

## 1 Elektrostatik

Coulombsches Gesetz:  $\mathbf{F}_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}$

Elektrisches Feld:

$\mathbf{E}(\mathbf{r}) := \mathbf{F}_C(\mathbf{r})/q, \mathbf{F}(\mathbf{r}) = q\mathbf{E}(\mathbf{r})$

Elektrische Feldstärke:  $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$

Superposition:  $\mathbf{E}(\mathbf{R}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^3} \rho(\mathbf{r}) dV$

mit  $Q = \int \rho(\mathbf{r}) d^3r$

diskrete Ladungsverteilung:

$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i$

Elektrischer Fluss  $\phi_E := \int \mathbf{E} d\mathbf{A}$ :

$Q_{\text{innen}} = 0 \rightarrow \phi_E = 0$

$Q_{\text{innen}} > 0 \rightarrow \phi_E > 0$  (Quelle)

$Q_{\text{innen}} < 0 \rightarrow \phi_E < 0$  (Senke)

Gaußsches Gesetz:  $\oint \mathbf{E} d\mathbf{A} = \frac{Q_{\text{innen}}}{\epsilon_0}$

Feld einer Linienladung:  $E(r) = \lambda/2\pi\epsilon_0 r$

Feld einer Flächenladung:  $E(r) = \Gamma/2\epsilon_0$

Innerhalb von Leitern (auch in Hohlräumen):

$\mathbf{E} = 0, Q = 0$

Gaußscher Satz:  $\oint_A \mathbf{E} d\mathbf{A} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{E} dV$

Gaußsches Gesetz (differentielle Form):  $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$

Potentielle Energie:  $E_{\text{pot}}(\mathbf{r}) = - \int_{\infty}^r \mathbf{F}_C d\mathbf{s}$

Coulombpotential (Punktladung):  $E_{\text{pot}}(\mathbf{r}) = Qq/4\pi\epsilon_0 r$

Zirkulationsgesetz:  $\oint \mathbf{E} d\mathbf{s} = 0$

Elektrisches Potential:

$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{E_{\text{pot}}(\mathbf{r})}{q} = - \int_{\infty}^r \mathbf{E} d\mathbf{s}$

$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla\varphi(\mathbf{r})$

Allgemeine Ladungsverteilung:

$\varphi(\mathbf{R}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r})}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|} dV$

Elektrische Spannung:

$U_{12} = \Delta\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = - \int_1^2 \mathbf{E} d\mathbf{s}$

Poisson Gleichung:  $\Delta\varphi = -\rho/\epsilon_0$

Dipolmoment:  $\mathbf{p} = q \cdot \mathbf{d}$

Dipol:  $\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q}{|\mathbf{r} - \mathbf{d}/2|} + \frac{-q}{|\mathbf{r} + \mathbf{d}/2|} \right)$

$r \gg d$ :  $\varphi(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}}{4\pi\epsilon_0 r^2}$

Feld für  $r \gg d$ :  $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{3(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - r^2 \mathbf{p}}{r^5}$

Homogenes Feld:  $\mathbf{M} = \mathbf{D} \times \mathbf{F} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$

$E_{\text{pot}} = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$

Kugelkonduktoren:

$\Delta\varphi = - \int_{\infty}^R \mathbf{E} d\mathbf{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \rightarrow Q = 4\pi\epsilon_0 R U$

Kapazität:  $C := Q/U$

Plattenkondensator:  $E = \sigma/\epsilon_0 = Q/A\epsilon_0$

$C = Q/U = \epsilon_0 A/d$

Kugelkondensator:  $C = 4\pi\epsilon_0 R_2 R_1 / (R_2 - R_1)$

Parallelschaltung:  $C_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n C_i$

Reihenschaltung:  $1/C_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n (1/C_i)$

Energie gespeichert im Kondensator:

$E_C = \frac{1}{2} C U^2$

Plattenkondensator:  $E_C = \frac{1}{2} \epsilon_0 V E^2$

Energiedichte:  $\omega_C = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$

Permittivität  $\epsilon_r$ :  $C_{\text{Diel}} = \epsilon_r C_{\text{Vakuum}} = \epsilon_r C_0$

$E_{\text{Diel}} = \frac{E_{\text{Vak}}}{\epsilon_r}$

Polarisation:  $\mathbf{P} = (1/V) \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i$

$\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{Diel}}$

elektrische Suszeptibilität  $\chi = \epsilon_r - 1$

Dielektrische Verschiebung:

