

Gleichstrom

Ohmsches Gesetz

$$U = R \cdot I$$

elektr. Feldstärke

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \left[\frac{N}{As} = \frac{V}{m} \right]$$

elektr. Arbeit

$$W = Q \cdot U \quad [J = Nm]$$

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} = |\vec{F}| |\Delta s| \cos \alpha$$

$$W_{2 \rightarrow 1} = -Q \cdot U = -W_{1 \rightarrow 2}$$

$$0^\circ C = 273,15 K$$

elektr. Leistung

$$P = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad [W = AV]$$

Homogenes elektr. Feld

$$|\vec{E}| = \text{const}; U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

spez. Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \rightarrow \text{Leitertlänge}$$

$$\text{bis } 200^\circ C: \frac{1}{R} \approx \frac{1}{R_0} (1 - \alpha_0 \Delta T)$$

$$\alpha_0 < 0: \text{Heißleiter } (I_U, I_R)$$

$$\alpha_0 > 0: \text{Kaltleiter } (I_U, I_R)$$

elektr. Stromstärke

$$I = \frac{Q}{t} \rightarrow \text{Ladung}$$

elektr. Stromdichte

$$S = \frac{I}{A} = \sigma \cdot E \quad \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

spez. Leitfähigkeit

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

Nutzwirkung

$$\eta = \frac{\text{genutzte Leistung}}{\text{aufgewendete Leistung}} = \frac{P_V}{P_{\text{Quelle}}} \quad \text{oder } \eta = \frac{P_V}{P_V + P_{L1} + P_{L2}}$$

elektr. Spannung

$$U = E \cdot l$$

elektr. Leitwert

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} \quad [S = \frac{1}{\Omega}]$$

Knoten k: Verzweigung, woin. 3 Ströme fließen

Zweig z: verbindet 2 Knoten

Masche M: geschl. Pfad von Knoten zu gleichem Knoten

KG: k-1

MG: z-KG

$$\sum_{v=1}^n I_v = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{zufließend } + \\ \text{abfließend } - \end{array} \right.$$

$$\sum_{m=1}^n U_m = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{U-Pfeil in Umlaufrichtung } + \\ \text{U-Pfeil gegen Umlauf } - \end{array} \right.$$

Reihenschaltung

$$R_{\text{ges}} = R_1 + \dots + R_n$$

$$L_{\text{ges}} = L_1 + \dots + L_n$$

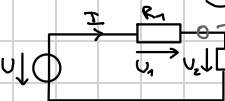
$$C_{\text{ges}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Spannungsteiler

- Strom ist gleich

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$



$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$\hookrightarrow 0: U_0 = U_{\text{Quelle}} - I \cdot R_1$$

Parallelschaltung

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} \rightarrow R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

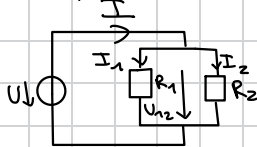
$$\frac{1}{L_{\text{ges}}} = \frac{1}{L_1} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

$$C_{\text{ges}} = C_1 + \dots + C_n$$

$$\frac{1}{Z_{\text{ges}}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

Stromteiler

- Spannungsabfall an allen Widerständen gleich



$$I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$I_2 = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$I = I_1 + I_2$$

Erzeugerzählpfeilsystem

→ Zählpfeile in unterschiedl. Richtung

+ u · i → abgegebene Leistung

- u · i → aufgenommene Leistung

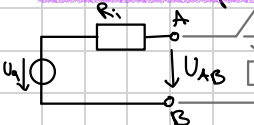
Verbraucherzählpfeilsystem

→ Zählpfeile in selbe Richtung

- u · i → abgegebene Leistung

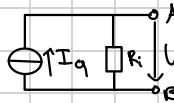
+ u · i → aufgenommene Leistung

Ersatzspannungsquelle



$$U_q = U_{AB,LL}; I_{KS} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}} = \frac{U_q}{R_i}$$

Ersatzstromquelle



$$I_{KS} = I_q; R_{AB} = R_i$$

$$KS: R = 0 \Omega, U = 0V, I = \text{max}$$

$$LL: R = \infty \Omega, U = \text{max}, I = 0A$$

Überlagerungssatz

→ bei linearen Netzwerken

→ NICHT: Leistung

$$\phi \rightarrow KS: R = 0 \Omega$$

$$\phi \rightarrow LL: R = \infty \Omega$$

⇒ alle Quellen bis auf eine herausnehmen

und GG für Teilsysteme lösen; $I_1 = I_{11} + I_{12}; I_2 = I_{21} + I_{22}$

Ideale U-Quelle: $U_q \uparrow$ $I \rightarrow \infty A, U_{AB} = U_q, P \rightarrow \infty W$

