Experimentalphysik II

(Kompendium)

Herausgegeben von

Jeffrey Kelling
Felix Lemke
Stefan Majewsky

Stand: 23. Oktober 2008

Inhaltsverzeichnis

Spezielle Relativitätstheorie siehe Kompendium „Theoretische Mechanik“.

Elektrisches Feld

- Coulomb-Kraft: $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \vec{e_r}$
- Feld einer Punktladung: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{e_r}$, allgemein: $\vec{F} = q\vec{E}$

Integralform	**Differentielle Form**
$\varepsilon_0 \oiint \vec{E}\mathrm{d}\vec{A} = Q_{\text{frei}} + Q_{\text{geb}}$	$\varepsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} = \varrho_{\text{frei}} + \varrho_{\text{geb}}$
$\oiint \vec{D}\mathrm{d}\vec{A} = Q_{\text{frei}}$	$\operatorname{div} \vec{D} = \varrho_{\text{frei}}$
$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$	$\operatorname{div} \vec{P} = -\varrho_{\text{geb}}$
$\vec{P} = \chi_e \varepsilon_0 \vec{E} \quad \Rightarrow \quad \vec{D} = (1+\chi_e)\,\varepsilon_0\vec{E} \equiv \varepsilon_r\varepsilon_0\vec{E}$	

- Superpositionsgesetz: $\vec{E}\left(\vec{r}\right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int \frac{\mathrm{d}Q' \cdot \left(\vec{r}-\vec{r}'\right)}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|^3}$ (Ladungen an Orten $\vec{r}'$)
- Energiedichte: $w = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}V} = \frac{1}{2}\vec{E}\vec{D} = \frac{1}{2}\varepsilon_r\varepsilon_0\vec{E}^2$

Magnetisches Feld

- Lorentz-Kraft: $F = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$

Integralform	**Differentielle Form**
$\oint \vec{B}\mathrm{d}\vec{r} = \mu_0 \left(I_{\text{frei}} + I_{\text{geb}} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint \vec{D}\mathrm{d}\vec{A}\right)$	$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{\jmath}_{\text{frei}} + \vec{\jmath}_{\text{geb}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)$
$\oint \vec{H}\mathrm{d}\vec{r} = I_{\text{frei}} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint \vec{D}\mathrm{d}\vec{A}$	$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\jmath}_{\text{frei}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M}\right) = \mu_0\vec{H} + \vec{J}$	$\operatorname{rot} \vec{M} = \vec{\jmath}_{\text{geb}}$ und $\operatorname{rot} \vec{J} = \mu_0\vec{\jmath}_{\text{geb}}$
$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad \Rightarrow \quad \vec{B} = (1+\chi_m)\,\mu_0\vec{H} \equiv \mu_r\mu_0\vec{H}$	

- Biot-Savart-Gesetz: $\vec{H}\left(\vec{r}\right) = \frac{I}{4\pi} \int \frac{\mathrm{d}\vec{r}' \times \left(\vec{r}-\vec{r}'\right)}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|^3}$ (Stromfluss an Orten $\vec{r}'$)
- Energiedichte: $w = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}V} = \frac{1}{2}\vec{H}\vec{B} = \frac{1}{2}\frac{\vec{B}^2}{\mu_r\mu_0}$

Maxwell'sche Gleichungen

	Integralform	**Differentielle Form**
1. Gleichung	$\oiint \vec{D}\mathrm{d}\vec{A} = Q$	$\operatorname{div} \vec{D} = \varrho$
2. Gleichung	$\oiint \vec{B}\mathrm{d}\vec{A} = 0$	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$
3. Gleichung	$\oint \vec{E}\mathrm{d}\vec{r} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint \vec{B}\mathrm{d}\vec{A}$	$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
4. Gleichung	$\oint \vec{H}\mathrm{d}\vec{r} = I + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint \vec{D}\mathrm{d}\vec{A}$	$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\jmath} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Elektrischer Dipol

