

Symbol	Name	Wert
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante („epsilon-null“)	$8.845 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$
e	Elementarladung	$1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
h	Planck'sches Wirkungsquantum	$6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
k_B	Boltzmann Konstante	$1.381 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$
μ_0	Magnetische Feldkonstante („mue-null“)	$1.257 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$
N_A	Avogadro-Zahl	$6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
σ	Stefan-Boltzmann Konstante („sigma“)	$5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Symbol	Name	Wert
u	Atomare Masseneinheit	$1u = 1.6612 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
eV	Elektronenvolt	$1\text{eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Symbol	Name
α	Helium-Kern („alpha-Teilchen“)
β^-, β^+	Elektron, Positron („beta-Teilchen“)
γ	Photon („gamma-Teilchen“)
e^-, e^+	Elektron („e-minus“), Positron („e-plus“)
n	Neutron
$\nu, \bar{\nu}$	Neutrino, Antineutrino („nue“, „nue-quer“)
p	Proton

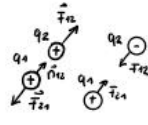
Masse Proton: $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 Masse Elektron: $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Elektrostatik

Das Coulomb'sche Kraftgesetz

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \vec{n}_{12}$$



Gravitationskraft

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad | \quad G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

Elektrisches Feld

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}_C(\vec{r})}{q_0}, \quad \vec{F}_C = \text{Coulomb'sche Kraft}$$

$$\vec{F}_C(\vec{r}) = q_0 \cdot \vec{E}(\vec{r}) \quad | \quad \vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \vec{n}_0 \quad (\text{V/m})$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m} \cdot \vec{E}$$

Elektrisches Potential und Spannung

$$\phi(\vec{r}) = \frac{E_{\text{pot}}(\vec{r})}{q_0} = - \int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V (Volt)}$$

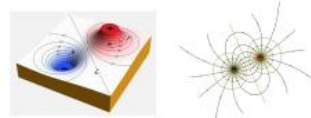
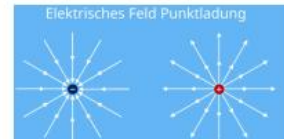
Energie einer Ladung

$$\Delta E_{\text{pot}, AB} = q_0 \cdot U_{AB} \quad | \quad E = q \cdot \phi$$

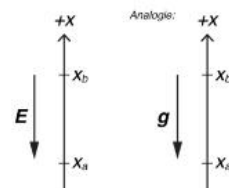
$$\Delta E_{\text{pot}} = -q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (\text{Joule, J})$$

$$E_{\text{pot}}(r) = q_0 \cdot \phi(r) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_0 \cdot q}{r}$$

(Eindimensionale Lösung ↑)



Analogie zu PHY1
(potentielle Energie des Gravitationsfeldes)

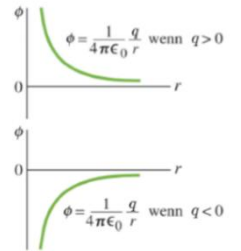


Elektrisches - Potential einer Punktladung (Eindimensional)

$$\phi(\vec{r}) = \frac{E_{\text{pot}}(\vec{r})}{q_0} = - \int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V (Volt)}$$

$$\phi(r) = - \int_{\infty}^r \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} = - \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left[\frac{1}{r} \right]_{\infty}^r$$

$$= \phi(\vec{r}) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad | \quad \begin{array}{l} \text{- positive Punktladungen haben ein pos. Potential} \\ \text{- negative haben ein negatives Potential} \end{array}$$



Elektrische Felder bestimmter Objekte

- positiv geladener dünner Draht $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{\lambda}{r} \quad \lambda = \frac{q}{L}$
- positiv geladene Platte (∞ -Ebene) $E = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0} \quad \sigma = \frac{q}{A}$
- zwei unterschiedlich geladene Platten $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

Der Plattenkondensator: Spannung, Kapazität & Energie

$$U = E \cdot d$$



$$q = C \cdot U$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \quad [C] = \text{Farad}, \quad 1\text{F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}}$$

$$E_{\text{el}} = \frac{q^2}{2C} = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (J)$$

Kapazität einer Kugel

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_K$$

Energiedichte

$$w_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{V} = \frac{\epsilon_0 \cdot E^2}{2} \quad (\text{J/m}^3)$$

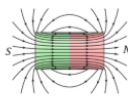
Neue Energieeinheit

$$1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} \quad \hat{=} [\text{Joule}]$$

