

Konstanten

El. Feldkonstante

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

Lichtgeschw.

$$c = 299.792.458 \frac{m}{s} \quad (f = \frac{c}{\lambda})$$

Stefan-Boltzmann-Konstante

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Einheiten

3 nano 3 mikro 3 mili 1 centi 2 meter 3 kilo 3 Mega 3 Giga

$$N = kg \cdot \frac{m}{s^2}$$

$$C = As$$

$$V = \frac{W}{A} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot A}$$

$$J = Nm = kg \cdot \frac{m^2}{s^2} = Ws$$

$$W = \frac{J}{s}$$

$$Pa = \frac{N}{m^2}$$

$$F = \frac{C}{V} = \frac{A^2 s^4}{kg m^2}$$

$$\Omega = \frac{V}{A}$$

$$S = \frac{A}{V}$$

$$T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{kg}{s^2 A}$$

$$H = \frac{Wb}{A} = \frac{kg m^2}{s^2 A^2}$$

$$\frac{m}{s} \xrightarrow{3,6} \frac{km}{h}$$

Elektrostatik

Plattenkondensator

$$\begin{aligned} - E_{\text{innen}} &= \frac{\sigma}{\epsilon_0} \\ - E_{\text{außen}} &= 0 \end{aligned}$$

an Batterie angeschlossen:
 $U = U_0(1 - e^{-t/\tau})$

einzelne Platte

$$- E_{\text{el}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \rightarrow \text{const.}$$

Punktladung

positiv: $\vec{E}$ fällt radial $\frac{1}{r^2}$

- $\vec{E}$ zeigt radial nach außen
- Fläche mit gleich φ_{el} ist Kugeloberfläche
- Äquipotenzialflächen $\perp$ Feldlinien

$$E_{\text{pot}} = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

Draht

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

$$\vec{E}(r) = \frac{1}{r} \dots$$

Induktion

$$I_{\text{ind}} = \frac{1}{R} \cdot U_{\text{ind}}$$

$$U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi_m}{dt}; \text{ bei quadr. Leiterschleife: } U_{\text{ind}} = - B \cdot d \cdot v \text{ und } F_L = I \cdot d \cdot B$$

$$\Phi_m = A_+ \cdot B_+ + A_- \cdot B_- = B(A_+ - A_-) = AB \sin(\omega t) \xrightarrow{\frac{d}{dt}} = \underbrace{AB\omega \cos(\omega t)}_{\equiv U_{\text{ind}}}$$

→ Wenn Schleife in einem magn. Feld ist, dann $\Phi_m = \text{const.} \rightarrow \frac{d\Phi_m}{dt} = 0$

; bei Spule: $U_{\text{ind}} = - \underbrace{NAB\omega \cos(\omega t)}_{u_0}$

Elektrodynamik

stromdurchflossene Leiter

$$r < R: I(r) = I_0 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

$$\text{Stromdichte } j = \frac{I_0}{\pi R^2}$$

$$\oint \vec{B}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = \text{Umfang} \cdot B(r)$$

Parallele Leiter

$$- I_1 \downarrow \uparrow I_2: B = B_1 + B_2$$

$$\rightarrow B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}$$

$$- I_1 \uparrow \uparrow I_2: B = 0 \text{ in der Mitte}$$

RCL-Schaltung

Gleichstrom ($\omega = 0$): kein I durch C

$$- R_{\text{tot}} = R$$

Wechselstrom ($\omega \rightarrow \infty$): $Z_C \rightarrow 0$ $Z_L \rightarrow \infty$

$$- R_{\text{tot}} = R$$

Optik

- Welcher Abstand b für scharfes Bild?:

$$\frac{1}{b} = \frac{g-f}{g \cdot f}$$

- Wo muss Linse stehen?:

$$\text{I: } f = \frac{g \cdot b}{g+b} \quad \text{II: } g = d - b$$

Strahlungsleistung, Druck und Kraft

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \quad \rho = \frac{P}{c} \quad F = p \cdot A$$

Winkelauftrennung $\Delta\beta$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(\alpha)\right) \rightarrow \left. \begin{matrix} \beta_1 = \dots \\ \beta_2 = \dots \end{matrix} \right\} \Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$$

Quantentheorie

- Bell'sche Ungleichung verletzt bei Experiment

Wellenfunktion ψ

$$\psi_1 \leftarrow \text{Index (Atom 1)} \quad \begin{matrix} \Rightarrow n=2 & \text{---} \\ n=1 & \text{---} \end{matrix}$$

$\psi_1 \leftarrow \text{Hauptquantenzahl}$

$$\psi_2 \leftarrow \text{---}$$

Orts-Impuls-Unschärfrelation

$$E_{\text{kin}} = \frac{p^2}{2m}$$

Quantenmechanisches Gas

$$\lambda_{\text{dB}} (\text{deBroglie Wellenlänge}) = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v_{\text{th}}}$$

Quantenzahl

Wie viele e^- kann ein Atom aufnehmen?

- $L = n \rightarrow n+1$ Orbitale
- $m_L = -L, -L+1, \dots, 0, \dots, L-1, L$
- m_s : meistens $\pm \frac{1}{2} \rightarrow$ also 2 e^- aufnehmen
- $\rightarrow \text{Anzahl } e^- = \text{Anzahl Orbitale} \cdot m_s\text{-Anzahl}$

Elektronenkonfiguration

- welche Ordnungszahl hat Element $\rightarrow$ so viele e^-

stabiler Kernzerfall

- z.B. ^{14}C in PS schauen: Ordnungszahl 6 $\rightarrow {}^1_6\text{C}_8$
- in Tabelle schauen $6 \hat{=} \uparrow \quad 8 \hat{=} \rightarrow N$
- Diagonal zu schwarzem Quadrat $\hat{=}$ neues Element

Elektrostatik

Coulombgesetz

$$\vec{F}_{q_1 \rightarrow q_2}^C = \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}}_{\text{Konstante}} \cdot \underbrace{q_1 \cdot q_2}_{\text{Physik}} \cdot \underbrace{\frac{\vec{r}}{r^2}}_{\text{Richtung}}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

$$\vec{F}_{q_1 \rightarrow q_2}^C = -\vec{F}_{q_2 \rightarrow q_1}^C$$

welches d' , dass $F' = \frac{1}{3} F$
→ Coulombgesetz statt $r^2 = d^2$

2 Ladungen q_1 , ein e^- , welche Kraft?

$$F = \frac{e^-}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{q_1}{r_1^2} + \frac{q_2}{r_2^2} \right)$$