- System aus zwei Ladungen $+Q$ und $-Q$ mit Abstand $\vec{L}$ (von der negativen zur positiven Ladung gerichtet)
- Dipolmoment: $\vec{p} = Q \cdot \vec{L}$, Feld: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\left[3\left(\vec{p}\vec{e_r}\right)\vec{e_r} - \vec{p}\right]$
- Drehmoment: $\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$, potentielle Energie: $E_{\text{pot}} = -\vec{p} \cdot \vec{E}$

Magnetischer Dipol

- stromdurchflossene Leiterschleife (Richtung der umschlossenen Fläche $\vec{A}$ aus I durch Schraubenregel)
- Dipolmoment: $\vec{m} = I \cdot \vec{A}$, Drehmoment: $\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$, potentielle Energie: $E_{\text{pot}} = -\vec{m} \cdot \vec{B}$

Stromkreise

- elektrische Spannung: $U = \int \vec{E} \mathrm{d}\vec{r} = \Delta\varphi$ (Potentialdifferenz), analog magnetische Spannung: $\Theta = \int \vec{B} \mathrm{d}\vec{r}$
- Ohm'sches Gesetz: $\vec{\jmath} = \sigma \vec{E}$, Kontinuitätsgleichung: $\operatorname{div} \vec{\jmath} = -\frac{\partial \varrho}{\partial t}$
- Kirchhoffsche Regeln: In einem Knoten ist $\sum I = 0$, in einer Masche ist $\sum U = 0$.
- elektrischer Widerstand: $\widetilde{Z_R} = R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{A} \equiv \varrho \cdot \frac{l}{A}$
- Kapazität eines Kondensators: $Q = C \cdot U$, kapazitativer Widerstand: $\widetilde{Z_C} = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{i}{\omega C}$
- Induktivität einer Spule: $U = L \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$, induktiver Widerstand: $\widetilde{Z_L} = i\omega L$
- Transformator: $\frac{U_{02}}{U_{01}} = -\frac{N_2}{N_1}$ (unbelastet), $\left|\frac{I_2}{I_1}\right| = \frac{N_1}{N_2}$ (belastet)

Selbst- und Gegeninduktion

- Lenz'sche Regel: Ein Induktionsstrom ist so gerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt.
- Selbstinduktion: $\Phi_B = \iint \vec{B} \mathrm{d}\vec{A} = LI$
- Gegeninduktion: $\Phi_2 = \iint \vec{B} \mathrm{d}\vec{A} = M_{21} I_1$, Symmetrie: $M_{12} = M_{21}$

Elektromagnetische Wellen

Im Folgenden sei $\varrho = 0$ und $\vec{\jmath} = 0$ (keine freien Ladungen und Ströme).

- Wellengleichung: $\vec{E} = \vec{E_0} \cdot \sin\left(\omega \cdot t \mp \vec{k} \cdot \vec{r} - \alpha\right)$, $\vec{B} = \frac{1}{\omega}\left(\vec{k} \times \vec{E}\right) = \vec{B_0} \cdot \sin\left(\omega \cdot t \mp \vec{k} \cdot \vec{r} - \alpha\right)$
- Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f$, Wellenzahl: $\left|\vec{k}\right| = \frac{2\pi}{\lambda}$ (zeigt $\substack{\text{in} \\ \text{entgegen}}$ Ausbreitungsrichtung)
- Ausbreitungsgeschwindigkeit: $c = \frac{\omega}{k} = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}$

