Kapitel 5

Elektrizität und Magnetismus

5.1 Elektrostatik und Punktladung

5.1.1 Ladung und Ladungserhaltung

Reibungselektrizität

Elektrische Phänomene waren schon im Altertum bekannt. Reibt man Bernstein (griechisch: elektron) mit einem Tuch, so zieht es Federn und Strohstäbchen an. Ursache der Reibungselektrizität:

Reibt man zwei unterschiedliche Isolatoren aneinander, so können elektrische Ladungen von Material 1 auf Material 2 übertragen werden.

Die elektrische Ladung

Einheit der elektrischen Ladung Q:

[Q] = 1C = 1 Coulomb

Definition über die elektrische Stromstärke, siehe später.

EIGENSCHAFTEN ELEKTRISCHER LADUNG

- 1. Es gibt positive und negative elektrische Ladungen.
- 2. Ladungen üben aufeinander Kräfte aus. Ungleichnamige Ladungen (unterschiedliche Vorzeichen) ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab.
- 3. Es gilt die LADUNGSERHALTUNG.

DIE SUMME DER LADUNGEN IN EINEM ABGESCHLOSSENEN SYSTEM IST KONSTANT.

- Dies gilt sogar, wenn Ladungen erzeugt oder vernichtet werden. Aufgrund der Paarbildung entstehen ein Elektron (neg. Ladung) und ein Positron (pos. Ladung) gleichzeitig.
- Es gilt die LADUNGSQUANTISIERUNG.
 Ladung tritt immer nur in Form von ganzzahligen Vielfachen der sogenannten

Elementarladung

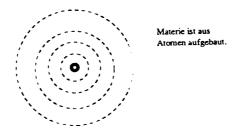
$$e = 1.602 \cdot 10^{-19} C$$
 auf.

5. Ladungen verhalten sich ADDITIV.

Die Gesamtladung eines Systems ist gleich der Summe der enthaltenen Einzelladungen:

$$Q_{ges} = \sum_{i} Q_{i}$$

Mikroskopische Deutung



ATOME:

- 1. ATOMKERN bestehend aus:
 - (a) Neutronen, Ladung = 0
 - (b) Protonen, Ladung = +e
- 2. ATOMHÜLLE, bestehend aus:
 - (a) Elektronen, Ladung = -e

Ein Atom besitzt genausoviele Elektronen wie Protonen. Es ist daher elektrisch neutral. (Gesamtladung = 0)

Atome, die ein oder mehrere Elektronen (Symbol: e^-) zuviel oder zu wenig haben (d.h. $Q_{ges} \neq 0$) heißen Ionen.

 $Q_{ges} > 0$ Kationen

 $Q_{ges} < 0$ Anionen

Festkörper, in denen die Ladungsträger unbeweglich (ortsfest) sind, heißen Nichtleiter oder ISOLATOREN.

Festkörper, die bewegliche Ladungsträger enthalten (z.B. Metalle) heißen LEITER. Bei Metallen ist ein Teil der enthaltenen Elektronen beweglich.

Folge: In Leitern können Ströme von Ladungsträgern "fließen", der sogenannte elektrische Strom I.

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$[I] = \frac{[Q]}{[I]} = 1 \frac{C}{s} =: 1 A$$
 1 Ampere.
 $\Rightarrow 1 C = 1 As$

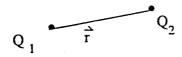
5.1.2 Kräfte auf Punktladungen: Coulombsches Gesetz

zur Erinnerung: Gravitationsgesetz

$$F_G = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Die Richtung der Kraft ist längs der Verbindungslinie beider Massenpunkte und stets anziehend.

Jetzt findet man ganz analog:



 $F_C=rac{1}{4\pi\epsilon_0}rac{Q_1Q_2}{r^2}$ Coulombsches Gesetz F_C : Coulomb Kraft oder elektrostatische Kraft, mit

 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ elektrische Feldkonstante. Auch allg. Dielektrizitätskonstante oder auch Dielektrizitätskonstante des Vakuums genannt.

Die Richtung der Kraft ist längs der Verbindungslinien beider Ladungen und kann anziehend oder abstoßend sein (je nach Vorzeichen von Q_1 und Q_2).

$$\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

 $ec{F}_C\colon$ Kraft auf Q_2 und Q_1 .

हैं: Einheitsvektor (gibt Richtung an).

5.1.3 Das elektrische Feld

Definition

Man führt das elektrische Feld der Punktladung Q_1 ein:

$$\vec{E}(\vec{r}) = rac{\vec{F}_C}{Q_2} = rac{1}{4\pi\epsilon_0} rac{Q_1}{r^2} \quad rac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Kraft auf eine Probeladung q durch Q_1 (am Ort \vec{r}):

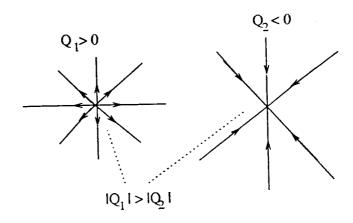
$$\vec{F}(\vec{r}) = \vec{E}(\vec{r}) \, q$$

 $ec{E}(ec{r})$: elektrische Feldstärke

Darstellung el. Felder $\vec{E}(\vec{r})$ durch Feldlinien

- Feldlinien zeigen stets in Richtung des elektrischen Feldes, das heißt $\vec{E}(\vec{r})$ bildet eine Tangente an Feldlinien. Daher entspricht die Richtung der Feldlinien der Richtung der Kraft auf eine positive Probeladung.
- Feldlinien beginnen und enden an elektrischen Ladungen:
 - beginnen an positiven Ladungen

- enden an negativen Ladungen
- ullet Feldlinien schneiden sich nie (da Kraft auf q in jedem Punkt $ec{r}$ eindeutig).
- Die Dichte der Feldinien entspricht der elektrischen Feldstärke



5.1.4 Potentielle Energie, Potential und Spannung

Arbeit im elektrischen Feld

Kraft auf eine Punktladung q:

$$\vec{F}_C = q \, \vec{E}$$

 \Rightarrow Um Ladung im elektrischen Feld unbeschleunigt zu bewegen, ist eine Kraft $\vec{F}=-\vec{F}_C=-q\,\vec{E}$

gegen die Coulombkraft aufzubringen.

⇒ Die im elektrischen Feld (gegen die Coulombkraft) verrichtete Arbeit:

$$W = \int \vec{F} d\vec{s} = -q \int \vec{E} d\vec{s}$$

Arbeit und potentielle Energie im Feld einer Punktladung ${\cal Q}$

Für die potentielle Energie ist ein Bezugspunkt mit der potentiellen Energie = 0 erforderlich, gesetzt für $r\to\infty$

 \Rightarrow Die potentielle Energie $E_{pot}(r)$ ist die erforderliche Arbeit, um q von $r' \to \infty$ auf r zu bringen.

$$E_{pot}(r) = -q \int_{\infty}^{r} \vec{E} \, d\vec{s}$$

$$= -q \int_{\infty}^{r} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \, dr$$

$$= -\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^{r} \frac{1}{r^2} \, dr$$

$$= -\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_{\infty}^{r}$$

$$=-\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0}\left[-\frac{1}{r}-\left(-\frac{1}{\infty}\right)\right]$$

$$\Rightarrow E_{pot}(r) = +\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r}$$

potentielle Energie von q im Feld der Punktladung Q

elektrostatisches Potential φ

Um unabhängig von der Größe der Probeladung q zu werden, definiert man das elektrostatische Potential φ :

$$\varphi(r) = \frac{E_{pot}(\vec{r})}{q}$$

Das Potential ist potentielle Energie pro Ladung. Die Arbeit. um q von \vec{r}_1 nach \vec{r}_2 zu bringen:

$$W = E_{pot}(\vec{r}_2) - E_{pot}(\vec{r}_1)$$
$$= q(\varphi(\vec{r}_2) - \varphi(\vec{r}_1))$$

$$W = q \Delta \varphi$$

Arbeit im elektrischen Feld Die Potentialdifferenz $\Delta \varphi = \varphi(\vec{r}_2) - \varphi(\vec{r}_1)$ nennt man auch die elektrische Spannung Uzwischen \vec{r}_1 und \vec{r}_2 .

$$[U] = 1 \frac{J}{C} = 1 V = 1 Volt$$

$$\Rightarrow 1 J = 1 VC = 1 VAs$$

$$1 J = 1 \frac{kg m^2}{r^2}$$

Das elektrostatische Feld

Das elektrostatische Feld ist (wie das Gravitationsfeld) konservativ. Die Potentialdifferenz $\Delta \varphi = U$, W und ΔE_{pot} sind unabhängig vom gewählten Weg.

5.1.5 Äquipotentialflächen und Äquipotentiallinien

Flächen, bzw. Linien auf denen das Potential konstant ist, heißen Äquipotential-flächen (bzw. Linien). Für beliebige Wege auf einer Äquipotentialfläche gilt daher stets:

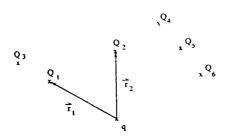
$$\Delta arphi = \int \, ec{E} \, dec{r} = 0$$

Äquipotentialflächen stehen daher in jedem Punkt senkrecht zum elektrischen Feld $ec{E}$ und damit zu den elektrischen Feldlinien.

Beispiel: Feld einer Punktladung Q:

- ullet : radial um Q auspolend
- Äquipotentialflächen: konzentrische Kupferschalen um Q als Mittelpunkt. die in jedem Punkt senkrecht auf \vec{E} stehen.

5.1.6 Systeme von mehreren Punktladungen



Welche Gesamtkraft üben die Ladungen Q_i (i = 1, ..., n) auf die Probeladung q aus ?

Superpositionsprinzip

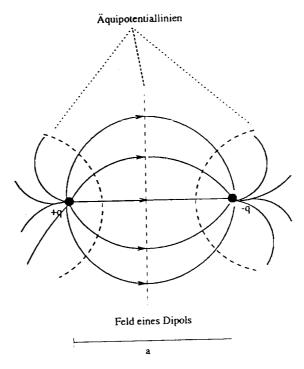
$$\vec{F}_{ges} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i} = q \frac{1}{4\pi\epsilon_{0}} \sum_{r_{i}^{2}} Q_{i} \frac{\vec{r}_{i}}{|\vec{r}_{i}|}$$

ganz analog gilt auch für das elektrische Feld:

$$\vec{E}_{ges} = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_{i}$$

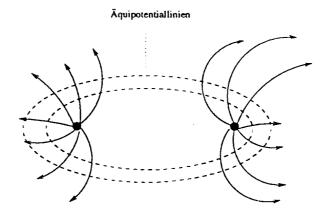
elektrisches Feld eines Dipols

Ein Dipol ist ein System aus 2 entgegengesetzt gleichen Ladungen +q und -q im Abstand a.



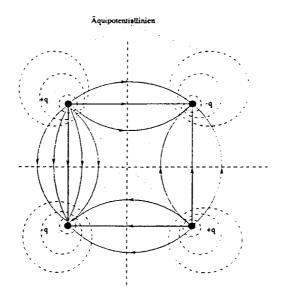
 $\vec{p} = q \vec{a}$ sog. elektrisches Dipolmoment (zeigt von \oplus nach \ominus)

Feld zweier gleicher Ladungen



Quadpol

Der Quadpol ist eine quadratische Anordnung von 4 Punktladungen in Form von 2 entgegengesetzt gleichen Dipolen.



5.1.7 Potentielle Energie eines Systems von Punktladungen

Wie berechnet man die potentielle Gesamtenergie E_{pot} ?

Trick: Eine Ladung nach der anderen aus dem Unendlichen holen, bis das System aufgebaut ist und dann mit der erforderlichen Energie W_i addieren:

$$E_{pot} = W_1 + W_2 + W_3 + ...$$

Die Reihenfolge ist egal!

Beispiel:

1. Hole Q_1 aus dem Unendlichen

2. Hole
$$Q_2$$
: $W_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1Q_2}{r_{21}}$

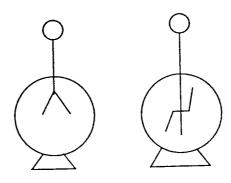
3. Hole
$$Q_3$$
: $W_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot (\frac{Q_3Q_1}{r_{31}} + \frac{Q_3Q_2}{r_{32}})$

4. Hole
$$Q_4$$
: $W_4 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot (\frac{Q_4Q_1}{r_{41}} + \frac{Q_4Q_2}{r_{42}} + \frac{Q_4Q_3}{r_{43}})$

5. ...
$$\Rightarrow E_{pot} = W_1 + W_2 + \dots$$

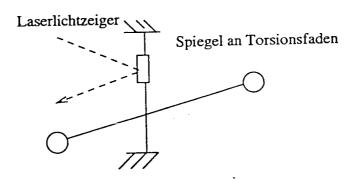
5.1.8 Messung von Ladung über Kräfte

mit dem Elektroskop



Elektrostatische Abstoßung zwischen gleichnamig geladenen Teilchen verursacht einen Zeigerausschlag.

mit der Torsionswaage



- analog zur Gravitationsdrehwaage nach Cavandish
- direkte Bestimmung der Coulomb-Kräfte

5.1.9 Bewegung von freien Ladungsträgern im elektrischen Feld

Newton: $m\vec{a} = q\vec{E}$

Vergleiche mit dem Gravitationsfeld: $m\vec{a} = \vec{F}_G$ Die Coulombkraft verrichtet Arbeit W an q: $W = \int \vec{F} \, d\vec{s} = q \int \vec{E} \, d\vec{s} = q \, \Delta \varphi = q \, U$

$$W = -q U = -\Delta E_{pot}$$

U: von q durchlaufene Spannungsdifferenz. Daher wird die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt.

$$\Delta E_{kin} = -\Delta E_{pot}$$

Für $v_0 = 0$:

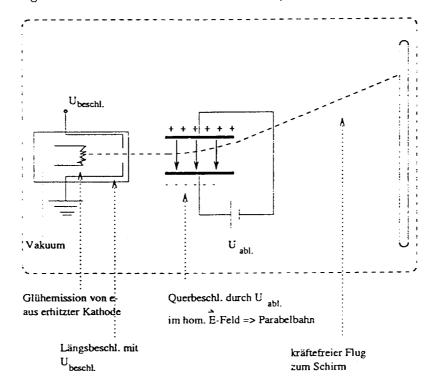
 $\frac{1}{2}m\,v^2 = |qU|$

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

falls $v \ll c$

c: Lichtgeschwindigkeit.

Anwendung: Elektronen in der Braunschen Röhre (Elektronenstrahlröhre).



In modernen Fernsehröhren wird die Ablenkung durch Magnetfelder statt durch elektrische Felder erreicht, da hier eine Ablenkung in x- und y-Richtung möglich ist.

5.2 Kontinuierliche Ladungsverteilung

5.2.1 Ladungsverteilungen und Ladungsdichte

Bisher haben wir nur Punktladungen betrachtet, nun betrachten wir auch Ladungswolken und ausgedehnte Ladungen.

Ladungsdichte ϱ :

$$\varrho(\vec{r}) = \frac{dQ}{dV} = \lim_{v \to 0} \frac{Q}{V}$$

Die Ladungsdichte ist Ladung pro Volumen. $[\varrho] = 1 \frac{C}{m^3}$ aus dem Superpositionsprinzip folgt:

• für Punktladungen:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i} \frac{q_i}{(\vec{r} - \vec{r_i})^2} \cdot \underbrace{\frac{\vec{r} - \vec{r_i}}{|\vec{r} - \vec{r_i}|}}_{Einheitsvektor}$$

 \vec{r} : Ort an dem \vec{E} gemessen wird.

 $ec{r_i}$: Orie der einzelnen Punktladungen

• für Ladungsverteilungen entsprechend:

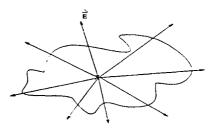
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int (\frac{dq_1}{(\vec{r} - \vec{r}_1)^2} \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\varrho(\vec{r}')}{(\vec{r} - \vec{r}_i)^2} \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV$$

5.2.2 Der elektrische Fluß und der Satz von Gauß

Wieviele Feldlinien "entspringen" einem bestimmten Volumen? Oder die Frage nach dem Fluß des elektrischen Feldes.

Der Fluß des elektrischen Feldes durch eine geschlossene Hüllfläche (Φ_E)



$$\Phi_E = \oint \vec{E} \, d\vec{A} = \oint E \, \cos \varphi \, dA$$

$$\varphi=0$$
 falls $\vec{E}\mid\mid d\vec{A}$

 \oint : Integral über die geschlossene Hüllfläche $d\vec{A}$: zeigt stets nach außen und steht \bot auf dem Flächenelement dA.

Berechnung für den Fall einer Punktladung

Wähle als geschlossene Hüllfläche eine Kugeloberfläche mit Radius r um Punktladung ${\bf q}$ als Mittelpunkt.

