

Zusammenfassung NuS I

René Zurbrügg

20. Dezember 2018

1 Elektrostatik

Elementarladung	e	$+1.602 \cdot 10^{-19}$	$\frac{As}{m}$
Dielektrizitätskonst.	ϵ_0	$8.854 \cdot 10^{-12}$	$\frac{As}{Vm}$
Magn. Permeabilität	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\frac{Vs}{Am}$
Ruhemasse Elektron	$m_{0,e}$	$9.1094 \cdot 10^{-31}$	$\frac{kg}{m}$
Ruhemasse Proton	$m_{0,p}$	$1.6726 \cdot 10^{-27}$	$\frac{kg}{m}$
Lichtgeschwindigkeit	$c_{vak.}$	$2.99792 \cdot 10^8$	$\frac{m}{s}$

1.1 Ladungsdichten

- Linienladungsdichte: $\lambda = \frac{dQ}{dl} = \left[\frac{As}{m} \right], Q = \int_l \lambda dl$
- Flächenladungsdichte: $\sigma = \frac{dQ}{dA} = \left[\frac{As}{m^2} \right], Q = \int_A \sigma dA$
- Raumladungsdichte: $\rho = \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{As}{m^3} \right], Q = \int_V \rho dV$

1.2 Grundgrössen

- E-Feld einer Punktladung: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \left[\frac{V}{m} \right]$
- Kraft mehrer, zweier Ladungen: $\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r \quad [N]$
- E-Feld Punktdlg: $\vec{E}(\vec{r}_p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sum_k \frac{Q_k}{|\vec{r}_p - \vec{r}_k|^2} \frac{\vec{r}_p - \vec{r}_k}{|\vec{r}_p - \vec{r}_k|}$
- E-Feld ∞ -langer Leiter: $E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r_\perp}$
- Spannung, Innen-/Aussenleiter: $\vec{E}(\rho) = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \frac{1}{\rho} \vec{e}_\rho$
 $U = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E}(\rho) d\vec{\rho} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon \cdot l} \frac{1}{\rho} d\rho = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon \cdot l} \ln \left| \frac{r_2}{r_1} \right|$
- Leckstrom: $I = \int_0^{2\pi} \int_0^l \vec{J}(\rho) \rho dz d\varphi = 2\pi \kappa l E(\rho) \Rightarrow E(\rho) = \frac{I}{2\pi \kappa l} \frac{1}{\rho}$
- Elektr. Flussdichte $\vec{D}(\vec{r}) = \epsilon_0 \cdot \vec{e}_r \cdot \vec{E}(\vec{r}) = \epsilon \cdot \vec{E}(\vec{r}) \quad \left[\frac{As}{m^2} \right]$

1.2.1 Arbeit & Potential (1-33)

$$W_{P_1 \rightarrow P_2} = - \int_{P_1}^{P_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad \text{weg-unabhängig}$$
$$W_e = -Q \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{s} = Q (\varphi(P_2) - \varphi(P_1)) = -U_{12} Q$$
$$\rightarrow [W] = W_s = J, [P] = \frac{J}{s} = W$$

Potential:
Oftmals $P_{ref} = \infty$
 $\varphi(P_1) = \frac{W(P_{ref} \rightarrow P_1)}{Q_1} = - \int_{P_{ref}}^{P_1} \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad [V]$

1.2.2 Spannung

$$U_{12} = \varphi(P_1) - \varphi(P_2) = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{W_{12}}{Q}$$

1.3 Das Gauss'sche Gesetz (1-45)

$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \iiint_{V_A} \rho \cdot dV = Q_{eff} \rightarrow Q_{eff} = D \cdot A_{eff}$$

E-Feldlinien von idealen Leitern, stehen senkrecht auf der Oberfläche.

