $\quad [R] = \frac{V}{A} = \Omega$

Widerstand hängt ab von: Messspannung (Stärke des Messstroms), Material, Materialtemperatur

Wenn Temperatur konstant → Stromstärke prop. zu Spannungsabfall

zylindrisch geformter, metallischer, homogener Leiter: $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ $\quad [\rho] = \Omega m$

<u>Reihenschaltung</u>: $U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots$

$R_{ges} \cdot I_{ges} = R_1 I_1 + R_2 I_2 + \dots$

Spannungsteiler: z.B. 2 Widerstände in Reihe

$I_{ges} = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{ges}}{R_{ges}} \rightarrow U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{ges}$

<u>Parallelschaltung</u>: $I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots$

$I_{ges} = \frac{U_{ges}}{R_1} + \frac{U_{ges}}{R_2} + \dots$

$R_{ges} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

<u>Wheatstone'sche Messbrücke</u> → präzisere Bestimmung des Widerstands,

$U_1 = U_X \quad U_2 = U_N$ wenn l_1 / l_2 sehr kurz → Ungenauigkeit erhebliche Folge

$I_W = \frac{R_1}{R_X} \cdot I_0$

$R_X = \frac{l_1}{l_2} \cdot R_N$

Messunsicherheit für Parallelschaltung: $R_a := \overline{R_a} \pm \Delta U_{R_a}$ $\quad \Delta U_{Ra} = 2 \cdot \frac{\Delta R_a}{\sqrt{n}}$

Standardabw. des Mittelwerts

7. Kondensator und Spule

KONDENSATOR:

Plattenkondensator: zwei parallele Platten, dazwischen Dielektrikum

Spannung an Kondensator anlegen → entgegengesetzte Ladungen auf die Platten → vollst. aufgel.

Feldlinien verlaufen + → − (senkrecht auf Platten)

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot A}$$

$\varepsilon_0 \hat{=}$ elektr. Feldkonstante

$\varepsilon_r \hat{=}$ rel. Dielektrizitätskonstante

$$U_C = \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} Q$$

$$C := \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$$

Ladung

$$Q = C \cdot U$$

Kapazität

$$[C] = \frac{As}{V} =: F \quad \text{(Farad)}$$

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{U_0 - U_C}{R}$$

$$\tau_L := R \cdot C$$

Aufladevorgang: $U_C(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$

$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

Entladevorgang: $U_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

$I(t) = -\frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

SPULE:

magn. Induktion im Inneren der Spule: $B = \mu_0 \mu_r \frac{n}{l} \cdot I$

μ_0 = magn. Feldkonst.

μ_r = Permeabilitätskonstante des Mediums

Induktionsfluss $\Phi = \int \vec{B} \, d\vec{A}$

$$\Phi = \mu_0 \mu_r \frac{n}{l} \cdot I \cdot A$$

Induktionsgesetz: $U_{ind} = \underbrace{\mu_0 \mu_r A \frac{n^2}{l}}_{L} \cdot \frac{dI}{dt} = L \cdot \frac{dI}{dt}$

$L \hat{=}$ Induktivität der Spule

$$[L] = H \quad \text{(Henry)}$$

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$$

Aufladevorgang: $U_{ind}(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$

$I(t) = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t})$

Entladevorgang: $U_{ind}(t) = -U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$

$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{ext}$$

8. Ionisierende Strahlung

Atomhülle: Elektronen, Atomkern: Nukleonen, Protonen, Neutronen

$A = Z + N$

Isotone: Kerne gleicher Neutronenzahl

Isobare: Kerne gleicher Nukleonenzahl

Isotope: Kerne gleicher Protonenzahl

Wechselwirkungen:
starke Wechselwirkungen
schwache Wechselwirkungen
Gravitationskraft
elektromagn. Wechselwirkungen

α-Strahlung: Nukleonenreicher Kern emittiert ein α-Teilchen

β-Strahlung: Neutronenreicher Kern emittiert ein energiereiches Elektron

γ-Strahlung: Angeregter Atomkern ist Ausgangspunkt elektromagnetischer Strahlung (γ-Str

Zerfallsgesetz:

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Aktivität

λ = Zerfallskonstante

[A] = Becquerel = Bq

mittlere Lebensdauer $\tau = \frac{1}{\lambda}$

Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Intensität $I = \frac{E}{t \cdot A} = n \cdot \frac{E_a}{A}$

$n = \frac{N}{t}$
↳ Zählrate

$\Delta E_{Elektr.} = E_{Photon} = h \cdot \nu$

Halbwertsdicke $d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}$

Absorptionsgesetz: $I(D) = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot D}$

$D = x \cdot \rho = \frac{m}{A}$

Standardmodell der Teilchenphysik:

	Hadronen			
I	II	III		
u	s	t	g	H
d	c	b	γ	
e^-	μ^-	τ^-	$W^\pm$	
ν_e	ν_N	ν_τ	Z^0	
Leptonen			Bosonen	

Geiger-Müller-Zählrohr Problem: unterschiedliche Empfindlichkeit auf α-β-γ-

$n_{korr} = \frac{n_{mess}}{1 - n_{mess} \cdot \tau_0}$

9. Eigenschaften des Elektrons

$\vec{F}_{el} = -e \cdot E$ $\quad \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ $\quad Q = \frac{e}{m}$