Elektr. Feld

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

Satz von Gauß

Elektr. Fluss

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

$$\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

- Kugel: $E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (r > R) \quad (Q = \oint A)$

- gerader, geladener Stab: $E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q/L}{r} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda}{r} \quad [\lambda] = \frac{\text{C}}{\text{m}}$

$$R = S \cdot \frac{L}{A}$$

- geladene, unendliche Platte: $E = \frac{Q/A}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

- Plattenkondensator: $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ } innerhalb Platte
 $E = 0$ } außerhalb

- Zylinder: $E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \cdot r} \cdot \frac{Q}{L}$

Energie einer Ladung im el. Feld

1) Energienullpunkt festlegen: $E_{\vec{r}_0} = 0$

2) Arbeit, die q von $\vec{r}_0$ zu $\vec{r}$ verschiebt: $W(\vec{r}) = -q \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E} \cdot d\vec{r}$

Elektrostatistisches Potential

$$\varphi_{el}(\vec{r}) = \frac{W(\vec{r})}{q} \longleftrightarrow \varphi_{el}(\vec{r}) = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad [V]$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad}[\varphi_{el}(\vec{r})] = -\vec{\nabla}\varphi_{el}(\vec{r})$$

$$\vec{E} = \left(\frac{\partial \varphi_{el}(\vec{r})}{\partial x}, \frac{\partial \varphi_{el}(\vec{r})}{\partial y}, \frac{\partial \varphi_{el}(\vec{r})}{\partial z} \right) \rightarrow \text{senkrecht auf Äquipotential-Flächen}$$

Punktladung: $\varphi_{el}(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$

Elektr. Spannung

$$U = \Delta \varphi_{el} = \varphi_{el}(\vec{r}_2) - \varphi_{el}(\vec{r}_1)$$

$$U = - \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Plattenkondensator: $|U| = \frac{Q}{\epsilon_0 A} d = E \cdot d \quad [V]$

Energie im el. Feld

Plattenkondensator: $W = \frac{1}{2C} \cdot Q^2$

$$W_{el} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{E}^2 (V) \quad \left[\frac{J}{m^3} \right]$$

↳ const.

$$\hookrightarrow E_{pot} = W_{el} \cdot V$$

Elektr. Strom

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad [A]$$

Stromdichte

$$\vec{j} = \frac{I}{A} \cdot \hat{m} = \rho \cdot q \cdot \vec{v} \quad \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

↳ Richtung des Flusses

Ohmsches Gesetz

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

— $\left[\frac{A}{Vm} = \frac{S}{m} \right]$ Siemens
Leitfähigkeit

$$U = R \cdot I$$

$$R = \frac{L}{A \cdot \sigma} = \rho \frac{L}{A} \quad \left[\frac{V}{A} = \Omega \right]$$

Elektr. Leistung

$$P = U \cdot I \quad [V \cdot A = W]$$

in ohmschen Leitern: $P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$

Beschleunigung e⁻ von Kath. zur Anode durch Spannung

$$W = E_{kin} \rightarrow e \cdot U = \frac{1}{2} m v^2$$

Elektr. Dipol

$$\vec{p} = q \cdot d \quad [Cm] \quad (\text{von neg. zur pos. Ladung})$$

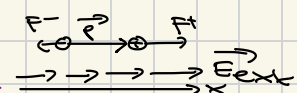
A) Homogenes el. Feld: $\vec{E}_{ext} = \text{const.} \Rightarrow \begin{matrix} \xrightarrow{F^+} \\ \xleftarrow{F^-} \end{matrix} \Rightarrow \vec{E}_{ext}$

$$\vec{F}_{ges} = 0$$

$$\text{el. Energie} = E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V$$

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$$

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

B) Inhomogenes Feld 

$$F = p \cdot \frac{dE}{dx}$$

Dielektrizität

$$\vec{P} = \text{mittleres Dipolmoment pro Volumen} \quad \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

Kapazität

$$C = \frac{|Q|}{|U|} \quad \left[\frac{C}{V} = \frac{As}{V} = F \right]$$

Plattenkondensator: $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

Elektr. Flussdichte

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

Plattenkondensator: 1) Vakuum ($\epsilon_r = 1$): - $E_1 = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A}$ - $D_1 = \frac{Q}{A}$

$$- U_1 = E_1 \cdot d \quad - C_1 = \frac{Q}{U_1}$$

$$- W_1 = \frac{Q^2}{2 \cdot C_1}$$

2) Dielektrikum ($\epsilon_r > 1$): - $E_2 = \frac{E_1}{\epsilon_r} < E_1$ - $D_1 = D_2 = \frac{Q}{A}$

$$- U_2 = E_2 \cdot d < U_1 \quad - C_2 = \epsilon_r \cdot C_1 > C_1$$

$$- W_2 = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot W_1 < W_1$$

Magnetostatik

Lorenzskraft

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = I \cdot \vec{d} \times \vec{B}$$

RHR: - Daumen = $\vec{v}$
- Zeigefinger = $\vec{B}$
- Mittelfinger = $\vec{v} \times \vec{B}$ } RHR + Vz der Ladung

Trajektorie geladener Teilchen im B-Feld $\left[\frac{A}{m} \right]$

A) $\vec{v}$ senkrecht zum homogenen $\vec{B}$ -Feld $\rightarrow$ Massenspektrometer

$$\vec{F}_L = F_z = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{m}{q} \cdot \frac{v}{B}$$

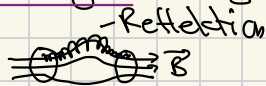
B) $\vec{v}$ schräg zum homogenen $\vec{B}$ -Feld

• $\vec{v}_\perp$ (zu $\vec{B}$) $\rightarrow$ Kreisbahn wie in A)

• $\vec{v}_\parallel$ (zu $\vec{B}$) $\rightarrow \vec{F}_L = 0 \rightarrow$ keine Beschleunigung $\rightarrow \vec{v}_\parallel = \text{const.} \Rightarrow$ Spiralbahn in $\vec{B}$ -Feld-Richtung

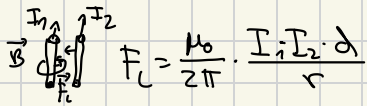
C) $\vec{B}$ -Feld inhomogen $\rightarrow$ magnet. Flasche / Schutz Erde vor Sonneneinstrahlung

$$r \sim \frac{1}{B}$$



Lorentzkraft auf el. Leiter mit Strom

$$\vec{F}_L = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$$

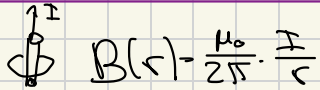

$$F_L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 \cdot L}{r}$$

↳ Ströme antiparallel → Abstößung

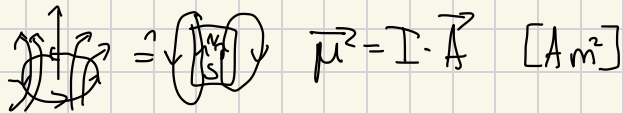
Ampèresches Durchflutungsgesetz

$$\oint_K \vec{B}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = \mu_0 \cdot I \quad \text{Wegintegral über } \vec{B} \text{ längs Randes } K$$

