Formelsammlung
Physik III

<Marco.Moeller@macrolab.de>

Stand: 15.02.2006 - Version: 1.0.0
Erhältlich unter HTTP://PRIVAT.MACROLAB.DE

Diese Formelsammlung basiert auf der Vorlesung "Physik III" von Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Achim Richter an der Technischen Universität Darmstadt im Wintersemester 2005/06.

Inhaltsverzeichnis

1 Elektrizitätslehre und Magnetismus **1**

1.1 Einleitung . . . 1

1.2 E-Feld . . . 2

1.3 Elektrische Kräfte auf Ladungen . . . 2

1.4 Potential und Arbeit im $\vec{E}$-Feld . . . 3

1.4.1 Dipol . . . 3

1.4.2 Atomare Dipole . . . 4

1.5 Freie Elektronen . . . 4

1.6 Materie im $\vec{E}$-Feld . . . 4

1.6.1 Dielektrizitätskonstante, Polarisierbarkeit und Suszeptibilität . . . 4

1.6.2 Mikroskopische Beschreibung der Polarisation . . . 4

1.7 Elektrostatik im Isolator . . . 5

1.8 Elektrischer Strom und Widerstand . . . 5

1.8.1 Leitfähigkeit und Widerstand . . . 5

1.8.2 Temperaturabhängigkeit von R . . . 5

1.9 Arbeitsleistung des el. Stromes . . . 6

1.10 Stromkreise und Stromverzweigung . . . 6

2 Magnetische Wechselwirkungen **6**

2.1 Bewegte Ladungen und Permanentmagneten . . . 6

2.1.1 Erdmagnetfeld . . . 7

2.2 Kraftwirkung von $\vec{B}$-Feldern auf Ströme und Magnetfelder . . . 7

2.3 Eigenschaften des Magnetfeldes im Vakuum . . . 8

2.4 Stoffe im Magnetfeld . . . 8

2.5 Ferromagnetische Stoffe . . . 8

2.6 Zeitliche veränderliche elektromagnetische Felder . . . 9

2.7 Wechselspannung . . . 9

2.8 Dipolstrahlung . . . 10

2.9 Tabellen . . . 11

3 Optik **11**

3.1 Beugung . . . 11

3.2 Brechung . . . 12

3.3 Polarisation . . . 12

4 Bemerkungen zur klassischen Theorie des Lichts **13**

4.1 Dipolmodell . . . 13

4.2 Schwarzkörperstrahlung . . . 13

4.3 Bohrsches Atommodell . . . 14

1 Elektrizitätslehre und Magnetismus

1.1 Einleitung

Elektrischer Strom $I = \frac{dq}{dt}$

- $[I] = 1A$ ist die Stärke eines elektrischen Stromes der durch zwei gerade parallele Leiter im Abstand von $1m$ fließt wenn zwischen den Leitern je Meter Länge eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}N$ auftritt.
- q ist die Ladungsmenge

Drift $I = Anqv$

- A ist Leiterquerschnitt
- $n = \frac{N}{V}$ ist Anzahl von Ladungen pro Volumen
- q ist Ladung eines Teilchens
- v ist die Driftgeschwindigkeit der Teilchen

Ladung $q = \int_{t_1}^{t_2} I\, dt$

- $[q] = 1As = 1C = 1$ Coulomb
- Ladung ist quantisiert
- $e^- = 1,602 \cdot 10^{-19} C$
- Ladungen sind relativistisch invariant, d.h. sie ändern sich nicht mit der Geschwindigkeit des Teilchens

1.2 E-Feld

Elektrische Feldstärke $\vec{F} = q\vec{E}$

- $\vec{E}$ entspricht der Kraft, die an einem Ort auf $q = 1$ wirkt
- $[E] = 1\frac{N}{C} = 1\frac{V}{m}$
- $\vec{E}$ ist superpositionierbar: $\vec{E} = \sum_{i=1}^{N} \vec{E}_i$
- An Oberflächen ist sie um so stärker, je kleiner der Krümmungsradius $E_\perp \sim \frac{1}{R_0}$
- An Oberflächen exisiteren nur Normalkomponenten von $\vec{E}$

Feldlinien Verbindungslinien zwischen Ladungen. Sie zeigen von $+$ nach $-$.

- 2 Feldlinien schneiden sich niemals

Coulomb'sches Gesetz $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_r$

- Elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
- Kraft kann auch abstoßend sein, für unterschiedliche Vorzeichen von q_1 und q_2
- für mehrere Ladungen

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r_0}) &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^{N} \frac{q_j}{r_{0j}^2} e_{\vec{0j}} \\ &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_V \frac{\varrho(\vec{r}_1)}{r_{01}^2} e_{\vec{01}} dV_1 \end{aligned}$$

Ladungsdichte $\varrho(\vec{r}) = \frac{dq}{dV}$

- $q = \int_V \varrho\, dV$

Fluss $\Phi = \int_A \vec{E} d\vec{A}$

Gauß'scher Satz der Elektrostatik

$$\begin{aligned} \oint_A \vec{E}\, d\vec{A} &= \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_j q_j \\ \oint_A \vec{E}\, d\vec{A} &= \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \varrho\, dV \\ \oint_A \vec{D}\, d\vec{A} &= \int_V \varrho\, dV \end{aligned}$$

- Auf der rechten Seite der Ausdrücke wird nur die Umschlossene Ladung gezählt!
- $\operatorname{div}\left(\vec{D}\right) = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \varrho$
  $\operatorname{div}\left(\vec{E}\right) = \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\varrho}{\varepsilon_0}$

Dieelektrische Verschiebung $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$

Influenz Trennung von Ladungen im elektrischen Feld

- Influenzladungsdichte $\frac{q}{A} = E \cdot \varepsilon_0 = D$
- Ladungen sitzen immer an der Oberfläche, d.h. das Innere eines metallischen Körpers ist feldfrei, d.h. dort sitzt auch keine Ladung

Flächenladungsdichte $\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta A} = \pm \left|\vec{D}\right| = \pm \left|\varepsilon_0 \vec{E}\right|$

- Durch Betrag von D geht das Vorzeichen von D verloren! $\Rightarrow$ überlegen!

Faraday-Käfig Metallischer Käfig, in dessem Inneren kein E-Feld vorliegt

Bildladung In einem Aufbau aus zwei entgegengesetzt geladenen Kugel lässt sich eine Metallplatte genau in die Mitte des Feldes einbringen. Falls diese das Potential an dieser Stelle besitzt, ändert sich dadurch nichts am Feldverlauf, selbst wenn eine Kugel entfernt wird (zumindest auf der einen Seite).

1.3 Elektrische Kräfte auf Ladungen

Kapazität $C = \frac{q}{U}$

- $[C] = 1\frac{C}{V} = 1 Farad = 1F$

Spannung $U = \frac{Fd}{q}$

- d Länge der Strecke, über die die Spannung gemessen wird
- q Größe der beteiligten Ladungen (symmetrisch $\pm q$)

- F Kraft auf die Platten
- $[U] = 1\frac{Nm}{As} = 1Volt = 1V$

Plattenkondensator $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 A} = \frac{U}{d}$

- ist unabhängig vom Plattenabstand d
- Kapazität $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$

Kugelkondensator $U = \frac{q}{\varepsilon_0 4\pi}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$

- $R_{1/2}$ sind der Radius der inneren Kugel, und der Innenradius der umhüllenden Kugel

Kondensator Parallelschaltung $C = \sum_i C_i$

Kondensator Reihenschaltung $\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}$

- Gesamtkapazität ist immer kleiner als die kleinste beteiligte Kapazität

1.4 Potential und Arbeit im $\vec{E}$-Feld

Konservatives Feld $\oint \vec{E}(\vec{r})\, d\vec{r} = 0$

Potentielle Energie $\varphi(\vec{r}_0) = \frac{W_{pot}}{q} = -\int_{\infty}^{\vec{r}_0} \vec{E}(\vec{r})\, d\vec{r}$

- der Referenzpunkt ∞ kann auch anders gewählt werden.