Reale U-Quelle: $U_{AB} = U_0 - R_i \cdot I$

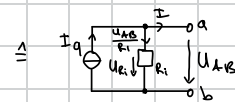
Leertlauf: $R_L = \infty, I = 0, U_{AB} = U_0$
Kurzschluss: $R_L = 0, I = I_K, U = 0$

$$U_{AB} = -\frac{U_0}{I_K} \cdot I + U_0 = U_0 - R_i \cdot I$$

Ideale Stromquelle: $I = I_q, U \rightarrow \infty V, P \rightarrow \infty W$

Reale Stromquelle: $I = I_q - \frac{1}{R_i} \cdot U_{AB}$

Quellenwandlung: ESB reale U-Quelle $\Leftrightarrow$ ESP reale I-Quelle: $U_{AB} \uparrow$ $I \rightarrow \infty A$



Wechselstrom

Wechselstrom

$$i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) \quad \text{Phasenwinkel}$$

Wechselspannung

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)$$

↳ Momentanwert

$$\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = 0$$

Mischgröße

$$\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \neq 0$$

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad \text{Effektivwert}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$$

$RAD = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot DEG$
$f < 50^\circ$: kapazitiv
$50^\circ < f < 90^\circ$: ohmsch-kap.
$f = 90^\circ$: ohmsch
$90^\circ < f < 180^\circ$: ohmsch-ind.
$f > 180^\circ$: induktiv
$jX_L \cdot \underline{I}_1 = X_L \cdot \underline{I}_1 \cdot e^{j(90^\circ - \varphi)}$

Phasenverschiebung

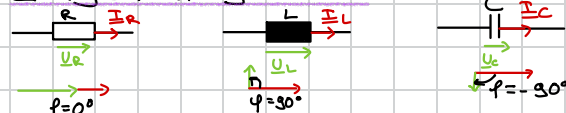
$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad \begin{cases} > 0 \rightarrow U \text{ eilt vor} \\ = 0 \rightarrow \text{in Phase} \\ < 0 \rightarrow U \text{ eilt nach} \end{cases}$$

$$\hat{u} \sin(\omega t + \varphi_u) = R \cdot \hat{i} \sin(\omega t + \varphi_i)$$

$$C: \varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2}; \varphi = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2} \quad L: \varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2}; \varphi = \varphi_u - \varphi_i = +\frac{\pi}{2}$$

Zeigerdiagramm

immer von I nach U



Amplitudenwert-ZD:

$$u_1(t) = \hat{u}_1 \cdot \sin(\omega t)$$

$$C: \hat{u}_C = \frac{1}{\omega C} \cdot \hat{i}_C; X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$L: \hat{u}_L = \omega L \cdot \hat{i}_L; X_L = \omega L$$

Effektivwert-ZD:

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad I_R = \frac{U_R}{R}$$

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad I_L = \frac{U_L}{X_L} \quad I_C = \frac{U_C}{X_C}$$

Kapazität

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot \omega \cdot \hat{u}$$

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{L} \quad U_C = Z_C \cdot I_C$$

Induktivität

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = L \cdot \omega \cdot \hat{i}$$

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{L} \cdot N^2 \quad U_L = Z_L \cdot I_L$$

RC-Reihe

$$I = I_C = I_R; U = U_R + U_C$$

$$U = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}; Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}; \varphi = -\arctan\left(\frac{1}{\omega C R}\right)$$

$$I = aA \cdot e^{j\varphi} \quad Z = R - jX_C$$

RL-Reihe

$$U = U_R + U_L$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right); I = \frac{U}{Z} = aA \cdot e^{-j\varphi}$$

$$Z = R + jX_L \Rightarrow U = |U| = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

RC-Parallel

$$I = I_R + I_C; U = U_R = U_C$$

$$U = \frac{I}{\frac{1}{R} + j\omega C}; Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}; \varphi = -\arctan(\omega C R)$$

RL-Parallel

$$I = I_R + I_L$$

$$Z = \frac{\omega L \cdot R}{R^2 + (\omega L)^2}; \varphi = \arctan\left(\frac{R}{\omega L}\right)$$

RLC-Reihe

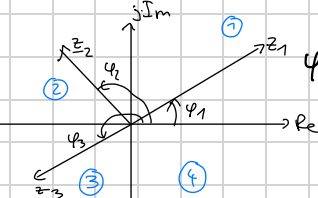
$$X_L = X_C \rightarrow Z \text{ ist } R$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow R \text{ ist min.}$$

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

Impedanz Z

$$Z = r \cdot e^{j\varphi}; \varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)}\right)$$



$$\varphi = \arg(x + jy) \quad \begin{cases} \arctan(\frac{y}{x}): x > 0 \\ \arctan(\frac{y}{x}) + \pi: x < 0, y \geq 0 \\ \arctan(\frac{y}{x}) - \pi: x < 0, y < 0 \\ \frac{\pi}{2}: x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2}: x = 0, y < 0 \\ -: x = 0, y = 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt}(Z) = j\omega \cdot Z$$

$$\int Z dt = \frac{1}{j\omega} \cdot Z$$

$$C: Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -jX_C$$

$$\begin{aligned} \omega \approx 0: X_C \rightarrow \infty & \text{ Leertaut} \\ 0 < \omega < \infty: X_C = \frac{1}{\omega C} & i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \\ \omega \rightarrow \infty: X_C \rightarrow 0 & \text{ Kurzschluss} \end{aligned}$$

$$L: Z_L = j\omega L = jX_L$$

$$\begin{aligned} \omega \approx 0: X_L \approx 0 & \text{ Kurzschluss} \\ 0 < \omega < \infty: X_L = \omega L & u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \\ \omega \rightarrow \infty: X_L \rightarrow \infty & \text{ Leertaut} \end{aligned}$$