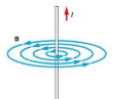
Beschleunigung eines Elektrons im homogenen E-Feld

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}}$$

Magnetismus



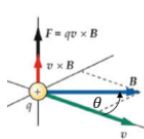
Stabmagnet
(Permanentmagnet)



Stromdurchflossener
Leiter (Ströme)

Bei Magnetfeldern sind die Feldlinien geschlossen (Endlos)

$$[\vec{B}] = T (\text{Tesla}) ; 1T = \frac{N \cdot s}{C \cdot m} = \frac{N}{A \cdot m} = \frac{V \cdot s}{m^2} \quad / \quad B = \text{Magnetfeld}$$



Lorentzkraft: $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

$$|\vec{F}| = |q| \cdot |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin \theta$$

→ Rechte-Hand-Regel zählt nur für positive Ladungen,
→ negative wirken entgegengesetzt

Spezialfall: Kombination E-Feld & Magnetfeld

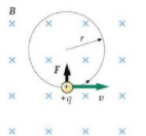
$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Bewegung einer Ladung im homogenen Magnetfeld

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

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

$$f = \frac{1}{T} = (T^{-1})$$



Wichtig:

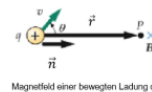
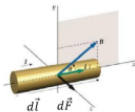
Im homogenen B-Feld bewegt sich die Ladung im Kreis
→ Rechte-Hand-Regel

Wirkung von B-Feldern auf elektrische Ströme

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

Kraft bei einem Leiterstück

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B} *$$



Magnetfeld einer bewegten Ladung q.

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot \vec{v} \times \vec{n}}{r^2}, \quad |B(r)| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{|q| \cdot |\vec{v}| \cdot \sin \theta}{r^2}$$

Gesetz von Biot-Savart

$$d\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{n}}{r^2}$$

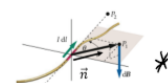
Der Magnetische Fluss Φ_M

$$\Phi_M = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad [\Phi_M] = Wb (\text{Weber})$$

$$1Wb = 1T \cdot m^2$$

$$\Phi_M = \oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

→ bei einer geschlossenen Fläche



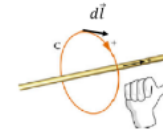
Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiterstückes dl

Bei homogenem B-Feld
($\varphi = 90^\circ$) → $F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin(\varphi)$

Das Ampèresche Gesetz

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I$$

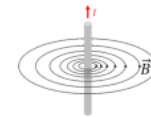
C = (Linienintegral)



Das Ampère'sche Gesetz: Die Umräumrichtung für das Linienintegral ist mit der Rechte-Hand-Regel durch die Stromrichtung definiert.

Magnetfeld eines langen, geraden stromdurchflossenen Leiters

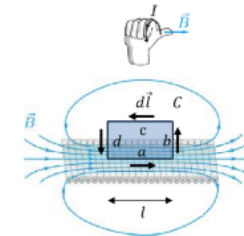
$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



Das Magnetfeld eines langen, geraden stromdurchflossenen Leiters.

Magnetfeld in einer langen dünnen Spule

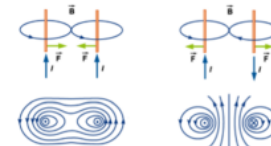
$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I = \mu_0 \cdot n \cdot I \quad | \quad n = \frac{N}{l}$$



Kraft zwischen zwei parallel stromdurchflossenen Leitern

Kraft pro Leiterlänge

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



Ströme in gleicher Richtung ziehen sich an (links). Ströme in entgegengesetzte Richtungen stoßen sich ab (rechts)

2.23

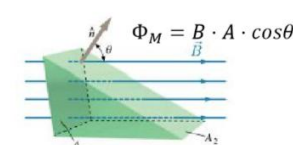
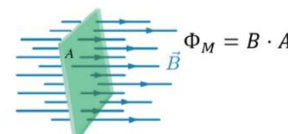
Induktion

$$\Phi_M = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

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

Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld induziert eine Spannung:

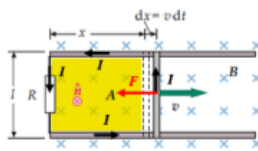
- Durch Flächenänderung
- Durch Winkeländerung
- Durch Änderung des B-Feldes