1) Stromdurchflossener gerader Leiter


$$B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}$$

2) Kreisstrom/magn. Dipolmoment

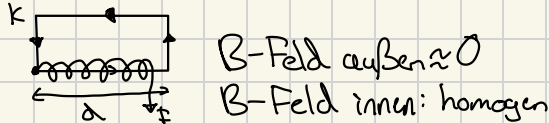

$$\vec{\mu} = I \cdot \vec{A} \quad [\text{Am}^2]$$

RHR: Zeige-Finger: Strom I

Daumen: Dipolmoment $\vec{\mu}$

$$\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

3) Lange, schlenke Spule mit N Windungen



$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Magnetischer Fluss

- keine magn. Monopole $\Leftrightarrow$ Magnetfeldlinien geschlossen
 $\rightarrow \Phi_m$ durch Oberfläche $\partial V = 0$

$$\oint_V \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{vgl.} \quad \oint_V \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Energie im B-Feld

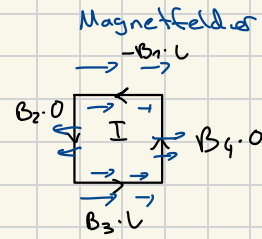
$$W_{\text{magn.}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} \quad \text{vgl.} \quad W_{\text{el.}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2$$

$$W_{\text{Spule}} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 A}{l} I^2 = \frac{1}{2} L I^2$$

Hall-Effekt

$$U_{\text{Hall}} = \frac{I \cdot B}{e n d}$$

↳ e-Dichte



Magnetische Feldstärke

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

- Paramagnet: $\mu_r \geq 1$

↳ angezogen im B-Feld

- Dipole $\parallel \vec{B}_{\text{ext}}$

- $\vec{M} \parallel \vec{B}_{\text{ext}}$

→ Verstärkung $\vec{B}_{\text{ext}} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$

- Diamagnet: $\mu_r \leq 1$

↳ abgestoßen im B-Feld

- $\vec{L} = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

- $\vec{\mu}$ anti $\parallel \vec{B}_{\text{ext}}$

- $\vec{M}$ anti $\parallel \vec{B}_{\text{ext}}$

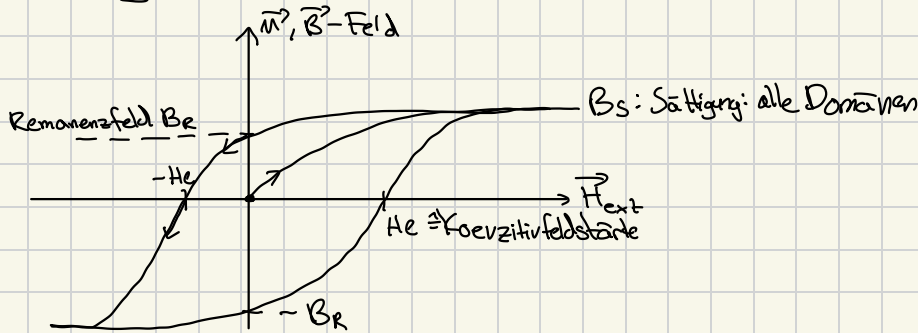
→ Abschwächung $\vec{B}_{\text{ext}}$

- Ferromagnet: $\mu_r \gg 1$

↳ angezogen im B-Feld (auch nach Abschalten)

- $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$

Magnetische Hysterese



Elektrodynamik

$$\vec{E}' = \vec{v}_B \times \vec{B}$$

$$\vec{B}' = -\frac{1}{c^2} \vec{v}_B \times \vec{E}$$

Induktionsgesetz

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \underbrace{\int \vec{E} \cdot d\vec{A}}_{\text{elektr. Fluss durch A}}$$

Induktion elektr. Felder

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \phi_m$$

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d}{dt} \phi_m$$

Lenz'sche Regel

- induzierte Feld ist Ursache entgegengerichtet: Stromrichtung so, dass ϕ_m gleich bleibt

Wirbelströme

- wirken Flussänderung entgegen

- Wirbelstrombremse: $\vec{F} \sim -\vec{v}$

Dynamo (Wechselstrom)

$$U_{\text{ind}} = U_0 \cdot \sin(\omega t)$$

↳ Spannungsamplitude

Selbstinduktion

$$U_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt}$$

$$\hookrightarrow L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

Satz von Gauß

$$\oint_{\text{Oberfl}} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Keine magn. Monopole

$$\oint_{\text{Oberfl.}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Faraday'sches Induktionsgesetz

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Elektronik

Impedanz Z (Widerstand inkl. Phasenverschiebung)

$$U(t) = Z \cdot I(t)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} : \text{Wechselstrom}$$

1) Ohm'scher Widerstand (ohne ohmscher Widerstand: $R=0 \rightarrow$ keine Dämpfung)

$$Z = R = \frac{U_0}{I_0} = \text{reell}$$

2) Ohm'sche Leistung

$$P_{\text{eff}} = \langle P(t) \rangle = \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{R} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R}$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

Wechselstrom im Kondensator

1) Phasenverschiebung $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (Strom (cos) eilt Spannung (sin) vor)

$$2) R_c(\omega) = \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow R_c \rightarrow \infty : \text{kein Strom}$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow R_c \rightarrow 0 : \text{Kurzschluss}$$

$$Z = \frac{1}{i\omega C}$$

$$P_{\text{eff}} = 0$$

Wechselstrom in Spule

1) $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ (Strom (-cos) hint Spannung (-sin) nach)

$$2) R_L(\omega) = \omega L$$

$$Z = i\omega L$$

$$P_{\text{eff}} = 0$$

Ampèresches Durchflutungsgesetz

$$\oint_{\text{Kurve K}} \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_{\text{von K umrundete Fläche}} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Kirchhoff'sche Gesetze

1) Knotenregel

$$\sum_{j=1}^N I_j = 0$$

2) Maschenregel

$$\sum_{j=1}^N U_j = 0$$

Parallel- und Reihenschaltung

Reihe: $R = \sum_{j=1}^N R_j$
 $\frac{1}{C} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{C_j}$
 $L = \sum_{j=1}^N L_j$
 $Z_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^N Z_j$