Admittanz bei RCL-Parallel

$$Y = \frac{1}{Z}; Y_R = \frac{1}{R}; Y_C = j\omega C; I = Y \cdot U$$

Blind-U

$$U_B = U \cdot \sin(\varphi)$$

Wirk-U

$$U_w = U \cdot \cos(\varphi)$$

Blind-I

$$I_B = I \cdot \sin(\varphi)$$

Wirk-I

$$I_w = I \cdot \cos(\varphi)$$

Blind-R

$$X_L = \omega L \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Wirkleistung

$$P = \text{Re}(S) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Blindleistung

$$Q = \text{Im}(S) = U \cdot I \cdot \sin(\varphi); Q = Q_L - Q_C \quad [var]$$

Scheinleistung

$$S = U \cdot I = P + jQ$$

Leistungsfaktor

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Elektromagnetismus

C Einschalten



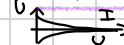
C Ausschalten



L Einschalten



L Ausschalten



Magn. Feld

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

Durchflutungsgesetz

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = N \cdot I; H = \frac{I}{2\pi r}$$

Stabspule

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

Diode

ideal $I \propto U_{AK}$

real V_F $\rightarrow U$

linear $I \propto U_{AK}$

um einen AP: $\frac{\Delta I_D}{\Delta U_D} = \frac{1}{R_A}$

Tangente: $I_D(U_D) = \frac{U_D - U_0}{R_A}$

Shockley

$I_D(U_D) = I_S (e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}} - 1)$ für $U_D > 0$

$I_S = I_S$ sonst: $I_S = I_S$

$U_T = \frac{k_B \cdot T}{e}$

Transistor

Basis-Schaltung

Kollektor

Emitter

Strom

$I_C = \beta I_B$

AP

$\beta = \frac{I_C}{I_B}$

Stromverstärkung

Wechselstromverstärkung

$\beta = \frac{\Delta I_{C0}}{\Delta I_B}$

AP-Einstellung

$R_C = \frac{U_{Bsat} - U_{CE}}{I_C}$; $I_{C0} = I_C - \frac{U_{CE}}{R_{CE}}$; $I_B = \frac{I_{C0}}{\beta} = \frac{U_{BE} - U_{BE0}}{R_{BE}}$

$U_{Bsat} = R_{BE} \cdot I_B + U_{BE0} = U_{REZ} = R_Z \cdot I_Z$; $U_{CE} = \frac{U_{Bsat}}{Z}$

$I_Z = q \cdot I_B$

Arbeitsgerade: $I_C = \frac{U_{Bsat} - U_{CE}}{R_C}$

1. Punkt: $U_{CE} = 0V$

2. Punkt: $I_C = 0A$

MOSFET

Sperrbereich: $U_{GS} < U_{th}; I_{DS} \approx 0$

linear: $K_n = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W_n}{L_n}$; $K_p = -K_n$

$U_{GS} > U_{th}; I_{DS} = K_{n,p} \cdot (U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2}$

Sättigung: $U_{GS} > U_{th}$ & $U_{DS,sat} \leq U_{DS}; I_{DS} = \frac{K_{n,p}}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2$

$U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th}$

Operationsverstärker

Differenzspannung

$U_A = U_+ - U_-$

ESB

$u_A = A_{ol} \cdot u_A$

Gegenkopplung ($u_A \rightarrow$ inv. Eingang)

$u_A = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_e$; $u_A = 0V$

$u_A = \frac{u_e}{u_e} = -\frac{R_2}{R_1}$; wenn $R_2 = R_1$; $K_i = -1$

Mittkopplung ($u_A \rightarrow$ nicht inv. Eingang)

$u_A = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot u_e$

$u_i = \frac{u_A}{u_e} = (1 + \frac{R_2}{R_1})$

Differenzverstärker: $u_A = A_d (u_{e2} - u_{e1})$

Bedingung: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \rightarrow u_A = \frac{R_2}{R_1} (u_{e2} - u_{e1})$