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{Diel}} + \mathbf{P} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{Diel}} = \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{Vak}}$

1. Maxwellsche Gleichungen in Materie:

$\oint \mathbf{D} d\mathbf{A} = Q_{\text{frei}}$

$\oint \mathbf{E} d\mathbf{A} = \frac{Q_{\text{frei}}}{\epsilon_r \epsilon_0}$

Elektrische Feldenergie:  $W_e = Q^2/2\epsilon_r C_0$

Energiedichte:  $\omega_e = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}^2 = \frac{1}{2} \mathbf{E} \mathbf{D}$

## 2 Elektrische Gleichströme

Elektrischer Strom:  $I := dQ/dt$

Elektrische Stromdichte:  $|\mathbf{j}| = I/A = dQ/dt d\mathbf{r}$

Technische Stromrichtung: Flußrichtung der positiven Ladungsträger!

Ladungsfluss:  $U = \varphi_b - \varphi_a = E \Delta l$

Differentieller Widerstand:  $r = dU/dI$

Differentielle Leitfähigkeit:  $S = dI/dU$

Ohmscher Leiter  $\rightarrow r = \text{const.}$

Ohmsches Gesetz:  $U = RI$

$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} = n q e \mathbf{v}_D$

$I = \mathbf{j} A$

Spezifische Leitfähigkeit:  $\sigma = l/RA = S(l/A)$

Spezifische Widerstand:  $\rho = 1/\sigma = R(A/l)$

ohmsche Leiter:  $\mathbf{v}_D = \mu \mathbf{E}$

Elektronenbeweglichkeit  $\mu = q\tau/m$

Mittlere Zeit zwischen zwei Wechselwirkungen:  $\tau$

Elektrische Leistung:  $P = U \cdot I$

Ohmscher Leiter:  $F = RI^2, F = U^2/R$

Kirchhoffsche Regeln:

Knotenregel: An jedem Knoten gilt:  $\sum I_k = 0$

Maschenregel: Für jede Masche gilt:  $\sum U_k = 0$

Reihenschaltung:  $R = \sum_{i=1}^n R_i$

Parallelschaltung:  $1/R = \sum_{i=1}^n (1/R_i)$

Spannungsquelle ( $R_i$ : Innenwiderstand):

$U_{kl} = U_0 - IR_i \Rightarrow R_i \rightarrow 0$

Stromquelle:  $R_i \rightarrow \infty$

## 3 Magnetostatik

$H$ : magnetische Erregung

$B$ : Magnetfeld und magnetische Flussdichte

Magnetischer Kraftfluss:  $\phi_m = \int \mathbf{B} d\mathbf{A}$

Lorentzkraft:  $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

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

$\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$

Zyklotronfrequenz:  $\omega = (q/w)B$

Leiterschleife: Magnetisches Moment:

$\mu = I \mathbf{A} = I \mathbf{A} n$

Drehmoment auf einen magnetischen Dipol:

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

Hallspannung:

$U_H = IB/nqd = R_H (IB/d)$

Leiter vekoriell:  $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (\hat{\mathbf{l}} \times \hat{\mathbf{r}})$

Quellfreiheit:  $\oint_A \mathbf{B} d\mathbf{A} = 0$

Ampersches Durchflutungsgesetz:

$\oint \mathbf{B} d\mathbf{s} = \mu_0 \sum_k I_k = \mu_0 I_{\text{innen}}$

Spule:  $B = \mu_0 n I$

Biot-Savart-Gesetz:

$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV'$

$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s}' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}$

Z-Feld einer Leiterschleife:

$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}$

Leiterschleife ( $r \gg R$ ):

$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( 3 \frac{\mu \cdot \mathbf{r}}{r^5} \mathbf{r} - \frac{1}{r^5} \mu \right)$

Magnetisierung:  $\mathbf{M} = (1/V) \sum_i \mu_i$

Magnetfeld aufgrund der Magnetisierung  $M$ :

$\mathbf{B}_{\text{mag}} = \mu_0 (I_m/l) \hat{\mathbf{n}} = \mu_0 \mathbf{M}$

$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{\text{mag}} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M}$