Parallel: $\frac{1}{R} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j}$
 $C = \sum_{j=1}^N C_j$
 $\frac{1}{L} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{L_j}$
 $\frac{1}{Z_{\text{tot}}} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{Z_j}$

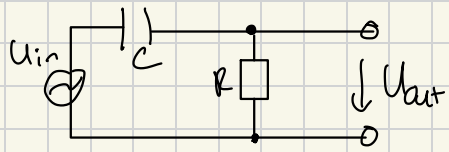
Spannungsteiler

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

RC-Hochpassfilter (lässt hohe Frequenzen passieren)

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{R^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}} \quad \begin{cases} \omega \rightarrow 0: U_{\text{out}} \rightarrow 0 \\ \omega \rightarrow \infty: U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \end{cases}$$

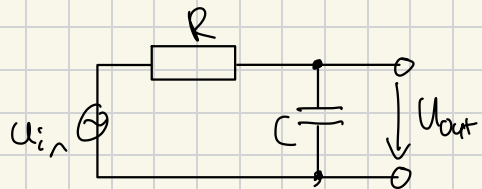
$$f_G = \frac{1}{2\pi RC}$$



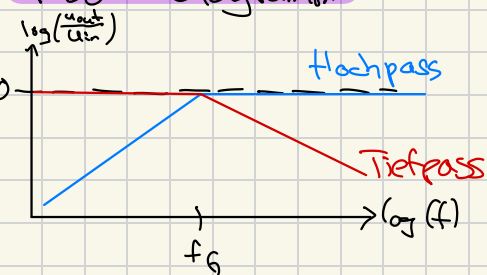
RC-Tiefpassfilter

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + (\omega RC)^2}} \quad \begin{cases} \omega \rightarrow 0: U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \\ \omega \rightarrow \infty: U_{\text{out}} \rightarrow 0 \end{cases}$$

$$f_G = \frac{1}{2\pi RC}$$

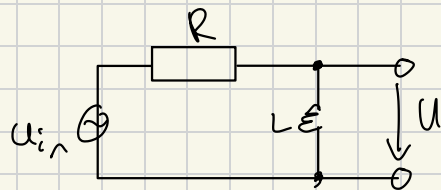


Bode-Diagramm

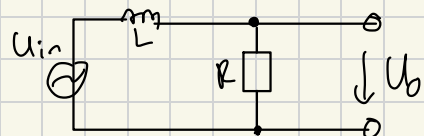


RL-Kreise

Hochpass: $U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + (\frac{R}{\omega L})^2}} \quad \begin{cases} \omega \rightarrow 0: U_{\text{out}} \rightarrow 0 \\ \omega \rightarrow \infty: U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \end{cases}$
 $f_G = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R}{L}$



Tiefpass: $U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \begin{cases} \omega \rightarrow 0: U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \\ \omega \rightarrow \infty: U_{\text{out}} \rightarrow 0 \end{cases}$
 $f_G = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R}{L}$



Transformator: 2 Spulen mit N Windungen durch Eisenkern verbunden

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$P_1 = P_2$$

$$N_2 > N_1: \text{groß } U / \text{klein } I$$

$$N_2 < N_1: \text{klein } U / \text{groß } I$$

RC-Kreis

Aufladen: $I(t) = I_0 \cdot e^{-t/RC} = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$ mit Zeitkonstante $\tau = RC$

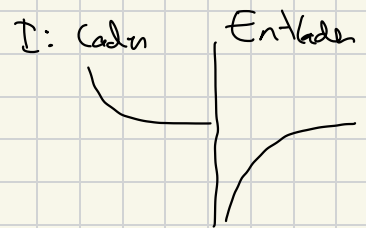
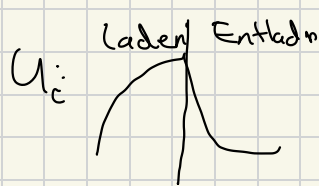
$$U_R(t) = U_B \cdot e^{-t/\tau}$$

$$U_C(t) = U_B(1 - e^{-t/\tau})$$

Entladen: $I(t) = -\frac{U_C(0)}{R} \cdot e^{-t/\tau}$

$$U_R(t) = -U_C(0) e^{-t/\tau}$$

$$U_C(t) = U_C(0) e^{-t/\tau}$$

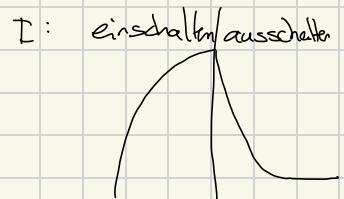


RL-Kreis

Aufladen: $I(t) = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-t/\tau})$ $\rightarrow \tau = \frac{L}{R}$

$$U_R(t) = U_B(1 - e^{-t/\tau})$$

$$U_L(t) = U_B \cdot e^{-t/\tau}$$



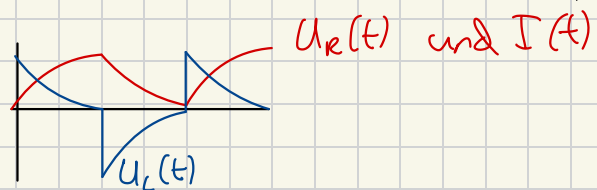
Strom aus: Periodische Spannungsquelle:

Öffnen des Schalters: - Strom geht schnell aus

- Große Induktionsspannung

- Evtl. Funken

- Evtl. Aussenden von elektromagnetischen Wellen



LC-Schwingkreis

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Elekt. Schwingkreis

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

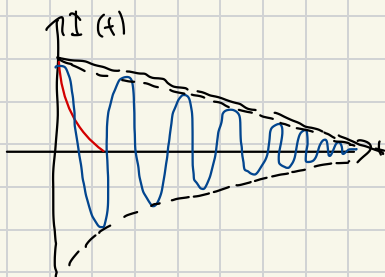
$$U_C(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t)$$