$\rightarrow$ Verstärkung genau: $V_i \cdot V_e$

Inv. Addierer

$u_A = -(\frac{R_N}{R_1} u_{e1} + \dots)$

mehrere Eingangssignale über R an inv. Eingang

Subtrahierer

$u_A = \frac{R_2}{R_1} \cdot (u_{e2} - u_{e1})$

Inv. Integrator

$u_A = -\frac{1}{R_1 C_1} \int u_e(t) dt + u_A(t=0)$

R am Eingang; C im Rückkopplungszweig

Inv. Differenzierer

$u_A = -R_1 C_1 \frac{du_e(t)}{dt}$

C am Eingang; R im Rückkopplungszweig

Inv. Schmitt-Trigger

$u_{ein} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_A$

$u_{aus} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_A$

Nicht-Inv. Schmitt-Trigger

$u_{ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot u_A$

$u_{aus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot u_A$

Impedanzwandler (Gegenkopplung)

$R_1 = \infty, R_2 = 0$

$u_A = u_e; u_i = 1$

Transformator

$L_1 = \frac{W_1 \cdot \Phi_{11}}{i_1}$

$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$

Übersetzungsverhältnis

$\bar{u} = \frac{L_1}{L_2}$; $\bar{u} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2}$

mit beliebigen passiven Zweipol Z_L

$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2 + Z_L}$; $Z_{EW} = (R_1 + j\omega L_1) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2 + Z_L}$

$\frac{U_2}{U_1} = \frac{j\omega M \cdot Z_L}{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2 + Z_L) + \omega^2 M^2}$

Kopplungskonst.

$k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}$

verlustlos ($R_1 = R_2 = 0$)

$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{k \cdot U_1}{1 + \frac{Z_L}{j\omega L_2}}$; $Z_{EW} = j\omega L_1 \frac{(1-k^2) + \frac{Z_L}{j\omega L_2}}{1 + \frac{Z_L}{j\omega L_2}}$

$\frac{U_2}{U_1} = \frac{k}{\bar{u}} \cdot \frac{1}{1 + j\omega L_2 \cdot \frac{1-k^2}{Z_L}}$

ideal ($|\frac{Z_L}{j\omega L_2}| \ll 1$; verlustlos, streuend)

$\frac{I_2}{I_1} = -\bar{u}$; $Z_{EIN} = \bar{u}^2 \cdot Z_L$; $\frac{Z_L}{\bar{u}} = \bar{u}$

Gleichstrommaschine

Erregerkreis: Magnetfeld durch Spule

$P_{VF} = \frac{U_F^2}{R_F}$

$\Phi = k_F \cdot I_F$

Ankerkreis: Drehmomentbildung

$U_A = R_A \cdot I_A + U_i$

$I_A = \frac{U_A - U_i}{R_A}$

$P_{VA} = R_A \cdot I_A^2$

$U_i = c \cdot \Phi \cdot \Omega$

$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A$

$M = M_i - M_R$

Schaltzeichen

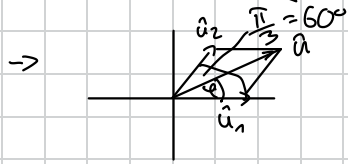
Fremderregung

Permanentmagnetenerregung

Reihenschlussenerregung

$n(M_i) = \frac{U_A}{2\pi c \cdot \Phi} - \frac{R_A}{2\pi (c \cdot \Phi)^2} \cdot M_i$; $\Omega(M_i) = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M_i$

Bestimme mit Zeigerdarstellung Amplitude $\hat{a}$ und Phasenwinkel φ von $u(t) = u_1(t) + u_2(t)$



1) $\hat{a}_1, \hat{a}_2$ einzeichnen; $\hat{a}_2$ mit $(\cdot + \frac{\pi}{3})$

2) Parallelogramm $\rightarrow \hat{a}$

3) $\hat{a}$ Länge messen, Winkel φ messen

$\rightarrow \hat{a} \sin(\frac{2\pi}{T}t + \varphi)$ 1) $\underline{U}_1 = \hat{u}_1 e^{j\omega_1 t}$ $\underline{U}_2 = \hat{u}_2 e^{j\omega_2 t} = \hat{u}_2 \cos(\omega_2 t) + j \hat{u}_2 \sin(\omega_2 t)$

2) $\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2$

3) $\hat{a} = |\underline{U}| = \sqrt{Re^2 + Im^2}$

4) $\varphi = \arctan(\frac{Im}{Re})$

$\underline{U}_R$ und $\underline{U}_L$

1) $\underline{U}_R = R \cdot \underline{I} \rightarrow \underline{U}_R$

2) bestimmen ob vor oder nach eilt + Winkel

3) $\underline{U}_R = \cos \alpha + j \sin \alpha$

Art der Last

- Ohmsche Last: $Q = 0 \rightarrow \underline{U}$ und $\underline{I}$ in Phase
 $P = S$
 $\cos \varphi = 1$

- ohmsch-induktiv: $Q > 0$
 $P > 0$

- Induktive Last: $Q > 0 \rightarrow \underline{I}$ hinter $\underline{U}$
 $P = 0$
 $\cos \varphi < 1$

- ohmsch-kapazitiv: $Q < 0$
 $P > 0$

- Kapazitive Last: $Q < 0 \rightarrow \underline{I}$ vor $\underline{U}$
 $P = 0$
 $\cos \varphi < 1$