Elektronenvolt $1eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$

- Energie, die ein Elektron / Proton beim Durchlaufen der Spannung von $1V$ gewinnt.

Spannung $U_{21} = \varphi(r_2) - \varphi(r_1) = -\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E}(\vec{r})\, d\vec{r} = \frac{\Delta W}{q}$

- $[U] = 1Volt = 1V = \frac{N}{As}$
- $[W_{pot}] = 1J = 1C \cdot 1V$

Coulombpotential $\varphi(r) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}$

Äquipotentialflächen sind Flächen gleichen Potentials.

- Es muss keine Arbeit geleistet werden, wenn eine Ladung auf einer Äquipotentialfläche verschoben wird.
- elektisch leitfähige Flächen sind immer Äquipotentialflächen

Kondensatorenergie $W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \int U dq = \int CU\, dU$

Energie im Plattenkondensator $W = \frac{C}{2}E^2 d^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 V$

- V Volumen zwischen den Kondensatorplatten

Energiedichte $w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$

Feld und Potential $\vec{E}(\vec{r}) = -\vec{\nabla}\varphi(\vec{r})$

- Allgemein überlagert man als erstes die Potentialfelder und bestimmt per Gradientenbildung aus dem resultierenden Feld das $\vec{E}$-Feld

Richter'sche Einheitsvektoren $\vec{e}_x = \vec{i}\ \vec{e}_y = \vec{j}\ \vec{e}_z = \vec{k}$

1.4.1 Dipol

Situation Im Koordinatensystem befindet sich eine Ladung $+q$ auf der positiven z-Achse im Abstand $\frac{d}{2}$ und eine Ladung $-q$ auf der negativen z-Achse ebenfalls im Abstand $\frac{d}{2}$ zum Ursprung.

Ergebnis der Überlegung soll eine Funktion für das $\vec{E}$-Feld und das Potential φ für $|\vec{r}| \gg d$ sein. Das sogenannte *Fernfeld*

Dipolmoment $\vec{p} = q \cdot \vec{d}$

Potential $\varphi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{(qd)z}{r^3} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{p\cos\theta}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{\vec{p}\cdot\vec{r}}{r^3}$

- Potential des Dipols fällt stärker ab als das einer Einzelladung. Im Unendlichen kompensieren sich die beiden Ladungen gerade.
- ist nur noch Axialsymmetrisch

$\vec{E}$-Feld $\vec{E} = \vec{e}_\varrho E_\perp + \vec{e}_z E_{||}$

- $E_\perp = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0}\frac{3\cos\theta\cdot\sin\theta}{r^3}$
- $E_{||} = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0}\frac{3\cos^2\theta - 1}{r^3}$
- $E_\perp = 0$ für $\theta = 90°$ und $\theta = 0°$
- $E_{||}(\theta = 0°) = -2E_{||}(\theta = 90°) = \frac{2p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$

Kraft im äußeren Feld $\vec{F} = q\vec{E}$

- $\vec{T} = \vec{p} \times \vec{E}$
- $T = pE\sin\varphi\left(\vec{p}, \vec{E}\right)$
- Drehmoment ist bestrebt, den Dipol in Feldrichtung zu stellen $\Rightarrow$ Arbeitsleistung
- $dW = -Td\varphi$
- $W_{pot}(\varphi) = \int Td\varphi = -pE\cos\varphi + c = -\vec{p}\vec{E} + c$
- Um Dipol um $180°$ im $\vec{E}$-Feld zu drehen, braucht man den Energieaufwand $2pE$.
- Translationskraft im inhomogenen $\vec{E}$-Feld

$$\vec{F} = \left(\vec{p}\vec{\nabla}\right)\vec{E}$$

1.4.2 Atomare Dipole

Dipolmoment $\vec{p} = q\vec{\varrho} = 4\pi\varepsilon_0 R_0^3 \vec{E} = \alpha_0 \varepsilon_0 \vec{E}$

- q Ladung, die im Atom verschoben wird
- ϱ Entfernung der Verschiebung
- R_0 Atomradius
- $\alpha_0 = 4\pi R_0^3$ atomare Polarisierbarkeit
- induzierte Dipolmomente sind kleiner als permanente Dipolmomente

1.5 Freie Elektronen

Glühkathoden-Diode ist ein Vakuum Röhrchen, in dem zwei Elektroden eingebaut sind (Kathode − und Anode +). Da die Kathode beheizt wird, ist es sehr leicht möglich, dass sich Elektronen von der Anode zur Kothode bewegen.

- Die Kennline ($I_A(V_{AK})$) ist erst flach, wird dann steiler und geht zum Schluss wieder in eine Sättigung. Die Kurve geht nicht ganz durch den Ursprung, da auch bei ausgeschalteter Spannung einige (thermische) Elektronen ihren Weg finden. Dieser Bereich wird Anlaufstromgebiet genannt.

Richardson Gleichung $j_s = CTe^{-\frac{\phi}{kT}}$

- j_s Anzahl der aus der Kathode austretenden Elektronen pro Zeit und Flächenelement
- C hängt von der geometrischen Struktur der Kathode ab

1.6 Materie im $\vec{E}$-Feld

1.6.1 Dielektrizitätskonstante, Polarisierbarkeit und Suszeptibilität

Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_r = \frac{C_{\text{mit Materie}}}{C_{\text{ohne Materie}}} = 1 + \frac{P}{\varepsilon_o E} = 1 + \chi$

- Die beiden Kapazitäten beziehen sich auf den selben Kondensator, einmal mit Vakuum ziwschen den Platten, einmal mit einem Stoff gefüllt.
- $\varepsilon_{\text{Luft}} \approx 1$

relative Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_r = \frac{E_0}{E}$

- Ingenieure rechnen nach dieser Methode.
- Damit ergibt sich die Dielektrizitätskonstante

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$$

Polarisation $P = \frac{q_P}{A} = \frac{\text{el. Dipolmoment}}{\text{Volumen}}$

- q_p Polarisationsladung
- A Plattenfläche des Kondensators
- $[P] = \frac{As}{m^2}$

el. Suszeptibilität $\chi = \varepsilon_r - 1$

- Maß für die el. Polarisierbarkeit eines Stoffes

Dielektrische Verschiebbarkeit $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$

- der Unterschied zwischen $\varepsilon_0 \vec{E}$ und $\vec{D}$ sind die Polarisationsladungen
- Im Kristall haben $\vec{E}$ und $\vec{D}$ oftmals nicht dieselbe Richtung (anisotrope Medien)

  $$\vec{D} = \varepsilon_0 A \vec{E}$$

  wobei A ein passende Matrix ist.