Energietransport bei elektromagnetischen Wellen

- Energiedichte einer Komponente: $w_{\mathrm{el}} = w_{\mathrm{magn}} = \frac{1}{2}\varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}\frac{E^2}{c^2 \mu_r \mu_0} = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_r \mu_0}$
- Gesamtenergiedichte: $w = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_r \mu_0}$
- Energiestromdichte, Intensität: $I = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}A}\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = cw = c\varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 = \frac{EB}{\mu_r \mu_0}$
- Poyntingvektor: $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$, $\left|\vec{S}\right| = I$
- Energiestrom, Leistung: $P = \oiint \vec{S} \mathrm{d}\vec{A}$, Joule'sche Verlustleistung: $P_{\mathrm{Joule}} = \iiint \frac{\vec{\jmath}^2}{\sigma} \mathrm{d}V$
- Strahlungsdruck: $p_s = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}A}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}A}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{W}{c}\right) = \frac{I}{c} = \frac{\left|\vec{S}\right|}{c} = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_r \mu_0}$
- Leistungsbilanz: $P + \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} + P_{\mathrm{Joule}} = 0$

Elektromagnetische Wellen an Grenzschichten

- Brechzahl eines Mediums: $n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$

  Eine in n_1 an eine Grenzschicht zu n_2 nahende Welle 1 wird zu einem Teil (2) reflektiert und geht zu einem Teil (3) durch.

- Reflexionskoeffizient $R = \frac{E_2}{E_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$, Transmissionskoeffizient $T = \frac{E_3}{E_1} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$
- Reflexionsvermögen $\varrho = \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$, Transmissionsvermögen $\sigma = \frac{I_3}{I_1} = \frac{4n_1 n_2}{n_1 + n_2}$

Bezeichnungen

- Gegenstand der Höhe G bei g, Bild der Höhe B bei b
- Brennweite: f, Gegenstandsweite: $x = g - f$, Bildweite: $x' = b - f$

Spiegel

- Brennweite $f = \left|\frac{r}{2}\right|$, Abbildungsgleichungen: $\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ und $xx' = f^2$, Abbildungsmaßstab: $\beta = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$
- Vorzeichenkonvention: positiv = vor dem Spiegel (b, g, r) bzw. aufrecht (B, G)
- Hohlspiegel: $r > 0$ und F vor dem Spiegel, Wölbspiegel: $r < 0$ und F hinter dem Spiegel
- Bildkonstruktion:
  - Paraxialstrahlen werden zu Brennpunktstrahlen und umgekehrt
  - Radialstrahlen (durch den Wölbungsmittelpunkt) werden in sich reflektiert
  - Zentralstrahlen (in den Schnittpunkt des Spiegels mit der optischen Achse) werden normal reflektiert

Kugeloberflächen

Auf der Seite des Gegenstandes sei ein Medium mit der Brechzahl n_g, gegenüber ein Medium mit n_b.

- Abbildungsgleichung: $\frac{n_g}{g} + \frac{n_b}{b} = \frac{n_b - n_g}{r}$, Abbildungsmaßstab: $\beta = \frac{B}{G} = -\frac{n_g}{n_b} \cdot \frac{b}{g}$
- Vorzeichenkonvention: g ist positiv auf der Seite des Mediums n_g, b auf der Seite des Mediums n_b. r ist positiv, wenn die Kugeloberfläche vom Gegenstand weg gewölbt ist, sonst negativ.

Linsen

- Abbildungsgleichungen und Abbildungsmaßstab wie bei Spiegeln
- Vorzeichenkonvention: b ist dort positiv, wo g negativ ist und umgekehrt
- Sammellinsen: F auf der Seite des Gegenstandes, F' auf der Seite des Bildes
- Zerstreuungslinsen: F auf der Seite des Bildes, F' auf der Seite des Gegenstandes
- Bildkonstruktion:
  - Paraxialstrahlen werden zu Brennpunktstrahlen in F'
  - Brennpunktstrahlen in F werden zu Paraxialstrahlen
  - Zentralstrahlen werden nicht gebrochen
- Brechung eines beliebigen, von der Gegenstandsseite kommenden Strahles:
  - Hilfsstrahl: parallel zum Ausgangsstrahl, durch F
  - Hilfsstrahl wird zu Paraxialstrahl gebrochen, diesen verlängern zur Brennebene von F'
  - Schnitt des Hilfsstrahles mit der Brennebene von F' verlängern zum Einfallspunkt des Ausgangsstrahls in die Linse; dies ist der ausfallende Strahl