Vorteile:

- $|\vec{E}| = const$ auf Mittelpunkt
- $\vec{E} \mid\mid d\vec{A}$ überall auf der Hüllfläche

$$\oint \vec{E} \, d\vec{A} = \oint E \, dA \cos \alpha$$

$$= E(r) \qquad \oint dA$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \oint dA$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} 4\pi r^2$$
Sata you Conflicted Form

$$\oint \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \, d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \qquad (*)$$

$$\oint \epsilon_r \epsilon_0 \, \vec{E} \; d\vec{A} = \int \varrho \; dV$$

 ϵ_r : Dielektrizitätskonstante des Mediums. Man kann zeigen:

- 1. (*) gilt für beliebige geschlossene Hüllflächen
- 2. (*) gilt für beliebige, auch unsymmetrische Ladungsverteilung innerhalb der Hüllfläche. (Superpositionsprinzip)

Der Fluss des elektrischen Feldes durch eine beliebige geschlossenen Fläche ist gleich der Summe der eingeschlossenen Ladungen, dividiert durch ϵ_0 .

$$d\phi_E = \frac{dQ}{\epsilon_0} = \frac{\varrho \, dV}{\epsilon_0}$$

Satz von Gauß (differentielle Form)

$$div \, \vec{E} := \frac{d\phi_E}{dV} = \frac{\varrho}{\epsilon_0}$$

 $div \vec{E}$: sog. Divergenz des elektrischen Feldes (= "Quellfluß pro Volumen").

5.2.3 Anwendungen des Gaußschen Satzes

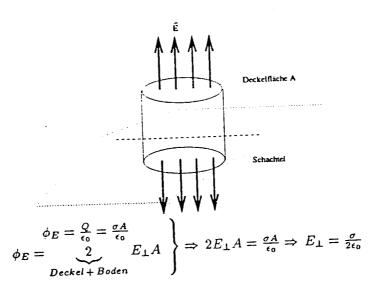
 Die unendlich ausgedehnte, homogen geladene Ebene besitzt die sog. Flächenladungsdichte,

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{Ladung}{Flaeche}$$

in der kein Punkt der unendlichen Ebene ausgezeichnet ist. Daher nennt man diese Fläche Äquipotentialfläche. Dabei steht \vec{E} an jedem Punkt der Ebene stets senkrecht auf derselben.

Wie groß ist \vec{E} ?

Dazu legen wir eine "Schachtel" durch einen Teil der Ebene:



• DER UNENDLICH LANGE, HOMOGEN GELADENE DRAHT: Längenladungsdichte

$$\lambda = \frac{Q}{l}$$

$$\vec{E}(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}$$

$$\phi(r) = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

Leiter im elektrischen Feld 5.2.4

Ein elektrischer Leiter enthält bewegliche Ladungsträger. Dies hat Folgen:

1. IM INNEREN VON LEITERN (Z.B. METALLEN) GILT IM ELEKTROSTATISCHEN FALL:

$$\vec{E} = 0$$

Begründung:

Wäre $ec{E}
eq 0$, würden Kräfte auf die Ladungen wirken \Rightarrow Ladungen bewegen sich solange, bis $\vec{E} = 0$.

2. An Leiteroberflächen steht \vec{E} stets senkrecht zur Oberfläche. Begründung:

Wäre $ec{E}$ parallel zur Oberfläche, würde dies zur Bewegung von Ladungsträgern führen, solange bis $\vec{E}_{||} = 0$.

3. SIND LEITER ELEKTRISCH GELADEN. SO BEFINDEN SICH DIE (ÜBERSCHUSS-) LADUNGEN (NAHE) AN DEN LEITEROBERFLÄCHEN.

Begründung:

Satz von Gauß: Jeder Ladung entspringt ein elektrischer Fluß. Befinden sich unkompensierte Ladungen im Leiter, so wird $\vec{E}=0 \Rightarrow$ Widerspruch zu 1.).

4. Bringt man einen Leiter in ein elektrisches Feld. so verschieben sich die beweglichen LAdungsträger solange, bis das externe elektrische Feld im Leiter kompensiert ist (siehe später: Verschiebungsdichte).

Begründung:

siehe Punkt 1.), $\vec{E} = 0$; Superpositionsprinzip.

5. Leiteroberflächen sind stets Äquipotentialflächen.

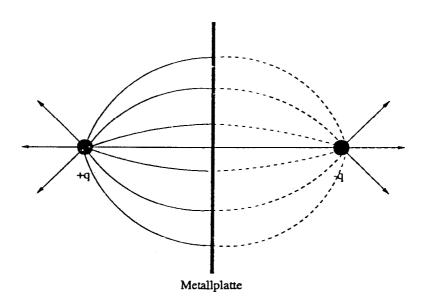
Begründung:

$$\vec{E}_{||}=0.$$

5.2.5 Influenz

Die Verschiebung von beweglichen Ladungsträgern in Leitern im äußeren elektrostatischen Feld nennt man INFLUENZ. Die so auf Leitern erzeugte Oberflächenladungen heißen INFLUENZLADUNGEN.

Ladungen vor einer elektrisch leitenden Ebene



Feld einer Ladungsanordnung vor einer unendlich ausgedehnten Ebene ist:

- im Außenraum gleich einem Feld von Ladungen und Spiegelladungen.
- im Leiter ist $\vec{E} = 0$.

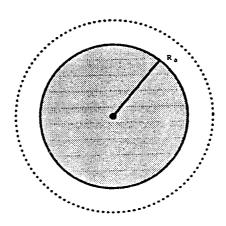
Spiegelladungen oder Bildladungen erzeugen durch:

- Spiegelung der Ladungsanordnung an Leiteroberfläche
- Wechsel des Ladungsvorzeichens

5.2.6 Abschirmung elektrostatischer Felder / Faradayscher Käfig

 $\vec{E}=0$ gilt überall im Leiter \Rightarrow dies gilt auch in ladungsfreien Hohlräumen von Leitern. Ladungen befinden sich also immer <u>nur auf den Außenflächen von Leitern</u>, die Innenflächen schließen Ladungen ein (wegen dem Satz von Gauß).

5.2.7 Das Außenfeld einer leitenden Kugeloberfläche



 $\vec{E} \perp \text{Oberfläche (Leiter)}$

 $|\vec{E}| = \text{const}$ auf der Oberfläche (wegen Symmetrie).

Satz von Gauß: $\Phi_E = \frac{Q}{\varepsilon_0}$

 $\Phi_E = 4\pi \mathbf{E} r^2 \ (r > R_0)$

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

Das Feld einer leitenden Kugel mit der Ladung q ist im Außenraum wie das Feld einer entsprechenden Punktladung q im Kugelmittelpunkt.

Allgemein gilt für Leiteroberflächen: je kleiner der Krümmungsradius r ist, desto größer wird die Feldstärke E an der Oberfläche: sogenannter Spitzeneffekt.

5.2.8 Felder kugelsymmetrischer Ladungsverteilungen

Aus Symmetriegründen und dem Satz von Gauß folgt:

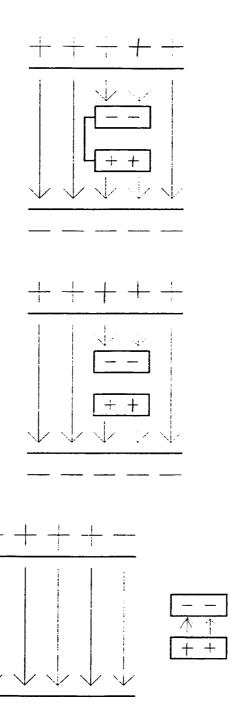
Das Außenfeld einer kugelsymmetrischen Ladungsverteilung ist gleich dem elektrischen Feld, das dadurch erzeugt würde, daß sich die gesamte Ladung im Mittelpunkt befände; aufgrund der Analogie des Gravitationsgesetzes zum Coulomb - Gesetz gilt dies auch für das Gravitationsfeld. Das Gravitationsfeld einer kugelsymmetrischen Massenverteilung ist im Außenraum gleich dem Gravitationsfeld, das dadurch erzeugt wird, daß sich die gesamte Masse im Mittelpunkt befindet.

5.3 Kondensatoren und Dielektrikum

5.3.1 Ladungsverschiebung im Plattenkondensator

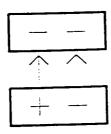
Ein Plattenkondensator besteht aus zwei parallelen, ebenen, elektrisch leitfähigen Platten mit der Fläche A und im Abstand d. Falls der Abstand nun sehr viel

kleiner ist als die latente Ausdehnung der Platten, so kann \vec{E}_{\perp} im Plattenkondensator als homogen angesehen werden, solange keine Ladungen zwischen die Platten eingebracht werden.



"Käseschachtelmethode": Satz von Gauß: $\Phi_E = E_\perp \cdot A$

außerdem:
$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma \cdot A}{\epsilon_0}$$
 $\Rightarrow \sigma = \epsilon_0 \cdot E$



Induzierte Flächenladungsdichte

Das E - Feld auf die Leiteroberfläche bewirkt die Flächenladungsdichte σ :

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E_{\perp} \tag{Skalar}$$

elektrische Verschiebungsdichte \vec{D} :

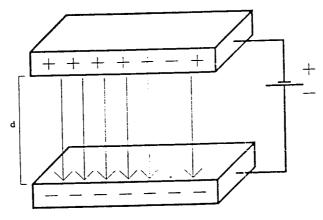
$$\vec{D} := \varepsilon_0 \vec{E}$$
 (Vektor mit der Einheit: $[1 \frac{C}{m^2}]$

5.3.2 Kapazität eines Plattenkondensators

Der Begriff der Kapazität

Ein Gebilde, bestehend aus zwei gegeneinander isolierten Leitern ("Elektroden") heißt KONDENSATOR.

Legt man zwischen den Elektroden eines Kondensators eine elektrische Spannung U an, lädt sich eine Elektrode positiv, die andere negativ auf; dabei wird die Ladung Q von einer zur anderen Elektrode transportiert.



Kapazität C eines Kondensators:

Rapazitat C emes Kondonsatoro.
$$C := \frac{Q}{U} \qquad \text{Einheit: } [C] = \frac{1C}{V} = \frac{1As}{V} = 1F \text{ (Farad)}$$

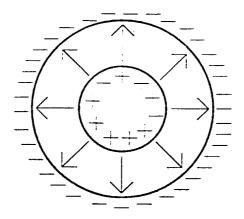
Kapazität des Plattenkondensators:

$$C = \frac{Q}{U} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

5.3.3 Kugel - und Zylinderkondensator

Kugelkondensator

Die Elektroden bestehen aus zwei leitenden, konzentrischen Kugeloberflächen mit den Radien r_1 und r_2 .



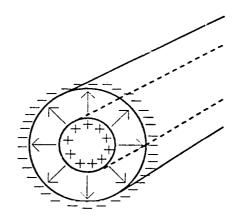
$$Q = \epsilon_0 E(r) \cdot A(r)$$
 Oberfläche einer Kugel: $O = 4\pi r^2$
$$U = \int\limits_{R_1}^{R_a} E(r) dr \qquad \Rightarrow U = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} (\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_a})$$

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

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{R_{\bullet}} - \frac{1}{R_{\bullet}}}$$

Zylinderkondensator

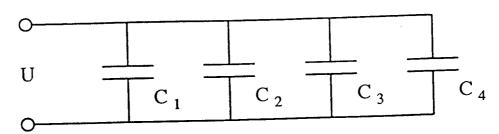
Die Elektroden bestehen aus zwei leitenden, konzentrischen Zylinderoberflächen mit den Radien r_1 und r_2 und der Länge l.



$$\begin{split} E \cdot 2\pi r l &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ E &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0 l} \cdot \frac{1}{r} \\ U &= \int_{R_*}^{R_a} E \, dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \int_{R_*}^{R_a} \frac{1}{r} dr \quad \Rightarrow U = \frac{Q}{\epsilon_0 2\pi l} \ln \frac{R_a}{R_*} \\ \Rightarrow C &= \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln(\frac{R_1}{R_a})} \end{split}$$

5.3.4 Parallel- und Serienschaltung von Kondensatoren

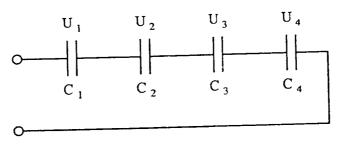
Parallelschaltung



- U ist für alle Ci gleich.
- $Q = \sum_{i} Q_{i}$
- $C_i = \frac{Q_i}{U} \Rightarrow Q_i = C_i \cdot U$

$$C_{ges} = \frac{Q_{ges}}{U} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}{U} = \frac{C_1 U + C_2 U + C_3 U + C_4 U}{U} = \sum_i C_i$$

Seerienschaltung



- Q ist für jeden Kondensator gleich
- $U = \sum_{i} U_{i}$

•
$$Q = C_i \cdot U_i \implies U_i = \frac{Q}{C_i}$$

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{U}{Q} = \sum_{i} \frac{1}{C_{i}} = \frac{1}{C_{1}} + \frac{1}{C_{2}} + \frac{1}{C_{3}} + \frac{1}{C_{4}}$$

5.3.5 Gespeicherte Energie und Energiedichte im elektrischen Feld

Beim Laden des Kondensators wird Energie gespeichert. Beim Entladen wird sie wieder frei.

Arbeit, um einen Kondensator zu laden:

Arbeit, um einen Kondensatol 24 idden:
$$W = \int_0^{U_0} dW = \int_0^{U_0} U \, dq = \int_0^{U_0} U \cdot C \, dU = C \cdot \left[\frac{U^2}{2}\right]_0^{U_0} = \frac{1}{2}CU_0^2$$

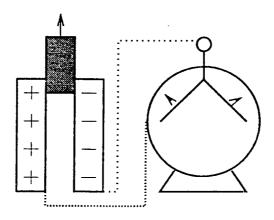
$$\Rightarrow \text{in C gespeicherte Energie (die steckt im E - Feld): } W = \frac{1}{2}CU_0^2$$

Betrachte Plattenkondensator:

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot E^2 d^2$$
$$= \frac{\varepsilon_0}{2}A \cdot d \cdot E^2 = \frac{\varepsilon_0}{2}E^2 \cdot V$$

Energiedichte des elektrischen Feldes (allgemein): $w=\frac{W}{V}=\frac{\varepsilon_0}{2}E^2$ Kraft auf eine Platte: $F=\frac{1}{2}E\cdot q$

5.3.6 Dielektrika im elektrischen Feld

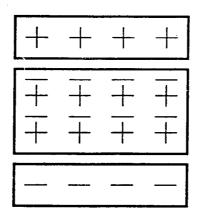


Experiment: Bringt man einen Isolator zwischen die Platten eines Plattenkondensators , sodaß er den Zwischenraum vollständig ausfüllt, so steigt C um einen Faktor ε_r an.

Im Plattenkondensator gilt dann: $C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ allgemein: $C = \varepsilon_r \cdot C_0$

 ε_r : Dielektrizitätskonstante (eine Materialkonstante ohne Einheit)

Erklärung: Die Spannung U sinkt um den Faktor ε_r , somit auch die Feldstärke \vec{E} und die Flächenladungsdichte σ . Aber es floß doch keine Ladung ab!



- Durch Polarisation der Atome / Moleküle im Dielektrikum sitzen die Polarisationsladungen an der Oberfläche des Dielektrikums.
- Sie kompensieren einen Teil der freien Ladungen auf den Kondensatorplatten.
- \Rightarrow Schwächung des \vec{E} Feldes im Kondensator. Dadurch sinkt die Spannung und erhöht sich die Kapazität.

Verschiebungspolarisation

Erst im elektrischen Feld wird das Atom oder Molekül zum Dipol.

Orientierungspolarisation

- Wasser hat bereits ein permanentes elektrisches Dipolnioment
- ullet im elektrischen Feld richtet es sich parallel zu $ec{E}$ aus: die Ausrichtung hängt hierbei von der Temperatur ab: So liegt ε_r von Eis bei 3, von Wasser jedoch bei 81.

Der Zusammenhang zwischen elektrischer Verschiebungs-5.3.7dichte und Polarisation

Flächenladungsdichte σ :

(Verschiebungsdichte) σ_F der freien Ladungen: $\sigma_F = D$ (elektrische Polarisation) σ_P der Polarisationsladungen: $\sigma_P = -P$

$$\sigma_{ges} = \sigma_F + \sigma_P = \varepsilon_0 \cdot E$$
$$\varepsilon_0 \cdot \vec{E} = \vec{D} - \vec{P}$$

 $\varepsilon_0 \cdot E$: Gesamtladung als Quelle

 $ec{D}$: elektrische Verschiebungsdichte

 \vec{P} : elektrische Polarisation (=Dipolmoment pro Volumen)

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P$$

$$= \varepsilon_0 \cdot E + \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$

$$= \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi) \cdot E$$

$$= \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot E$$

$$\Rightarrow \varepsilon_r = 1 + \chi$$

mit χ als der elektrischen Suszeptibilität

Für die Polarisation gilt:

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$

Stationäre Ströme 5.4

Elektrischer Strom und Ohmsches Gesetz 5.4.1

Der elektrische Strom I

Bisher haben wir nur ruhende Ladungen betrachtet, im folgenden geht es um bewegte Ladungen. Neu ist hierbei, daß auch im Innern eines elektrischen Leiters ein stationäres elektrisches Feld bestehen kann, sofern eine Spannungsquelle dieses aufrecht erhält.

Elektrischer Strom I = Ladung Q, die je Zeitabschnitt durch den Leiterquerschnitt

A tritt:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad [I] = 1 \frac{C}{s} = 1A$$
$$j := \frac{I}{A} = \frac{el.\,Stromstaerke}{Leiterquerschnitt}$$

127

heißt STROMDICHTE. Die technische Stromrichtung wird von @ nach @ definiert.