Ladungsdichte $\rho = \text{div}\vec{D} = \vec{\nabla}\vec{D}$

Polarisierungsladungdichte $\rho_P = \text{div}\left(\varepsilon_0 \vec{E} - \vec{D}\right)$

1.6.2 Mikroskopische Beschreibung der Polarisation

Dipolmoment $\vec{P} = \frac{N}{V}\vec{p} = n\vec{p}$

- $\vec{p}$ Dipolmoment eines Molekühls
- n Zahl der Molekühle pro Volumen

Moleküle ohne permanentes Dipolmoment

- $1 < \varepsilon_r < 10$
- z.B. C_6H_6, CO_2, N_2, H_2
- $\vec{p} = \varepsilon_0 \alpha \vec{E}$ induziertes Dipolmoment
- $\vec{P} = n\vec{p} = n\varepsilon_0 \alpha \vec{E}$
- $\chi = n\alpha$
- α wird durch Molekülvolumen bestimmt
- für Flüssigkeiten gilt

  $$\chi = \frac{n\alpha}{1 - \frac{n\alpha}{3}}$$

- wenn $\frac{n\alpha}{3} \ll 1$ (für dünne Gase) gilt $\chi \approx n\alpha$
- α ist unabhängig vom Aggregatzustand eines Stoffes

Moleküle mit permanentem Dipolmoment

- $\varepsilon_r > 20$
- z.B. HCN, H_2O, HCl, CO
- es liegt eine Ausrichtung der Dipole bereits ohne äußeres Feld $\vec{E}$ vor
- $\vec{E}$-Feld $\Rightarrow$ Drehmoment auf Dipole $\vec{F} = \vec{p}_k \times \vec{E}$
- $W_{pot} = -p\vec{E}\cos\varphi$
- Anzahl der Moleküle mit diesem φ relativ zum äußeren Feld
$$n(\varphi) = \frac{n}{a\pi} e^{-\frac{W_{pot}}{kT}}$$
- bei hinreichend hohen Temperaturen gilt $e^{-\frac{W_{pot}}{kT}} \approx 1 - \frac{W_{pot}}{kT} = 1 + \frac{p_k E \cos\varphi}{kT}$
- $\vec{P} = \int n(\varphi) p\vec{e}_r(\varphi) d\varphi$ $P = \frac{np_k^2 E}{3kT}$
- paraelektrische Suszeptiblität $\chi = \varepsilon_r - 1 = \frac{P}{\varepsilon_0 E} = \frac{np_k^2}{\varepsilon_0 3kT}$

Curie-Verhalten gilt bei $\chi \sim \frac{1}{T}$

Para- oder ferromagnetische Stoffe haben eine Hysteresekurve im B über E Diagramm

- ε_r sehr groß (10^4)
- starke Temperaturabhängigkeit von P. Sinkt mit steigender Temperatur bis es bei der kritischen Temperatur T_c schließlich ganz zusammenbricht.

1.7 Elektrostatik im Isolator

Gauß'scher Satz im Isolator $\oint_A \left(\vec{E} + \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0}\right) d\vec{A} = \frac{q_F}{\varepsilon_0}$

- q_F sind die freien Ladungen im umschlossenen Volumen
- Polarisationsladungen $q_P = -\oint_A \vec{P} d\vec{A} = \int_V \varrho_P dV$
- ϱ_P Polarisationsladungsdichte

1.8 Elektrischer Strom und Widerstand

1.8.1 Leitfähigkeit und Widerstand

Feld in einem Draht $E = \frac{U}{l}$

Strom $I = nA\overline{v}q$

- $n = \frac{N}{V}$ Anzahl der e^- pro Volumen
- A Querschnittsfläche
- $\overline{v}$ mittlere Geschwindigkeit der e^-
- q Ladung eines e^-

mittlere Driftgeschwindigkeit $\overline{v} = -\frac{e}{2m}E\tau$

- τ mittlere Stoßzeit der e^- in Metallen
- $\overline{v} \sim E \sim \frac{U}{l}$
- $I \sim U$

Stromdichte $j = \frac{I}{A} = n\overline{v}q = nq\mu E$

- μ Beweglichkeit der e^-, die sich durch ein "zähes" Medium bewegen

Ohm'sches Gesetz $\vec{j} = \sigma_0 \vec{E}$

elektrische Leitfähigkeit σ_0

- Stoffkonstante

spezifischer Widerstand $\varrho_0 = \frac{1}{\sigma_0}$

- Stoffkonstante

Draht $U = \frac{\varrho_0 l}{A} I$

- Widerstand des Drahtes $R = \frac{\varrho_0 l}{A}$

Widerstand $R = \frac{U}{I}$

- $[R] = 1\frac{V}{A} = 1\Omega = 1Ohm$
- ist bei den meisten Materalien für konstante Temperatur konstant

1.8.2 Temperaturabhängigkeit von R

kleiner Temperaturbereich $R_t = R_0(1 + \beta t)$

- β Temperaturkoeffizient
- für reine Metalle ist β positiv; $\beta \approx \frac{1}{273}$ grad
- für reine Metalle gilt außerdem
$$\frac{R}{R_0} = \frac{T}{T_0}$$
- Bei Metallen gilt
$$\frac{\text{Wärmeleitfähigkeit}}{\text{el. Leitfähigkeit}} = const$$
- Halbleiter haben einen negativen Temperaturkoeffizient
$$R(T) \sim e^{\frac{c}{T}}$$

Supraleiter verlieren ab einer gewissen Temperatur T_c sogut wie ihren ganzen Ohm'schen Widerstand

- Metalle: $T_C \approx 8K$
- Hochtemperatursupraleiter: $T_c \approx 90K$

Ionenleitung in Elektrolyten in einem Lösungsmittel mit einer hohen Dielektrizitätskonstante reicht die thermische Beweungsenergie aus, um die *Dissoziation* (Trennung der Ionen aus ihrer Verbindung) herbeizuführen.

- $W = \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r_0^2}$
  r_0 Ionendurchmesser
- Leitfähigkeit

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= nNe\left(\mu^+ - \mu^-\right) \\ &= nNe\left(\left|\mu^+\right| + \left|\mu^-\right|\right) \end{aligned}$$

- n Wertigkeit der Ionen
- N Ionenkonzentration
- μ^+, μ^- Beweglichkeit der jeweiligen Ionen
- Bei einer Ladungsmenge $q = 96,487C$ wird genau $1mol$ einer einwertigen Substanz abgeschieden.

1.9 Arbeitsleistung des el. Stromes

Strom $dI{=}\frac{dq}{dt}$

Arbeit $dW = N = U \cdot I$

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

1.10 Stromkreise und Stromverzweigung

Knoten sind Stellen, in denen sich mehrere Leiterbahnen treffen.

Maschen sind geschlossene Wege, die nur über Leiterbahnen und Bauteile führen.

technische Stromrichtung geht von + nach −

- In Quellen U, I entgegengesetzt
- In Verbrauchern U, I in gleiche Richtung
- Achtung: Elektronen fließen andersherum!
- Spannungen U positiv, wenn Ladung von + nach − verschoben wird.