$W_{el} = e \cdot U = W_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 \rightsquigarrow v = \sqrt{2U \cdot \frac{e}{m}}$

Lorentzkraft: $F_{Lorentz} = e \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q \cdot |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin\alpha$

Teilchen senkrecht zu Magnetfeldlinien → Lorentzkraft maximal

Teilchen parallel zu Magnetfeldlinien → Lorentzkraft Null

$F_{Lorentz} = F_{zentripetal}$

$e \cdot v \cdot B = \frac{m v^2}{r} \rightarrow r = \frac{m}{e} \cdot \frac{v}{B} = \frac{1}{B}\sqrt{2 \cdot U \cdot \frac{m}{e}}$

$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2}$ — weil wir B nicht messen können →

Apparatekonstante $A_c = \mu_0 \cdot \frac{k \cdot R^2}{\sqrt{(R^2 + (\frac{R}{2})^2)^3}}$ $\rightarrow$ $\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2} \cdot \frac{1}{A_c^2 \cdot I^2}$

Versuch: $\frac{e}{m}$ e m

Millikan-Versuch: $F_G = m \cdot g = \rho_{Öl} \cdot V \cdot g = \rho_{Öl} \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot g$

Sinkfall

$F_{G\,eff} = (\rho_{Öl} - \rho_{Luft}) \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot g$

$F_R = 6\pi\eta r v = \frac{6\pi e \cdot r \cdot v}{1 + \frac{b}{p \cdot r}}$

Steigfall

$F_{el} = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d}$

$F_{el} = F_{G\,eff} + F_R$ $\quad Q$

Protokoll: Aufbau wie immer, keine Theorie

2a)

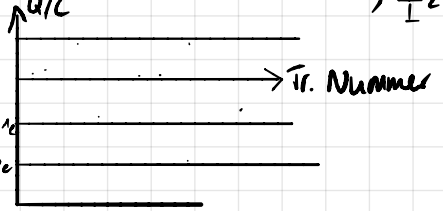


Ursprungsgerade → nicht 0/0 als Messwert

↳ muss nicht durch U gehen

$\frac{e}{m} = \frac{2\Delta a}{r^2 AC^2}$ → Fehlerrechnung mit EXCEL

3.b)



$\frac{e}{m} = \overline{\frac{e}{m}} \pm \underbrace{\Delta \frac{e}{m}}_{\text{größter Fehler}}$

3.d) $e = \bar{e} \pm \Delta e$ mit $\Delta e = 2 \cdot s_m$

$s_M = \frac{s}{\sqrt{12}}$ $\quad s$ mit STABW.S

4) $m = \frac{1}{\frac{e}{m}} \cdot e$

$\Delta m = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial \frac{e}{m}} \cdot \Delta \frac{e}{m}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial e} \cdot \Delta e\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{e}{(\frac{e}{m})^2} \cdot \Delta \frac{e}{m}\right)^2 + \left(\frac{1}{\frac{e}{m}} \cdot \Delta e\right)^2} \Rightarrow m_{gm} = m \pm \Delta m$

10. Atomstruktur

5. Jhd v. Chr.: Naturphilosophen (Demokrit) → kleinstes, unteilbares Teilchen = Atom

R. Boyle → unzerlegbare Bausteine der Materie

1808: J. Dalton → es gibt so viele versch. Atome wie Elemente, Atome = mit Masse gefüllte Kugeln, elastisch

1897: J.J. Thomson → ELEKTRON, pos. / neg. Ladung (Rosinenkuchen)

1909-1911: E. Rutherford → räumliche Verteilung der pos. / neg. Ladung

---

Bohrsches Atommodell:

- um Atomkern herum: Elektronenkreisbahnen
- beim Übergang eines Elektrons von einer zur nächsten Bahn → Energie freigesetzt bzw. aufgenommen

elektromagn. Strahlung: $\Delta E = h \cdot f = E_{außen} - E_{innen}$

Bahndrehimpuls: $L = m \cdot v \cdot r = n \cdot \hbar$ n = Hauptquantenzahl

Ionisation: Elektron wird vom Grundzustand zu einem „freien Elektron"

Energieniveaus: $E_n = -13{,}6\,eV \cdot \frac{Z^2}{n^2}$ Z = Kernladungszahl

Franck-Hertz-Versuch: die diskreten Energieniveaus der äußeren Schalen von Quecksilberatomen werden nachgewiesen

Röntgenfluoreszenz: Energie von Photonen bei Übergängen zwischen kernnahen Schalen wird analysiert → charakteristische Strahlung

---

Protokoll: alles in sek!

5: kurz: wie kommt Kurve zustande? → $U_{beschl.}$ erhöhen

am Maximum habe Elektr. genügend Energie um Gegenspannung zu überwinden und Elektronen anzuregen

Protokolle

- Zielstellung (ca. 3 Zeilen)
- Auswertung (nicht Versuchsaufbau / -auswertung)
  am besten stringent den Aufgaben der „Auswertung" folgen
  - ↳ Messwerte (ges. auf ganze mm) in Tabellen
  - ↳ Formeln (nur Buchstaben)
  - ↳ Tabellen mit Überschriften! Diagramm mit Unterschrift!
- Fazit: Bewertung des Versuches, der Messwerte, der Genauigkeit
- abgezeichnetes Messwertprotokoll / manchmal geht auch nur Excel Tabelle