Bewegter Leiter im stationären B-Feld

$$|U_{\text{ind}}| = |\vec{E}_i| \cdot l = |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \cdot l$$

$$U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi_M}{dt} = \frac{d(B \cdot A(t))}{dt} = -B \cdot v \cdot l$$



Generatoren

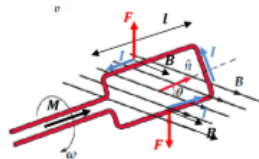
$$\Phi_M = N B \cdot A = N B A \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

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

$$U_0 = N \cdot B \cdot A \cdot \omega$$

N = Anzahl Windungen der Spule

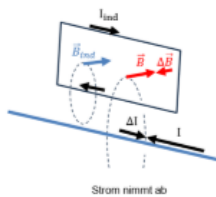
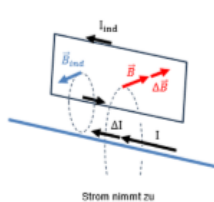
$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}| \cdot \sin \theta$$



Lenzsche Regel

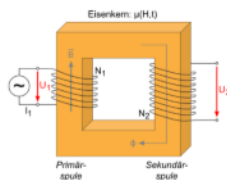
Das Induzierte Magnetfeld wirkt der Änderung des Magnetfeldes des Leiters entgegen

-> Aktion gleich Reaktion (B-Felder sind in der Summe Null)



Transformatoren

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



Induktivität einer Spule (Selbstinduktion)

$$\Phi_M = N \cdot B \cdot A = \mu_{\text{rel}} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot I \cdot A = L \cdot I$$

$$L = \mu_{\text{rel}} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A, [L] = 1 \text{ H (Henry)} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

$$l = \text{Länge der Spule} \quad // \quad U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi_M}{dt} = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Energie des Magnetischen Flusses

$$P = U \cdot I \text{ (W)}, E_{\text{magnetisch}} = L \cdot \frac{I^2}{2} \text{ (J)}$$

$$\text{Energiedichte: } w_{\text{mag}} = \frac{E_{\text{mag}}}{A \cdot l} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \text{ (J/m}^3\text{)}$$

Elektromagnetische Energiedichte

$$w_{\text{em}} = w_{\text{el}} + w_{\text{mag}} = \frac{\epsilon_0 \cdot \vec{E}^2}{2} + \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \text{ (J/m}^3\text{)}$$

Elektrodynamik

Der Verschiebungsstrom

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I + I_v) \quad // \quad I_v = \epsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$

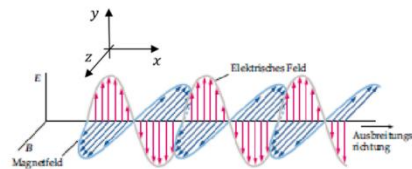
Lösung der Wellengleichung: Ebene Welle

$$\text{Wellenzahl } k = 2\pi/\lambda \quad | \quad \text{Kreisfrequenz } \omega = 2\pi \cdot f$$

$$T = \text{Periode (s)} \quad | \quad f = \frac{1}{T} = \text{Frequenz (1/s)} = \text{s}^{-1}$$

$$c = f \cdot \lambda \quad / \quad \lambda = \text{Wellenlänge}$$

-> Das B-Feld steht senkrecht auf dem E-Feld



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

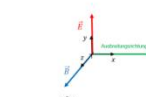
$$\vec{B}(x, t) = \vec{B}_0 \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

$$|\vec{E}_0| = c \cdot |\vec{B}_0| \text{ (Amplituden sind gekoppelt)}$$

Ausbreitungsrichtung $\vec{E}$ & $\vec{B}$

-w-d + x-Richtung | +w-d -x-Richtung

Ausbreitung in positive x-Richtung:



$$\vec{E}(x, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B_0/c \end{pmatrix} \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

Ausbreitung in negative x-Richtung:



$$\vec{E}(x, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \sin(k \cdot x + \omega \cdot t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -B_0/c \end{pmatrix} \cdot \sin(k \cdot x + \omega \cdot t)$$

Energie, Leistung und Intensität von EM-Wellen

Energiedichte:

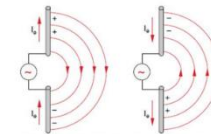
$$w_{\text{em}} = w_{\text{el}} + w_{\text{mag}} = \frac{\epsilon_0 \cdot \vec{E}^2}{2} + \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} = \frac{\vec{E} \cdot \vec{B}}{N_0 \cdot c}$$