Knotenregel $\sum_n I_n = 0$

- Die Summe aller Ströme in einem Knoten ist 0
- auch 1. Kirchhoff'sches Gesetz genannt

Maschenregel $\sum_n U_n = 0$

- Die Summe aller Spannungen in einem geschlossenen Umlauf ist 0.
- auch 2. Kirchhoff'sches Gesetz genannt

Reihenschaltung $R_g = \sum_n R_n$

Parallelschaltung $\frac{1}{R_g} = \sum_n \frac{1}{R_n}$

Strommessung mit R_i sehr klein

- in Reihe
- R_i Innenwiderstand des Messgerätes

Spannungsmessung mit R_i sehr gross

- parallel
- R_i Innenwiderstand des Messgerätes

Kondensatorentladung $U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

- $I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

2 Magnetische Wechselwirkungen

2.1 Bewegte Ladungen und Permanentmagneten

Lorentzkraft $\vec{F} = m\vec{a} = q\vec{v} \times \vec{B}$

- bewirkt nur eine Richtungsänderung, und keine Beschleunigung
- $\left[\vec{B}\right] = \frac{N}{Am} = 1T = 1Tesla$
- $1G = 1Gauss = 10^{-4}T$
- $1\gamma = 10^{-9}T$
- Ablenkung erfolgt auf Kreis oder Spiralbahn mit der Kreisfrequenz $\vec{\omega}$
- $r = \sqrt{\frac{2mU}{q}}\frac{1}{B}$ wobei U die Beschleunigungsspannung der Ladungen war

Ablenkung $\vec{\omega} = -\frac{q}{m}\vec{B}$

Gekreuzte $\vec{B}$ und $\vec{E}$ Felder $\vec{v} = \frac{E}{B}$

- Diese Geschwindigkeit passiert die Felder unabgelenkt

Eigenschaften von $\vec{B}$-Feldern

- $\vec{B}$-Feldlinien verlaufen immer vom Nord zum Süd-pol (außerhalb des Magneten)
- sind ringförmig geschlossen
- Ws gibt keine magnetischen Ladungen, d.h. es gibt nur Dipole und keine magnetischen Monopole.
- Das Superpositionsprinzip gilt auch für magnetische Felder.
- Teilung eines Magneten führt immer wieder zu Dipolen. → fortsetzbar bis zu sehr kleinen Molekularmagneten, unter Erhaltung der Polstärke.
- Magnetfelder werden nur von bewegten Ladungen erzeugt

Ampere'sche Kreisströme Ein Stabmagnet hat das gleiche Magnetfeld wie eine Spule. Vermutung: Es existieren Kreisströme in der Spule. Sogenante Ampere'sche Kreisströme

Hall-Effekt $U_H = \frac{1}{nq}\frac{BI}{d} = R_H \frac{BI}{d}$

- In stromdurchflossenem Plättchen der Breite d äußern sich zum Strom senkrechte Magnetfelder in einer Querspannung.

Hall-Konstante $R_H = \frac{1}{nq}$

Klitzing Konstante $R_K = \frac{h}{e^2} = 25813\Omega$

- Die Hallkonstante ist quantisiert (unter extremen Bedingungen) gilt

$$R_H = \frac{R_K}{n} \quad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Zyklotron $f = \frac{qB}{2\pi m}$ $r = \frac{mv}{qB}$

2.1.1 Erdmagnetfeld

Pole sind in der Erdhistorie in Bewegung. Im Moment liegt der magnetische Südpol in der Nähe des geographischen Nordpols und umgekehrt.

Deklination horizontale Komponente des Erdfeldes zeigt nicht exakt nach Norden sondern um einen Winkel α verkippt.

- $\alpha \approx 4°$ in der Mitte von Deutschland

Inklination Neigung der Magnetnadel gegen wagerechte Achse

- $\approx 65°$ in Deutschland
- $0°$ am Äquator
- $90°$ an den Polen

2.2 Kraftwirkung von $\vec{B}$-Feldern auf Ströme und Magnetfelder

Kraft $\vec{F} = l\left[\vec{I} \times \vec{B}\right] = \int \vec{j} \times \vec{B}\, dV$

- auf einen stromdurchflossenen Leiter

Kraft pro Volumen $\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$

- $\vec{j}$ Stromdichte

unendlicher Leiter $\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{\vec{I}\times\vec{r}}{r^2}$

- Leiter ist unendlich ausgedehnt
- $\vec{r}$ ist der rechtwinkelige Abstandsvektor vom Leiter

endlicher Leiter $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\frac{L}{\sqrt{L^2+4r^2}}$

- Im Abstand r vom Leiter, der oberhalb unt unterhalb vom Projektionspunkt von $\vec{r}$ noch jeweils $\frac{L}{2}$ lang ist.

Permeabilität $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\frac{N}{A^2}$

Kraft auf zwei Leiter mit entgegengesetzten gleichen Strömen $F = L\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I^2}{r}$

magnetisches Moment $\vec{m} = I \cdot A \cdot \vec{e}_n$

Drehmoment $\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B}$

- I Strom durch Flächenrand
- A umschlossene Fläche
- $\vec{e}_n$ Einheitsvektor auf Fläche

Vergleich von elektrischen und magnetischen Dipolen

	$\vec{T}$ im Feld	W_{pot}	Kraft auf Dipol
$\vec{m}$	$\vec{m} \times \vec{B}$	$-\vec{m}\vec{B}$	$\left(\vec{m}\vec{\nabla}\right)\vec{B}$
$\vec{p}_{el}$	$\vec{p}_{el} \times \vec{E}$	$-\vec{p}_{el}\vec{E}$	$\left(\vec{p}_{el}\vec{\nabla}\right)\vec{E}$

Generator $U = \int_0^l \vec{E}d\vec{r} = -vBl$

- $qE - qvB = 0$

2.3 Eigenschaften des Magnetfeldes im Vakuum

Magnetischer Fluss $\Phi = \int_A \vec{B} d\vec{A}$

- $[\Phi] = 1Wb = 1Weber = 1Vs = 1Tm^2$

Quellenfreiheit von Magnetfeldern

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

- 4. Maxwellsche Gleichung

Zirkulation $\Gamma = \oint_{\partial A} \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 \int_A \vec{j} d\vec{A} = \mu_0 I$

- Das geschlossene Wegintegral ist gleich dem eingeschlossene Strom
- Ampere'sche Gesetz
- $\text{rot}\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$

Spulenfeld $B = \mu_0 n I$

- $n = \frac{N}{L}$ Windungsanzahl pro Spulenlänge
- gilt im Spuleninnern

Biot-Savart $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} \left[d\vec{l} \times \vec{r} \right]$

- $\vec{B} = \int_{L_1}^{L_2} d\vec{B}$

2.4 Stoffe im Magnetfeld

Magnetfeld $\vec{B}_{mit} = \vec{B}_{ohne} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \left(\vec{H}_0 + \vec{M} \right)$

- $\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$

Magnetisierung

$$\vec{M} = \frac{i \cdot n}{l} = \frac{\text{Magnetisches Momet}}{\text{Volumen}} = \frac{\chi}{\mu_0} \vec{B}$$

- i Ampere'sche Kreisströme
- $[M] = 1 \frac{A}{m}$

magnetische Permeabilität $\mu = \frac{B_{mit}}{B_{ohne}}$

magnetische Suszeptibilität $\chi_m = \mu - 1$

- ist eine Funktion von
  - Temperatur
  - Stärke des erregenden Feldes
  - Vorgeschichte des Stoffes

Stoff kategorien

diamagnetisch $\mu < 1$

- diese Eigenschaft ist in allen Stoffen temperaturunabhängig vorhanden. Sie wird nur meistens durch andere Effekte überlagert

paramagnetisch $\mu > 1$

- $\chi_m = \frac{\mu_0 M}{B_0} = \frac{\mu_0}{3} \frac{m^2 n}{kT}$
- $M = \frac{1}{3} \frac{m^2 B_0 n}{kT}$

ferromagnetisch $\mu \gg 1$

- ist stark temperaturabhängig.