Widerstand und ohmsches Gesetz

Bei vielen Leitern, vor allem Metallen, gilt das Ohmsche Gesetz: I~U Elektrischer Widerstand:

$$R = \frac{U}{I} \qquad [R] = 1\frac{V}{A} = 1\Omega \quad (Ohm)$$

Elektrischer Leitwert:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{II}$$
 $[G] = \frac{1}{Q} = 1S$ (Siemens)

5.4.2 Elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand

R hängt vom Material und der Geometrie des Leiters ab: man findet für U = const:

- $I \sim A$ (Querschnittsfläche)
- $I \sim \frac{1}{l}$

$$\Rightarrow R = \frac{U}{I} \sim \frac{I}{A}$$

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$$

mit g als dem Spezifischen Widerstand (Materialkonstante)

Elektrische Leitfähigkeit:

$$\sigma = \frac{1}{\varrho}$$

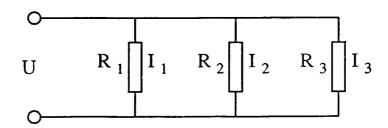
Für die Stromdichte ermittelt man somit:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{\sigma \cdot \frac{I}{A}} = \sigma \cdot \frac{A}{I} \cdot U = \sigma \cdot A \cdot E$$

$$j = \frac{I}{A} = \sigma \cdot E$$

5.4.3 Parallel- und Serienschaltung von Widerständen

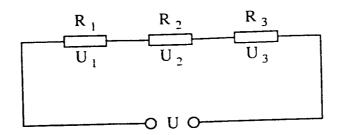
a.) Parallelschaltung



Die Spannung ist an allen R_i gleich und die Ströme addieren sich zum Gesamtstrom I.

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} + \dots = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

b.) Serienschaltung



Der Strom ist durch alle R_i gleich. Die Spannungen addieren sich zur Gesamtspannung U.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \dots = R_1 + R_2 + \dots$$

5.4.4 Widerstandsnetzwerke: Kirchhoffsche Gesetze

1. Kirchhoffsches Gesetz

An jedem Verzweigungspunkt einer Schaltung (=Knoten) muß wegen der Ladungserhaltung ebensoviel Strom zusließen wie absließen.

$$\sum_{i} I_{i} = 0 \quad sog. Knotenregel$$

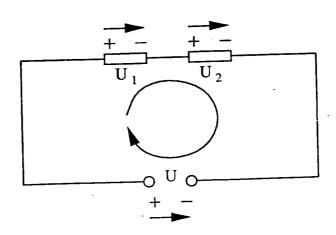
dabei gilt: zufließende Ströme: I>0 abfließende Ströme: I<0

2. Kirchhoffsches Gesetz

Die Gesamtspannung längs einer geschlossenen Masche einer Schaltung ist Null.

$$\sum_{\pmb{i}} U_{\pmb{i}} = 0 \quad sog. \ Maschenregel$$

$$|U_1| + |U_2| - |U| = 0$$



129

5.4.5 Elektrische Arbeit und Leistung

Elektrische Arbeit W

$$dW = dQ \cdot U = U \cdot I \, dt$$

Elektrische Leistung P

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot I$$

Elektrische Leistung am ohmschen Widerstand

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

Fließt ein elektrischer Strom durch einen ohmschen Widerstand, so wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt (analog: Reibung im mechanischen Fall).

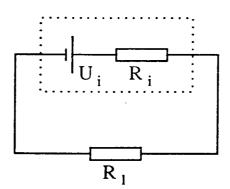
5.4.6 Spannungsquellen

Arten von Spannungsquellen

- ullet Generator (elektromagnetisch): mechanische Energie ullet elektrische Energie
- Batterie (galvanische Elemente): chemische Energie → elektrische Energie
- Solarzelle (Halbleiter): Strahlungsenergie (z.B. Licht)→ elektrische Energie

Innenwiderstand von Spannungsquellen

Jede Spannungsquelle hat einen inneren Widerstand Ri.



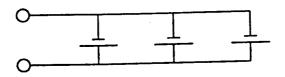
Folge:

- $U_{ext} = U_{int} R_i \cdot I$
- Quelle erwärmt sich, Leistung an R: $P_{int} = R_i \cdot I^2$
- Strom vermindert sich: $I = \frac{U}{R_L + R_t}$

$$I_{max} = \frac{U}{R_i} sog. Kurzschlusstromstaerke$$

Schaltung von Spannungsquellen

- Parallelschaltung von Spannungsquellen mit gleichem U
 - senkt $R_{i;ges}$ (Parallelschaltung der einzelnen Innenwiderstände)
 - erhöht Kurzschlußstromstärke: $I_{max} = I_{max,1} + I_{max,2} + \dots$

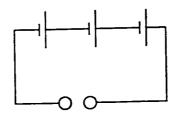


• Serienschaltung von Spannungsquellen

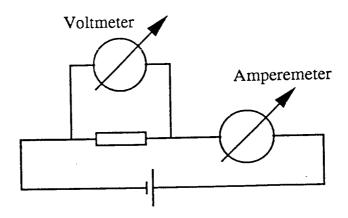
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

$$R_i = R_{i,1} + R_{i,2} + R_{i,3} + \dots$$

$$I_{max} = \frac{\sum_{i} U_{i}}{\sum_{j} R_{ij}}$$



5.4.7 Messung von Strömen und Spannungen



Auch Strommeßgeräte (Amperemeter) und Spannungsmeßgeräte (Voltmeter) haben einen Innenwiderstand R_i

Um Meßfehler zu vermeiden, muß gelten:

ullet $R_i\gg R_L$ für Spannungsmessung

129

5.4.5 Elektrische Arbeit und Leistung

Elektrische Arbeit W

$$dW = dQ \cdot U = U \cdot I \, dt$$

Elektrische Leistung P

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot I$$

Elektrische Leistung am ohmschen Widerstand

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

Fließt ein elektrischer Strom durch einen ohmschen Widerstand, so wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt (analog: Reibung im mechanischen Fall).

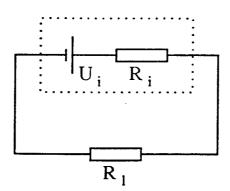
5.4.6 Spannungsquellen

Arten von Spannungsquellen

- Generator (elektromagnetisch): mechanische Energie → elektrische Energie
- Batterie (galvanische Elemente): chemische Energie → elektrische Energie
- Solarzelle (Halbleiter): Strahlungsenergie (z.B. Licht)→ elektrische Energie

Innenwiderstand von Spannungsquellen

Jede Spannungsquelle hat einen inneren Widerstand Ri.



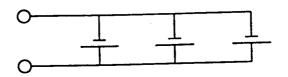
Folge:

- $U_{ext} = U_{int} R_i \cdot I$
- Quelle erwärmt sich, Leistung an R: $P_{int} = R_i \cdot I^2$
- Strom vermindert sich: $I = \frac{U}{R_L + R_L}$

$$I_{max} = \frac{U}{R_i} sog. Kurzschlusstromstaerke$$

Schaltung von Spannungsquellen

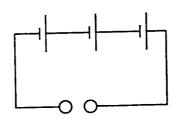
- Parallelschaltung von Spannungsquellen mit gleichem U
 - senkt $R_{i;ges}$ (Parallelschaltung der einzelnen Innenwiderstände)
 - erhöht Kurzschlußstromstärke: $I_{max} = I_{max,1} + I_{max,2} + \dots$



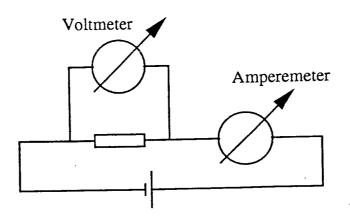
• Serienschaltung von Spannungsquellen

$$\begin{split} U &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots \\ R_i &= R_{i,1} + R_{i,2} + R_{i,3} + \dots \end{split}$$

$$I_{max} = \frac{\sum_{i} U_{i}}{\sum_{j} R_{ij}}$$



5.4.7 Messung von Strömen und Spannungen



Auch Strommeßgeräte (Amperemeter) und Spannungsmeßgeräte (Voltmeter) haben einen Innenwiderstand R_i .

Um Meßfehler zu vermeiden, muß gelten:

ullet $R_i\gg R_L$ für Spannungsmessung

131

• $R_i \ll R_L$ für Strommessung

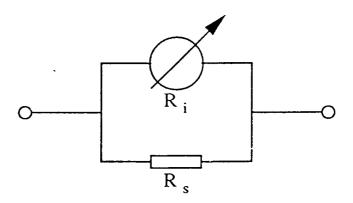
Spannungmeßgeräte haben deswegen einen hohen. Strommeßgeräte dagegen einen niedrigen Innenwiderstand.

Meßbereichserweiterung um den Faktor n

• bei Strommeßgeräten Parallelwiderstand (SHUNT) mit:

$$R_S = \frac{R_i}{n-1}$$

 \Rightarrow Der Strom durch das Meßgerät sinkt so um den Faktor n.



ullet bei Spannungsmeßgeräten Vorwiderstand R_V mit:

$$R_V = (n-1)R$$

 \Rightarrow Der Spannungsabfall am Meßgerät (= R_i) sinkt um n.

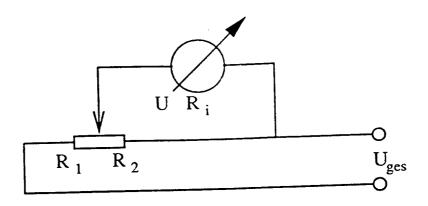
5.4.8 Potentiometer und Wheatstone - Brücke

Potentiometer

Widerstand mit verstellbarem Teilverhältnis $\frac{R_1}{R_2}$, wobei:

$$R = R_1 + R_2 = const$$

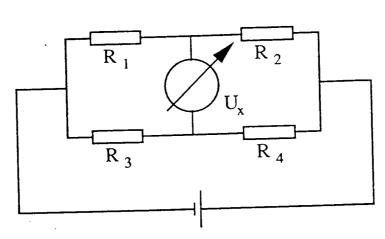
$$\frac{U}{U_{ges}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \; fuer \, R_i \to \infty$$



Wheatstone - Brücke

 $U_x = 0$, falls:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$



5.4.9 Mikroskopische Modelle des Ladungstransports:

Elektronentransport in Metallen

- \bullet Die Spannungsquelle erzeugt ein konstantes \vec{E} Feld im Metall.
- ullet Das Metall enthält freie $e^-(\log$, freies Elektronengas im Metall)
- $\Rightarrow e^-$ werden im \vec{E} Feld beschleunigt: $F = e \cdot E$: $F = m \cdot a$

$$a = \frac{\epsilon}{m} \cdot E$$

Umwandlung von elektrischer Energie in kinetische

Nach einer mittleren "Flugzeit" τ gibt das ϵ^- in einem Stoßprozeß seine kinetische Energie ab:

Umwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie durch Erzeugung von "Pho-NONEN". Das Quantum der Gitterschwingung entspricht hierbei der Wärmebewegung im Festkörper.

$$\Delta v = a \cdot \tau = \frac{e}{m} E \cdot \tau = u_D$$
 sog. Driftgeschwindigkeit

Da das e^- beim Stoß nur einen Teil seiner Impulse abgibt, läßt sich u_D grob als mittlere gerichtete Geschwindigkeit des e^- betrachten (neben der viel schnelleren, aber ungerichteten thermischen Bewegung).

In der Zeit Δt werde ΔQ durch den Leiterquerschnitt A transportiert durch N Elektronen.

 $n: \frac{Anzahl}{Volumen}$ der Elektronen, sog. "ANZAHLDICHTE".

$$\Delta Q = N \cdot e = n \cdot \Delta V \cdot e$$

$$= n \cdot \Delta x \cdot A \cdot e = n \cdot u_D \Delta t \cdot A \cdot e$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = n \cdot u_D \cdot A \cdot e \Rightarrow$$

$$j = n \cdot e \cdot u_D$$
 Stromdichte

$$j = n \cdot e \cdot \frac{e}{m} \cdot E \cdot \tau = n \cdot e^2 \frac{\tau}{m} \cdot E; \quad j = \sigma \cdot E$$

$$\sigma = n \cdot \epsilon^2 \frac{\tau}{m}$$

andere Ladungstransportmechansismen

• Halbleiter:

Erst durch thermische Anregung über eine Energielücke oder / und Dotierung werden bewegliche Ladungsträger erzeugt. σ und u_D sind stark temperaturabhängig.

Elektrolyte:

Flüssigkeiten, die Ionen enthalten. Ionen bewegen sich zur Elektrode und geben dort ihre Ladung ab. Dies bewirkt einen Ladungstransport.

Pro mol einwertige Ionen werden transportiert:

$$\begin{array}{l} \frac{\Delta Q}{n} = N_A \cdot e \\ = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{C}{mol} \\ \approx 96500 \frac{As}{mol} \qquad Faraday - Konstante \end{array}$$

• Supraleiter:

Für $T < T_C$ (sog. Sprungtemperatur) wird die Ladung durch Cooper-Paare (je $2e^-$) transportiert, mit R = 0.

5.5 Stationäre Magnetfelder

5.5.1 Phänomen des Magnetismus

- gewisse Materialien ziehen Eisenfeilspäne an
- ullet Nadeln richten sich nach Norden aus o Navigation.

Diese Phänomene waren schon im Altertum bekannt und sind in Magnesia entdeckt worden.

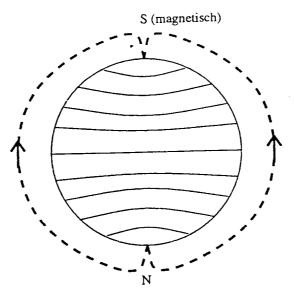
Permanentmagnete

- · Nordpol (rot) richtet sich nach Norden aus.
- Südpol (grün) richtet sich nach Süden aus

Permanentmagnete stellen magnetische Dipole dar. In einem Magnetfeld richten sie sich parallel zu den Feldlinien aus (siehe elektrische Dipole).

- gleichnamige Pole stoßen sich ab, entgegengesetzte ziehen sich an. Anwendungen sind der Magnethalter für die Anziehung und das Magnetlager für die Abstoßung
- Die Erde selbst ist ein magnetischer Dipol; in ihrem Feld richten sich magnetische Dipole (bei drehbarer Lagerung) aus.

Achtung: Der Erdnordpol ist magnetischer Südpol.

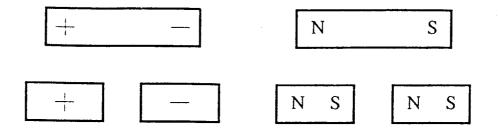


5.5.2 Eigenschaften magnetischer Felder

Magnetische Feldlinien zeigen im Außenfeld eines Magneten stets vom Nordpol weg und zum Südpol hin.

Experimentelle Bestimmung der Richtung magnetischer Feldlinien:

- Orientierung von magnetischen Dipolen
- Orientierung von Eisenfeilspänen (→induzierte Dipole)
- Nordpol weist in Feldrichtung

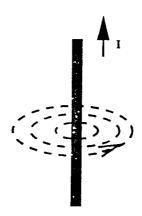


Die Spaltung eines magnetischen Dipols ergibt wieder zwei Dipole. Dies hat zur Folge, daß es nur magnetische Dipole. nicht aber magnetische Ladungen ("Monopole") gibt, an denen Feldlinien entspringen.

⇒ Magnetische Feldlinien sind stets geschlossen.

5.5.3 Das Magnetfeld stromdurchflossener Leiter

Das Magnetfeld eines stromdurchflossenen unendlich langen Drahtes:



- Die Feldlinien sind konzentrische Kreise um den Leiter.
- Orientierung ergibt sich aus der sogennanten RECHTE HAND REGEL: Daumen in technischer Stromrichtung, dann zeigen die Finger in Feldrichtung.

Magnetische Erregung \vec{H} und Amperesches Gesetz

Für die magnetische Erregung \vec{H} (magnetische Feldstärke) findet man:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I = \int j \, d\vec{A}$$
 Amperesches Durchflutungsgesetz

Das Wegintegral über geschlossene Kurven ergibt den umschlossenen Strom (Zusammenhang zwischen Strom und resultierendem Magnetfeld).

$$\oint \vec{H} \, d\vec{s} = I \Rightarrow [H] = 1 \frac{A}{m}$$

Anwendung:

• unendlich langer Draht. Kreisbahn mit Radius r um Draht mit Strom I: • $\vec{H} \ d\vec{s} = H \cdot 2\pi r = I$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

 lange dünne Zylinderspule mit der Windungszahl N, der Spulenlänge l und dem Strom I:

$$H = I \cdot \frac{N}{l}$$

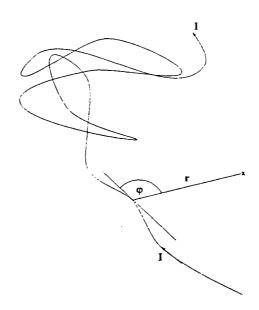
Rechte - Hand - Regel für Spulen

der Daumen zeigt in die technische Stromrichtung, die Finger in Feldrichtung.

5.5.4 Das Gesetz von Biot - Savart

Problem: beliebig geformter, stromdurchflossener Draht. Berechne $\vec{H}(\vec{r})$. Lösung: jedes Leiterstückchen $d\vec{s}$ liefert einen Beitrag zu $H(\vec{r})$.

$$dH = \frac{I ds}{4\pi r^2} \cdot \sin \varphi$$
 Gesetz von Biot – Savart



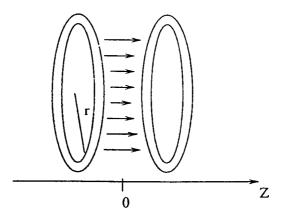
Anwendungsbeispiel:

H im Mittelpunkt eines Kreisstroms. Da überal $d\vec{s} \perp \vec{r}$ ist ebenfalls überall $\sin \varphi = 1$.

$$\frac{I}{4\pi r^2} \cdot 2\pi r = H = \frac{I}{2r}$$

5.5.5 Helmholtz - Spulenpaare

Sie erzeugen besonders homogene magnetische Felder. Sie bestehen aus zwei kurzen Spulen ($l \ll r$) im Abstand d (Radius r), die beide gleichsinnig vom Strom I durchflossen sind.