Intensität & Poynting Vektor $\vec{S}$

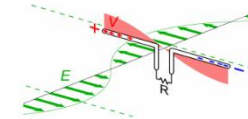
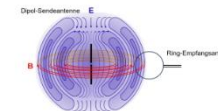
$$I_{\text{em}} = \frac{\vec{E}_0 \cdot \vec{B}_0}{2 \cdot \mu_0} = \langle |\vec{S}| \rangle \quad \vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}$$

$$\text{Energie} = h \cdot f = \text{Joule (J)} \quad / \quad [I_{\text{em}}] = [\vec{S}] = \text{W/m}^2$$

Generelle Antennen



$$l = \frac{\lambda}{2} \text{ (Dipollänge)}$$

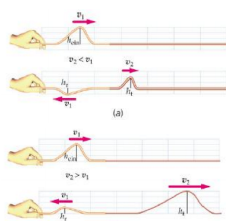
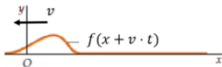
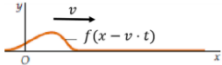


• Initial wirkt das E-Feld

- Das B-Feld wirkt viel schwächer -> $B = E/c$ (extrem klein)

Seilwellen (transversal)

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = v^2 \cdot \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}, \quad v = \sqrt{\frac{F_s}{\mu}}, \quad F_s = \text{Seilkraft (N)}, \quad \mu = \frac{m}{\ell} = (\text{kg}/\ell)$$



Harmonische Wellen

$$y(x,t) = y_m \cdot \sin(k \cdot x \pm \omega \cdot t) \quad (\text{Ort}) \quad | \quad \text{Phasengeschwindigkeit: } v = \frac{\omega}{k}$$

y_m = Amplitude der Welle [y]

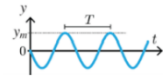
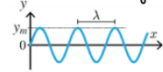
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ Wellenzahl [1/m]

λ = Wellenlänge [m]

$\omega = 2\pi \cdot f$ Kreisfrequenz [1/s]

T = Periode [s]

f = Frequenz [Hz=1/s]



$$y(x,t) = \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = -\omega \cdot y_m \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

Energiedichte

$$\langle w \rangle = \frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot y_m^2 \quad w = (\text{J}/\text{m}^3) \quad | \quad \text{mittlere Leistung}$$

ρ = Massendichte des Mediums / v = Wellengeschw.

Mittlere Intensität

$$\langle I \rangle = \frac{\langle P \rangle}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot y_m^2 = \langle w \rangle \cdot v$$

Schallwellen (longitudinal)

$$\frac{\partial^2 s(x,t)}{\partial t^2} = v^2 \cdot \frac{\partial^2 s(x,t)}{\partial x^2} \quad (5.10.a) \quad v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{m_{\text{Mol}}}} = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Luft @ 293 K})$$

mit der Lösung für die in positive Richtung laufende harmonische Welle

$$s(x,t) = s_m \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (5.10.b)$$

Für den Druck gilt dann

$$p(x,t) = p_m \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t - \frac{\pi}{2}) \quad (5.11.a)$$

wobei die Druckamplitude mit der Amplitude der Auslenkung verknüpft ist durch

$$p_m = \rho_0 \cdot \omega \cdot v \cdot s_m \quad (5.11.b)$$

Dabei ist ρ_0 die Gleichgewichtsdichte des Gases. Auslenkung und Druck sind um $\frac{\pi}{2}$ phasenverschoben.

Die mittlere Energiedichte einer Schallwelle ist nach 5.7

$$\langle w \rangle = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot s_m^2 \quad (5.12.a)$$

und die Intensität (5.10)

$$\langle I \rangle = \frac{\langle P \rangle}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot s_m^2 = \langle w \rangle \cdot v \quad (5.12.b)$$

Wasserswellen (longitudinal)

Tiefes Wasser: $d \gg \lambda$

$$v \approx \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi}}, \quad f = \frac{v}{\lambda} \approx \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi \cdot \lambda}} \quad (5.14.a)$$

Flaches Wasser: $d < \frac{\lambda}{2}$

$$v \approx \sqrt{g \cdot d}, \quad f = \frac{v}{\lambda} \approx \sqrt{\frac{g \cdot d}{\lambda}} \quad (5.14.b)$$