Schwingkreis

- mind. 2 Energiespeicher

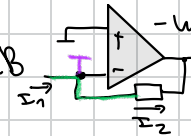
Operationsverstärker

- mind. 5 Anschlüsse

- Eingangswiderstand $\rightarrow \infty$



- Ausgangswiderstand $\rightarrow 0$

- virtuelle Masse: z.B.  - wegen $U_a = 0$ muss $U_+ = U_-$ sein
 $\rightarrow$ also an $\ominus$ auch Masse
 $\hookrightarrow I_1$ fließt nicht durch - wegen $R_1 \rightarrow \infty$,
 also $I_1 = I_2$

- $U_a = U_d \cdot A_{oc}$

- $U_a = 0V$ bei Gegenkopplung

- Nicht-invertierender Verstärker: $U_a = U_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$
 - Eingangssignal an $\ominus$; $\oplus$ an Masse
 +, also $+U_e$ verstärkt $+U_a$
- Invertierender Verstärker: $U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e$
 - Eingangssignal an $\oplus$
 $\rightarrow +U_e$ wird $-U_a$

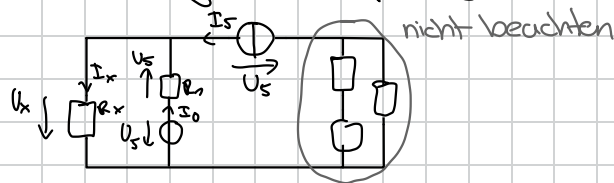
geg: Z_{ges} ; ges: 2 Bauteile, die Z_{ges} ergeben

1) $U \downarrow \rightarrow \boxed{R_x} \parallel L_x$ 2) $P = \frac{U^2}{R_x} \rightarrow R_x = \frac{U^2}{P}$ 3) $Q = \frac{U^2}{X_L} \rightarrow X_L = \frac{U^2}{Q}$ 4) $X_L = 2\pi f \cdot L \rightarrow L = \frac{X_L}{2\pi f}$

Überlagerungssatz anwenden

- 1) Spannungsquellen $\rightarrow$ KS / Stromquellen $\rightarrow$ Leerlauf
 - 2) Teilstrom $I_{1,1}$ jeweils berechnen mit KG/MG / Strom-/Spannungsteilerregel
 - 3) Teilstrome zu Gesamtstrom addieren
- ! Auf VZ achten, wenn $\vec{I_1} \leftarrow \vec{I_2}$ dann $\ominus$!

Leistung P_0 über Spannungswerte U_0 berechnen



- 1) KG: $I_{0,1} = I_{x,1}$
- 2) Stromteiler: $I_{0,2} = -I_s \cdot \frac{R_x}{R_1 + R_x}$
- 3) $I_0 = I_{0,1} + I_{0,2}$
- 4) $P_0 = U_0 \cdot I_0$

Gleichstrom

elektr. Feldstärke
 $E = \frac{F}{q} \left[\frac{N}{As} = \frac{V}{m} \right]$
 elektr. Arbeit
 $W = Q \cdot U \quad [J = Nm]$
 $W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} = |F| |ds| \cos \alpha$
 $W_{2 \rightarrow 1} = -Q \cdot U = -W_{1 \rightarrow 2}$
 Homogenes elektr. Feld
 $|\vec{E}| = \text{const}; U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$

elektr. Leistung
 $P = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad [W = AV]$
 spez. Widerstand
 $R = \rho \cdot \frac{L}{A} \rightarrow \text{Leitertlänge}$
 bis 200°C: $\frac{1}{R} \rightarrow \frac{1}{\rho}$
 $R = R_0 \cdot [1 + \alpha_0 (T - T_0)]$
 $\hookrightarrow \alpha_0 < 0$: Halbleiter (T_0, T_R)
 $\hookrightarrow \alpha_0 > 0$: Halbleiter (T_0, T_R)
 $0^\circ C = 273,15 K$

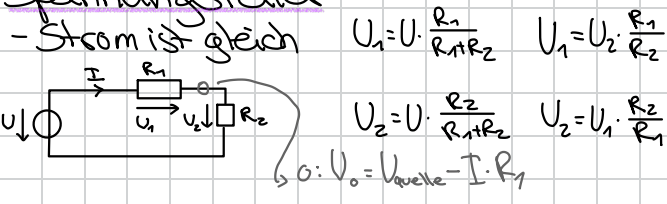
Nutzwirkung
 $\eta = \frac{\text{genutzte Leistung}}{\text{aufgewendete Leistung}} = \frac{P_v}{P_{\text{Quelle}}} = \frac{R_e(a)}{R_e(b)} = \frac{R_v}{R_v + R_{L1} + R_{L2}}$
 alle im Schaltkreis
 elektr. Stromstärke
 $I = \frac{Q}{t} \rightarrow \text{Ladung}$
 elektr. Stromdichte
 $S = \frac{I}{A} = \sigma \cdot E \quad \left[\frac{A}{m^2} \right]$
 spez. Leitfähigkeit
 $S = \frac{1}{\rho}$
 elektrische Spannung
 $U = E \cdot l$
 elektr. Leitwert
 $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} \quad \left[S = \frac{1}{\Omega} \right]$