Man findet

$$H(z=0,3R) = \frac{99}{100}H(z=0)$$

Man verwendet 3 orthogonal zueinander stehende Helmholtzpulen. um das Erdmagnetfeld bei Versuchen zu kompensieren.

5.5.6 Kräfte auf bewegte freie Ladungen

a.) Die magnetische Flußdichte

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

$$\mu_0 = 4\pi \, 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

 \vec{B} : magnetische Flußdichte

 \vec{H} : magnetische Erregung

μ₀: magnetische Feldkonstante

 μ_r : relative magnetische Permeabilität, $\mu_r = 1$ im Vakuum und $\mu_r \neq 1$ in Materie.

b.) Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld

Statische Magnetfelder üben Kräfte nur auf bewegte Ladungen aus. Für die Lorentz-Kraft gilt daher:

$$\vec{F}_L = q \, \vec{v} \times \vec{B}$$

c.) Bahnen freier Ladungsträger im Magnetfeld

1. Fall: $\vec{v} \parallel \vec{B}$

Es existiert keine Lorentzkraft $\Rightarrow \vec{v} = const$

 $\underline{2}$. Fall: $\vec{v} \perp \vec{B}$

$$\vec{F}_L = q \, \vec{v} \times \vec{B} \perp \vec{v}$$

Daher ist $\vec{v} \neq const$, aber $|\vec{v}| = const$. Nur die Richtung ändert sich. F_L ist eine Zentralkraft, woraus eine Kreisbahn folgt.

$$m \frac{v^2}{r} = q v B$$

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

3. Fall: \vec{v} beliebig:

Man zerlege \vec{v} in $\vec{v}_{||} \parallel \vec{B}$ und $\vec{v}_{\perp} \perp \vec{B}$, $\vec{v} = \underbrace{\vec{v}_{||}}_{v \cdot \cos \varphi} + \underbrace{\vec{v}_{\perp}}_{v \cdot \sin \varphi}$. Wie man sieht überlagern

sich zwei unabhängige Bewegungen:

- eine Translation mit $\vec{v}_{||} = const$ parallel zu \vec{B}
- eine Kreisbahn um \vec{B} mit $|\vec{v}_{\perp}| = const$ und $r = \frac{m\,t}{q\,B}$.

Zusammengenommen ergeben diese beiden Bewegungen eine Schraubenlinie um B.

d.) wichtige Anwendungen

- Fernsehröhre mit magnetischer Strahlablenkung
- Massenspektrometer
 - Beschleunigung: $\frac{1}{2}mv^2 = qU \implies v = \sqrt{2\frac{q}{m}U}$
 - Kreisbahn mit $\vec{v} \perp \vec{B}$: $\frac{mv^2}{r} = q \, v \, B \Rightarrow v = r \quad \frac{q}{m}$ spec. Ladung
- Magnethydrodynamischer Generator
- Zyklotron

Es findet eine Beschleunigung von Ladungsträgern im periodischen elektrischen Feld zwischen den beiden Halbdosen im homogenen magnetischen Feld statt.

Umlaufzeit T:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{q \, B}$$

sog. Zyklotron-Frequenz

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

5.5.7 Kräfte auf Ladungen in stromdurchflossenen Leitern

a.) Herleitung

Auf bewegte Ladungsträger im Leiter wirkt die Lorentzkraft. Beitrag eines Ladungsträgers Q mit der Geschwindigkeit $\vec{v} || \vec{l}$ zum Strom im Leiter

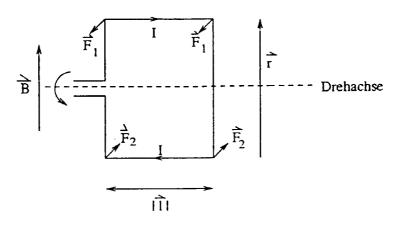
der Länge $|\vec{l}|$.

$$I = \frac{Q}{l} = \underbrace{\frac{Q \, v}{l}}_{l = \frac{1}{2}} \Rightarrow \underbrace{I \cdot l = Q \cdot v}_{I \cdot \vec{l} \times \vec{B} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}}$$

Dies führt zur Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld:

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

b.) Drehmoment auf eine rechteckige Leiterschleife

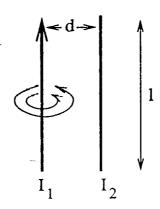


$$\begin{split} \vec{F}_1 &= I \cdot \vec{l} \times \vec{B} \\ \vec{F}_2 &= -I \cdot \vec{l} \times \vec{B} \\ \vec{M} &= (\frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_1) + (-\frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_2) \end{split}$$

$$\vec{M} = I \cdot \underbrace{\vec{r} \times \vec{l}}_{\vec{A}} \times \vec{B} = I \cdot \vec{A} \times \vec{B} = \vec{m} \times \vec{B}$$

Dies ist das Drehmoment auf eine Leiterschleife mit dem magnetischen Moment der Leiterschleife $\vec{m} = I \cdot \vec{A}$.

c.) Kräfte zwischen parallelen stromdurchflossenen Leitern



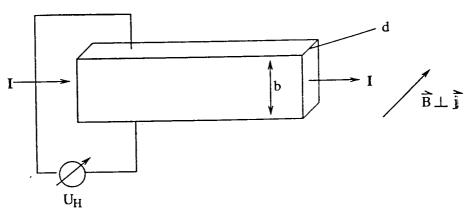
Der Draht 2 befindet sich im \vec{B} -Feld von Draht 1.

$$B_1 = \mu_0 H_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi d}$$

$$F_2 = I_2 \cdot \underbrace{l \cdot B_1}_{\vec{l} \perp \vec{B}_1} = \mu_0 \cdot \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

d.) Der Hall-Effekt

Bei einem bandförmigen Leiter mit $\vec{j} \perp \vec{B}$ (Strom \perp Magnetfeld) beobachtet man eine Spannung, die orthogonal zu \vec{j} und \vec{B} steht, die sog. Hall-Spannung. Die Ursache ist die Lorentzkraft.



Es gilt: $I = j \cdot A = j \cdot b \cdot d = n e u_D b d$

$$u_D = \frac{I}{b e n d}$$

Die Lorentzkraft verschiebt die Ladungsträger solange orthogonal zu \vec{j} , \vec{B} , häs ein Kräftegleichgewicht zwischen der Lorentzkraft und der Coulombkraft herrschat.

$$q \underbrace{u_D \cdot B}_{da \sin \varphi = 1} = q \cdot E_H$$

$$E_H = u_D \cdot B = \frac{I}{n e b d} \cdot B$$

$$U_H = E b H = \frac{1}{n e} \cdot \frac{I B}{d} = A_H \cdot \frac{I B}{d}$$
Hall-Konstante AH

5.5.8 Materie im Magnetfeld

Auch Atome und Moleküle können permanente und induzierte magnetische Momente besitzen.

Für makroskopische Ströme gilt

$$I_{mak} = \oint \vec{H} \ d\vec{s}$$

und für die atomaren Beiträge gilt

$$I_{atomar} = \oint \vec{M} \ d\vec{s}$$

wobei \vec{M} die Magnetisierung darstellt. Der Gesamteffekt ist (analog zu \vec{E} im elektrischen Feld)

$$\oint \vec{B} \ d\vec{s} = \mu_0 (I_{mak} + I_{atomar})$$

Umformungen ergeben

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

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \mu_r \cdot \vec{H}$$

wobei $\mu_r = 1 + \kappa$ und κ die magnetische Suszeptibilitätist und das Drehmoment

$$\vec{M} = \kappa \cdot \vec{H}$$

mit $\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V}$ (Dipolmoment pro Volumen) definiert ist.

5.5.9 Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus

a.) Diamagnetismus

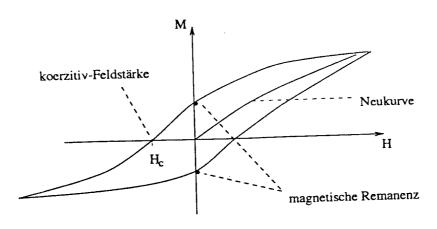
- Durch äußeres Magnetfeld in den Atomen induzierte magnetische Momente
- dem äußeren Feld entgegengerichtet (Lenzsche Regel) $\kappa < 0$; $|\kappa|$ sehr klein (z.B. 10^{-4}) und $\mu_r < 1$.
- bei allen Atomen vorhanden.

b.) Paramagnetismus

- bei Atomen mit permanentem Dipolmoment
- Ausrichtung der Dipole im externen Feld
 - Zeitabhängig (vgl. Orientierungspol)
 - -- relativ klein (typischerweise $\kappa < 10^{-2}$)
 - $-\kappa > 0$, $\mu_r > 1$

c.) Ferromagnetismus

- Bei bestimmten Materialien, sog. Ferromagneten (Fe. Co, Ni), treten magnetisch geordnete Bereiche, sog. Weißsche Bezirke auf. κ ist sehr hoch (Fe: $\kappa = 10^4$).
- Polarisation durch Blochwand-Verschiebung und durch Umorientierung Weißscher Bezirke. Dies geschieht unstetig, sog. Barkhausensprünge.
- Hysterese der Magnetisierung



Elektromagnetische Induktion 5.6

Induktionsgesetz und magnetischer Fluß 5.6.1

Analog zum elektrischen Fluß definiert man den magnetischen Fluß

$$\phi_{u} = \int \vec{B} \, d\vec{A}$$

Man findet:

Ändert man den magnetischen Fluß durch eine Leiterschleife, so wird in der Leiterschleife eine Spannung U_{ind} induziert mit:

Induktionsgesetz

$$U_{ind} = \oint \vec{E} \, d\vec{s} = -\frac{d\phi}{dt} \qquad (\star)$$

Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld, das den magnetischen Fluß umschließt (neu: geschlossene elektrische Feldlinien!)

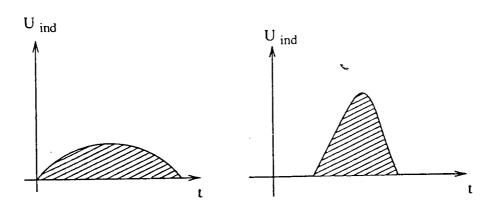
$$U_{ind} = -\frac{d\phi}{dt}$$

$$\int d\phi = \int U_{ind}(t) dt = \Delta \phi$$
Flussaenderung sog. Spannungsstoss

hängt nur von $\Delta\phi$ ab.

Experiment:

Einen Magneten langsam bzw. schnell in eine Spule einführen, solange der ohmsche Widerstand R der Spule nicht ∞ ist, fließt ein sog. Induktionsstrom.:



 $\int U dt$ ist in beiden Fällen gleich!

Man kann eine Spule als eine Serienschaltung von N Windungen auffassen.

\Rightarrow Lenzsche Regel

$$U_{ind} = -N \; \frac{d\phi}{dt}$$

wobei ø in jeder der N Windungen gleich ist.

Das Minuszeichen in (*) bedeutet, daß der Induktionsstrom stets so gerichtet ist, so daß er der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirkt (Lenzsche Regel). Dies folgt aus dem EES.

Folgen:

- 1. Diamagnetismus durch Induktion atomarer Ströme. $\mu_r < 1$ für Diamagnetika.
- 2. Induktionsströme kompensieren externes Magnetfeld im Supraleiter. $\Rightarrow \vec{B} = 0$ (Meissner-Effekt).

5.6.2 Erzeugung von Induktionsspannungen

$$U_{ind} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \, d\vec{A}$$

Daher gibt es drei Möglichkeiten, U_{ind} hervorzurufen:

- a.) Änderung von \vec{B}
- b.) Änderung von \vec{A}
- c.) Änderung des Winkels zwischen \vec{B} und \vec{A} .

a.) Änderung von \vec{B} :

$$U_{ind} = -N A \frac{d\vec{B}}{dt}$$

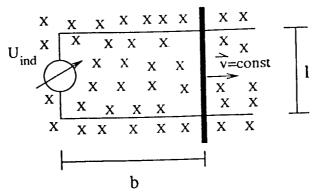
(falls $\vec{B} = const$ über \vec{A}).

b.) Änderung von \vec{A} :

$$U_{ind} = -N \vec{B} \frac{d\vec{A}}{dt}$$

$$= -N B \cos \varphi \, \frac{dA}{dt}$$

falls die Richtungen von \vec{A} und \vec{B} fest liegen. Beispiel:bewegter Bügel in rechteckiger Leiterschleife.



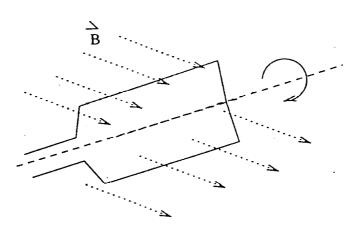
 $\vec{B} \perp \text{Zeichenebene} = const$

$$\phi = B l b$$

$$\dot{\phi} = B l \dot{b} = B l v$$

$$U_{ind} = -B l v$$

c.) Änderung von φ



$$\varphi = <) (\vec{B}, \vec{A})$$

$$\phi = \vec{B} \, \vec{A} = B \, A \cos \varphi \qquad \text{falls } \vec{B} = const.$$

Beispiel (sehr wichtig):

Rotation einer Spule mit N Windungen mit $\omega = const$ $(\varphi = \omega t)$ im homogenen B-Feld mit $\vec{B} \perp$ Drehachse der Spule.

$$U_{ind}(t) = -\frac{d}{dt}(\phi(t))$$
$$= -\frac{d}{dt}(N A B \cos(\omega t))$$
$$= N B A \omega \sin(\omega t)$$

 $NBA\omega$: Amplitude der induzierten sinusförmigen Wechselspannung.

Anwendungen:

- Generatoren im Kraftwerk
- Fahrraddynamo
- Drehzahlmesser, elektronischer Tachometer

5.6.3 Selbstinduktion und Induktivität

Stromänderungen in einer Spule $(\frac{dI}{dt})$ haben eine Änderung des magnetischen Flusses durch diese Spule zur Folge. Daraus folgt die Induktion einer Spannung in diese Spule, die dieser Stromänderung entgegenwirkt. Nach der Lenzschen Regel (sog. Selbstinduktion)

$$U_{ind} = -L \cdot \frac{dI}{dt} \qquad (\star)$$

L: Induktivität

$$[L] = 1 \frac{Vs}{A}$$
 vgl. $[C] = 1 \frac{As}{V}$.

Serienschaltung von Induktivitäten:

$$L_{ges} = \sum_{i} L_i = L_1 + L_2 + \dots$$

Parallelschaltung von Induktivitäten:

$$\frac{1}{L_{ges}} = -\frac{1}{U_{ind}} \cdot \frac{dI_{ges}}{dt} = -\frac{1}{U_{ind}} \sum_{i} \frac{dI_{i}}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{L} = \sum_{i} \frac{1}{L_{i}} = \frac{1}{L_{1}} + \frac{1}{L_{2}} + \dots$$

Induktivität einer langen Zylinderspule

$$H = I \cdot \frac{N}{l}$$

$$\phi = B A = \mu_r \mu_0 H A$$

$$= \mu_r \mu_0 I \frac{N}{l} A$$

$$U_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$= \underbrace{-\mu_r \mu_0 A}_{l} \frac{dI}{dt}$$

$$L = \mu_r \mu_0 A \frac{N^2}{l}$$
allgemein:

$$L = f \,\mu_r \,\mu_0 \,A \frac{N^2}{l}$$

f:=Formfaktor der Spule

f=1 für lange Spulen

Bemerkung:

Jeder beliebige Stromkreis besitzt Kapazitäten und Induktivitäten, selbst jede Zuleitung hat C und L.

5.6.4 Energie und Energiedichte des Magnetfeldes

Das Magnetfeld enthält ebenso wie das elektrische Feld Energie.

Berechnung am Beispiel der langen Spule

Beim Einschalten des Stroms wird (gegen U_{ind}) von der Spannungsquelle Arbeit verrichtet, um das Magnetfeld aufzubauen.

$$W_m = \int_{t=0}^{\infty} (-U_{ind} \cdot I) dt = + \int_{t=0}^{\infty} L \cdot I \frac{dI}{dt} dt$$

$$= \int_{I=0}^{I} L I dI = \frac{1}{2} L I^2 \text{ Energie des Magnetfeldes}$$

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2$$

für Induktivitäten. (Vergleiche $W_{el}=\frac{1}{2}CU^2$ für Kapazitäten).

Energiedichte $w = \frac{W}{V}$ in einer langen Spule mit homogenem Feld

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2}L I^2 \frac{1}{V} = \frac{1}{2}\mu_r \mu_0 A \frac{N^2}{l} I^2 \frac{1}{Al}$$
$$= \frac{1}{2}\mu_r \mu_0 (I \frac{N}{l})^2 = \frac{1}{2}\mu_r \mu_0 H^2$$

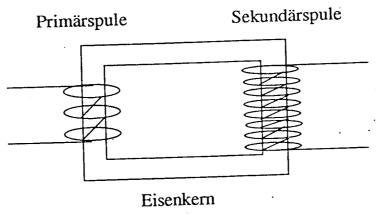
Für die Energiedichte im Magnetfeld gilt allgemein:

$$w = \frac{1}{2}\mu_r \,\mu_0 \,H^2 = \frac{1}{2}H \,B$$

Vergleiche die Energiedichte im elektrischen Feld: $w=\frac{1}{2}\epsilon_r\epsilon_0 E^2=\frac{1}{2}D\,E$

5.6.5 Transformatoren

Ein Transformator besteht aus zwei aufeinenader gewickelte Spulen (z.B. auf einem gemeinsamen Eisenkern). Daher fließt durch beide Spulen die gleiche $\frac{d\phi}{dt}$ und wird die gleiche Spannung pro Windung induziert. Die Energie bleibt erhalten!



$$\frac{U_{ind1}}{U_{ind2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Aus einer Sinusspannung an der Spule 1 mit der Amplitude U_1 folgt eine phasenverschobene Sinusspannung an der Spule 2 mit der Amplitude U_2 .