Reflexion und Transmission an Grenzflächen

$$y_{\text{ref}} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot y_{\text{ein}} \quad (5.15.a)$$

$$y_{\text{trans}} = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot y_{\text{ein}} \quad (5.15.b)$$

und damit:

$$I_{\text{ref}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot I_{\text{ein}} \quad (5.16.a)$$

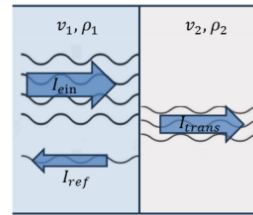
$$I_{\text{trans}} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \cdot I_{\text{ein}} \quad (5.16.b)$$

Man nennt $R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$ den Reflexionskoeffizienten und $T = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2}$ den Transmissionskoeffizienten.
 $\alpha_{\text{ref}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$ den Reflexionsgrad und $\alpha_{\text{trans}} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$ den Transmissionsgrad.

Aus $I_{\text{ein}} = I_{\text{ref}} + I_{\text{trans}}$ folgt:

$$\alpha_{\text{ref}} + \alpha_{\text{trans}} = 1 \quad (5.16.c)$$

$$\alpha_{\text{ref}} + \alpha_{\text{trans}} = 1$$



$$Z_1 = \rho_1 \cdot v_1$$

$$Z_2 = \rho_2 \cdot v_2$$

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

Reflexion & Transmission bei Seilwellen

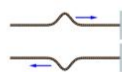
$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad (5.17.a)$$

$$T = \frac{2 \cdot v_2}{v_2 + v_1} \quad (5.17.b)$$

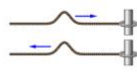
$$f = \frac{v}{\lambda}$$

* Koeffizienten

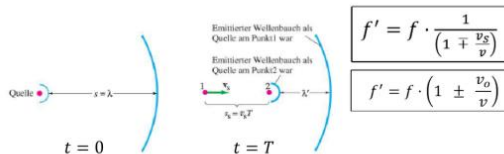
Festes Ende



Freies Ende



Dopplereffekt



→ auf Empfänger zu
 → von Empfänger weg

$$f' = f \cdot \frac{1}{1 \pm \frac{v_s}{v}}$$

$$f' = f \cdot \left(1 \pm \frac{v_o}{v} \right)$$

Schallmauer

$$\sin \theta = \frac{v}{v_s} = \frac{1}{Ma}$$

v = Geschw. des Obj.
 v_s = Schallgeschw. im Medium

Stehende Welle

$$y(x,t) = 2 \cdot y_0 \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Beidseitig eingespannte Saite

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot \ell}{n}, \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \sqrt{\frac{F_s}{\mu}} \cdot \frac{n}{2 \ell} \quad | \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

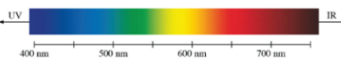
$f_n = n \cdot f_1$ (Frequenz f_1 : Harmonischer Grundton)

Einseitig eingespannte Saite

$$\lambda_n = \frac{4 \cdot \ell}{n}, \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \sqrt{\frac{F_s}{\mu}} \cdot \frac{n}{4 \ell} = n \cdot f_1 \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Optik

$$c = \lambda \cdot f$$



$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

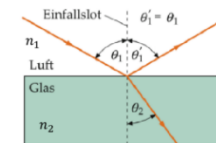
$$c_n = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{rel}} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}}}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{rel}} \cdot \mu_{\text{rel}}}} = \frac{c}{n}$$

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

Reflexion und Brechung

$$\theta_1 = \theta_1'$$

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

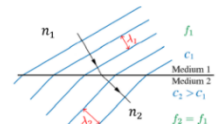
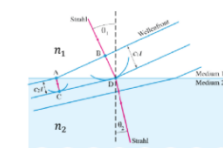


Brechungsgesetz

$$f_1 = f_2$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

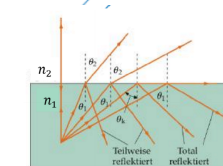
$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



Totalreflexion

$$n_1 > n_2$$

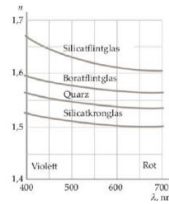
$$\sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1}$$



Totalreflexion tritt ab einem gewissen Eintrittswinkel beim Übergang von einem optisch dichteren Medium zu einem optisch dünneren Medium auf. In der Figur gilt $n_1 > n_2$