2.5 Ferromagnetische Stoffe

Permeabilität bis zu 10^5

magnetische Domänen (auch *Weiß'schen Bezirke*)
Dieses sind Bereiche innerhalb von Permanentmagneten, die durch atomare Felder im Bereich von 500 Tesla gleich ausgerichtet sind. Durch Einwirkung von außen lassen sich mehrere dieser Bereiche in ihrer Ausrichtung drehen, bzw. sich die Wände zwischen ihnen bewegen. So erhält das Material ein nach außen wirksames Magnetfeld.

- Größe 10^{-3} bis 10^{-1}m Länge

Blochwände sind Grenzen zwischen Weiß'schen Bezirken, also Bereichen mit unterschiedlicher magnetischer Orientierung.

Hysteresekurve $H \Rightarrow M$
Dies ist ein Diagramm, in dem die Magnetisierung M über H aufgetragen ist. In diesem Diagramm sind 2 bzw. 3 Linien übereinander vorhanden, da es bei den Materialien einen Unterschied macht, wie ihre Magnetisierung vorher war, wenn ein neuer H Wert auf sie wirkt. Aufgenommen werden sie so: H bei 0 starten und bis zum +Maximum erhöhen, bei einem noch nicht magnetisierten Material. Diese ist die Neukurve. Nun H bis -Maximum absenken, und wieder bis +Maximum erhöhen. Dies beiden Kurven sind nicht deckungsgleich, und ergeben eine Hysterese.

Sättigung M_S
Bei der Sättigung erhöht sich der Wert von $\vec{M}$ nicht weiter, da alle magnetischen Domänen bereits gleichgerichtet sind.

Remanenz M_R
Die Remanenz ist der $\vec{M}$ Wert, der sich bei einem H von 0 einstellt (nicht Neukurve).

Koerzitiv Feldstärke H_C
ist die Feldstärke H die benötigt wird, um die Magnetisierung $\vec{M}$ den Wert 0 annehmen zu lassen (nicht Neukurve).

Ummagnetisierungsverluste entstehen durch die Hysterese. Sie entsprechen der Fläche zwischen den beiden Kurven.

weichmagnetisch nennen sich die Stoffe die eine schwach ausgeprägte Hysterese besitzen (H_C und M_R klein).

Hartmagnetisch nennen sich die Stoffe die eine stark ausgeprägte Hysterese besitzen (H_C und M_R groß, $M_R \approx M_S$).

- Materialien: PermalloyFeNi, amorphe Legierungen
- Anwendungen: Transformatorblech (geringe Verluste)

2.6 Zeitliche veränderliche elektromagnetische Felder

Induktionsgesetz $U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$

1.Maxwellsches Gesetz $\oint_{\partial A} \vec{E} d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B} d\vec{A}$

- in Differentialform

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{dt}$$

Lenzsche Regel besagt, das der induzierte Strom immer seiner Ursache entgegengerichtet ist.

Selbstinduktion L mit $U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$

- $[L] = 1\frac{Vs}{A} = 1H = 1Henry$
- abhängig von der Geometrie der Spule
- Achtung: Windungszahl Berücksichtigen!
- lange Spule $L = \mu_o \frac{A}{l} N^2$
  - l Länge der Spule
  - A Querschnittsfläche
  - N Windungszahl

Einschalten $I(t) = \frac{U_0}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

- $\tau = \frac{L}{R}$
- U_o angelegt Spannung
- R Ohmischer Wiederstand in dem Kreis

Ausschalten $I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

- $\tau = \frac{L}{R}$

Energie $W = \frac{L}{2} I_o^2$

Energiedichte $w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}$

2.7 Wechselspannung

Trafo $\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$

- Idealer Trafo
  - Kopplungsfaktor = 1 (Anteil des B Feldes das durch beide Spulen geht)
  - Windungen ohne ohm'schen Widerstand
- $\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$
- Ein Widerstand R_{sec} auf der Sekundärseite erscheint auf der Primärseite mit R_{prim}

$$R_{prim} = R_{sec}\left(\frac{n_{prim}}{n_{sec}}\right)^2$$

Effektivwerte sind die Spannungs und Stromwerte, die als Gleichspannung die gleiche mittlere Leistung umsetzen wie die betrachtete Wechselspannung. Bei sinusförmigen Verläufen sind dies

- $U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0$
- $I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0$

Blindwiderstand setzt im zeitlichen Mittel keine Leistung um. Er gibt die aufgenommenen Leistung immer wieder ab.

- $R_L = \omega L$ mit Phasenlage $\varphi = -\frac{\pi}{2}$
- $R_C = \frac{1}{\omega C}$ mit Phasenlage $\varphi = +\frac{\pi}{2}$
- solche Wiederstände nennen sich "wattlos"

Komplexer Widerstand $Z = R + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) i$

- Reihenschaltung aus R, L, C
- Spanngungen und Ströme werden dann auch komplex. Betrag und Phasenlage in $ae^{i\varphi}$ sind dann Beträge und Phasen der Spannungen und Ströme
- auch *Impedanz* genannt

Komplexer Leitwert $Y = \frac{1}{R} + i\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$

- bei R, L, C Parallelschaltung
- auch *Admittanz* genannt

Resonanzfrequenz $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Wirkleistung $\overline{N} = U_{eff} I_{eff} \cos(\varphi) = \Re(U \cdot I^*)$

Blindleistung $U_{eff} I_{eff} \sin(\varphi) = \Im(U \cdot I^*)$

- bei einer rein kapazitiven und/oder induktiven Belastung ist $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$. D.h. wir haben einen leistungslosen Blindstrom

Tabelle 1: Vergleich von Schwinger in der Mechanik und der Elektrodynamik

Mechanik		Elektrodynamik	
Feder	$W_{pot} = \frac{1}{2}Dx^2$	Kondensator	$W_{el} = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$
Masse	$W_{kin} = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$	Induktivität	$W_{mag} = \frac{1}{2}L\dot{q}^2$
	q	x	
	$\dot{q} = I$	$\dot{x} = v$	
	C	$\frac{1}{D}$	
	L	m	

Wirkkomponente des Strom $I \cos\varphi$

Blindkomponente des Strom $I \sin\varphi$

Vergleich mit Mechanik siehe Tabelle 1

gedämpfte Schwingung $\sum U = 0 \Rightarrow L\ddot{I} + R\dot{I} + \frac{1}{C}I = 0$

- $I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega t + \varphi)$
- $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \omega_0\sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}}$
- $\tau = \frac{2L}{R}$
- $Q = \tau\omega_0 = 2\pi\frac{\tau}{T}$ Gütefaktor des Oszillators
- $\varphi = \arctan\left(-\frac{R}{2\omega}\right)$
- nur für schwache Dämpfung

erzwungene Schwingung $L\ddot{I} + R\dot{I} + \frac{1}{C}I = \dot{U}$

- gegeben: $U(t) = U_0 \cos(\omega t)$
- $I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi)$
- $I_0 = \frac{\omega U_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{C} - \omega^2 L\right)^2 + (\omega R)^2}}$
- $\varphi = \arctan\left(\frac{\frac{1}{C} - \omega^2 L}{\omega R}\right)$