Magnetische Erregung:  $\mathbf{H} := (1/\mu_0) \mathbf{B} - \mathbf{M}$

$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$

$\oint \mathbf{H} d\mathbf{s} = I_{\text{frei}}$

Magnetische Suszeptibilität:  $\chi_m$

Magnetisierung:  $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$

$\mu_0 \mathbf{H} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{M}$

Relative Permeabilität:  $\mu = \chi_m + 1$

$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$

$\chi_m > 0, \mu > 1$ : Paramagnetismus

$\chi_m < 0, \mu < 1$ : Diamagnetismus

$\chi_m \gg 0, \mu \gg 1$ : Ferromagnetismus

Sättigungsmagnetisierung:  $\mathbf{M}_s$

Curie-Gesetz:  $\mathbf{M} = \frac{1}{3} \frac{\mu B_{\text{ext}}}{k_B T} \mathbf{M}_s \sim \frac{1}{T}$

Grenzflächen mit unterschiedlichen  $\mu$ :

$H_{\parallel}^{(1)} = H_{\parallel}^{(2)} \quad \frac{B_{\parallel}^{(1)}}{\mu_1} = \frac{B_{\parallel}^{(2)}}{\mu_2}$

$B_{\perp}^{(1)} = B_{\perp}^{(2)} \quad \mu_1 H_{\perp}^{(1)} = \mu_2 H_{\perp}^{(2)}$

## 4 Induktion

Faradaysches Induktionsgesetz:

$U_{\text{ind}} = \oint \mathbf{E}_{\text{ind}} d\mathbf{s} = -\dot{\phi}_m$

Leiterschleife:  $U_{\text{ind}} = vBl$

Induktionsgesetz:  $\oint \mathbf{E} d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} d\mathbf{A}$

Lenzsche Regel: Induktion wirkt der Ursache stets entgegen.

Rotierende Leiterschleife:

$\phi_m = \int \mathbf{B} d\mathbf{A} = BA \cos \omega t$

$U_{\text{ind}} = -\dot{\phi}_m(t) = \omega BA \sin \omega t$

Induktivität  $L$ :  $\phi_m = L \cdot I$

Induktivitäten:

Spule:  $L = \mu \mu_0 (N^2/l) A$

Drahtschleife:  $L = \mu_0 R \ln(R/r)$

Doppelleitung:  $L = (\mu_0 l/\pi) \ln(a/r)$

Koaxialkabel:  $L = (\mu_0 l/2\pi) \ln(r_a/r_i)$

Selbstinduktion:  $U_{\text{ind}} = -\dot{\phi}_m = -L \dot{I}$

Ampere-Maxwell-Gesetz:

$\oint \mathbf{B} d\mathbf{s} = \mu_0 \int \mathbf{j} d\mathbf{A} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} d\mathbf{A}$

In Materie:  $\oint \mathbf{H} d\mathbf{s} = \mu_0 \int \mathbf{j} d\mathbf{A} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{A}$

## 5 Schaltungen

### 5.1 Gleichstrom

LR-Glied:

Einschalten:  $I(t) = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-tR/L})$

Ausschalten:  $I(t) = \frac{U_0}{R} e^{-tR/L}$

RC-Glied:

Einschalten:  $I(t) = \frac{U_0}{R} e^{-t/RC}$

Ausschalten:  $I(t) = -\frac{U_0}{R} e^{-t/RC}$

### 5.2 Wechselstrom

Wirkleistung:

$P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = \frac{1}{2} U_0 = (1/T) \int_0^T P(t) dt$

Blindleistung:  $Q$

Scheinleistung:  $S^2 = P^2 + Q^2$

Induktiver Widerstand:

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

$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \pi/2)$

$I_0 = U_0/\omega L$

Kapazitiver Widerstand:

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

$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \pi/2)$

$I_0 = \omega C U_0$

Ohmscher Widerstand:  $Z_R = R, \varphi = 0$

Induktiver Widerstand:  $Z_L = \omega L, \varphi = -90$

Kapazitiver Widerstand:  $Z_C = 1/\omega C, \varphi = 90$

### 5.3 Komplexe Darstellung

$U(t) = U_0 e^{i\omega t}$

$I(t) = I_0 e^{i(\omega t + \varphi)} = I_0 e^{i\varphi} e^{i\omega t}$

Ohmscher Widerstand:

$U(t) = U_0 e^{i\omega t}$

$I(t) = (U_0/R) e^{i\omega t} = \hat{I} e^{i\omega t}$

Induktiver Widerstand:

$U(t) = U_0 e^{i\omega t}$

$I(t) = (U_0/i\omega L) e^{i\omega t} = \hat{I} e^{i\omega t}$

Kapazitiver Widerstand:

$U(t) = U_0 e^{i\omega t}$

$I(t) = i\omega C U_0 e^{i\omega t} = \hat{I} e^{i\omega t}$

Impedanzen:

$\hat{Z}_R = R$

$\hat{Z}_L = i\omega L = \omega L e^{i(\pi/2)}$

$\hat{Z}_C = 1/i\omega C = (1/\omega C) e^{-i(\pi/2)}$

Ohmsches Gesetz:  $\hat{U} = \hat{Z} \cdot \hat{I}$

RC-Serienschaltung:

$I(t) = I_0 e^{i\omega t}$

$U(t) = \hat{Z} I_0 e^{i\omega t}$

$\hat{Z} = (R + 1/i\omega C)$

RC-Parallelschaltung:

$U(t) = U_0 e^{i\omega t}$   
 $I(t) = U_0 (1/\widehat{Z}) e^{i\omega t}$   
 $1/\widehat{Z} = 1/R + i\omega C$   
Erweiterte Kirchhoffsche Regeln:  
Knotenregel:  $\sum \widehat{I} = 0$   
Maschenregel:  $\sum \widehat{U} = 0$   
Reihenschaltung:  $\widehat{Z} = \sum \widehat{Z}_i$   
Parallelschaltung:  $\widehat{Z}^{-1} = \sum \widehat{Z}_i^{-1}$   
RLC-Schwingkreis ohne Stromquelle:  
 $I(t) = C_1 e^{-\gamma t} e^{i\omega_R t} + C_2 e^{-\gamma t} e^{-i\omega_R t}$   
 $\omega_R = (\omega_0^2 - \gamma^2), \omega_0^2 = 1/LC, \gamma = R/2L$   
 $\gamma < \omega_0$ : Schwingfall  
 $\gamma > \omega_0$ : Kriechfall  
 $\gamma = \omega_0$ : aperiodischer Grenzfall  
Mit Stromquelle:  
 $I(t) = U_0 \frac{1}{\widehat{Z}} e^{i\omega t} = e^{i\omega t}.$   
$$\left( \frac{U_0 R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} - i \frac{U_0 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \right)$$
  
Unbelasteter (verlustfreier) Transformator:  
 $U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1$   
 $I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$   
Elektrische Leistung im RC-Glied / elektrische Feldenergie:  $W_{\text{el}} = \frac{1}{2} C U(t)^2$   
Elektrische Leistung im LR-Glied / magnetische Feldenergie:  $W_{\text{el}} = \frac{1}{2} L I(t)^2$   
Energiedichte des elektrischen Feldes:  
 $w_{\text{el}} = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} E D$   
Energiedichte des magnetischen Feldes:  
 $w_{\text{m}} = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} B H$   
Allgemein:  $w_{\text{elektromag}} = \frac{1}{2} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H})$   
**6 Elektromagnetische Wellen**  
Transversale Wellen  
→ Ausbreitung senkrecht zur Schwingungsrichtung  
Longitudianle Wellen  
→ Ausbreitung entlang der Schwhingungsrichtung  
Harmonische Ebene Welle:  
 $y(x, t) = A \sin(kx \pm \omega t)$   
 $y(\mathbf{x}, t) = A \sin(\mathbf{kx} \pm \omega t)$   
Wellenzahl:  $k = 2\pi/\lambda$   
Wellenlänge:  $\lambda = 2\pi/k$   
Phasengeschwindigkeit:  $v_{ph} = \omega/k$   
Amplitude  $A$   
Winkelgeschwindigkeit:  $\omega = 2\pi v = 2\pi/T$   
Fourier-Reihe:  
 $f(t) = f(t + T)$   
$$\rightarrow f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$
  