$$U_0 = -L I_0 \omega$$

$$W = \frac{1}{2} L I_0^2 = \text{const. (Energie)}$$

Schwingkreise mit Dämpfung

$$R_{\text{krit}} = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

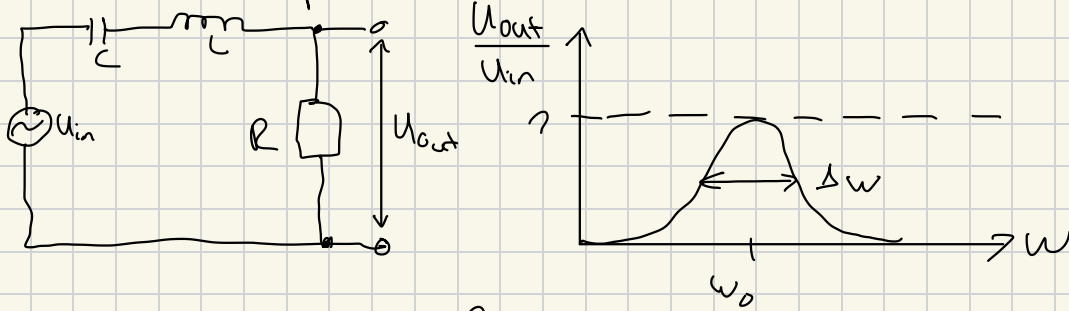


Schwingfall $R < R_{\text{krit}}$

Aperiodischer Grenzfall $R = R_{\text{krit}}$

Kriechfall $R > R_{\text{krit}}$

RCL-Bandpassfilter



- Bandbreite $\Delta\omega = \frac{R}{L}$
- Resonanzfrequenz $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$

Hertz'sches Dipol

$$\lambda = 2L \quad c = \lambda \cdot f$$

$$f_A = \frac{c}{2L}$$

max. Abstrahlung: $\perp$ zu $\vec{d}$

keine Abstrahlung: $\parallel$ zu $\vec{d}$

Optik

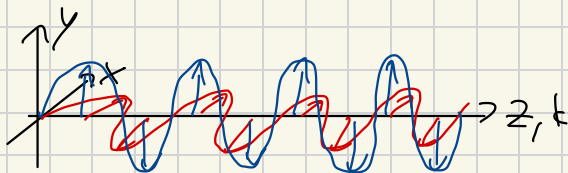
- Dipolstrahlung

- Kugelwellen

- Ebene Wellen

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 \cdot \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$



$$\vec{E}_0 = E_0 \cdot \hat{e}_x$$

$$\vec{B}_0 = B_0 \cdot \hat{e}_y$$

$$\vec{k} = k_0 \cdot \hat{e}_z$$

- Transversalwellen $\vec{B} \perp \vec{E} \perp \vec{k} \perp \vec{B}$

- Wellenlänge $\lambda \rightarrow$ Wellenzahl $|\vec{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda}$

- Schwingungsdauer $T \rightarrow$ Kreisfrequenz $\omega = \frac{2\pi}{T}$; $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

$$E_0 = c \cdot B_0$$

EL. magn. Welle

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$P = I \cdot A \quad \text{falls } I = \text{const, sonst: } P = \int_A I(\vec{r}) dA$$

Impuls: A) komplett absorbiert: $p = \frac{I}{c}$

B) komplett reflektiert: $p = 2 \cdot \frac{I}{c}$

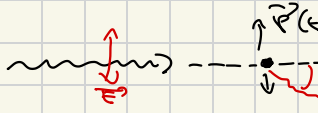
Wellen in Materie

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \cos(knx - \omega t)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

$$c_n = \frac{c}{n}$$

Streuung

A) Rayleigh-Streuung (klein)  $\rightarrow p = \text{Leistung abgestrahlt}$

$$\rightarrow p \sim \omega^4$$

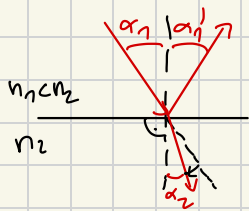
$\rightarrow$ blaues Licht stärker gestreut als rotes

B) Mie-Streuung (groß)

$$\rightarrow p \text{ unabhängig von } \lambda$$

$\rightarrow$ gestreutes Licht ist farblos

Reflexion an Grenzflächen



$$\text{Reflexion: } \alpha_1' = \alpha_1$$

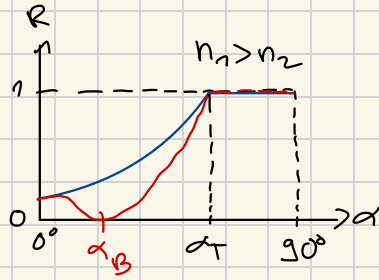
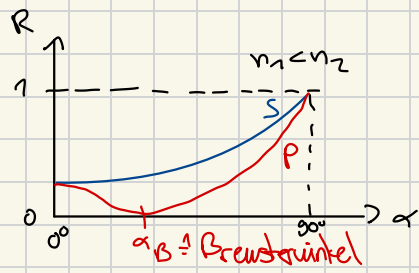
$$\text{Snellius: } n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2)$$

Totalreflexion



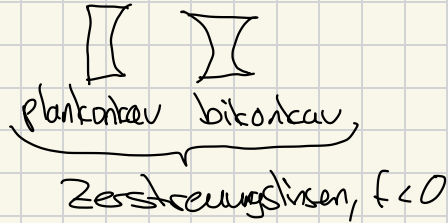
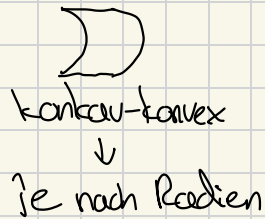
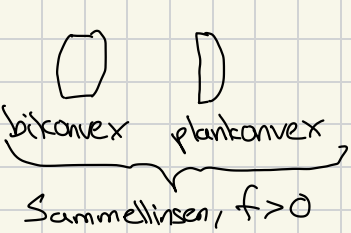
$$\alpha_T = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Reflektivität an Grenzflächen



Optische Abbildungen

Linsen



konkav: $r_{1/2} > 0 \rightarrow f > 0$

konkav: $r_{1/2} < 0 \rightarrow f < 0$

Plane Fläche: $r_2 = \infty$

Brennweite

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$D = \frac{1}{f}$$

Zusammengesetzte Linsen

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

bzw. $D = D_1 + D_2$

Vergrößerung $V = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$

Abbildungsgesetz

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}, \quad b = \frac{g \cdot f}{g - f}, \quad V = \frac{B}{G} = \frac{|b|}{g} = \frac{f}{|g - f|}$$

Optische Instrumente

A) Lupe: virtuelles Bild mit Vergrößerung $V_{\text{Lupe}} = \frac{d}{f}$

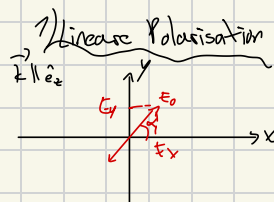
B) Auge: Akkommodation: f variabel (mit Brille $D_{\text{tot}} = D_{\text{Auge}} + D_{\text{Brille}}$)