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

Wegen der Energieerhaltung gilt mit den Effektivwerten:

$$I_1U_1 = I_2U_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

Anwendungen:

1. Netztrafo: $N_1 > N_2$.

5.7. MAXWELL-GLEICHUNGEN UND ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN147

- 2. Schweißtrafo: $N_1 \gg N_2$. Das Ziel ist eine hohe Stromstärke zu induzieren:
- 3. Hochspannungstrafo. Das Ziel ist eine hohe Spannung.
- 4. Überlandleitung mit dem Leitungswiderstand R. Ziel ist ein geringer Wärmeverlust in den Leitungen.

$$P_{Verlust} = RI^2$$
; $P_{Nutz} = UI = const$

Beispiel:

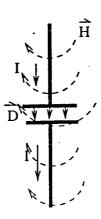
- U um Faktor 100 erhöhen
- I um Faktor 100 senken
- ⇒ Pverlust um Faktor 10 000 gesunken!

5.6.6 Wirbelstromdämpfung und Wirbelstromheizung

Ein bewegter Leiter im inhomogenen Magnetfeld bewirkt eine Induktion von Wirbelströmen. Je kleiner R ist, desto größer ist I. Es findet eine Umwandlung von mechanischer Energie über elektrische und magnetische Energie in Wärmeenergie statt. Man kann so eine Dämpfung mechanischer Schwingungen bewirken. Dies nennt man Wirbelstromdämpfung. Der Vorteil ist, daß die mechanische Dämpfung und damit der aperiodische Grenzfall über den elektrischen Widerstand einstellbar ist. Die sogenannte Wirbelstromheizung ist ein Transformator, bei dem die "Sekundärspule" eine Metallplatte ist. Sie stellt somit eine induktive Heizplatte dar.

5.7 Maxwell-Gleichungen und elektromagnetische Wellen

5.7.1 Der Maxwellsche Verschiebungsstrom



 \vec{D} : elektrische Verschiebungsdichte

 \vec{H} : magnetische Erregung

Der induzierte Strom I im Leiter zum Kondensator:

$$I = \oint \vec{H} \ d\vec{s}$$

Beobachtung:

 $ec{H}$ umschließt auch den Kondensator, obwohl dort der Strom 0 ist. Der Grund ist, daß sich im Kondensator die elektrische Verschiebungsdichte D ändert:

$$\underbrace{I}_{im\ Leiter} = \dot{Q} = \frac{d}{dt} \int \underbrace{\vec{D}}_{im\ Kondensator} d\vec{A} = \underbrace{\frac{d}{dt} \int \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \, d\vec{A}}_{sog.\ Verschiebungsstrom}$$

Die Stromdichte j im Leiter entspricht der Änderung der Verschiebungsstromdichte $ec{D}$ im Isolator.

Die Maxwell-Gleichungen 5.7.2

1. Ampere-Maxwell-Gesetz (Erste Maxwellsche Gleichung)

$$\oint \vec{B} \ d\vec{s} = \mu_r \mu_0 (I + \frac{d}{dt} \int \epsilon_r \epsilon_0 \, \vec{E} \ d\vec{A})$$

2. Induktionsgesetz (Zweite Maxwellsche Gleichung)

$$\oint \vec{E} \, d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \, d\vec{A}$$

3. Gaußscher Satz (Dritte Maxwellsche Gleichung)

$$\oint \vec{E} \, d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

4. Quellenfreiheit des Magnetfeldes (Vierte Maxwellsche Gleichung)

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

"Es gibt keine magnetischen Ladungen."

Diese 4 sogennannten Maxwellschen Gleichungen bilden die Grundlage der klassischen Elektrodynamik.

Die Materialgleichungen

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

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

gelten zusätzlich.

5.7.3 Elektromagnetische Wellen

Ein zeitlich veränderliches \vec{E} -Feld erzeugt ein \vec{B} -Feld (aus der Ersten Maxwellschen Gleichung).

Ein zeitlich veränderliches \vec{B} -Feld erzeugt ein \vec{E} -Feld (aus der Zweiten Maxwellschen Gleichung).

Dies bedeutet, daß sich die beiden Felder wechselseitig erzeugen. Dies macht eine Ausbreitung als Welle möglich. Man kann nun durch Einsetzen zeigen, daß die Maxwell-Gleichungen die Wellengleichung erfülen.

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$$

Es gelten die Wellengleichungen für \vec{E} und \vec{B} :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

wobei in Materie für c gilt:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \, \mu_0 \mu_r}}$$

beziehungsweise im Vakuum die Gleichung

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \, \mu_0}}$$

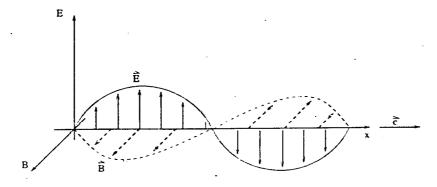
die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit liefert

$$c_0 = 2,997 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$
.

Der Brechungsindex des Mediums ist

$$n=\frac{c_0}{c}=\sqrt{\epsilon_r\,\mu_r}\;.$$

Die Elektromagnetischen Wellen sind transversale Wellen. Aus den Maxwell-Gleichungen folgt die Tatsache, daß $\vec{E}\bot\vec{B}$.



Polarisation:

- ullet schwingt in einer Ebene. d.h. die Welle ist linear polarisiert.
- ullet läuft auf einem Kreis oder einer Ellipse, d.h. die Welle ist zirkular oder elliptisch polarisiert.
- \vec{E} hat alle Richtungen, die orthogonal zum \vec{x} -Vektor stehen, d.h. die Welle ist unpolarisiert.

5.7.4 Energiedichte, Intensität und Poynting-Vektor

Eine elektromagnetische Welle transportiert Energie. Die Energiedichte ist für das elektrische und magnetische Feld gleich:

$$w_{el} = w_{mag} \Leftrightarrow \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}$$
$$\Rightarrow \epsilon_0 \mu_0 E^2 = B^2$$
$$\Rightarrow E = c B$$

Gesamtenergiedichte

$$w = w_{el} + w_{mag} = \epsilon_0 E^2$$

$$w = \epsilon_0 c B E = \frac{B E}{\mu_0 c}$$

Für die momentane Intensität, die Energie pro Zeit und Fläche, gilt $I_m = c \, w = \epsilon_0 \, c^2 \, B \, E = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 \mu_o} B \, E = \frac{B \, E}{\mu_0}$

$$I_{\mathbf{m}} = \frac{BE}{\mu_0}$$

Der Poynting-Vektor

$$\vec{S} := \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

hat den Betrag von I_m und zeigt in die Ausbreitungsrichtung der Welle.

Es gilt für die Welle:

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx)$$

$$B = B_0 \sin(\omega t - kx)$$

$$w = \frac{EB}{\mu_0 c} = \frac{E_0 B_0}{\mu_0 c} \cdot \frac{\sin^2(\omega t - kx)}{Mittelwert = \frac{1}{2}}$$

Der zeitliche Mittelwert der Energiedichte des elektromagnetischen Feldes ist

$$\bar{w} = \frac{E_0 B_0}{2 \mu_0 c} = \frac{E_{eff} B_{eff}}{\mu_0 c}$$

und die Effektivwerte sind definiert durch

$$E_{eff} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$$

$$B_{eff} = \frac{B_0}{\sqrt{2}}$$

woraus die Intensität folgt

$$I = \frac{E_0 B_0}{2 \mu_0}$$

In der Materie wird in diesen Formeln ϵ_0 zu $\epsilon_0 \epsilon_r$ und entsprechend μ_0 zu $\mu_0 \mu_r$.

5.7.5 Erzeugung elektromagnetischer Wellen: der Hefzsche Dipol u.a.

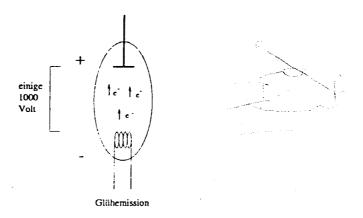
Allgemein findet bei der Erzeugung von elektrischem Strom durch beschleunigte Ladungen eine Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen statt.

<u>Drei wichtige Beispiele:</u>

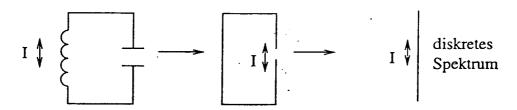
a.) Synchroton-Strahlung.

Geladene Teilchen laufen mit hoher Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn mit der sogenannten Radialbeschleunigung. Dies zieht eine Abstrahlung von elektromagnetischer Strahlung mit einem kontinuierlichem Spektrum, der Synchroton-Stahlung, nach sich.

b.) Röntgen-Röhre. An der positiven Elektrode, der sogenannten "Antikathode", werden die Elektronen e" abgebremst, was eine Emission von kontinuierlicher Röntgenstrahlung zur Folge hat.



c.) Hertzscher Dipol. Der Hertzsche Dipol sind schwingende Ladungen im Leiter-Stab.

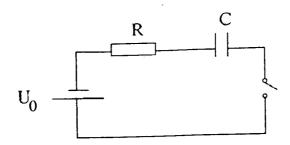


5.8 Wechselstromkreise und komplexe Widertände

5.8.1 Ein- und Ausschaltvorgänge an C und L

an Kapazitäten

1.) Einschaltvorgang (bei t = 0)



Für das Aufladen der Kapazität C über den Widerstand R gilt die Maschenregel:

$$U_0 - RI - \frac{Q}{C} = 0$$

Q: die Ladung des Kondensators. Q(t=0)=0

mit
$$I = \dot{Q}$$
 folgt

$$U_0 - R\dot{Q} - \frac{1}{C}Q = 0$$

$$\frac{U_0}{R} - \dot{Q} - \frac{1}{RC}Q = 0$$

Dies führt zu einer Differentialgleichung für Q

$$\dot{Q} + \frac{1}{RC}Q - \frac{U_0}{R} = 0$$

Die Differentialgleichung wird gelöst durch den Ansatz

$$Q(t) = C U_0 \left(1 - \exp(-\frac{t}{RC})\right)$$

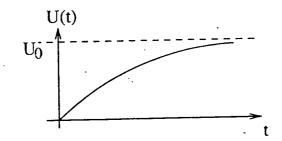
was zu den Gleichungen führt

$$U(t) = \frac{Q}{C} = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)\right)$$

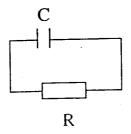
$$U(t) = U_0 \left(1 - \exp(-\frac{t}{\tau})\right)$$

$$I = \dot{Q} = \frac{U}{R} \exp(-\frac{t}{\tau})$$

mit $\tau = RC$ als Zeitkonstante.



2.) Ausschaltvorgang (bei t = 0)



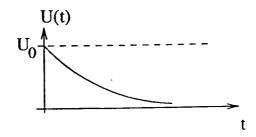
Für die Entladung einer Kapazität C über R gilt: $U(t=0)=U_0$ und $Q(t=0)=Q_0$ ebenso die Maschenregel $RI+\frac{Q}{C}=0$. So folgt die Differentialgleichung für Q.

$$\dot{Q} + \frac{1}{RC}Q = 0$$

und deren Lösung

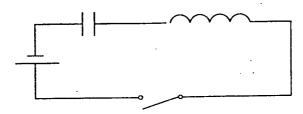
$$Q(t) = Q_0 \exp(-\frac{t}{RC}) = Q_0 \exp(-\frac{t}{\tau})$$

die entsprechen für U(t) und I(t) gilt.



an Induktivitäten

1.) Einschaltvorgänge



Die Maschenregel $U-RI-L\dot{I}=0$ liefert die Differentialgleichung für I:

$$\dot{I} + \frac{R}{L}I - \frac{U_0}{L} = 0$$

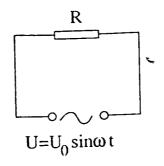
und die Lösung der Differentialgleichung lautet

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - \exp(-\frac{R}{L}t) \right)$$

auch hier ist $\tau = \frac{L}{R}$ die Zeitkonstante.

5.8.2 Wechselströme und Phasenverschiebungen am R, C und L

a.) Ohmscher Widerstand R



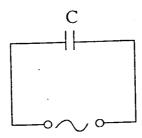
Maschenregel: U - RI = 0

$$U(t) = U_0 \sin \omega t$$

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \sin \omega t$$

Die Phasenverschiebung φ ist Null. U(t) und I(t) sind in Phase!

b.) kapazitiver Widerstand von C



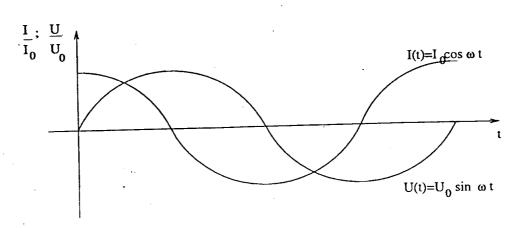
Die Maschenregel lautet: $U - \frac{Q}{C} = 0$ $\Rightarrow Q = CU \Rightarrow \dot{Q} = I = C\dot{U}$

$$U(t) = U_0 \sin \omega t$$

$$I(t) = C \omega U_0 \cos \omega t =: I_0 \cos \omega t$$

mit $I_0 = \omega \, C \, U_0$ folgt der sogenannte Blindwiderstand

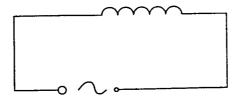
$$X_C = \frac{U_0}{I_0} = \frac{1}{\omega C}$$



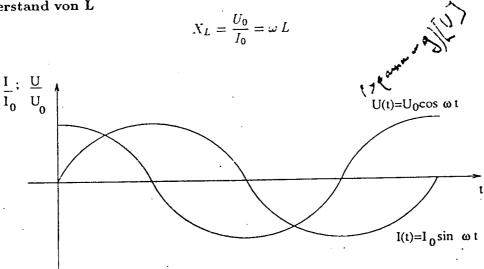
Die Spannung an C hinkt dem Strom um $\frac{\pi}{2} = 90^{\circ}$ nach. Die Phasenverschiebung an C ist demnach $\varphi_C = \frac{\pi}{2}$.

Dies ist auch anschaulich klar. Denn erst muß ein Strom C laden, dann erst hat man die Spannung $U=\frac{Q}{2}$ am Kondensator.

c.) Induktivität L



Die Maschenregel in diesem Fall ist $U-L\dot{I}=0$ mit $I=I_0\sin\omega t$. $U=L\dot{I}=L\omega\,I_0\cos\omega t=U_0\cos\omega t$ und $U_0=L\omega\,I_0$ ergibt sich für den Blindwiderstand von L



Die Spannung von L eilt dem Strom um $\frac{\pi}{2}=90^\circ$ voraus. Die Phasenverschiebung an L beträgt demnach $\varphi_L=+\frac{\pi}{2}$

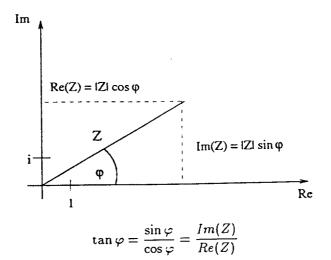
Dies ist auch anschaulich klar. Denn in den Aufbau des Magnetfeldes muß erst Energie investiert werden.

5.8.3 komplexe Widerstände

Man muß zwei Informationen eines Widerstandes darstellen:

- Betrag eines Widerstandes
- ullet Phasenverschiebung arphi

Daher liegt die Darstellung mit Hilfe eines zwei-dimensionalen Vektors in der komplexen Zahlenebene nahe. Der Vorteil ist, daß so die Rechnung viel einfacher ist.



<u>Im</u> = <u>Imaginärteil</u>

Einheit: i = imaginäre Einheit

Er wird definiert durch $i \cdot i = -1 \iff \frac{1}{i} = -i$

 $\underline{Re} = \underline{Realteil}$

Einheit: 1

 $Im = 0 \Leftrightarrow \varphi = 0^{\circ}$, $180^{\circ} \Leftrightarrow$ reelle Zahl

 $Re = 0 \Leftrightarrow \varphi = \pm 90^{\circ} \Leftrightarrow \text{imaginäre Zahl}$

Wenn $Im \neq 0$ und $Re \neq 0$ ist φ beliebig und wir haben eine komplexe Zahl.