$$a_i = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(i\omega t) dt$$

$b_i = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(i\omega t) dt$   
Fourier-Integral:  
 $f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (a(\omega) \cos(\omega t) + b(\omega) \sin(\omega t)) d\omega$   
 $a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt$   
 $b(\omega) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin(\omega t) dt$   
Klassische Wellengleichung:  
 $\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$   
 $\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v^2 \Delta \psi$   
Wellenpaket:  
 $\psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} A(k) e^{i(kx - \omega t)} dk$   
 $A(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x, 0) e^{-i(kx)} dx$   
Phasengeschwindigkeit:  $v_{ph} = \omega/k$   
Dispersionsrelation:  
 $\omega = \omega(k) = \omega(k_0) + \frac{d\omega}{dk}|_{k_0} (k - k_0) + \dots$   
Gruppengeschwindigkeit:  $v_{gr} = d\omega/dk$   
Elektromagnetische Wellengleichungen:  
 $\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \Delta \mathbf{E} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon \mu \varepsilon_0 \mu_0} \Delta \mathbf{E}$   
 $\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \Delta \mathbf{B} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon \mu \varepsilon_0 \mu_0} \Delta \mathbf{B}$   
Linear polarisierte, ebene Wellen:  $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \hat{e}_y E_0 \sin(kx - \omega t)$   
 $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \hat{e}_z (E_0/c) \sin(kx - \omega t)$   
 $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}, \mathbf{E}, \mathbf{B} \perp \mathbf{k}$   
 $\mathbf{E}, \mathbf{B}$  in Phase  
 $|\mathbf{B}| = |\mathbf{E}|/c$   
 $\mathbf{B} = (1/\omega)(\mathbf{k} \times \mathbf{E})$   
 $c = \omega/k$   
Zirkular polarisierte, ebene Wellen:  
 $E_{0,x} = E_0, y; \varphi = 90$   
Elliptisch polarisierte, ebene Wellen:  
 $E_{0,x} \neq E_{0,y}; \varphi = 90$   
Kugelwellen:  $\mathbf{E} = (\mathbf{E}_0/r) \sin(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t), \mathbf{B} = (\mathbf{B}_0/r) \sin(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t), \mathbf{k} \parallel \mathbf{r}$   
Poynting-Vektor:  $\mathbf{S} = (1/\mu_0)(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$   
Hertzer Dipol:  
Eigenfrequenz:  $1/\sqrt{LC}$   
Nahfeld:  $E \sim 1/r^3, B \sim 1/r^2, \varphi = 90$   
Fernfeld:  $E \sim 1/r, B \sim 1/r, \mathbf{E} \perp \mathbf{B} \perp \mathbf{k}$   
Drahtwelle:  
 $I_0(z) = I_0 \cos(\pi x/e)$   
 $U_0(z) = I_0 \sin(\pi x/e)$   
Strahlungsgleichung:  
 $S(r, v) = \frac{p_0^2 \omega^4 \sin^2 \theta}{16\pi^2 \varepsilon_0 c^3 r^2} \sin^2(\omega t - kr)$   
 $\lambda = c/\nu$

**7 Optik**  
Phasengeschwindigkeit:  
 $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}, c' = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu \varepsilon_0 \mu_0}}$   
Amplitude:  $E = cB$   
Energiefluss:  $\mathbf{S} = (1/\mu_0)(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$   
Intensität:  $I = |\mathbf{S}| = \varepsilon_0 c E^2$   
Spalt, Nullstellen:  $a \sin \theta = m\lambda, m \in \mathbb{N}$   
Intensitätsverteilung für Beugung am Einzelspalt:  
$$I = I_0 \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right)^2$$
  
Doppelspalt mit unendlich dünne Spaltbreite:  
Interferenzmaxima:  $d \sin \theta = m\lambda, m \in \mathbb{N}_0$   
Interferenzminima:  $d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda, m \in \mathbb{N}_0$   
Intensitätsverteilung:  $I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \delta$   
 $\delta = (2\pi/\lambda) d \sin \theta$   
Doppelspalt mit Spaltbreite  $a$ :  
$$I = 4I_0 \left( \frac{\sin \frac{1}{2} \phi}{\frac{1}{2} \phi} \right)^2 \cos^2 \frac{1}{2} \delta$$
  
 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$   
Fraunhofer-Beugung:  
 $E(\theta, t) \sim e^{i\omega t} \int A(x) e^{iKx} dx, K = k \sin \theta$   
Mehrfachspalt:  
$$I(\theta) \sim \left( \frac{\sin\left(Mk \frac{d}{2}\right)}{\sin\left(k \frac{d}{2}\right)} \right)^2 \left( \frac{\sin\left(k \frac{a}{2}\right)}{k \frac{a}{2}} \right)^2$$
  
Hauptmaxima:  $\sin \phi_n = n(\lambda/d), m \in \mathbb{N}_0$   
Auflösungsvermögen:  $\lambda/\Delta\lambda \leq nm$   
Anzahl Spalte:  $m$   
Ordnung:  $n$   
Gesetz von Snellius:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$   
Kritischer Winkel:  $\sin \theta_k = n_1/n_2$   
Gesetz von Malus:  $I = I_0 \cos^2 \theta$   
Fresnelsche Formeln:  
 $R_{\perp}(\alpha, \beta) = \left( \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2$   
 $R_{\parallel}(\alpha, \beta) = \left( \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right)^2$   
 $T_{\perp}(\alpha, \beta) = \left( \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2$   
 $T_{\parallel}(\alpha, \beta) = \left( \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2$   
Gesetz von Brewster:  $\tan \theta_{Br} = n_2/n_1$   
Reflexionskoeffizient bei senkrechten Einfall:  
 $R_{\parallel} = R_{\perp} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$   
Linsengleichung:  $1/g + 1/b = 1/f$   
$$\text{Brennweite: } f = \frac{r_1 r_2}{(n - 1)(r_1 + r_2)}$$
  