Dispersion bei Glas

→ der Brechungsindex ist λ (Wellenlängen) abhängig

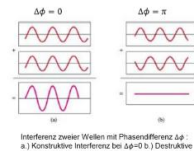


Überlagerung (Interferenz) bei Phasendifferenzen

$$\Delta \phi = 2\pi \cdot \frac{\Delta s}{\lambda}$$

für $\Delta s = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$
→ konstruktive Interferenz

für $\Delta s = \lambda/2, 3\lambda/2, \dots$
→ destruktive Interferenz

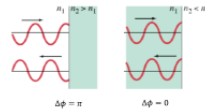


Interferenz zweier Wellen mit Phasendifferenz $\Delta \phi$
a.) Konstruktive Interferenz bei $\Delta \phi = 0$ b.) Destruktive Interferenz bei $\Delta \phi = \pi$

Phasendifferenz (Phasensprung) bei Reflexion

$\Delta \phi = \pi$ Reflexion an Grenzfläche zu einem Medium mit größerer Brechzahl

$\Delta \phi = 0$ Reflexion an Grenzfläche zu einem Medium mit kleiner Brechzahl



Auch schon bei minimalen Differenzen gültig
bspw. $n_1 = 1,000$ & $n_2 = 1,001$

Interferenz am Doppelspalt

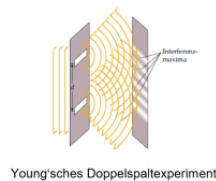
Interferenzmaxima

$$d \cdot \sin \theta_m = m \cdot \lambda$$

Interferenzminima

$$d \cdot \sin \theta_m = (m + 1/2) \cdot \lambda$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots, m \in \mathbb{N}$$



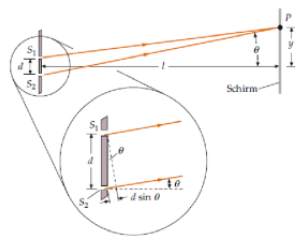
Young'sches Doppelspaltexperiment

Es gilt:

$$y_m \approx l \cdot \frac{m \cdot \lambda}{d}$$

Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{d \cdot y_m}{e \cdot m}$$



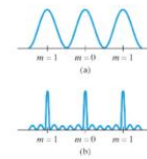
Beugungsgitter

→ mehrere Spalte mit dem gleichen Abstand
→ mehrere Spalte ergeben extremere Peaks.

Analog zum Doppelspalt

$$d \cdot \sin \theta_m = m \cdot \lambda$$

$$m \in \mathbb{N}$$



Beugung am Einfachspalt

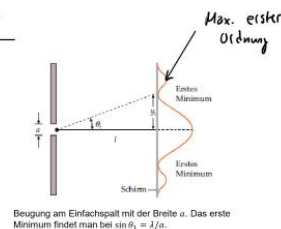
Beugungsminimum:

$$a \cdot \sin \theta_m = m \cdot \lambda$$

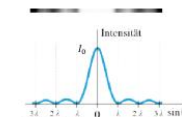
Beugungsmaximum:

$$a \cdot \sin \theta_m = (m + 1/2) \cdot \lambda$$

$$m \in \mathbb{N}$$



Beugung am Einfachspalt mit der Breite a. Das erste Minimum findet man bei $\sin \theta_1 = \lambda/a$.



Die Intensitätsverteilung bei einem Einfachspalt zeigt ein deutliches Maximum bei $\theta = 0$ und Minima bei $\sin \theta_m = m \cdot \frac{\lambda}{a}$

Sphärische Spiegel mit Radius r

Abbildungsgleichungen:

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

$$f = r/2$$

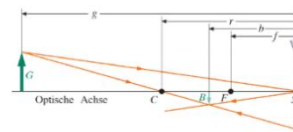


Abbildung durch einen konvexen sphärischen Spiegel. Der Punkt C ist der Mittelpunkt des sphärischen Spiegels, der Punkt F ist der Brennpunkt.

$$\text{Vergrößerungen: } V = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$$

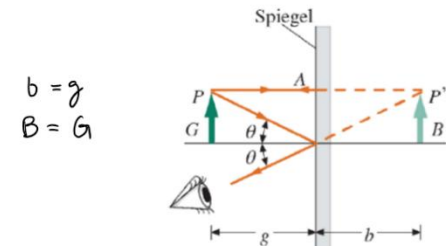
g = Gegenstandsweite

b = Bildweite

f = Brennweite (Fokus)

Geometrische Optik:

Abbildung durch Reflexion: **Ebene Spiegel**



$$b = g$$

$$B = G$$

Beispiele Sphärische Spiegel

Vorzeichenkonvention:

- Klein g ist positiv, falls es sich auf der Lichtseite befindet
- Bildweite b ist positiv, wenn es sich auf der Lichtseite befindet
- Konkave Spiegel haben positive Brennweite f wobei konvexe eine negative haben

Konkaver Spiegel $\leftrightarrow f > 0$
 $g > f \rightarrow b > 0$

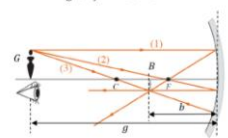


Bild reell, invertiert, verkleinert

Konkaver Spiegel $\leftrightarrow f > 0$
 $g < f \rightarrow b < 0$

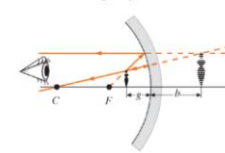


Bild virtuell, aufrecht, vergrößert

Konvexer Spiegel $\leftrightarrow f < 0$
 $\rightarrow b < 0$

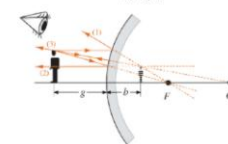


Bild virtuell, aufrecht, verkleinert

			10^6	Eins
d	Dezi	lat. decem = zehn	10^{-1}	Zehntel
c	Zenti	lat. centum = hundert	10^{-2}	Hundertstel
m	Milli	lat. mille = tausend	10^{-3} = 1000^{-1}	Tausendstel
µ	Mikro	gr. mikros = klein	10^{-6} = 1000^{-2}	Millionstel
n	Nano	gr. nanos = Zwerg ^[2]	10^{-9} = 1000^{-3}	Milliardstel
p	Piko	span. piko = Winzigkeit ^[6] ital. piccolo = klein	10^{-12} = 1000^{-4}	Billionstel
f	Femto	dän. femten = fünfzehn ^[4]	10^{-15} = 1000^{-5}	Billionstel

a	Atto	dän. atten = achtzehn ^[4]	10^{-18} = 1000^{-6}	Trillionstel
z	Zepto ^[4]	lat. septem = sieben ^[4]	10^{-21} = 1000^{-7}	Trillionstel
y	Yokto ^[4]	lat. octo = acht ^[4]	10^{-24} = 1000^{-8}	Quadrillionstel
r	Ronto ^[4]	lat. novem = neun ^[2] gr. ennea = neun ^[23]	10^{-27} = 1000^{-9}	Quadrillionstel
q	Quekto ^[4]	lat. decem ^[2] , gr. deka = zehn ^[3]	10^{-30} = 1000^{-10}	Quintillionstel

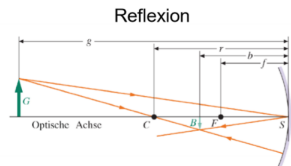
Abbildung durch Transmission: Brechung an einer sphärischen Grenzfläche

Transmission

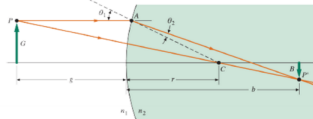
$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

Vergrößerung V:

$$V = \frac{B}{G} = - \frac{n_1 \cdot b}{n_2 \cdot g}$$



Transmission/Brechung

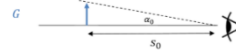


Brechkraft einer Linse:

$$B = \frac{1}{f} \quad (D) \text{ Dioptrien}$$

Die Lupe

Ohne Lupe:



$$\text{Lupevergrößerung } \alpha \approx \frac{s_0}{f}$$

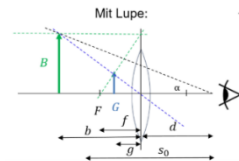


Abbildung durch Transmission: Dünne Linse

Normale Transmission

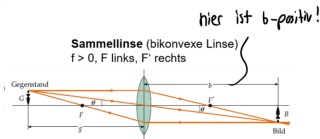
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Transmission mit Brechungsindex:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n_{\text{Luft}}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

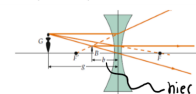
$$V = \frac{B}{G} = - \frac{b}{g}$$

Sammeln & Streuen



Streulinse (bikonkave Linse)

f < 0, F' links, F rechts



Die Gegenstandsweite ist fast immer positiv!