Der Betrag einer komplexen Zahl ist

$$|Z| = \sqrt{Re^2(Z) + Im^2(Z)}$$

Addition

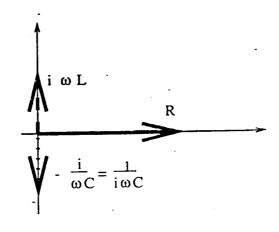
$$Z_1 + Z_2 = (Re_1 + Re_2) + i(Im_1 + Im_2)$$

Für die komplexen Widerstände \tilde{R} gilt nun:

$$R: \varphi = 0 \qquad \tilde{R} = R$$

$$L: \varphi = +90^{\circ} \quad \tilde{X}_{L} = i\omega L$$

$$C: \varphi = -90^{\circ} \quad \tilde{X}_{C} = -\frac{i}{\omega C} = \frac{1}{i\omega C}$$



5.8.4 Der RLC - Serienkreis



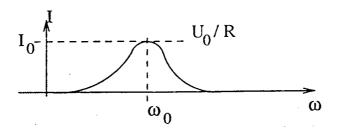
Für den Serienkreis gilt:

$$\tilde{R}_{ges} = R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

 $ilde{R}_{ges}$ ist minimal und arphi=0, falls $\omega=\omega_0$ mit $\omega L=rac{1}{\omega_0 C}$ so daß für ω_0 gilt

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

In diesem Fall ist $\tilde{R}_{ges} = R$.



Allgemein gilt im Serienkreis:

$$\tan \varphi = \frac{Im \, \tilde{R}_{ges}}{Re \, \tilde{R}_{ges}} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

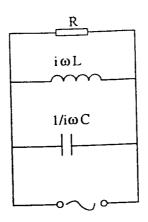
 φ ist die Phasenverschiebung der Spannung gegen den Strom. Für den Strom und die Spannung dagegen gilt:

$$U(t) = U_0 \cos \omega t$$

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \varphi) = \frac{U_0}{|\tilde{R}|} \cos(\omega t - \varphi)$$

$$I(t) = \frac{U_0 \cos(\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

5.8.5 Der (R)LC - Parallelschwingkreis



Parallelschaltung:

$$\frac{1}{\tilde{R}_{ges}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{i\omega L} + i\omega C$$

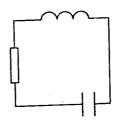
$$|\tilde{R}_{ges}| = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}}$$

 \tilde{R}_{ges} hat ein Maximum bei:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \iff \tilde{R}_{ges} = R \quad \varphi = 0$$

Diese Schaltung nennt man auch Sperrkreis.

freie Schwingungen



Der Schwingkreis führt eine elektromagnetische Schwingung aus. Falls in diesem Schwingkreis R=0 gilt, liegt eine ungedämpfte Schwingung vor, falls $R\neq 0$ eine gedämpfte Schwingung. Für die Resonanzfrequenz gilt $\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$. Die Differentialgleichung der Maschenregel $L\dot{I}+RI+\frac{Q}{C}=0$ führt zur Schwingungsgleichung

$$\ddot{I} + \frac{R}{L}\dot{I} + \frac{1}{LC}I = 0$$

Sie hat die Lösung für eine gedämpfte Schwingung

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

wobei

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

und für die Dämpfung

$$\delta = \frac{R}{2L}$$

Dies steht in völliger Analogie zur mechanischen Schwingung.

5.8.6 Leistungen und Effektivwerte

$$U = U_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

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

Für die Leistung gilt:

The die Beistung gives
$$P = U I$$

$$W = \int_{0}^{T} U(t) I(t) dt$$

$$= \int_{0}^{T} U_{0} \sin(\omega t + \varphi) I_{0} \sin(\omega t) dt$$

 $=\frac{1}{2}U_0 I_0 T \cos \varphi$ (aus der Formelsammlung)

So folgt daraus die mittlere Leistung

$$\bar{P} = \frac{1}{2}U_0 \; I_0 \; \cos \varphi = U_{eff} \; I_{eff} \; \cos \varphi$$

Bei einer Sinusspannung gilt für die Effektivwerte

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

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

Man beachte:

an R: $\cos \varphi = 1 \Rightarrow \bar{P} = U_{eff} I_{eff}$

an L: $\cos \varphi = 0 \Rightarrow \bar{P} = 0$

an C: $\cos \varphi = 0 \Rightarrow \bar{P} = 0$

Bezeichnungen:

R: Wirkwiderstand

 $i\omega L$. $\frac{1}{i\omega C}$: Blindwiderstand

 $|\tilde{R}|$: Impedanz oder Scheinwiderstand

Das Spektrum elektromagnetischer Wellen

Gammastrahlung

 λ klein

 ν groß

Röntgenstrahlung

Ultraviolettstrahlung

sichtbares Licht

violett

blau

grün gelb

rot

In frarotstrahlung

Wärmestrahlung

Mikrowellen

Radiowellen

UKW

KW

MW

LW

 λ groß

 ν klein

Kapitel 6

Optik

6.1 Einteilung der Optik

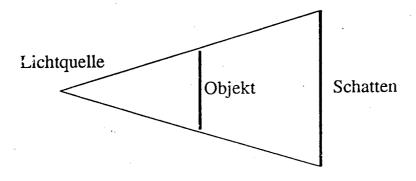
- geometrische Optik (= Strahlenoptik)
 - Licht als Lichtstrahlen (Bsp.: Wirkungsweise einer Lupe)
- Wellenoptik
 - Licht als Welle
- Quantenoptik
 - Licht als Teilchen: Lichtquanten = Photonen (Bsp.: Funktion des Lasers)

6.2 Geometrische Optik

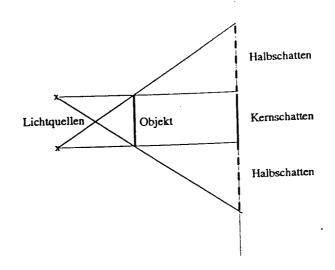
6.2.1 Grundprinzipien

- Alle Teile eines Lichtbündels ("Lichtstrahlen") sind unabhängig voneinander, d.h. keine Interferenz.
- Das Licht breitet sich im homogenen Medium geradlinig aus.
- Das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz gelten.

Schattenbildung:



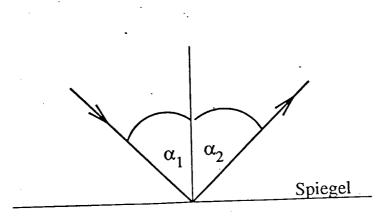
mit zwei oder mehreren Lichtquellen:



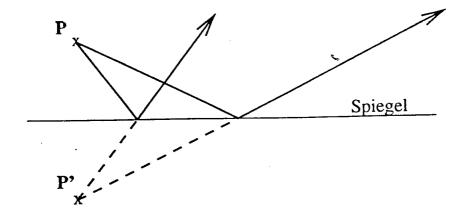
6.2.2 Reflexionsgesetz und ebener Spiegel

Wird Licht an einer glatten Grenzfläche reflektiert, gilt das Reflexionsgesetz

Einfallswinkel = Ausfallswinkel



<u>Spiegelbilder</u>



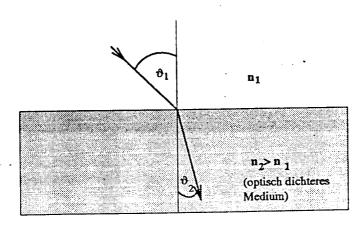
Das reflektierte Licht <u>scheint</u> von P' zu kommen. Das Speigelbild ist ein virtuelles Bild.

6.2.3 Brechungsgesetz und Fermatsches Prinzip

a.) Brechungsgesetz

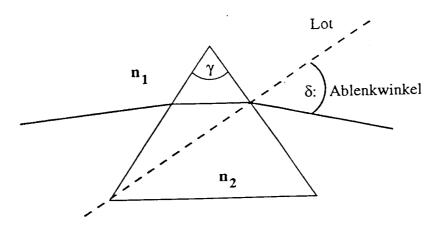
Trifft Licht auf eine Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes $(n_1 \neq n_2)$, so findet eine Lichtbrechung statt. Es gilt das Brechungsgesetz

$$n_1 \sin \vartheta_1 = n_2 \sin \vartheta_2$$



Beim Eintritt in das optisch dichtere Medium wird das Licht zum Lot hin gebrochen und umgekehrt.

b.) Ablenkung eines Lichtstrahls im Prisma



Der Strahlbetrag wird um δ "weg von der brechenden Kante" gebrochen. δ ist minimal für symmetrsichen Durchgang. Geometrie Überlegungen und das Brechungsgesetz liefern:

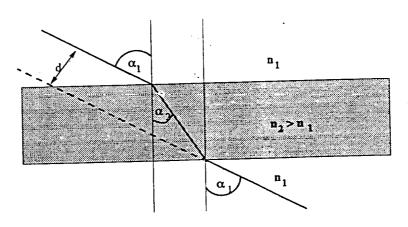
$$\sin \frac{\gamma + \delta}{2} = n \sin \frac{\gamma}{2} \implies n = \frac{n_2}{n_1}$$
 in Näherung für kleine Winkel γ , δ :

$$\frac{\gamma+\delta}{2}\approx n\frac{\gamma}{2}$$

$$\delta = (n-1) \cdot \gamma$$

für kleine γ.

c.) Planparallele Platte



Hier findet eine Parallelverschiebung des Lichtstrahls durch eine Berechung statt. Grund: das Fermatsche Prinzip: Der Weg, den das Licht beschreibt. um von Punkt A nach Punkt B zu gelangen, ist stets so, daß die Laufzeit des Lichts von A nach B minimal wird ("Laufzeitminimierung").

6.2.4 Totalreflexion

Tritt ein Strahl vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium über (z.B. von Wasser nach Luft), gilt wegen

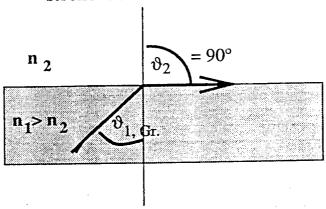
$$\frac{\sin\vartheta_1}{\sin\vartheta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

 $\sin \vartheta_2 = 1$, falls

$$\sin\vartheta_{1,\,Gr.}=\frac{n_2}{n_1}$$

wobei $\vartheta_{1,\,Gr.}$ der Grenzwinkel der Totalreflexion ist.

streifender Ausfallsstrahl



Falls $\vartheta_1 > \vartheta_{1,Gr.}$, existiert keine Lösung für ϑ_2 . Daher gibt es keinen gebrochenen Strahl. Dies nennt man Totalreflexion. Die Grenzfläche verhält sich wie ein Spiegel.

6.2.5 Dispersion

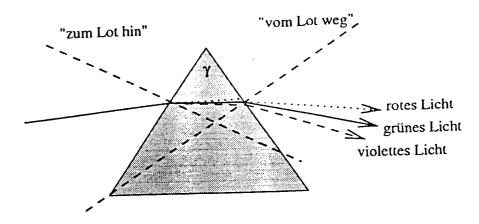
Die Tatsache, daß der Brechungsindex von der Wellenlänge abhängt, d.h.

$$n = n(\lambda)$$

nennt man Dispersion.

Anwendungen:

• Zerlegung von Licht in seine unterschiedlichen Wellenlängen im Prisma. $n_{Prisma} > n_{Luft} \approx 1$

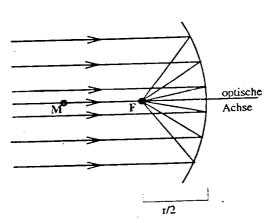


 Regenbogen Zerlegung von "weißem" Sonnenlicht durch Dispersion in den Wassertröpschen.

Hohlspiegel oder Konkav-Spiegel 6.2.6

1.) Fällt achsenparalleles Licht auf einen sphärischen (kugelförmigen) Hohlspiegel, trifft es sich in einem Brennpunkt (Fokus) bei

$$|f| = \frac{|r|}{2}$$



M: Mittelpunkt des Spiegels

F: Brennpunkt

DER PARALLELSTRAHL WIRD ZUM BRENNSTRAHL.

2.) Umgekehrt gilt:

BRENNSTRAHL WIRD ZUM PARALLELSTRAHL

Anwendung: Scheinwerfer mit Birne im Fokus.

3.) Ferner:

Ein Lichtstrahl durch den Mittelpunkt des Hohlspiegels ist ein sog. Mittelpunktstrahl, der in sich selbst reflektiert wird.

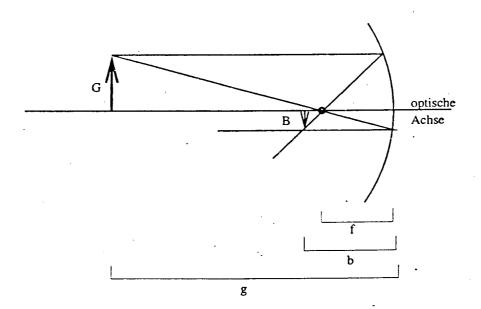
Bemerkungen:

1. Mit 1), 2) und 3) lassen sich Bilder von Gegenständen rekonstruieren und Vergrößerungen berechnen.

- 2. 1) un 2) gilt in guter Näherung nur für paraxiale Strahlen (d.h. Strah.en nahe am Zentralstrahl) bei sphärischen Spiegeln. Jedoch exakt bei Parabelsspiegeln.
- 3. Beweis von 1) und 2) durch einfache Trigonometrie in der Näherung paraxialer Strahlen.

6.2.7 Bildentstehung bei gewölbten Spiegeln

a.) Hohlspiegel, g > f:



F: Fokus = Brennpunkt

f: Brennweite

B: Bildgröße

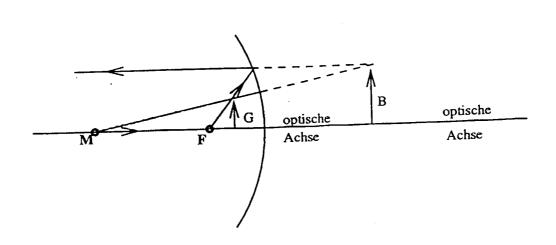
b: Bildweite

G: Gegenstandsgröße

g: Gegenstandsweite

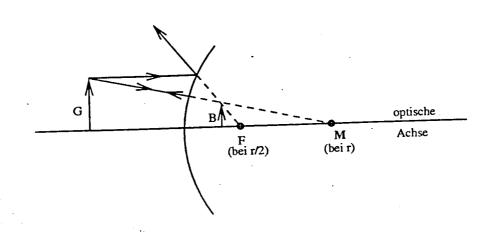
Die vom gleichen Punkt des Gegenstandes ausgehenden Lichtstrahlen treffen sich in einem gemeinsamen Punkt des Bildes wieder. Dieses Bild ist ein reelles Bild.

b.) Hohlspiegel, g < f:



Ein Brennstrahl wird zum Parallelstrahl. Der Mittelpunktstrahl wird in sich selbst reflektiert. Dadurch entsteht ein virtuelles, vergrößertes Bild. Die Lichtstrahlen "scheinen" von B zu kommen.

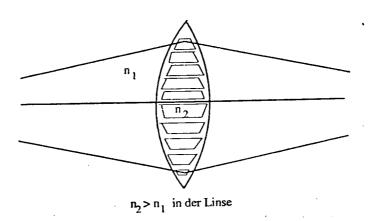
c.) Konvexspiegel ("Wölbspiegel")



Das Bild ist aufrecht, virtuell und verkleinert.

6.2.8 Abbildung mit Linsen

a.) Lichtbrechung an Linsen



Man kann eine Linse als Sequenz von Prismenstücken betrachten, so daß das Licht von der brechenden Kante weg gebrochen wird. Man findet für Linsen mit Kugeloberflächen näherungsweise

Parallelstrahl ⇒ Brennstrahl
Brennstrahl ⇒ Parallelstrahl
Zentralstrahl ⇒ Zentralstrahl

Zetralstrahl bedeutet ein Strahl durch den Linsenmittelpunkt Z. Die obenstehenden Beziehungen gelten nur für paraxiale Strahlen, für kleine Einfallswinkel und dünne Linsen.

b.) Arten von Linsen

positiver Meniskus

bikonvex

plankonvex

Sammellinsen

(in der Mitte dicker als am Rand)

bikonkav

plankonkav

negativer Meniskus

Zerstreuungslinsen

6.2.9 Die Brennweite von Linsen

Man findet aus einfachen geometrischen Überlegungen in der Näherung von 8a).

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot (\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2})$$

n: Brechungsindex

1: Brechungsindex der Umgebung

aus der Formel für das Prisma folgt die Brechkraft

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

 $[D] = \frac{1}{m} = 1 dpt = 1$ Dioptrien.

Zwei dünne Linsen im Abstand d:

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

falls $d \to 0$, folgt $\frac{d}{f_1 f_2} \to 0$

$$D = D_1 + D_2$$

6.2.10 Das Abbildungsgesetz

Man findet für sphärische Linsen und Spiegel:

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

Dabei gilt für das Vorzeichen:

 $g, b, f, r_1, r_2 > 0$ falls G, B, F und Krümmungsmittelpunkte M_1 . M_1 auf der reellen Seite sind. Dies ist bei Spiegeln die Einfallsseite, bei Linsen Einfalsseite für G und die Transmissionsseite für B. M_1 . M_2 . Wenn b > 0 handelt es sind um ein reelles Bild, wenn b < 0 ist es ein virtuelles Bild.

Für die Vergrößerung V gilt:

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

was aus dem Strahlensatz folgt. Falls V < 0 ist das Bild kopfstehend.

Beispiel: Planspiegel

$$f \to \infty \Rightarrow \frac{1}{f} = 0$$
$$\Rightarrow \frac{1}{g} = -\frac{1}{b}$$
$$0 < g = -b$$
$$V = -\frac{b}{g} = +1$$

Dies bedeutet für das Bild:

Es wird in Originalgröße (|V|=1), aufrecht stehend (V>0) dargestellt und es ist virtuell (da b<0).

6.2.11 Abbildungsfehler

Auch bei perfekter Herstellung des gewählten Spiegels, oder der Linse. Verbleiben drei prinzipielle Fehler:

1. sphärische Aberration

Abweichung von der berechneten Brennweite für achsenferne Strahlen.