1.4 Kondensator (1-61)

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A}}{\int_s \vec{E} \cdot d\vec{s}} = \frac{\oint_A \sigma dA}{\int_s \vec{E} \cdot d\vec{s}} \quad [F] = \left[\frac{As}{V} \right]$$

Einfache Kondensatorentladung: $U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

- Plattenkondensator:**
 $E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{Q}{\epsilon A}, \quad U = Ed \rightarrow C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon A}{d}$
Das Feld einer Platte ist $E/2$
- Kugel(schalen)kondensator: (1-62)(1-73)**
 $U_{ab} = \int_{r_i}^{r_a} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \int_{r_i}^{r_a} \frac{1}{r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \frac{r_a - r_i}{r_a r_i} = \frac{Q}{C} \rightarrow C = 4\pi\epsilon \frac{r_i r_a}{r_a - r_i}$

- Vielschichtenkondensator aus n Platten:**
 $C_{ges} = (2n - 1)C$

- Zylinderkondensator**
 $C = \frac{R_2}{R_1} \frac{Q}{\frac{1}{2\pi l \epsilon n d}} = \frac{2\pi \epsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$
Für unendlich dünne Platten: $D = \sigma/2$

1.5 Energie im E-Feld (1-70)(1-72)

$$W_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2 = \iiint_V \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} dV$$

2 Elektr., stationäres Strömungsfeld

2.1 Strom

$$I = \frac{dQ}{dt} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \approx \pm J \cdot A, \quad [I] = A, \quad J = \frac{dI}{dA}, \quad [J] = \frac{A}{m^2}$$

Stat. Strömungsfeld, wenn I konst.: $\oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0$ (1-86)

- Spezifische Leitfähigkeit:**
Driftgeschw. $\vec{v}_{Drift} = -\mu_e \vec{E}$ wobei $\mu_e = \text{"Beweglichkeit"}$
 $\vec{J} = \vec{v}_{Drift} \rho = \underbrace{\vec{v} n q}_{\kappa} \vec{E} = -\rho \mu_e \vec{E}$
 $\kappa = (\mu_- q_- + \mu_+ q_+) = \text{spez. Leitf.}, [\kappa] = \frac{A}{Vm} = \frac{1}{\Omega m}$
- Spezifischer Widerstand:** $\rho_R = \frac{1}{\kappa}, [\rho_R] = \Omega m = \frac{Vm}{A}$
- Temperaturabhängigkeit:**
 $\rho_R(T) = \rho_{R,20^\circ C} (1 + \alpha(T - 20^\circ C))$

- Ohmsches Gesetz:** $U = R \cdot I$, $[R] = \frac{V}{A} = \Omega$
 $\vec{J} = \kappa \vec{E}, \quad R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\kappa A} = \frac{\rho_R l}{A} = \frac{\int_s \vec{E} \cdot d\vec{s}}{\kappa \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A}}$

- Leitwert:** $G = \frac{1}{R}$ $[G] = S$ (Siemens)

2.2 Sprungstellen bei Materialübergängen (1-99)

- Normalkomponenten.:** $J_{n1} = J_{n2}, \quad \kappa_1 E_{n1} = \kappa_2 E_{n2}$
Die Normalkomponente der Stromdichte ist stetig.

- Tangentialkomp.:** $E_{t1} = E_{t2}, \quad \frac{J_{t1}}{J_{t2}} = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} = \frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)}$
 $\alpha_i = \text{Winkel zur Flächennormale, Die Tangentialkomponente des E-Feldes ist stetig.}$

2.3 Energie und Leistung (1-102)

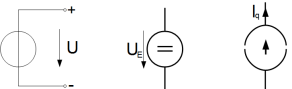
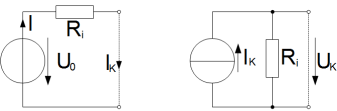
$$W_e = \int_0^t P(\tau) d\tau \quad \text{und} \quad P(t) = \frac{dW_e}{dt}$$
$$P = UI = I^2 R = U^2 / R$$

Verlustleistungsdichte: $p_V = \frac{dP}{dV} = \vec{E} \cdot \vec{J}$

$$P = \iiint_V p_V dV = \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV$$

3 DC-Netzwerke

3.1 Spannungs- und Stromquellen

- Ideale Quellen:**

- Reale Stromquelle** Leerlaufspannung: $U_0 = R_i \cdot I_k$
- Reale Spannungsquelle** Kurzschlussstrom: $I_k = \frac{U_0}{R_i}$

Umwandlung: $[U\text{-Quelle}] U_0 = R_i \cdot I_0 [I\text{-Quelle}]$

- Kirchhoff'sche Maschenregel:** $\sum_{\text{Masche}} U_k = 0$

- Kirchhoff'sche Knotenregel:** $\sum_{\text{Knoten}} I_k = 0$

- Leistungsanpassung**
Die Leistung wird maximiert, wenn gilt: $R_L = R_i$

Wechselwirkung Quelle $\Leftrightarrow$ Verbraucher

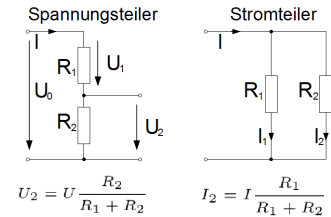
- Gleichmässige Energieabgabe ist nur bei identischen Quellen möglich.
- Leistungsabgabe von zusammengeschalteten Spannungsquellen ist unterschiedlich, wenn sie über versch. R_i oder U_L verfügen.