KG: k-1 MG: z-KG

Reihenschaltung

$R_{\text{ges}} = R_1 + \dots + R_n$
 $L_{\text{ges}} = L_1 + \dots + L_n$
 $C_{\text{ges}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

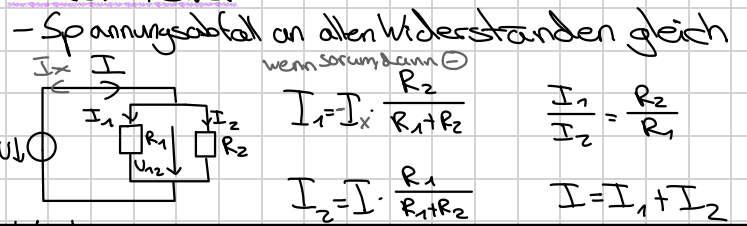
Spannungsteiler



Parallelschaltung

$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} \rightarrow R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$
 $\frac{1}{L_{\text{ges}}} = \frac{1}{L_1} + \dots + \frac{1}{L_n}$
 $C_{\text{ges}} = C_1 + \dots + C_n$
 $\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

Stromteiler



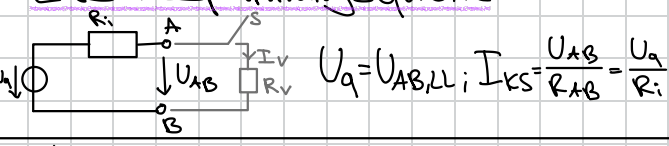
Erzeugerzählfeldsystem

→ Zählpeile in unterschiedl. Richtung
 + u.i → abgegebene Leistung
 - u.i → aufgenommene Leistung

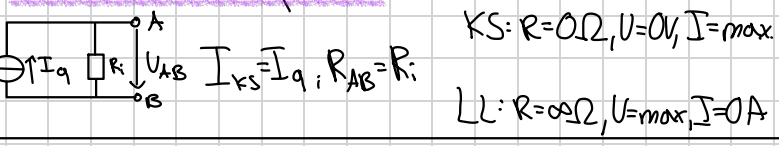
Verbraucherzählfeldsystem

→ Zählpeile in selbe Richtung
 - u.i → abgegebene Leistung
 + u.i → aufgenommene Leistung

Ersatzspannungsquelle



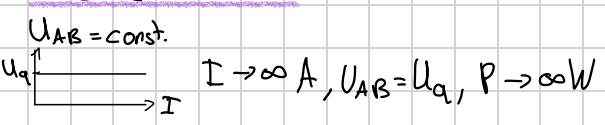
Ersatzstromquelle



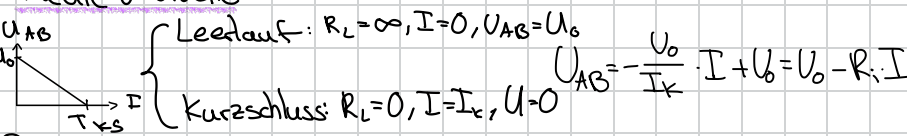
Überlagerungssatz

→ bei linearen Netzwerken
 → NICHT: Leistung
 1) Teilstrom $I_{1,1}$ jeweils berechnen mit KG/MG/Ström-/Spannungsteilerregel
 2) $I_1 = I_{1,1} + I_{1,2}$
 ! VZ achten, wenn → ← dann ⊖!
 ⇒ alle Quellen bis auf eine herausnehmen und GG für Teilsysteme lösen; $I_1 = I_{1,1} + I_{1,2}; I_2 = I_{2,1} + I_{2,2}$

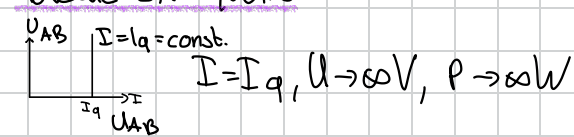
Ideale U-Quelle:



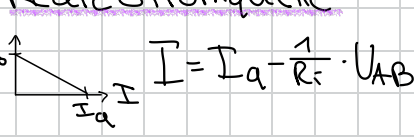
Reale U-Quelle:



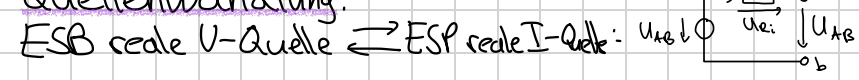
Ideale Stromquelle:



Reale Stromquelle:



Quellenwandlung:



Wechselstrom

Wechselstrom
 $i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)$ Phasenwinkel
 $\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = 0$

Mischgröße

$\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \neq 0$
 Wechselspannung
 $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)$
 $\hookrightarrow$ Momentanwert
 $\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = 0$