- (a) Abhilfe: Blende, durch Ausblenden der achsenfernen Strahlen. Nachteil ist, daß das Bild zwar schärfer aber dafür auch dunkler wird.
- (b) Nicht vorhanden ist die sphärische Aberration bei Parabolspiegein.
- 2. chromatische Aberration gibt es nur bei Linsen, da hier $n = n(\lambda)$ (Discersion), woraus folgt $f = f(\lambda)$, die Wellenlängenabhängigkeit der Brennweite.
 - (a) Korrektur durch zusammengesetzte Linsen mit unterschiedlichen $n(\lambda)$.
 - (b) Oder: Verwendung von Spiegeloptiken statt Linsenoptik.

3. Astigmatismus schiefer Bündel

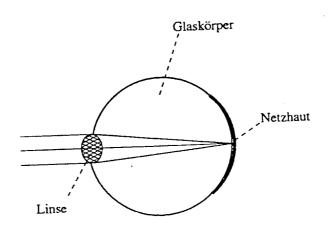
Parallelbündel achsenferner Strahlen werden auf gekrümmte statt etene Flächen fokusiert.

(a) Abhilfe: Blende

(b) Astigmatismus auch durch Linsenfehler. Falls die Linse für unterschiedliche Richtungen unterschiedliche Krümmungsradien aufweist.

Optische Instrumente 6.2.12

a.) Das Auge



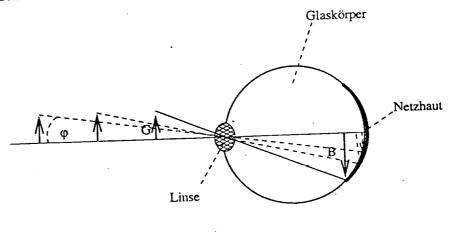
Stäbchen: schwarz / weiß sehend.

Zäpfchen: unempfindlicher aber farbsehend

Die Linse besitzt eine adaptierbare Brennweite von 19...25 mm. Sie erzeugt ein reelles aber kopfstehendes Bild auf der Netzhaut. Man kann eine Brennweitenkorrektur durch Kontaktlinsen oder Brillen vornehmen.

b.) Die Lupe

Der Sehwinkel ist durch die Akkomodationsfähigkeit des Auges begrenzt.

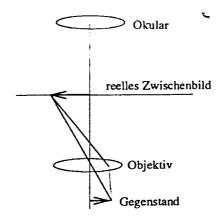


Die Sammellinse zwischen Gegenstand und Auge erlaubt eine Sehwinkelvergrößerung.

 $B \sim \varphi$

 $Vergroesserung = \frac{Sehwinkel\ mit\ Lupe}{Sehwinkel\ ohne\ Lupe}$

c.) Das Mikroskop

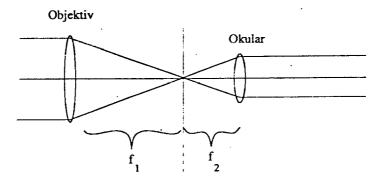


Das Objektiv erzeugt ein reelles, vergrößertes Zwischenbild der Probe, das mit einer Lupe, dem sog. Okular, betrachtet wird.

$$V = V_{Objektiv} \cdot V_{Okular}$$

d.) Fernrohr

Das Ziel ist es, den Sehwinkel weit entfernter Gegenstände zu vergrößern (z.B. das Kepler-Fernrohr).



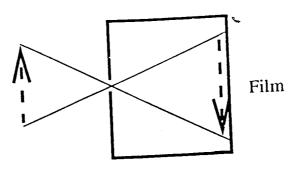
reelles Zwischenbild

e.) Kamera

Das Objektiv erzeugt ein reelles Bild auf dem Film.

mehrlinsiges Objektiv → Korrektur der chromatischen Aberration
Verschluß → Belichtungszeit
Blenden → paraxiale Strahlen
→ Tiefenschärfe

f.) Die Lochkamera

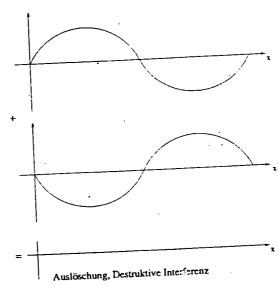


Die Lochkamera besitzt ein winziges Loch, dessen Durchmesser gegen Null geht. Sie ist eine perfekte Kamera ohne Abbildungsfehler, jedoch extrem lichtschwach.

Wellenoptik 6.3

Kohärenz und Interferenz 6.3.1

Überlagerungen von zwei Wellenzügen mit fester Phasenbeziehung über einen ausgedehnten räumlichen Bereich (kohärentes Licht) nennt man Interferenz.



Erforderlich für Kohärenz:

- 1. (nahezu) monochromatisches Licht, wegen der festen Phasenbeziehung.
- 2. Ausreichende Länge der Wellenzüge, damit diese trotz Phasenverschiebung einander treffen. Dies ist die sog. Kohärenzlänge

Lampen: inkohärentes Licht

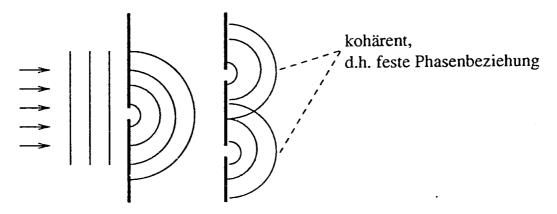
Atome senden in statistischer Abfolge kurze Wellenzüge aus. so daß keinerlei Phasenbeziehung festgelegt wird.

LASER: (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

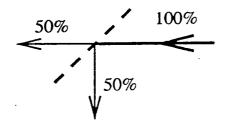
Sendet kohärentes Licht aus.

Kohärentes Licht kann man auch ohne Laser durch Aufspalten ein und derselben Wellenfront in Teilstrahlen erzeugen.

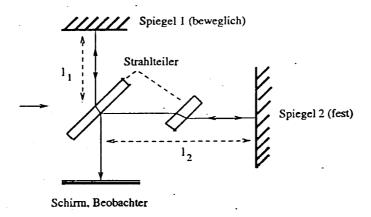
a.) <u>über Spalte:</u>



b.) über halbdurchlässigen Spiegel:



6.3.2 Das Michelson-Interferometer



Der Gangunterschied beider Teilstrahlen beim Michelson-Interferometer wird errechnet durch

$$\Delta x = 2 \cdot (l_1 - l_2) = 2\Delta l \, n$$

und der Phasenunterschied allgemein

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x$$
 $(oder: \frac{\Delta \varphi}{2\pi} = \frac{\Delta x}{\lambda})$

und für $m \in N$

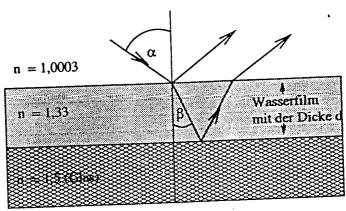
$$\Delta \varphi = m \cdot 2\pi \Leftrightarrow \Delta x = m \cdot \lambda \Leftrightarrow \text{Maxima}$$

$$\Delta \varphi = (2m-1)\pi \Leftrightarrow \Delta x = (2m-1)\frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \text{Minima}$$

Daher haben die Maxima beim Michelson-Interferometer ein Abstand von $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$. Man kann so die Wellennatur des Lichts nachweisen und λ sowie n bestimmen (z.B. $n_{Luft}=1,003\ldots).$

Interferenz an dünnen Schichten 6.3.3

Bei der Reflexion am optischen dichteren Medium findet ein Phasensprung um $\Delta \varphi =$ π statt. Bei der Reflexion am optisch dünneren Medium gibt es dagegen kein Phasensprung.



Man findet (ohne Herleitung):

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2d\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha}$$

Speziell für senkrechten Einfall ($\alpha = 0$):

$$\Delta arphi = rac{2\pi}{\lambda} \cdot 2dn_2$$

Da die Wellenlänge im Medium nur $\frac{\lambda}{2}$ berägt! Der Wegunterschied im Medium zählt n-fach.

$$\Delta x_{opt} = \Delta x$$
 $sog. opt. Wellenlaenge$
 $geometrische Wellenlaenge$

$$\Delta arphi = rac{2\pi}{\lambda} \Delta x_{opt}$$

Falls: $2nd = m\lambda_0$ ist die Interferenz konstruktiv.

Falls: $2nd = (m + \frac{1}{2})\lambda_0$ ist die Interferenz destruktiv. $(m \in N)$

Ob der Film farbig schillert hängt von λ ab. Das Farbmuster ist von α abhängig.

Man beachte:

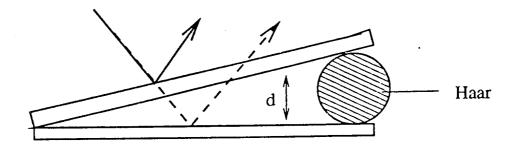
Das Maximum bzw. Minimum ist bei der Seifenblase genau umgekehrt, da einer

der Phasensprünge entfällt.

Die Anwendung dünner Schichten liegt in der "Antireflexbeschichtung", der sog. "Vergütung" von Linsen (Brillen, Objektive oder Ferngläser) oder bei Interferenzfiltern.

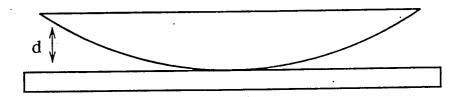
6.3.4 Interferenz am Luftkeil

a.) Keil aus zwei Glasplatten



b.) Keil zwischen einer Plankonvex-Linse und einer Glasplatte

Es findet eine Reflexion an der Ober- und Unterseite des Luftspaltes statt.



Für den senkrechten Einfall gilt

$$\Delta \varphi = \underbrace{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2d}_{\text{Phasengang}} + \underbrace{\pi}_{\text{Phasengang}}$$

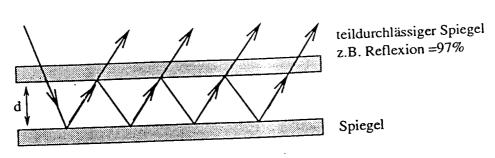
Aus dem Phasengang folgt in der Mitte ein schwarzer Punkt (Minimum).

- 1. Ordnung: $\Delta \varphi = 2\pi$
- 2. Ordnung: $\Delta \varphi = 4\pi$
- n. Ordnung: $\Delta \varphi = n \cdot (2\pi)$

Die Anwendung liegt darin, daß man planparallele Platten auf eine Glasscheibe auflegen kann. So entstehen farbige Muster falls in der Glasscheibe Unebenheiten existieren.

6.3.5 Perot-Fabry-Interferometer und LASER

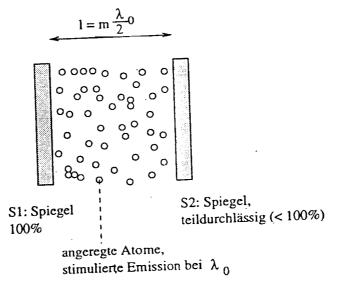
Perot-Fabry-Interferometer



Bei senkrechtem Einfall gibt es ein Maximum für $2d = n_1 \lambda$.

b.) LASER

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)



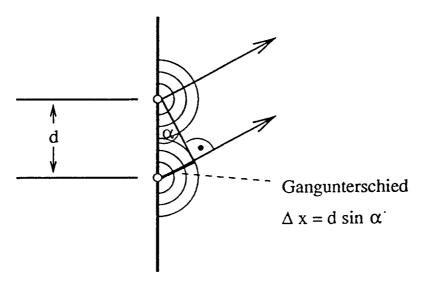
Funktion:

- 1. Fabry-Perot-Interferometer als Laser-Resonator.
- ·2. Wegen $l = m \cdot \frac{\lambda_0}{2}$ ist eine stehende Welle im Resonator möglich.
- 3. Im Resonator angeregte Atome, die mit $\lambda=\lambda_0$ emittieren können.
- 4. Stehende Welle im Resonator regt Atome zur phasensynchronen Emission über die Energie als elektromagnetische Welle an. (stimulierte Emission). Daraus folgt eine Verstärkung der stehenden Welle im Resonator.
- 5. Auskoppeln eines kleinen Teils der stehenden Welle über S2. Dies ist die Laserstrahlung, die kohärent, monochromatisch und parallel ist.

6.3.6 Doppelspalt und Gitter

a.) Beleuchtung eines Doppelspalts mit kohärentem Licht

Es tritt eine Interferenz der aus beiden Spalten austretenden Teilwellen ein.



Für Maxima gilt

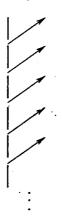
$$d \cdot \sin \alpha = m \cdot \lambda$$

und für Minima gilt

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

b.) Interferenz am Gitter

Ein Gitter besteht aus N äquidistanten Spalten im Abstand d.

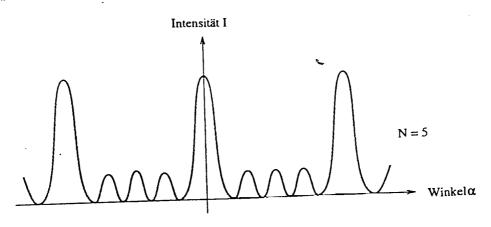


Es tritt ein Hauptmaximum ein. falls

$$\underbrace{d \cdot \sin \alpha} = m \cdot \lambda$$

Gangunterschied benachbarter Strahlen

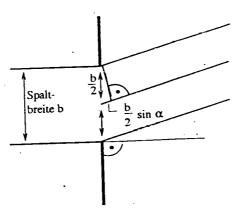
jedoch treten zusätzlich noch N-2 Nebenmaxima zwischen je zwei Hauptmaxima auf.



Die Intensität der Maxima ist proportional zu N^2 , während die Breite der Maxima mit N abnimmt ($\sim \frac{1}{N}$ für große N).

6.3.7 Beugung am Spalt

Bis jetzt war die Spaltbreite sehr viel kleiner als die Wellenlänge. Jetzt betrachten wir breitere Spalten. Dabei tritt eine Interferenz der Teilstrahlen ("Huygenssche Elementarwellen") auf , die durch den Spalt treten.



Es findet eine Auslöschung statt, falls

$$\frac{b}{2}\sin\alpha = m \cdot \frac{\lambda}{2}$$

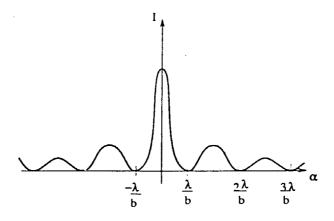
da dann für jeden Teilstrahl der oberen Spalthälfte ein destruktiv interferierender Teilstrahl der unteren Spalthälfte existiert. Man findet für die Intensität I am Spalt:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\frac{\varphi}{2}}{\frac{\varphi}{2}}\right)^2$$

mit

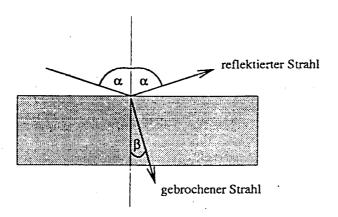
$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}b \cdot \sin \alpha$$

181



6.3.8 Polarisation durch Reflexion; Brewster-Winkel

- Ein schwingender Dipol strahlt elektromagnetische Wellen mit maximaler Intensität senkrecht zur Dipolachse (mit Intensität ≡ 0) parallel zu seiner Achse ab.
- Reflexion: Die reflektierte Welle wird durch schwingende (atomare / molekulare) Dipole erzeugt.



Brewster-Bedingung:

falls der reflektierte Strahl senkecht auf dem gebrochenen Strahl steht, ist folglich nur eine Polarisation des reflektierten Strahls senkrecht zur Zeichenebene möglich. Dies führt zur Erzeugung von polarisiertem Licht. Also:

$$\sin \alpha_B = n \cdot \sin \beta_B = n \cdot \sin(90^\circ - \alpha_B) = n \cdot \cos \alpha_B$$
Brewster-Bedingung

$$n = \tan \alpha_B$$

wobei α_B der Brewster-Winkel ist.

Doppelbrechung 6.3.9

Snelliussches Brechungsgesetz:

gilt nur für optisch isotrope Medien (Brechungsgesetz, siehe auch 6.2.3) Doppelbrechung im optisch anisotropen Medium:

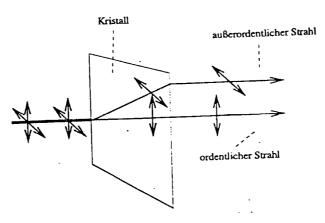
Der Brechungsindex hängt ab von

- Strahlrichtung
- Polarisationsrichtung

Beispiele:

- anisotrope Kristalle (z.B. Kalkspat = CaCO₃)
- Spannungsdoppelbrechung Das Material wird durch mechanische Spannungen auch optisch anisotrop.

Folge:



Unpolarisiertes Licht trifft senkrecht auf die Oberfläche eines optisch anisotropen Kristalls. Dies hat zur Folge, daß sich das Licht in zwei zueinander senkrecht polarisierte Teilstrahlen aufspaltet. So kann man polarisiertes Licht erzeugen.

Trick:

Glam-Thompson-Prisma nutzt die selektive Totalreflexion eines der beiden Teilstrahlen zur Trennung. Daraus folgt polarisiertes Licht in Transmission.

Dichroismus 6.3.10

Dichroismus ist die Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten von der Polarisationsrichtung.