Energiebetrachtung $E_{osz} = \frac{1}{2}\left(LI^2 + \frac{q^2}{C}\right)$

$$\frac{d}{dt}E_{osz} = N - N_{dis}$$

- $N = UI$ hineingesteckte Leistung
- $N_{dis} = RI^2$ *dissipierte*, d.h. verbrauchte Leistung

Rückkopplung Ein Teil der Energie wird abgezweigt, verstärkt dem System wieder zugeführt

Mitkopplung dies geschieht in Phase $\Rightarrow$ Oszillation

Gegenkopplung dies geschieht um 180° Phasenverschoben $\Rightarrow$ Dämpfung

2.8 Dipolstrahlung

Dipolmoment $p(t) = l \cdot q_0 \sin(\omega t)$

- Es handelt sich um Transversalwellen
- linear polarisiert

Nahfeld $E \sim \frac{1}{r^3}$

- $r < \lambda$

Fernfeld $E \sim \frac{1}{r}$

- $r \gg \lambda$
- $\left|\vec{E}_s\right| = \frac{\omega^2}{c^2}p_o\frac{\sin\Theta}{4\pi\varepsilon_0 r}$
- $c = \frac{|E_s|}{|B_s|}$
- Im Fernfeld E, B in Phase, allerdings senkrecht aufeinander.

Ausbreitungsgeschwindigkeit $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\mu\varepsilon_0\varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$

- Brechungsindex $n = \frac{c}{v} \approx \sqrt{\varepsilon_r}$

Energieinhalt $w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0}{2}\vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2 = \varepsilon_0\vec{E}^2 = \frac{1}{\mu_0}B_0^2$

Leistungsdichte auch *Intensität*, ist die Menge Energie die pro Zeiteinheit durch eine Einheitsfläche senkrecht hindurchtritt.

Poynting Vektor $\vec{S} = \varepsilon_0 c^2 \left[\vec{E} \times \vec{B}\right]$

- $\vec{S}$ zeigt in Ausbreitungsrichtung
- $\left|\vec{S}\right|$ zeigt Intensität an.
- $\left[\vec{S}\right] = 1\frac{W}{m^2}$

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

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

Tabelle 2: Die Maxwellschen Gleichungen

	Integralform	Differentialform
1.	$\oint_{\partial A} \vec{E} d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B} d\vec{A}$	$\mathrm{rot}\vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
2.	$\oint_{\partial A} \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{E} d\vec{A}$	$\mathrm{rot}\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
3.	$\oint_{\partial V} \vec{E} d\vec{A} = \frac{q}{\varepsilon_0}$	$\mathrm{div}\vec{E} = \vec{\nabla}\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
4.	$\oint_{\partial V} \vec{B} d\vec{A} = 0$	$\mathrm{div}\vec{B} = \vec{\nabla}\vec{B} = 0$

2.9 Tabellen

Verschiebungsstrom $I_d = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{E} d\vec{A}$

- kompensiert in Maxwell 2. die Flächenwahl

Maxwellschen Gleichungen siehe Tabelle 2.

Parallel- vs. Reihenschaltung siehe Tabelle 3 auf der nächsten Seite.

- falls in den mit “alle gleich” Gekennzeichneten Zeilen nicht alle X_i’s gleich sind, ist das ein Widerspruch.

3 Optik

Frequenzschärfe $\Delta\nu$

- $T \cdot \Delta\nu \approx 1$
- T Ausstrahlungsdauer
- $T \cdot E \approx h$
- $E = \Delta\nu h$ Energie

Interferenz $A_R^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

- A_R resultierende Amplitude
- A_i, φ_i Amplitude und Phase von Quelle i
- Spezialfall mit Intensität $I_1 = I_2 = I_0 = A^2$
  $I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)$

Kohärentes Licht hat feste Phasen und Amplitudenbedingung

- im allgemeinen nur, wenn die Ausdehnung der Lichtquelle $a \ll \lambda$
- bei Lasern auch für $a \gg \lambda$ koheräntes Licht

3.1 Beugung

Doppelspalt Abstand d, Spaltdicke wesentlich kleiner als d

Maxima $\sin\theta = \frac{n\lambda}{d}$

Minima $\sin\theta = \frac{(2n+1)\lambda}{2d}$

Einzelspalt der Ausdehnung d

Minima $\sin\theta = \frac{n\lambda}{d}$

Maxima $\sin\theta = \frac{(2n+1)\lambda}{2d}$

Auflösungsvermögen $k \approx \frac{\lambda}{n \cdot \sin\alpha}$

- α Aperturwinkel (von Objekt aus, bis Mitte und Rand des Spalts)
- k Objektgröße, die noch aufgelöst werden kann
- n Brechungsindex

Gitter mit N Strichen und Strichabstand d

Breite des Gitters $N \cdot d$

Maxima $\sin\theta = \frac{m \cdot \lambda}{d}$

- m Beugungsordnung

Auflösungsvermögen $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\theta}{\Delta\theta} = N \cdot m$

- λ mittlere Wellenlänge
- $\Delta\lambda$ unterschie zwischen 2 unterschiedlichen Wellenlängen, der gerade noch sichtbar ist

Prismenspektralapparat Einfallwinkel relativ zum Lot α, brechender Winkel φ, Ausfallswinkel relativ zum Einfallswinkel β

dünnes Prisma $\beta \approx (n-1)\varphi$

Auflösungsvermögen $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\theta}{\Delta\theta} = b\frac{dn}{d\lambda}$

- senkrechter Einfall der Breite h auf Prisma mit senkrechter Grundfläche b
- $\frac{dn}{d\lambda}$ ist die Dispersion des Prismenmaterials

Dispersion des Prismenmaterials $\frac{dn}{d\lambda}$

- Wie hängt n von λ ab

normale Dispersion $\frac{dn}{d\lambda} > 0$

annormale Dispersion $\frac{dn}{d\lambda} < 0$

Tabelle 3: elektrische Größen und deren Verhalten in Bezug auf Reihen- und Parallelschaltung

	In Reihe	Parallel
$R_g =$	$\sum_i R_i$	$\frac{1}{\sum_i \frac{1}{R_i}}$
$L_g =$	$\sum_i L_i$	$\frac{1}{\sum_i \frac{1}{L_i}}$
$C_g =$	$\frac{1}{\sum_i \frac{1}{C_i}}$	$\sum_i C_i$
$U_{g=}$	$\sum_i U_i$	U_i (alle gleich)
$I_g =$	I_i (alle gleich)	$\sum_i I_i$
$Q_g =$	Q_i (alle gleich)	$\sum_i Q_i$

- Grobe näherung
  $n = 1 + f\frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$
  - f Materialkonstante
  - Dämpfung fehlt noch
  - Es normalerweise mehrere solche Resonanzpunkte
  - hinter dem Resonanzpunkt gibt es normalerweise einen Punkt bei dem $n < 1$ ist.
    * dies bedeutet nicht, das die Gruppengeschwindigkeit größer ist als c, sondern nur die Phasengeschwindigkeit

3.2 Brechung

Brechungsindex $n = \frac{\sin \alpha_{Vakuum}}{\sin \alpha_{Material}} = \frac{c_{Vakuum}}{c_{Material}}$

- $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \approx \sqrt{\varepsilon_r}$

Snellius'sches Brechungsgesetz

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

- Licht wird beim Eintritt in optisch dichteres Medium zum Lot hin gebrochen.
- Licht wird beim Eintritt in optisch dünneres Medium vom Lot weg gebrochen.