- Quellen können zu Verbrauchern werden.

3.2 Einfache Netzwerkberechnungen

- [R] Seriell:** $R_{ges} = \sum_{k=1}^n R_k$
- [R] Parallel:** $\frac{1}{R_{ges}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad n=2 \rightarrow R_{ges} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
- [C] Seriell:** $\frac{1}{C_{ges}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \quad n=2 \rightarrow C_{ges} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$
- [C] Parallel:** $C_{ges} = \sum_{k=1}^n C_k$
- [L] Seriell:** $L_{ges} = \sum_{k=1}^n L_k$
- [L] Parallel:** $\frac{1}{L_{ges}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k} \quad n=2 \rightarrow L_{ges} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$

3.3 Spannungs-/Stromteiler



Belasteter Spannungsteiler:

$$R'_2 = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} \rightarrow \frac{U_2}{U} = \frac{R'_2}{R_1 + R'_2} = \frac{R_2 R_L}{R_1 (R_2 + R_L) + R_2 R_L}$$

3.4 Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_L}{P_{ges}} \cdot 100\% = \frac{I^2 R_L}{I^2 (R_i + R_L)} \cdot 100\% = \frac{R_L / R_i}{1 + R_L / R_i} \cdot 100\%$$

Umgeformt (1-140): $\eta = \left(1 - \frac{1}{I_{max}} \right) \cdot 100\%$
Bei der Leistungsanpassung beträgt der Wirkungsgrad 50%.

3.5 Widerstandsmessung (1-131)

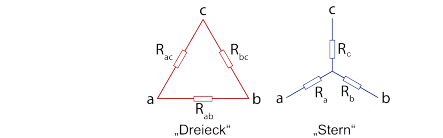
- Mit korrekter Spannungsmessung:**
 $R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - U_V / R_V} = \frac{U_V R_V}{I_A R_V - U_V}$
- Mit korrekter Strommessung:**
 $R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V - R_A I_A}{I_A}$

3.6 Superpositionsprinzip

Für jede Quelle das Netzwerk analysieren, die Anderen ausschalten, Resultate addieren.

- Spannungsquellen $\rightarrow$ Kurzschliessen
- Stromquellen $\rightarrow$ Leerlauf

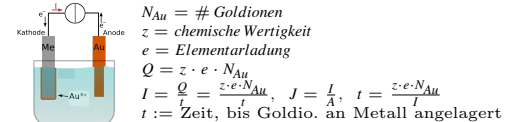
3.7 Stern-Dreieck-Transformation



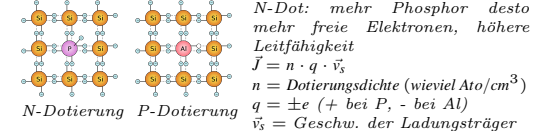
$$R_{AB} = \frac{R_{AC} R_{BC} + R_{AB} R_{BC} + R_{AC} R_{BC}}{R_{BC}} \quad R_A = \frac{R_{AC} R_{AB}}{R_{AC} + R_{AB} + R_{BC}}$$
$$R_{AC} = \frac{R_{AB} R_{BC} + R_{AB} R_{BC} + R_{AC} R_{BC}}{R_{BC}} \quad R_B = \frac{R_{AB} R_{BC}}{R_{AC} + R_{AB} + R_{BC}}$$
$$R_{BC} = \frac{R_{AB} R_{BC} + R_{AB} R_{BC} + R_{AC} R_{BC}}{R_{BC}} \quad R_C = \frac{R_{AC} R_{BC}}{R_{AC} + R_{AB} + R_{BC}}$$

Falls die Widersände gleich sind, gilt: $R_{Dreieck} = 3 R_{Stern}$

Galvanisierung

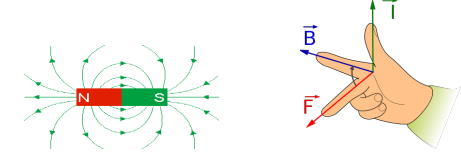


Dotierung



4 Magnetostatik

- Magnetfeld:** Feldlinien von N nach S (innen S → N)
Magnetfelder sind immer geschlossen.