Literaturverzeichnis

- Hering, Martin, Stohrer "Pkysik für Ingenieure"
 VDI-Verlag
- [2] Gerthsen, Helmut Vogel "Physik"18. Auflage Springer-Verlag
- [3] Paul A. Tipler "Physik" Spektrum Akademischer Verlag
- [4] Friedhelm Kuypers "Physik für Ingenieure" Band 1: "Mechanik und Thermodynamik" Band 2: "Elektrizität und Magnetismus, Wellen, Atom- und Kernphysik" VCH, Weinheim

Index

•	momentane. 16
Aberration	radial, 24
chromatische, 171	Winkel-, 37
sphärische, 171	bewegte Quelle, 81
Abschirmung, 120	bewegter Beobachter, 82
Adiabate, 96	Bewegung
Adiabatenkoeffizient, 94	gleichförmig beschleunigte, 17
Äquipartitionstheorem, 90	Bewegungsgleichung. 64
Äquipotentialfläche, 111, 117	Bezugssystem, 20
Aktionsprinzip, 20	gleichförmig rotierendes, 25
Ampere-Maxwell-Gesetz, 148	Bindungsenergie, 45
Amperesches Gesetz, 135	Binnendruck, 92
Anionen, 108	Biot - Savart, 136
Anzahldichte, 89	Blindwiderstand
aperiodischer Grenzfall, 67	induktiver, 155
Arbeit, 37	kapazitiver, 154
allgemein, 26	Boltzmann
elektrische, 129	-Faktor, 90
im elektrischen Feld, 111	-Konstante, 88
im elektrischen Feld, 110	Boyle-Mariotte, 88
Reibungs-, 23	Braunsche Röhre, 115
Astigmatismus schiefer Bündel. 171	Brechkraft, 170
Atomhülle, 108	Brechungsgesetz, 163
Atomkern, 108	Brechungsindex, 149
Auftrieb, 53	Brennpunkt, 166
Auge, 172	Brewster
Ausschaltvorgänge, 151	Bedingung, 181
Avogadro	Winkel, 181
Gesetz von, 87	
Konstante, 87	Carnot, 97
	Cavandish: Gravitationsdrehwaage, 46
Barkhausensprünge, 141	Cooper-Paare, 133
Barometrische Höhenformel. 54	Corioliskraft. 21
Bernoulli-Gleichung, 58	Coulombsches Gesetz, 109
Beschleunigung, 37	Dämpfung, 159
allgemein, 17	Daltonsches Partialdruckgesetz, 91
mittlere, 16	Daironsenes 7 Street

Dampfdruck. 91	Elementarladung. 108
Dehnung, 49	Elementarwelle, 79
Diamagnetismus, 141	Emission
Dichroismus, 182	stimulierte, 178
Dielektrikum, 120, 125	Ende .
Dielektrizitätskonstante, 109	geschlossenes, 79
Differentialgleichung, 64	offenes, 79
Dioptrien, 170	Energie
Dipol	des Magnetfeldes, 146
elektrisches Feld eines, 112	eines Kondensators, 124
magnetischer, 135	elastische, 52
Dipolmoment, elektrisches, 112	innere, 93
Dispersion, 82, 165	kinetische, 29, 37
Doppelbrechung, 182	der Rotation, 35
Doppelspalt, 179	potentielle, 27. 111
Dopplereffekt, 81	Energiedichte, 124
Drehbewegung, 23	einer elektromagnetischen Welle,
Drehimpuls, 35, 37	150
Drehimpulserhaltungssatz, 37	im Magnetfeld, 146
Drehmoment, 36, 37, 41	Energiedichte
einer Leiterschleife, 139	für Dehnung, 52
Drehschwingung, 65	für Torsion, 52
Driftgeschwindigkeit, 133	Energieerhaltungssatz (EES), 29
Druck	Energiestromdichte, 81
Flüssigkeitskugel, 55	Energietransport durch die Welle, 81
Seifenblase, 56	Entropie, 103
Druck	Nullpunkt, 104
isotroper, 50	Entropieänderung, 104
Schwere-, 58	Expansion, 96
Stau-, 58	
	Faraday
E-Modul, 49	Käfig, 120
Effektivwerte, 150, 159	Konstante, 133
Einheitsvektor, 24	Feder
Einschaltvorgänge, 151	Hook'sche, 65
Einschwingvorgänge, 69	Federkonstante, 21
Elastizitätsgrenze, 48	Federkonstante
Elastizitätsmodul, 49	eines Stabes, 52
Elektrolyte, 133	Federwaage, 21
Elektronen, 108	Feld
Elektronengas, 132	elektrisches, 109
Elektronenstrahlröhre, 115	elektrostatisches, 111
Elektroskop, 114	magnetisches, 134

77.111	Gauk, Satz von
Feldkonstante	integrale Form. 117
elektrische. 109	Gaußscher-Satz, 148
Feldlinien. 109	Gay-Lussac
Feldstärke, elektrische, 109	Überströmversuch, 104
Fermatsche Prinzip, 164	Gesetz von, 88
Fernrohr, 173	Gegenkraft. 22
Ferromagnetismus, 141	Geschwindigkeit, 37
fest. 85	mittlere, 15
Festigkeitsgrenze, 48	momentane, 15
Figurenachse, 42	Winkel-, 37
Flächenladungsdichte, 117, 122	Gesetz von Biot - Savart, 136
flüssig, 85	Gitter, 179
Flüssigkeitsthermometer, 85	Gleichverteilungssatz, 90
Fluß	Gleitreibungskraft, 22
eines el. Feldes, 116	Gradient. 30
magnetischer, 142	Gravitationsfeldstärke, 45
Flußdichte	Gravitationskonstante, 45
magnetische, 137	Gravitationspotential, 45
Fluklinien. 56	Grenzfall
Fluchtgeschwindigkeit, 47	aperiodisch, 67
Fokus, 166	Grenzwinkel, der Totalreflexion. 165
Fourier .	griechische Buchstaben, 14
Analyse, 73	Gruppengeschwindigkeit. 82
Koeffizienten, 73	Gruppengesen
Spektrum, 73	Haftreibungskonstante, 23
Synthese, 73	Haftreibungskraft. 22
freie Achsen, 42	Hagen-Poiseuille, Gesetz von, 60
freier Fall. 18	Halbleiter, 133
Freiheitsgrade, 90, 94	Hall
Fundamentalschwingungen, 74	-Effekt, 140
	-Spannung, 140
Gammastrahlung, 160	harmonischer Oszillator, 65
Gangunterschied, 175	Hauptsatz
Gase	dritter, 104
ideale, 87	erster, 93
reale, 87, 92	nullter, 83
gasförmig, 86	zweiter, 102
Gasgleichung, ideale, 88	Hauptträgheitsachsen, 41, 42
Gastheorie	
kinetische, 89	Hebelgesetz. 36
Gasverflüssigung, 92	Heißluftmotor, 101
Gauß. Satz von	Helmholtz-Spulen, 136
differentielle Form, 117	Hertzscher Dipol, 151

2., 46 Höhenformel, Barometrische, 54 3., 46 Hohlspiegel, 166 Kernladungszahl. 87 Hook'sche Feder, 65 Hooksches Gesetz der Torsion, 44 Kirchhoffsche Gesetze. 128 Hooksches Gesetz, 21, 31, 49 Knotenregel. 128 kohärentes Licht, 174 Huygenssche Elementarwelle, 79, 180 Kohärenz, 82 Prinzip, 78 Kohärenzlänge, 174 komplexe Zahlenebe, 155 Impuls, 21, 37 Kompressibilität, 50 Impulserhaltungssatz, 32 Kompression, 96 Induktionsgesetz, 142, 148 Kompressionsmodul, 50 Induktionsstrom, 142 Kondensationswärme. 86 Induktivität Kondensator, 120 einer langen Zylinderspule, 145 Kapazität eines. 122 Induktivitäten Kugel-, 122 Parallelschaltung von, 145 Parallelschaltung. 124 Serienschaltung von, 145 Platten-, 120, 122 Inertialsystem, 20 Serienschaltung, 124 Influenz, 119 Zylinder-, 122 Infrarotstrahlung, 160 Kontinuitätsgleichung. 57 Intensität, 150 Kopplung am Spalt. 180 schwache, 75 Interferenz. 174 Kraft, 21 am Luftkeil, 177 elastische, 30 an dünnen Schichten, 176 konservative, 29 destruktiv. 82 nicht-konservative. 29 konstruktiv, 82 Tangential-, 36 Maxima, 179 Kraftkonstante, 37 Minima. 179 Kreisbewegung, 24 Ionen, 108 Kreisel, 41 Isentropen, 103 Kreisfrequenz, 24, 31 Isolatoren, 108 Kreisprozeß, 97 Joule - Thomson Kriechfall, 67 Effekt von, 92 Kühlschrank, 100, 101 Kugeloberfläche Kamera, 173 Außenfeld einer, 120 Kapillardruck, 56 Kurzschlußstromstärke. 129 Kapillarität, 56 Kationen. 108 Ladugsverteilungen. 116 Kelvin. absolute Temperatur, 84 Ladung, elektrische, 107 Keplersches Gesetz Ladungen, im Magnetfeld. 137 1., 46

Ladungensträger im Magnetfeld, Bah-	Massenträgheitsmoment. 37
nen von. 137	Massenzahl, 87
	Materialsleichungen, 148
Ladungsdichte, 115	Materie im Magnetfeld. 140
Ladungserhaltung, 107	mathemathisches Pendel. 65
Ladungsquantisierung, 107	Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung,
Ladungstransport, 132	90
Längenausdehnung, 84	Maxwellsche Gleichung
Längenladungsdichte, 118	Dritte, 148
Laser, 178	Erste, 148
Laserstrahlung, 178	Vierte, 148
Leistung, 27, 37	Zweite, 148
der Rotation, 35	Meissner-Effekt. 143
elektrische, 129	Messung. 130
mechanische, 27	Michelson-Interferometer, 175
mittlere, 159	Mikroskop, 173
Leiter, 108	Mikrowellen, 160
Leiter im el. Feld, 118	Mittelpunktstrahl, 166
Leitfähigkeit, elektrische, 127	mol, 87
Leitwert	Molwärmen, spezifische, 93
elektrischer, 127	
Lenzsche Regel, 143	Neutronen, 108
Lichtgeschwindigkeit, im Vakuum, 149	Newtonsches Axiom
Linde Verfahren, 92	1., 20
Linsen	2 20
Arten von, 170	3 20
Lissajous Figur, 72	Newtonsches Reibungsgesetz, 59
Lochkamera, 174	Nichtleiter, 108
Lorentz-Kraft, 137	Normalkraft. 23
Luftfeuchtigkeit, 91	Nutation, 42
relative, 91	. 55
Lupe, 172	Oberflächenspannung, 55
	ohmsches Gesetz, 127
Magnetfeld, 134	optische Instrumente. 172
magnetische Erregung, 135	Orientierungspolarisation, 126
Magnetisierung, 141	Oszillator
Magnetismus, 133	gedämpft, 66
Maschenregel, 128	harmonisch, 65
Masse, 21	n II laskaleung
schwere, 22	Parallelschaltung Spannungsquellen. 130
träge, 22	Spannungsquenen. 130 Widerstände, 127
Masse der Erde, 46	
Massenmittelpunkt, 32	Parallelschwingkreis
Massenspektrometer, 138	mit (R)LC, 158

Paramagnetismus, 141	potentielle Energie eines. 113
paraxiale Strahlen, 167	Systeme von, 112
Partialdruck, 91	
Pascalsches Prinzip, 52	Quadpol, 113
Pendel	Quellenfreiheit des Magnetfeldes, 148
mathematisch, 65	Querkontraktion, 49
physikalisch, 66	Radialbeschleunigung, 25
Permeabilität	Radiowellen. 160
magnetische, 137	
Perot-Fabry-Interferometer, 178	Reaktionsprinzip, 20
Perpetuum Mobile, 29	Rechte - Hand - Regel, 135
Phasengang, 177	Rechtssystem, 24
Phasengeschwindigkeit, 78	Reflexionsgesetz, 162
Phasensprung, 79	Reißgrenze, 48
Phasenumwandlungen, 85	Reibungselektrizität, 107
Phasenverschiebung	Reibungskräfte, 22
induktive, 155	Reihenschaltung
komplexe, 155	von Widerständen, 127
Phononen, 133	Resonanz, 69
physikalisches Pendel, 66	Resonanzüberhöhung, 69
Pitot-Rohr, 58	Resonanzfrequenz, 69, 79
Poisson-Zahl, 49	Reynoldszahl, 60
Polarisation, 149	Röntgen-Röhre, 151
durch Reflexion, 181	Röntgenstrahlung, 151, 160
Potential, 29	Rollbedingung, 40
elektrostatisches, 111	Rotation, 23, 35
Potentiometer, 131	Rückstellkraft, 55
Poynting-Vektor, 150	Satellitenbahnen, 47
Präzession, 43	Satz von Steiner, 40
Prandtlsches Staurohr, 58	Scheinkräfte. 25
Prinzip von Archimedes, 54	Schermodul, 50
·	Schernodur, 50 Scherspannung, 50
Prisma, 164	Scherung, 50
Proportionalitätsgrenze, 48	Schmelzwärme, 85
Protonen, 108	Schwebung
Prozesse	rein, 70
adiabatische, 96	unrein, 70
irreversible, 103	Schweredruck, 53, 56
isobare, 95	
isochore, 94	Schwerelosigkeit, 22
isotherme, 95	Schwerpunkt, 32
polytrope, 96	Schwingfall, 66
reversible, 103	Schwingung
Punktladungen, 116	harmonische, 30

einer Hookschen Feder. 31	Stokesches Gesetz. 60
Energieerhaltung, 31	Strahlungspyrometer, 85
Schwingungen, 63	Strömung
Dreh 65	stationäre, 56
erzwungen, 68	Strömung
gegenphasig, 74	laminare, 60
gekoppelt, 73	turbulente, 60
gleichphasig, 74	viskose, 59
harmonisch, 64, 65	Strom
inharmonisch, 64	elektrischer, 126
Überlagerung, 69	stationärer, 126
orthogonal, 71	Stromdichte, 127, 133
parallel, 69	Stromrichtung
Schwingungsbauch, 79	technische, 127
Schwingungsgleichung, 158	Superpositionsprinzip, 18, 112
Schwingungsknoten, 79	Supraleiter, 133
Selbstinduktion, 145	Suszeptibilität
Serienkreis, mit RLC, 157	elektrische, 126
Serienschaltung	magnetische, 141
Spannungsquellen, 130	Symmetrieachse, 42
von Widerständen, 127	Synchroton-Strahlung, 151
Widerstände, 128	Taupunkt, 91
Shunt, 131	Temperatur, 83
sichtbares Licht, 160	Thermoelemente. 85
Siedepunkt, 91	Thomson. 92
Siemens, 127	Torsion, 51
Skalarprodukt, 27	Torsionskonstante, 51
Snelliussches Brechungsgesetz, 182	Torsionsmodul, 50
Spannarbeit, 37	Torsionswaage, 114
Spannung, el., 111	Totalreflexion, 165
Spannungsquellen, 129	Trägheitsmoment, 35, 38
Spektrum el. mag. Wellen, 160	Trägheitsprinzip, 20
Sperrkreis, 158	Transformator, 146
spezifische Ladung, 138	Translation, 35
Spiegelbilder, 162	
Spitzeneffekt, 120	Überlandleitung, 147
Stirling - Prozeß, 101	Überströmversuch. 104
Stoß	Ultraviolettstrahlung, 160
elastischer. 33	Umlaufzeit, 24
gerader, zentraler, 33	universelle Gaskonstante. 88
gerader, zentraler inelastischer. 33	
Stoffmenge, 87	van der Waals, 92
Stokes-Gesetz, 66	Vektor

axialer, 24	Wheatstone - Brücke, 132
Vektorprodukt. 24	Widerstände
Verdampfungswärme, 86	komplexe. 155
Verformung	Widerstand: 127
elastische, 48	komplexer, 156
plastische, 48	spezifischer, 127
Vergrößerung, 171	Widerstandsthermometer, 85
Verschiebungsdichte, elektrische, 147	Winkel, 35, 37
Verschiebungspolarisation, 126	Winkelbeschleunigung, 25, 35
Verschiebungsstrom, maxwellscher. 148	Winkelgeschwindigkeit, 24, 35
virtuelles Bild, 163	Winkelrichtgröße, 37
Viskosität, 59	Wirbelstrom
Volumenausdehnung, 85	- dämpfung, 147
Volument and a series of the s	- heizung, 147
waagrechter Wurf, 18	Wirkungsgrad, 27, 99 .
Waals	Zehnerpotenzen, 14
van der, 92	Zeitkonstante, 152
Wärme	Zugspannung, 49
latente, 85	Zustand
spezifische, 85	gebundener, 47
Wärmeausdehnungskoeffizient, 85	Zustand
Wärmeenergie, 83, 85	ungebundener, 47
Wärmepumpe, 101	Zustandsänderung, 94
Wasser, 86	Zustandsgleichung, 88
Wasser	Zustansänderung
Dichteanomalie, 87	adiabatisch, 96
Weg, 37	isotherm, 96
Weißsche Bezirke, 141	polytrop, 96
Wellen, 77	Zyklotron, 138
ebene, 78	25
elektromagnetische, 151	·
gegenphasig, 82	
gleichphasig, 82	•
Kreis-, 78	•
Kugel-, 78	
longitudinale, 78	
stehende, 79	
transversale, 78	
Wellenarten, 78	
Wellenfront, 78	
Wellengleichung, 78	$\cdot \cdot \cdot$
Wellenlänge, 77	
Wellenzahl, 77	
·	