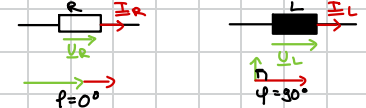
$RAD = \frac{2\pi}{360} \cdot DEG$

$\varphi < 90^\circ$: kapazitiv
 $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$: ohmsch-kap. (C)
 $\varphi = 0^\circ$: ohmsch
 $0^\circ < \varphi < 90^\circ$: ohmsch-ind. (L)
 $90^\circ < \varphi$: induktiv
 $jX_L \cdot \underline{I}_1 = X_L \cdot \underline{I}_1 \cdot e^{j(90^\circ + \varphi)}$

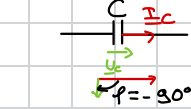
Phasenverschiebung
 $\varphi = \varphi_0 - \varphi_1$ $\begin{cases} > 0 \rightarrow U \text{ eilt vor} \\ = 0 \rightarrow \text{in Phase} \\ < 0 \rightarrow U \text{ eilt nach} \end{cases}$

$C: \varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2}; \varphi = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$ $L: \varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2}; \varphi = \varphi_u - \varphi_i = +\frac{\pi}{2}$

Zeigerdiagramm



flimmer von I nach U



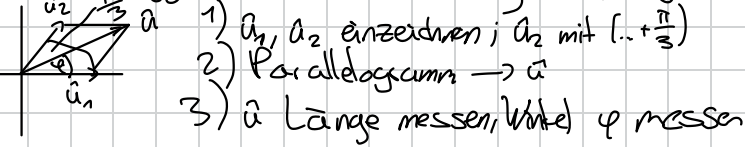
Amplitudenwert-ZD:

$u_1(t) = \hat{u}_1 \cdot \sin(\omega t)$
 $C: \hat{u}_C = \frac{1}{\omega C} \cdot \hat{i}_C; x_C = \frac{1}{\omega C}$
 $L: \hat{u}_L = \omega L \cdot \hat{i}_L; x_L = \omega L$

Effektivwert-ZD:

$\left(U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \right) | I = \sqrt{a^2 + b^2}$
 $I = \frac{1}{\sqrt{2}}$

Bestimme mit Zeigendarstellung Amplitude $\hat{u}$ und Phasenwinkel φ von $u(t) = u_1(t) + u_2(t)$



- 1) $\hat{u}_1, \hat{u}_2$ einzeichnen; $\hat{u}_2$ mit $(\dots + \frac{\pi}{3})$
- 2) Parallelogramm $\rightarrow \hat{u}$
- 3) $\hat{u}$ Länge messen, Winkel φ messen

$\hat{u} \sin(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi)$
 1) $\underline{U}_1 = \hat{u}_1 \cdot e^{j\varphi_1} = \hat{u}_1 \cos(\varphi_1) + j \hat{u}_1 \sin(\varphi_1)$
 2) $\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2$ 3) $\hat{u} = |\underline{U}| = \sqrt{Re^2 + Im^2}$

Kapazität

$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot \omega \hat{u}$ $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{L}$
 $\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -jX_C$ $\begin{cases} \omega \rightarrow 0: X_C \rightarrow \infty \text{ Leerlauf} \\ 0 < \omega < \infty: X_C = \frac{1}{\omega C} \\ \omega \rightarrow \infty: X_C \rightarrow 0 \text{ Kurzschluss} \end{cases}$

Induktivität

$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = L \cdot \omega \hat{i}$ $L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{L} \cdot N^2$
 $\underline{Z}_L = j\omega L = jX_L$ $\begin{cases} \omega \rightarrow 0: X_L \rightarrow 0 \text{ Kurzschluss} \\ 0 < \omega < \infty: X_L = \omega L \\ \omega \rightarrow \infty: X_L \rightarrow \infty \text{ Leerlauf} \end{cases}$

RC-Reihe $\rightarrow U$ -Zeiger addieren

$I = I_C = I_R; U = U_R + U_C$
 $\underline{Z} = R - jX_C; \varphi = -\arctan(\omega C R)$

RL-Reihe

$U = U_R + U_L$
 $\underline{Z} = R + jX_L; \varphi = \arctan(\frac{\omega L}{R})$

RC-Parallel $\rightarrow I$ -Zeiger addieren

$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C; U = U_R = U_C$
 $\varphi = -\arctan(\omega C R)$

RLC-Parallel
 $-\frac{1}{\underline{Z}} = \underline{Y}$

RL-Parallel

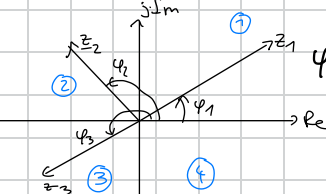
$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L$
 $\varphi = \arctan(\frac{R}{\omega L})$

RLC-Reihe

$-X_C = X_L \rightarrow \underline{Z} \text{ ist } R$
 $-\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow R \text{ ist min}$
 $-\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$