- Mag. Flussdichte eines Leiters:** $\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{\rho}$, $[T] = \left[\frac{Vs}{m^2}\right]$
 ρ Abstand zum Leiter
- Mag. Feldstärke eines Leiters:** $\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} = \frac{1}{2\pi} \frac{I}{\rho}$, $[H] = \frac{A}{m}$
- Lorenzkraft (1-180):** $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = I\vec{l} \times \vec{B}$
- F auf Ladung (1-183):** $\vec{F}_L = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ $\vec{F} = Q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Analogie: Elektrisch, Magnetisch (1-209)

Grösse	Elektrisch	Magnetisch
Leitfähigkeit	κ	μ
Widerstand	$R = \frac{1}{\kappa \cdot A}$	$R_m = \frac{1}{\mu \cdot A}$
Spannung	$U_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{s}$	$V_{m12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{H} \cdot d\vec{s}$ $= R_{m12} \cdot \Phi_{12}$
Strom/Fluss	$I = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$ $= \iint_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$	$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$ $= \mu \iint_A \vec{H} \cdot d\vec{A}$
Ohm. Gesetz	$U = R \cdot I$	$V_m = R_m \cdot \Phi$
Maschengl.	$U_0 = \sum_{Masche} U_M$	$\Theta = \sum_{Masche} V_m$
Knotengl.	$\sum_{Knoten} I = 0$	$\sum_{Knoten} \Phi = 0$

Feldgrössen	Elektrisch	Magnetisch
Intensität/Wirkung (Kraft)	$\vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Quantität/Ursache (Ladung)	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$	$\vec{H}$

4.1 Oersted'sches Gesetz (Durchfl.satz)(1-187)

$$N \cdot I_{eff} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \Theta = \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_k H_k l_k = \sum_k \frac{B_k}{\mu} l_k$$

Θ Durchflutung, N Windungszahl
Prinzip gilt insbesondere für N = 1, sprich Einzelne Leiter

4.2 Verschiedene magnetische Komponenten

- ∞-langer Leiter (1-189):**
 $\vec{H}(\rho) = \vec{e}_\phi \cdot \frac{1}{2\pi} \int \frac{\rho/R^2}{1/\rho} \quad \rho \leq R$
 $\rho \geq R$
- Toroidspule (1-190):**
 $NI = \Theta = \int_0^{2\pi} \vec{e}_\phi H_\phi \rho d\phi = 2\pi \rho H_\phi(\rho) \rightarrow \vec{H} = \frac{NI}{2\pi \rho} \vec{e}_\phi$
- Reluktanzmodell:** $H = \frac{NI}{l} \vec{e}_x$
- Spannung über Spule:** Wenn sich die Spule bewegt, gilt nach dem Induktionsgesetz: $U_s = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$
Dies vereinfacht sich zu: $U_s = l_s \cdot B \cdot v$ mit l_s : Leiterlänge im B-Feld, v: Geschwindigkeit mit der sich die Spule über den Kern bewegt.

4.3 Reluktanzmodell (1-206)

- Magn. Spannung:** $V_m = \int_{P_1}^{P_2} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta = NI$ $[\Theta] = A$
- Magn. Strom:** $\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$, $[\Phi] = Vs = Wb$ (Weber)
- Magn. Widerstand:** $R_m = \frac{l}{\mu A}$, $[R_m] = \frac{1}{H} = \frac{A}{Vs}$
- Magnetische spezifische Leitfähigkeit:** μ
- Magnetischer Leitwert:** $\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$, $[\Lambda_m] = \frac{Vs}{A}$
- Ohm'sches Gesetz:** $V_m = R_m \Phi$, $[V_m] = A$

4.4 Magnetische Polarisation(1-199)

Magnetische Polarisation: $\vec{J}_m = \mu_0 \mu_r \vec{H} - \mu_0 \vec{H}$
Magnetisierung: $\vec{M} = \mu_r \vec{H} - \vec{H}$

Diamagnetismus:
Materialien, die das B-Feld schwächen, $\mu_r < 1$

Paramagnetismus:
Materialien, die das B-Feld leicht stärken, $\mu_r > 1$

Ferromagnetismus:
Neben der Hysteresekurve eines Ferrit Materials
Remanenz: oberer Schnittpunkt mit y-Achse, $\mu_r \gg 1$, μ_r nicht konstant

Dauermagnete: Ferromagnetische Stoffe im Remanenzzustand.