Welle Teilchen Dualismus

Photonen

Energie E

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Impuls p

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (Ns)$$

Intensität I

$$I_{\text{em}} = \frac{E \cdot B_0}{2 \cdot \mu_0} \quad (W/m^2)$$

Teilchen mit Masse

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{h}{m \cdot v} \quad (v \ll c)$$

Bsp. beschleunigtes Elektron

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}}$$

Kernphysik

Genereller Aufbau

Bsp. Stickstoffisotop $^{15}_7N$

- Ordnungszahl Z (Protonenzahl) $\rightarrow$ 7 Protonen
- Massenzahl A (Nukleonenzahl)

$$A = Z + N$$

$$\text{Neutronenzahl } N = A - Z \rightarrow 15 - 7 = 8$$

Teilchen	Masse m	Elektr. Ladung q
Elektron	$9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$-e (-1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})$
Proton	$1.67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$+e (+1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})$
Neutron	$1.67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	neutral

Teilchen	Masse
Elektron	$9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ 0.000548 u 0.511 MeV/c ²
Proton	$1.67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ 1.007276 u 938.27 MeV/c ²
Neutron	$1.67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ 1.008665 u 939.57 MeV/c ²

Radioaktives Zerfallsgesetz:

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

Zerfallskonstante λ (s⁻¹)

Zerfallsrate oder Aktivität R

$$R(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = R_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$R_0 = \lambda \cdot N_0$$

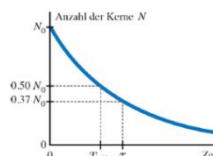
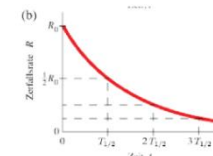
R = Bq (Becquerel), 1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde

3.7 · 10¹⁰ Bq = 1 Curie

Mittlere Lebensdauer τ
in Sekunden

Halbwertszeit T_{1/2}
in Sekunden

$$\tau = 1/\lambda \quad T_{1/2} = \ln(2) \cdot \tau$$



Kernbindungsenergie

$$\Delta E_B = \sum_{i=1}^A (m_i - m_k) \cdot c^2$$

Nukleonen = Protonen & Neutronen im Kern!

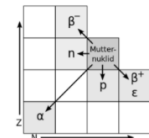
Kernbindungsenergie pro Nukleon

$$\Delta E_{BA} = \frac{\Delta E_B}{A} \quad \text{|| Achtung: Der Kern ist leichter als} \quad \text{jeder Nukleon einzeln} \rightarrow \text{Massendefizit}$$

Radioaktiver Zerfall

Alpha - Zerfall:

Der Atomkern emittiert ein Teilchen aus zwei Protonen und zwei Neutronen (Heliumkern)
 $\rightarrow$ Die Massenzahl verringert sich um 4
 $\rightarrow$ Die Ordnungszahl verringert sich um 2



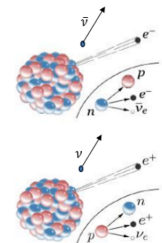
Die Ordnungszahl Z (Anzahl Protonen) und die Neutronenzahl N ändert sich je nach Zerfallsmodus unterschiedlich.

7.15

Beta - Zerfall:

Der Atomkern emittiert ein Elektron B- oder ein Positron B+

$\rightarrow$ Umwandlung Neutron zu Proton oder Proton zu Neutron
 $\rightarrow$ Die Massenzahl bleibt gleich, die Ordnungszahl wird entweder +1 oder -1



Gamma - Zerfall:

Der Atomkern emittiert ein hochenergetisches Photon. Die Massen- und Ordnungszahlen bleiben gleich. $\rightarrow$ passiert oft direkt nach einem Alpha- oder Beta Zerfall.

Illustrative Darstellung der Kerne bei einem β^- -Zerfall (oben) und einem β^+ -Zerfall (unten)

Abschirmung von γ -Strahlen

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

$$I = s^{-1} \cdot m^{-2} \quad (\text{Zählrate})$$

$$\mu = m^{-1} \quad (\text{Absorptionskoeffizient})$$

$$X = m \quad (\text{Dicke der Abschirmung})$$

$$d_{1/2} = m \quad (\text{Halbwertsdick})$$

$$d_{1/2} = \ln(2) / \mu$$

Dosimetrie (Strahlenmessung)

Energie dosis D

$$D = \frac{E_{\text{abs}}}{m} \rightarrow [D] = 1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

Äquivalenzdosis H (effektive Dosis)

$$H = Q \cdot D \rightarrow [H] = 1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$