C) Mikroskop: Okular = Lupe: vergrößert Zwischenbild, Tubus, Objektiv: reelles Zwischenbild

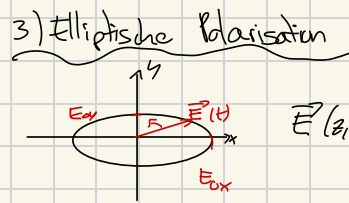
$$V_{\text{Mikr}} = V_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}}$$

D) Teleskop: $V_{\text{Teleskop}} = \frac{f_1}{f_2}$

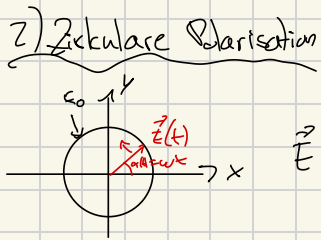
Polarisation von Licht



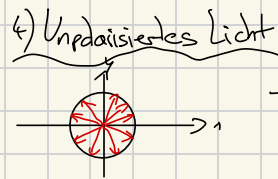
$$\vec{E}(z,t) = E_0 \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \cdot \cos(kz - \omega t)$$



$$\vec{E}(z,t) = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \\ E_{0y} \sin(kz - \omega t) \end{pmatrix}$$



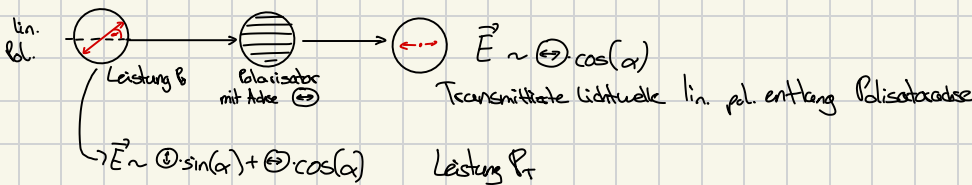
$$\vec{E}(z,t) = E_0 \begin{pmatrix} \cos(kz - \omega t) \\ \sin(kz - \omega t) \end{pmatrix}$$



- Glühlampe, Sonnenlicht, Feuer

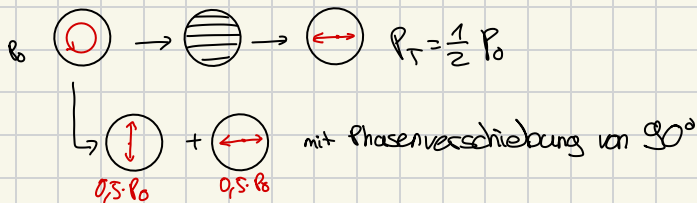
Pol. Elemente & Effekte

1) Polarisation (Folien, Würfel, Platten)

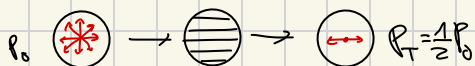


Gesetz von Malus $P_T = P_0 \cdot \cos^2(\alpha)$

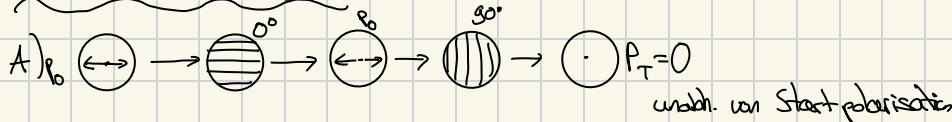
Zirkular pol. Licht auf Polarisator



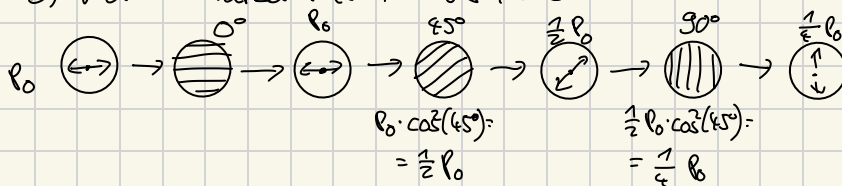
Unpolarisiertes Licht auf Polarisator



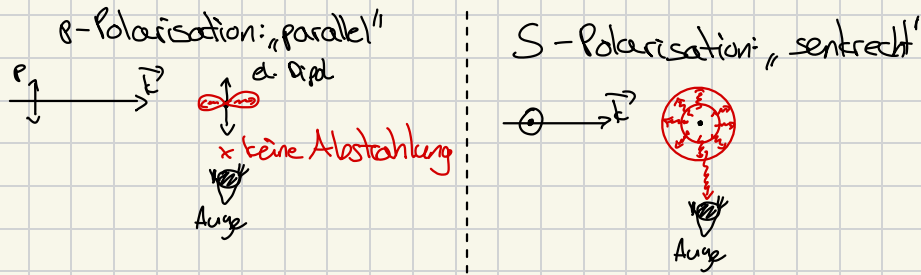
Gekreuzte Polarisation



B) Weiterer Polarisator (45°) in der Mitte

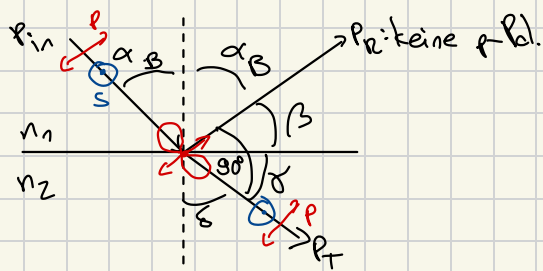


2) Polarisation durch Rayleigh-Streuung



Beobachter in 90° -Winkel zu $\vec{k}$ detektiert nur S-pol. Licht

3) Brewster-Reflexion an Grenzflächen

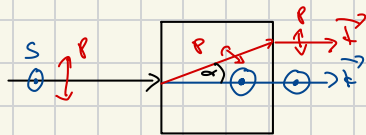


$$\alpha_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$\begin{aligned}\beta + \gamma &= 90^\circ \\ \alpha + \beta &= 90^\circ \\ \alpha + \delta &= 90^\circ \\ \delta + \gamma &= 90^\circ\end{aligned}$$

Doppelbrechung

Brechungsindex abh. von Polarisation



außerordentlicher Strahl
ordentlicher Strahl
 α = walk-off-angle

Opt. Aktivität

Drehung lin. Polar.