4.5 Sprungstellen bei Materialübergängen (1-205)

- Normalkomponenten:** $B_{n1} = B_{n2}$, $\frac{H_{n1}}{H_{n2}} = \frac{\tan(\alpha_2)}{\tan(\alpha_1)}$
- Tangentialkomp.:** $H_{t1} = H_{t2}$, $\frac{B_{t1}}{B_{t2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)}$

4.6 Induktivität (1-211)

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N^2}{R_m}, \quad [L] = \frac{Vs}{A} = H \text{ (Henry)}$$

- A_L -Wert:** $L = N^2 \Lambda_L = N^2 \Lambda_m$, $A_L = \Lambda_m = \frac{1}{R_m} = [nH]$

- Generell:** $L \cdot I = N \cdot \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} \approx NB \cdot A$

- Toroidspule:** $L = \frac{\Phi}{I} = \frac{N\Phi_A}{I} = N^2 \frac{\mu H}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{ausser}}{r_{innen}}\right) = \mu \cdot \frac{A \cdot N^2}{l}$

- Luftspalt:** $L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_{rel} A}{l_m \mu_{rel} d} \approx N^2 \frac{\mu_0 A}{d}$ d Spaltgrösse

- Kraft Magnetfeld:** $F_A = \frac{B^2}{2\mu_0} A$

4.7 Induktion und Selbstinduktion(1-249)

- Induktionsgesetz:** $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$
Fluss gemäss rechte Hand Regel durch Kontur s zählen

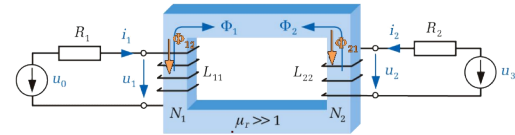
- Selbstinduktion:** $u_L(t) = L \frac{di_L}{dt}$ (vgl. $i_C = C \frac{dU_C}{dt}$)

- Energie:** $W_m = W_L = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \Phi I = \iiint_V \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} dV$

4.8 Bewegungsinduktion

- Induziertes E-Feld** $\vec{E}_i = \vec{v} \times \vec{B} \rightarrow u_{ind} = \int_{l(t)} \vec{E}_i \cdot d\vec{s} \rightarrow u_{ind} \simeq l_{eff}(t) \cdot E \cdot v$,
 $l_{eff}(t)$ Länge des Leiters im Magnetfeld wo $\vec{v} \perp \vec{B}$
- Veränderliche Fläche** $u_{ind} \simeq \pm B \cdot \frac{d(A(t))}{dt}$

4.9 Transformatoren

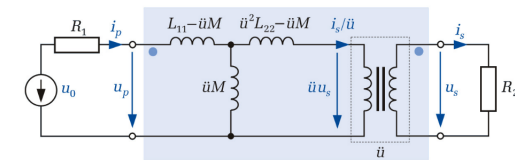


Gegeninduktivität $L_{12} = N_1 \cdot \frac{\Phi_{12}}{i_2} \simeq L_{21} = M$

Selbstinduktivität $L_{11} = N_1 \cdot \frac{\Phi_{11}}{i_1} \simeq N_1^2 \mu \cdot \frac{A}{l} = \frac{N_1^2}{R_m}$

Spannungskoppelung
 $u_1 = L_{11} \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \rightarrow u_1 = [L_{11} - M] \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} (i_2 - i_1)$
 $u_2 = L_{22} \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \rightarrow u_2 = [L_{22} - M] \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} (i_1 - i_2)$

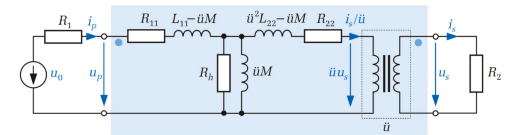
Ersatzschaltbild



Koppelfaktor $k_{21} = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}}, k_{12} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}} \rightarrow k = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}$

Übersetzungsverhältniss $\pm u = \frac{u_p}{u_s} = \frac{N_p}{N_s} = i_s i_p$
+ Falls Φ_1 und Φ_2 entgegengesetzt fliessen, sonst -