Totalreflexion Grenzwinkel $\sin \alpha_{gr} = \frac{n_2}{n_1}$

Doppelbrechnung hat man in einem Material, das für unterschiedliche Schwingungsebenen verschiedene ausbreitungsgeschwindigkeiten aufweist.

- mit $\frac{\lambda}{4}$ Plättchen lässt sich linear Polarisiertes Licht in Zirkuläres und wieder zurückumwandeln.
- mit $\frac{\lambda}{2}$ Plättchen lässt sich die schwingungsebene um 90° drehen

Optische Aktivität besitzt ein Stoff, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Zirkulationsrichtung des Lichtes abhängt.

- auch linear polarisiertes Licht lässt sich als überlagerung von zirkular polarisiertem Auffassen
- Bewirkt Drehung der Polarisationsebene abhängig von der in ihm zurückgelegten Strecke

3.3 Polarisation

- Ausbreitung in einer Transversalwelle

Linear Polarisiert die Schwingungsebene ist konstant

Zirkular Polarisiert hier sind die x und y Komponente des Feldvektors Phasenverschoben

- rechtszirkulares Licht / + / $\vec{E}$ rotiert im Uhrzeigersinn (von hinten von Quelle betrachtet)
- linkszirkulares Licht / - / $\vec{E}$ rotiert gegen den Uhrzeigersinn (von hinten von Quelle betrachtet)
- Elliptische Rotation, wenn:
  - Komponenten in x, y Richtung unterschiedlich groß
  - Phasenverschiebung nicht 90°

Polarisator Anordnung, zur Erzeugung polarisiertem Lichts

Analysator Anordnung zum Nachweis von Polarisiertem Licht

Melus'sches Gesetz $I(\gamma) = I_0 \cos^2(\gamma)$

- γ Winkel zwischen den beiden Polarisationsfiltern

Brewster Winkel $\tan(\phi_B) = \frac{n_2}{n_1}$

- Polarisation durch Reflexion
- ϕ_B Winkel zwischen Lot und aus n_1 Einfallenden Licht auf die Grenzfläche
- Das Reflektierte Licht ist nun Parallel zur Reflexionsschicht Polarisiert

4 Bemerkungen zur klassischen Theorie des Lichts

4.1 Dipolmodell

Lösung der Maxwellgleichung

$$\begin{aligned} E_\theta &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\ddot{p}\left(t-\frac{R}{C}\right)\cdot\sin\theta}{c^2R} \\ B_\phi &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\ddot{p}\left(t-\frac{R}{C}\right)\cdot\sin\theta}{cR} \\ 0 &= E_\phi = E_r = B_r = B_\theta \end{aligned}$$

- Retadierung $r-\frac{R}{c}$
  E, B hängen von der Historie von $\ddot{p}$ ab

Energiestrom $S_r = \frac{1}{(4\pi)^2\varepsilon_0}\frac{\sin^2\theta}{c^3R^2}\ddot{p}^2$

- mit $\ddot{p} = -\omega^2 p$
$$S = \frac{\mu_0}{16\pi^2 c}\omega^4 p^2\sin^2\theta\frac{1}{r^2}$$
-
$$\begin{aligned} \dot{W} &= \int_{\partial V} d\sigma\, S \\ &= \frac{\mu_0}{6\pi c}\omega^4 p^2 \\ &= \frac{\ddot{p}^2}{6\pi\varepsilon c^3} \end{aligned}$$

Relativistisch gilt mit $\beta = \frac{v}{c}$

$$\begin{aligned} E_\theta &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\ddot{p}\left(t-\frac{R}{C}\right)\cdot\sin\theta}{c^2R}\cdot\frac{1}{(1-\beta\cos\theta)^3} \\ B_\phi &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\ddot{p}\left(t-\frac{R}{C}\right)\cdot\sin\theta}{cR}\cdot\frac{1}{(1-\beta\cos\theta)^3} \\ 0 &= E_\phi = E_r = B_r = B_\theta \end{aligned}$$

- $S = \frac{\mu_0}{16\pi^2 c}\ddot{p}^2\frac{\sin^2\theta}{r^2}\cdot\frac{1}{(1-\beta\cos\theta)^6}$

Güte $Q = 2\pi\frac{\text{Energieinhalt des Oszillators}}{\text{Energieverlust in einer Periode}} = 2\pi\frac{W}{\dot{W}\tau}$

- Holraumresonator
$$Q = \frac{6\pi m\varepsilon_0 c^3}{e^2\omega}$$
- für Elementarladung im Atom
$$Q = \frac{3mc^2\varepsilon_0\lambda}{e^2} = \frac{3}{4\pi}\frac{\lambda}{r_0}$$
- $W(t) = W_0 e^{-\gamma t}$
- Dämpfungskonstante $\gamma = \frac{\omega}{Q}$
- $\left\langle\dot{W}\right\rangle = \frac{e^2 z_0\omega^4}{12\pi\varepsilon_0 c^3}$

Klassischer Elektronenradius Abstand, für den die potentielle Energie eines Elektrons im Feld eines 2. ten Elektrons gerade gleich der Ruheenergie ist

$$r_0 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mc^2} = 2,82\cdot 10^{-15}m$$

4.2 Schwarzkörperstrahlung

Leuchtdichte $B = \frac{I}{F}$

- Intensität pro Fläche
- Ist für alle Betrachtungswinkel bei Warmen körpern konstant

Reflexionsvermögen $R = \frac{E_R}{E_0}$

- Reflektiertes im Verhältniss zu einfallenden Licht

Absorptionsvermögen $A = \frac{E_A}{E_0}$

- Absorbiertes im Verhältniss zu einfallenden Licht
- $R + A = 1$

Kirchhoff'sches Strahlugsgesetz $\frac{E_w}{E_s} = \frac{A_w}{A_S}$

- A_i Absorptionsvermögen
- E_i Emittierte Strahlung
- w Weisse Fläche
- s Schwarze Fläche

Schwarzer Körper $A_s = 1$

Totaler Wirkungsquerschnitt $\sigma = -\frac{\dot{W}}{S}$

- σ =gestreute Energie (abgestrahlte Energie) / Zeiteinheit PRO einfallender Energie / Zeit- und Flächeneinheit
- $-d\dot{W} = \sigma(\omega)\frac{dS(\omega)}{d\omega}d\omega$

Strahlungsgesetz von Rayleigh-Jeans
$\frac{dS}{d\omega} = \frac{\nu^2}{c^2}kT$

- Beschreibt die Strahlungsflussdichte (je Polarisationsdichte) bei *niedrigen* Frequenzen gut, aber es kann bei hohen Frequenzen nicht korrekt sein, da Integration über alle Frequenzen eine unendlich hohe Energiedichte ergeben würde ⇒ ultraviolett Kathastrophe

Wien'sches Strahlungsgesetz $\frac{dS}{d\nu} \approx c_1\nu^3 e^{-\frac{c_2\nu}{kT}}$

- c_1, c_2 Konstanten
- Experimentell gefundene Formel

Wien'sches Verschiebungsgesetz $\lambda_{max}T = \text{konst} = 0,2898\,\text{cm}\,\text{K}$