- feste Stoffe: $\alpha = \alpha_s \cdot L$
- Flüssigkeit: $\alpha = \alpha_s \cdot L \cdot c$

Interferenz

Addition der elektr. Felder $\vec{E}_1(\vec{r}, t)$ und $\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_1 \cdot \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega_1 t + \varphi_1) + \vec{E}_2 \cdot \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega_2 t + \varphi_2)$

Intensität: $I = I_1 + I_2 + 2\epsilon_0 c \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle_t$

Konstruktive Interferenz: $I = [I_0 + I_0 + 2I_0] = 4 \cdot I_0 = 4 \cdot \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot c \cdot \hat{E}_0^2$

$$\Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2$$

Destruktive Interferenz: $I = [I_0 + I_0 - 2I_0] = 0$

$$\Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2 + \pi$$

Bedingungen für Interferenz:

- gleiche Polarisation: $\vec{E}_1 \parallel \vec{E}_2$ (Interferenzterm $\hat{E}_1 \cdot \hat{E}_2$ ^{Skalarprodukt})
- gleiche $\vec{k}$ -Vektoren: $\vec{k}_1 = \vec{k}_2$ (Interferenzstrahlen für $\vec{k}_1 \neq \vec{k}_2$)
- gleiche Frequenzen: $\omega_1 = \omega_2$ (Schwebung für $\omega_1 \approx \omega_2$)
- Kohärenz $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \text{zeitlich konstant}$

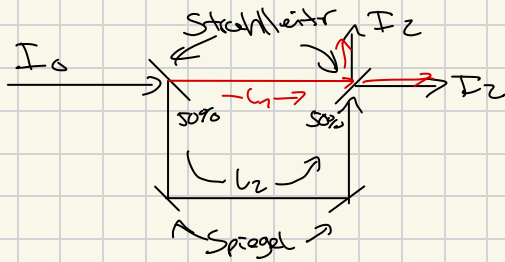
Kohärenz $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \text{konst.} \Leftrightarrow$ feste Frequenzbreite $\Delta\omega$ des Lichts

Kohärenzzeit: $\tau_c = \frac{1}{\Delta f}$

Kohärenzlänge: $l_c = \tau_c \cdot c$

Mach-Zehnder-Interferometer

Interferenz: Intensität I_1 und I_2 abh. von Wegdifferenz $\Delta L = l_2 - l_1$



$$I_1 = I_0 \cdot \cos^2\left(\frac{k \cdot \Delta L}{2}\right)$$

$$I_2 = I_0 \cdot \sin^2\left(\frac{k \cdot \Delta L}{2}\right) \quad \text{falls } \Delta L < l_c$$

Dünnschichtinterferenz: Vielfach Reflexionen an dünnen parallelen Schichten

konstr. Int. $2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha_m} = (m - \frac{1}{2}) \cdot \lambda$

destr. Int. $2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha_m} = m \cdot \lambda$

Beugung

Prinzip von Huygens: Jeder Punkt einer Welle = Ausgangspunkt einer Elementarquelle

Neue Welle = Überlagerung aller Elementarquellen

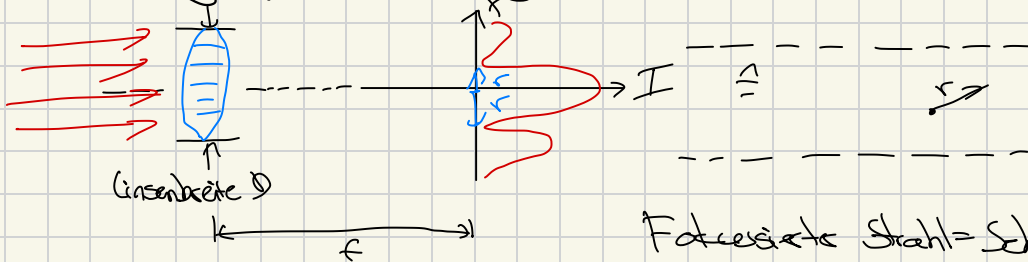
Doppelspalt: Maxima: $d \cdot \sin(\alpha) = m \cdot \lambda$

Minima: $d \cdot \sin(\alpha) = (m + \frac{1}{2}) \lambda$

Gitter: Hauptmaxima: $d \cdot \sin(\alpha) = m \lambda$

Einzelspalt: Maxima: $a \cdot \sin(\alpha) = m \cdot \lambda$; Minima: $a \cdot \sin(\alpha) = (m + \frac{1}{2}) \lambda$

Auflösung opt. Abbildungen



Fokussierte Strahl = Strahl mit Radius r

$$\rightarrow r \geq \frac{\lambda}{2}$$

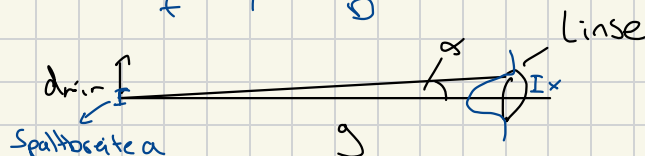
A) Rayleigh-Kriterium: Max. von Obj. 1 $\hat{=}$ Min. Obj. 2

$$\sin(\delta_{\min}) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

$$\frac{r}{f} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

B) Abbe-Kriterium:

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\alpha)} \hat{=} NA.$$



$\hat{=}$ dünner Spalt

$$\alpha = \frac{r}{g} \quad a = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$$

bei $a \hat{=}$ Gegenstand
sin weglassen

Eigenschaften von Photonen

$$E = h \cdot f = \hbar \cdot \omega$$

$$\text{Planck: } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta E = h(f - f') = h \cdot \Delta f = \frac{1}{2} m_e v^2 = e \cdot U$$

$$\text{Impuls: } p = \frac{h}{\lambda} = \hbar \cdot k$$

$$\frac{h}{\lambda} = m \cdot v$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\text{Leistung: } P = j \cdot \hbar \omega = \frac{N}{t} \cdot \hbar \omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

$$\text{A) Temperaturstrahlung: } \lambda_{\max} = \frac{2837,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T}$$

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$$\sigma = \text{Stefan-Boltzmann-Konstante} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

$$\text{B) Photoelektr. Effekt: } h \cdot f \geq W_k = \hbar \omega = \hbar \cdot \frac{2\pi c}{\lambda}$$

$$\text{C) Compton-Streuung: } \Delta \lambda = \lambda - \lambda' = \lambda_c (1 - \cos(\theta)) \quad \text{mit } \lambda_c = \frac{h}{m_e \cdot c}$$

$$\text{D) Photonenstatistik: Photonenpaare}$$

Quantenphysik

Kopenhagener Deutung

$$\text{Lichtwelle: } \vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \rightarrow \text{Schwingung des el. Feldes}$$

$$E_0^2 \sim I \hat{=} \text{Intensität der Welle} \sim \text{Anzahl der Photonen}$$

$$\Rightarrow E_0^2(\vec{r}) \sim \text{Wahrscheinlichkeit, ein Photon an Ort } \vec{r} \text{ zu messen}$$

$$\text{Materiewelle:}$$

$$\text{Wellenfunktion } \psi(\vec{r}, t) = \psi_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

$$|\psi(\vec{r}, t)|^2 = \psi^* \psi \in \mathbb{R} \geq 0: \text{Wahrscheinlichkeit, dass Teilchen zur Zeit } t \text{ am Ort } \vec{r} \text{ zu messen}$$

Heisenbergsche Unschärferelation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar \quad E_{\text{kin}} = \frac{p^2}{2m}$$

Überlagerung

$$\psi_+ = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_e + \psi_r) \rightarrow \text{Energie } E_+ < E_0$$

binden der Wellenfkt. (Molekül)

$$\psi_- = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_e - \psi_r) \rightarrow \text{Energie } E_- > E_0$$

antibindende Wellenfkt.