4.10 nicht-idealer Übertrager



- Kupfermaterial in den Windungen: R_{11}, R_{22}
- Reluktanzverlust ($\mu_r \neq \infty$): $\ddot{u}M$
- Streuung: Streuinduktivitäten, L_{s1}, L_{s2}

Vereinfachende Annahmen:

- Verlustfrei:** $R_{11} = R_{22} = 0$ $R_h = \infty$
- Strefrei:** $L_{11} - \ddot{u}M = 0$ $\ddot{u}^2 L_{22} - \ddot{u}M = 0$

- Kern ideal:** $R_m = \infty$ $\ddot{u}M = 0$

Koppelfaktor: $k = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}$

Widerstandstransformation
 R_L hinter Transformator $\Rightarrow R_L = \frac{u_p}{i_p} = \ddot{u}u_s \cdot \frac{\ddot{u}}{i_s} = \ddot{u}^2 \cdot R$ ohne Transformator

5 Allgemeines

Absoluter Fehler: $F = \Delta x = |x_{ist} - x_{mess}|$
Relativer Fehler $F_{rel} = \frac{\Delta x}{x_{ist}} \cdot 100\%$

Kreis-Tangentengleichung: $a = \frac{v^2}{r}$

Beschleunigung: $a = \frac{E}{m}$
Kugel: $V = \frac{4}{3} \pi r^3, A = 4\pi r^2$

Kreis: $A = \pi r^2, U = 2\pi r$

Auftriebskraft = $Fa = \rho L u_{fr} V g$

Karth. Koordinaten: $\vec{e}_\phi = \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} (-y\vec{e}_x + x\vec{e}_y)$

	Einheit	Bedeutung
$\vec{B}$	Vs/m^2	Magnetische Flussdichte
C	$As/V = F$	Kapazität
$\vec{D}$	As/m^2	Elektr. Flussdichte, el. Erregung
$\vec{E}$	V/m	Elektrische Feldstärke
G	$1/\Omega = A/V$	Elektr. Leitwert
$\vec{H}$	A/m	Magn. Feldstärke
I	A	Gleichstrom
I_K	A	Kurzschlussstrom
i	A	Zeitabhängiger Strom
$\vec{J}$	A/m^2	(räuml. vert.) Stromdichte
$\vec{J}$	Vs/m^2	Magn. Polarisation
$\vec{J}$	Vsm	Magn. Dipolmoment
k		Koppelfaktor
L	Vs/A	Induktivität
$\vec{M}$	A/m	Magnetisierung
$\vec{m}$	Am^2	Magnetisches Moment
N		Windungszahl
P	$VA = W$	Leistung
$\vec{P}$	As/m^2	Dielekt. Polarisation
$\vec{p}$	Asm	Elektr. Dipolmoment
Q	$As = C$	Ladung, Punktladung
R	$V/A = \Omega$	Ohmscher Widerstand
R_m	A/Vs	Magn. Widerstand
U	V	Gleichspannung
u	V	Zeitlich veränderliche Spannung
$\ddot{u}$		Übersetzungsverhältnis
V_m	A	Magnetische Spannung
W	$VAs = J$	Energie
w	WAs/m^3	Energiedichte
Φ	Vs	Magnetischer Fluss
Λ_m	Vs/A	Magnetischer Leitwert
Θ	A	Durchflutung
Ψ	As	Elektr. Fluss
χ		Dielekt. & magn. Suszeptibilität
ϵ	As/Vm	Dielektrizitätskonstante
ϵ_r		Dielektrizitätszahl
ϕ		Phasenwinkel
ϕ_e	V	Elektrostatisches Potential
η		Wirkungsgrad
κ	A/Vm	Spezifische Leitfähigkeit
λ	As/m	Linienladungsdichte
μ	Vs/Am	Permeabilität
μ_c	m^2/Vs	Beweglichkeit der Ladungsträger
ρ	As/m^3	Raumladungsdichte
ρ_R	Vm/A	Spezifischer Widerstand
σ	As/m^2	Flächenladung
ω	$1/s \cdot 2\pi$	Kreisfrequenz

	Name	Wert		Name	Wert
T	Tera	10^{12}	p	Piko	10^{-12}
G	Giga	10^9	n	nano	10^{-9}
M	Mega	10^6	μ	Mikro	10^{-6}
k	Kilo	10^3	m	Mili	10^{-3}
h	Hekto	10^2	c	Zenti	10^{-2}
da	Deka	10^1	d	Dezi	10^{-1}