- Beschreibt die Wellenlänge mit der maximalen Intensität relativ zur Temperatur des Strahlers

Plank'sches Strahlungsgesetz $\frac{dS}{d\nu} = \frac{\nu^2}{c^2}\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} = \frac{c^2 h}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$

- *Plak'sches Wirkungsquantum* $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} Js$
- für $h\nu \gg kT$ geht über in Wiensches Strahlungsgesetz
- für $h\nu \ll kT$ geht über in Rayleigh-Jeans Strahlungsgesetz
- Photon hat Masse $m_{ph} = \frac{h\nu}{c^2}$ wenn es in Bewegung ist

Stefan-Boltzmann-Gesetz $S = \sigma \cdot T^4$

- $\sigma = \frac{2\pi^2 k^4}{15 c^2 h^3} = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4}$

Spektrale Energiedichte $u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$

$$u(\nu, T) \cdot d\nu = \frac{\text{Strahlungeenergie im Frequenzbereich } [\nu, \nu + d\nu]}{\text{Volumen}}$$

4.3 Bohrsches Atommodell

1. e^- im Atom auf Kreisbahn um den Kern unter Einwirkung der Coulombkraft nach den Gesetzen der Klassischen Mechanik
2. Es gibt nich unendlich viele Bahnen, sondern nur *stationäre* Bahnen, dür die der Drehimpuls die Werte
$$L = n\frac{h}{2\pi}$$
mit $n \in \mathbb{N}$ (Quantenzahl) annhemen kann.
3. Auf den stationären Bahnen strahlt das e^- nicht, obwohl es eine beschleunigte Bewegung ausführt
4. Frequenz der bei einem übergang zwischen 2 stationären Zuständen abgestrahlten oder absorbierten e.m. Strahlung genübt der Bedingung
$$\nu = \frac{E_m - E_{m'}}{h}$$

Photoeffekt $\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - eU = h\nu - \Phi$

- Φ ist die Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Material
- v ist die Geschwindigkeit der Elektronen nach dem Austritt
- ν ist die Frequenz der Photonen die auf das Material auftreffen

Index

Äquipotentialflächen, 3

Absorptionsvermögen, 13
Admittanz, 9
Ampere'sche - Kreisströme, 7
Analysator, 12
Arbeit, 6
Auflösungsvermögen, 11
Ausbreitungsgeschwindigkeit, 10
Ausschalten, 9

Beugung, 11
Beugungsordnung, 11
Bildladung, 2
Biot-Savart, 8
Blindkomponente, 10
Blindleistung, 9
Blindwiederstand, 9
Brechung, 12
Brechungsindex, 10, 12
Brewster Winkel, 12

Coulomb, 2
Coulombpotential, 3
Coulombsches Gesetz, 2
Curie-Verhalten, 5

Deklination, 7
Dielektrische Verschiebbarkeit, 4
Dielektrische Verschiebung, 2
Dielektrizitätskonstante, 4
Dipol, 3
Dipolmodell, 13
Dipolmoment, 3, 4
Dipolstrahlung, 10
Dispersion, 11
dissipierte Leistung, 10
Dissoziation, 6
Doppelbrechnung, 12
Doppelspalt, 11
Draht, 5
Drehmoment, 7
Drift, 1
Driftgeschwindigkeit, 5

E-Feld, 2
Effektivwerte, 9
Einschalten, 9
Einzelspalt, 11
Elektrische Feldstärke, 2
elektrische Suszeptibilität, 4
Elektrischer Strom, 1
Elektrolyten, 6
Elektronenradius, 13
Elektronenvolt, 3
Energie, 9
Energiedichte, 3, 9, 14
Erdmagnetfeld, 7
erzwungene Schwingung, 10

Faraday-Käfig, 2
Feldstärke, 2
Fernfeld, 3
Flächenladungsdichte, 2
Fluss, 2
Frequenzschärfe, 11

Güte, 13
Gütefaktor, 10
Gauß'scher Satz der Elektrostatik, 2
gedämpfte Schwingung, 10
Gegenkopplung, 10
Gitter, 11

Hall-Effekt, 7
Hall-Konstante, 7
Hartmagnetisch, 9
Hysteresekurve, 8

Impedanz, 9
Induktionsgesetz, 9
Influenz, 2
Inklination, 7
Intensität, 10
Interferenz, 11
Ionenleitung, 6

Kapazität, 2
Kirchhoff'sches Gesetz, 6
Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz, 13
Klitzing-Konstante, 7
Knoten, 6
Knotenregel, 6
Koerzitiv Feldstärke, 8
Kohärentes Licht, 11
Kondensatorenergie, 3
Kondensatorentladung, 6
Kugelkondensator, 3

Ladung, 2
Ladungsdichte, 2, 4
Leistung, 6
Leistungsdichte, 10
Leitfähigkeit, 5
Lenzsche Regel, 9
Leuchtdichte, 13
Linear Polarisiert, 12
Lorentzkraft, 6

Magnetisch
    Ummagnetisierung, 9
Magnetische
    Hysteresekurve, 8
    Koerzitiv Feldstärke, 8
    Remanenz, 8
    Sättigung, 8
    Weisschen Bezirke, 8
magnetische
    Domänen, 8

magnetische Permeabilität, 8
magnetische Suszeptibilität, 8
Magnetisierung, 8
Maschen, 6
Maschenregel, 6
Maxima, 11
Melus'sches Gesetz, 12
Mitkopplung, 10

Ohm'sches Gesetz, 5
Optik, 11
Optische Aktivität, 12

paraelektirsche Suszeptiblität, 5
Parallelschaltung
    Kondensator, 3
    R, 6
Permeabilität, 7, 8
Photoeffekt, 14
Photon Masse, 14
Plank'sches Strahlungsgesetz, 14
Plank'sches Wirkungsquantum, 14
Plattenkondensator, 3
Polarisation, 4, 12
Polarisator, 12
Polarisierungsladungdichte, 4
Pole, 7
Poynting Vektor, 10
Prisma, 11
Prismenspektralapparat, 11

Rückkopplung, 10
Raumwelle, 10
Rayleigh-Jeans, 13
Reflexionsvermögen, 13
Reihenschaltung
    Kondensator, 3
    R, 6
relative Dielektrizitätskonstante, 4
Remanenz, 8

Sättigung, 8
Schwarzer Körper, 13
Schwarzkörperstrahlung, 13
Selbstinduktion, 9
Snellius'sches Brechungsgesetz, 12
Spannung, 2, 3
Spannungsmessung, 6
Spektrale Energiedichte, 14
spezifischer Widerstand, 5
Spulenfeld, 8
Stefan-Boltzmann-Gesetz, 14
Strom, 1, 5, 6
Strommessung, 6
Stromrichtung, 6
Supraleiter, 6
Suszeptibilität, 4, 8
Suszeptiblität, 5

technische Stromrichtung, 6
Totalreflexion, 12
Trafo, 9

Ummagnetisierung, 9

Verschiebbarkeit, 4
Verschiebung, 2
Verschiebungsstrom, 11

Wattlos, 9
Weichmagnetisch, 9
Weisschen Bezirke, 8
Widerstand, 5
    spezifischer, 5
Wien'sches Strahlungsgesetz, 13
Wien'sches Verschiebungsgesetz, 13
Wirkkomponente, 10
Wirkleistung, 9

Zirkular Polarisiert, 12
Zirkulation, 8
Zyklotron, 7