 $B/G = b/g$   
Parallelstrahl → Brennstrahl  
Zentralstrahl → Zentralstrahl  
Brennstrahl → Parallelstrahl

**8 Werte**  
 $\varepsilon_0 = 8.854\,16 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$   
 $\mu_0 = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ Vs/Am}$   
 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$   
 $e = 1.602 \text{ C}$   
**9 Extras**  
 $\mu_0 \varepsilon_0 = 1/c^2$   
 $\widehat{Z} = |\widehat{Z}| \cdot e^{i\varphi} \quad |\widehat{Z}| = \sqrt{(\Re \widehat{Z})^2 + (\Im \widehat{Z})^2}$   
 $\varphi = \arctan \Im \widehat{Z} / \Re \widehat{Z}$  Maxwell-Gleichungen:  
 $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$   
 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$   
 $\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$   
 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$   
Makroskopische:  
 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{\text{frei}}$   
 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$   
 $\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$   
 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$   
 $\rho_{frei} = \rho - \rho_{pol} = \rho + \div \mathbf{P}$   
Integrale Form:  
 $\oint_{\partial V} \mathbf{D} d\mathbf{A} = \int_V \rho dV = Q(V)$   
 $\oint_{\partial V} \mathbf{B} d\mathbf{A} = 0$   
 $U_{\text{ind}} = \oint_{\partial A} \mathbf{E} ds = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{A}$   
 $\oint_{\partial A} \mathbf{H} ds = \int_A \mathbf{j} d\mathbf{A} + \int_A \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{A}$   
Tiefpass:  
 $\widehat{U}_e = \widehat{U}_R + \widehat{U}_C, \widehat{U}_C = \widehat{U}_a, \widehat{I}_R = \widehat{I}_C = \widehat{I}_0$   
 $\rightarrow \widehat{U}_e = \widehat{Z}_R \widehat{I}_0 + \widehat{Z}_C \widehat{I}_0$   
 $\rightarrow \widehat{I}_0 = \widehat{U}_e / (\widehat{Z}_R + \widehat{Z}_C)$   
 $\rightarrow \widehat{U}_C = \widehat{U}_a = \widehat{U}_e (\widehat{Z}_C / (\widehat{Z}_R + \widehat{Z}_C))$   
Ringspule mit Lücke:  
 $\mu_1 H_{\perp}^{(1)} = \mu_2 H_{\perp}^{(2)} \rightarrow \mu_{Fe} H_{Fe} = H_{\text{Luft}}$   
 $\oint \mathbf{H} ds = I_i = NI$   
 $\oint \mathbf{H} ds = \int_{\text{Luft}} H_{\text{Luft}} ds + \int_{Fe} H_{Fe} ds$   
 $\oint \mathbf{H} ds = \int_{\text{Luft}} H_{\text{Luft}} ds + \int_{Fe} (H_{\text{Luft}}/\mu_{Fe}) ds$   
 $NI = H_{\text{Luft}} d + (H_{\text{Luft}}/\mu_{Fe})(2\pi R - d)$   
$$\rightarrow H_{\text{Luft}} = \frac{\mu_{Fe} NI}{2\pi R + (\mu_{Fe} - 1)d}$$
  
 $B_{\text{Luft}} = \mu_0 H_{\text{Luft}} = B_{Fe}$   
Ring mit Paramagnet:  
 $B_{Fe} = \mu_0 \mu_{Fe} H_{Fe} = B_{\text{Para}}$   
 $H_{\text{Para}} = B_{\text{Para}}/\mu_0 - M \quad \oint \mathbf{H} ds = 0 = \int_{Fe} H_{Fe} ds + \int_{\text{Para}} H_{\text{Para}} ds$   
 $0 = H_{Fe}(2\pi R - d) + (B_{\text{Para}}/\mu_0 - M)d$   
 $0 = H_{Fe}(2\pi R - d) + (\mu_{Fe} H_{Fe} - M)d$   
$$\rightarrow H_{Fe} = \frac{dM}{2\pi R + (\mu_{Fe} - 1)d}$$