Verschränkung

- Jedes Photon ist unbestimmt
 - Korrelation zwischen den Teilden
- } = \text{Verschränkung}

Bohr'sches Atommodell

- e kreist auf Bahn um Kern

$$A) F_z = F_c : \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z \cdot e \cdot e}{r^2}$$

B) Kohärenzbedingung: konstruktive Interf. nach Umlauf: $2\pi \cdot r = n \cdot \lambda = n \cdot \frac{h}{p} = n \cdot \frac{h}{m_e v}$

$$\text{Quantisierte Bahnen: } r_n = a_B \cdot \frac{n^2}{Z}, \quad a_B = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \approx 0,5 \text{ \AA} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\text{Quantisierte Energie: } E_n = -E_{Ry} \cdot \frac{Z^2}{n^2}, \quad E_{Ry} = 13,6 \text{ eV} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} \hat{=} E_{\text{(Ionisation von H)}}$$

Absorption/Emission von Photonen

$$\Delta E = E_n - E_m = h \cdot f = E_{Ry} \cdot Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$


$$T \cdot \lambda = \text{const} \rightarrow T_1 \cdot \lambda_1 = T_2 \cdot \lambda_2$$

Schrödinger ($\psi(\vec{r})$ des e⁻)

1) Energieerhaltung

2) Operator $\hat{O} \rightarrow$ wirken auf ψ

$$3) \text{Hamilton-Operator zu } E_{\text{gesamt}}: -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(\vec{r}) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \psi(\vec{r}) = E \cdot \psi(\vec{r})$$

$$4) \text{quantisierte Parameter: } \psi(\vec{r}) = \psi_{\text{nem}}(\vec{r}), \quad E_{\text{nem}} = -E_{Ry} \frac{Z^2}{n^2}$$

Hauptquantenzahl n

Bohr'sche Schalen: $n=1: K$

$n=2: L$

$n=3: M$

$$r_n = a_B \cdot \frac{n^2}{Z}$$

Drehimpulsquantenzahl L $\hat{=}$ Bahndrehimpuls e⁻

$$|\vec{L}| = \hbar \sqrt{L(L+1)} \quad L = 0, 1, \dots, (n-1)$$

$L=0$: s-Orbital, radialsymm.

$L=1$: p-Orbital, Keulen

$L=2$: d-Orbital

Magn. Quantenzahl m $\hat{=}$ Projektion $\vec{L}$ auf z-Achse

$$m = -L, -L+1, \dots, L-1, L$$

$$L_{zm} = m \cdot \hbar$$

Elemente & PS

Elektronen: Spin-Quantenzahl: $m_s = \pm \frac{1}{2}$

Spin-up

Spin-down

Alle Teilchen: Spin $\frac{1}{2}$ (Fermionen): e⁻, n, p⁺ ; Spin 1 (Bosonen): Photonen

Pauli-Prinzip: 2 Fermione nie gleichen q.m. Zustand $\rightarrow$ max. 2 e⁻ für jede Kombi. von n, l, m mit $m_s = \pm \frac{1}{2}$
 $\hookrightarrow$ also gleiches n und Ort

1s			
2s	2p		
3s	3p	3d	
4s	4p	4d	4f

max e: 2 6 10 14

Kernphysik



Starke Kernkraft (Gluonen)

Nukleonen: - Z Protonen p^+
- N Neutronen n
 $\frac{A}{Z} X_N$



$\rightarrow q = +e$



$\rightarrow q = 0$

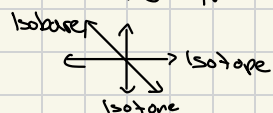
$$q_{\text{Kern}} = Z \cdot e$$

$$m_{\text{Kern}} = Z \cdot m_p + N m_n - \underbrace{\Delta m_K}_{\text{Massendefekt}} = A \cdot u \quad \text{atomare Masseneinheit}$$

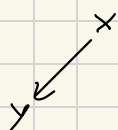
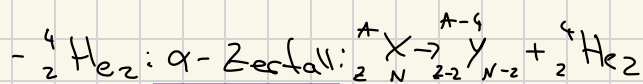
$$\text{Massendefekt} \leftrightarrow \text{Bindungsenergie } E_{B,K} = \Delta m_K \cdot c^2$$

Massenzahl = const

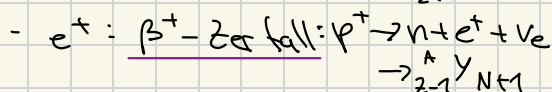
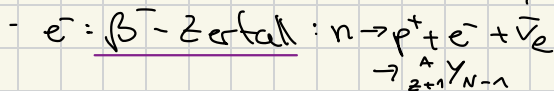
Isotone: $N = \text{const}$, Z, A nicht; Isobare: $A = \text{const}$, Z, N nicht; Isotope: $Z = \text{const}$, $A = Z + N$ nicht



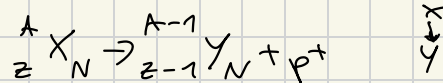
Radioaktivität



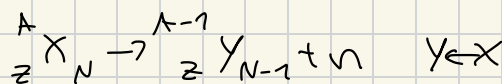
Elektron-Antineutrino



- p^+ : Protonenemission:



- n : Neutronenemission:



- γ : γ -Zerfall: Kern in angeregtem Zustand

$\rightarrow \gamma$ -Quant: $E = 0,6 \text{ MeV}$

Zerfallsgesetz

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

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} \rightarrow T_{1/2} = \tau \cdot \ln(2)$$

$$P(dt) = P_0 \cdot dt$$

Aktivität

$$A = -\frac{dN}{dt} = \frac{N_0}{\tau} e^{-t/\tau} \quad \left[\frac{1}{s} = \text{Bq} \right]$$