Impedanz $\underline{Z}$

$\underline{Z} = r \cdot e^{j\varphi}; \varphi = \arctan(\frac{Im(\underline{Z})}{Re(\underline{Z})})$



$\varphi = \arg(x + jy)$ $\begin{cases} \arctan(\frac{y}{x}): x > 0 \text{ ①} \\ \arctan(\frac{y}{x}) + \pi: x < 0, y \geq 0 \text{ ②} \\ \arctan(\frac{y}{x}) - \pi: x < 0, y < 0 \text{ ③} \\ \frac{\pi}{2}: x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2}: x = 0, y < 0 \\ -: x = 0, y = 0 \end{cases}$

Admittanz

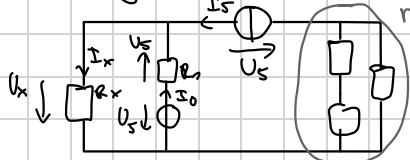
$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}; \underline{Y}_R = \frac{1}{R}; \underline{Y}_C = j\omega C; \underline{Y}_L = \frac{1}{j\omega L}$

Blind-U Wirk-U Blind-I Wirk-I
 $U_B = U \sin(\varphi)$ $U_W = U \cos(\varphi)$ $I_B = I \sin(\varphi)$ $I_W = I \cos(\varphi)$

Blind-R Leistungsfaktor Scheinleistung
 $X_L = \omega L$ $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ $S = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$
 $X_C = \frac{1}{\omega C}$

Wirkleistung Blindleistung
 $P = Re(S) = U \cdot I \cos(\varphi)$ $Q = Im(S) = U \cdot I \sin(\varphi) = Q_L - Q_C$

Leistung P_0 über Spannungswerte U_0 berechnen



- 1) $K_G: I_{0,1} = I_{x,1}$
- 2) Stromteiler: $I_{0,2} = -I_5 \cdot \frac{R_x}{R_1 + R_x}$
- 3) $I_0 = I_{0,1} + I_{0,2}$
- 4) $P_0 = U_0 \cdot I_0$

geg: $\underline{Z}_{ges}$; ges: 2 Bauteile, die $\underline{Z}_{ges}$ ergeben

1) $\underline{U} \rightarrow \underline{I} \rightarrow R_x$ 2) $P = \frac{U^2}{R_x} \rightarrow R_x = \frac{U^2}{P}$ 3) $Q = \frac{U^2}{X_C} \rightarrow X_C = \frac{U^2}{Q}$ 4) $X_L = 2\pi f L \rightarrow L = \frac{X_L}{2\pi f}$

Art der Last

- Ohmsche Last: $Q = 0 \cos \varphi = 1$ $P = S \rightarrow U$ und I in Phase
 - Induktive Last: $Q > 0 \cos \varphi < 1$ $P = 0 \rightarrow I$ hinter U
 - Kapazitive Last: $Q < 0 \cos \varphi < 1$ $P = 0 \rightarrow I$ vor U
 - ohmsch-induktiv: $Q > 0$ - ohmsch-kapazitiv: $Q < 0; P > 0$

Elektromagnetismus

C Einschalten



C Ausschalten



L Einschalten



L Ausschalten



Magn. Feld

$B = \mu_0 \mu_r \cdot H$

Durchflutungsgesetz

$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = N \cdot I; H = \frac{I}{2\pi r}$

Stabspule

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

Diode

ideal $I \propto U_{AK}$

real $I = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$

linear $I \propto U_{AK}$

um einen AP: $\frac{\Delta I_D}{\Delta U_D} = \frac{1}{R_A}$

Tangente: $I_D(U_D) = \frac{U_D - U_{D0}}{R_A}$

Shockley $I_D(U_D) = I_s (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$ für $U_D > 0$

$I_T = \frac{k_B T}{e}$

Transistor

Basis-Schaltung

Kollektor

Emitter

Strom AP

$I_C = \beta I_B$

$\beta = \frac{I_C}{I_B}$

Stromverstärkung

Wechselstromverstärkung

$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

AP-Einstellung

$R_C = \frac{U_{Batt} - U_{CE}}{I_C}$; $I_{C0} = I_C - \frac{U_{CE}}{R_{CE}}$; $I_B = \frac{I_{C0}}{\beta} = \frac{U_{BE} - U_{BE0}}{R_{BE}}$

$U_{Batt} = R_{BE} I_B + U_{BE0} = U_{RE2} = R_2 I_2$; $U_{CE} = \frac{U_{Batt}}{2}$

$I_2 = q \cdot I_B$

Arbeitsgerade: $I_C = \frac{U_{Batt} - U_{CE}}{R_C}$ { 1. Punkt: $U_{CE} = 0V$
2. Punkt: $I_C = 0A$

MOSFET

Speerbereich: $U_{GS} < U_{th}$; $I_{DS} \approx 0$

linear: $K_n = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W_n}{L_n}$; $K_p = -K_n$

$U_{GS} > U_{th}$; $I_{DS} = K_{nfp} \cdot ((U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2})$

Sättigung: $U_{GS} \geq U_{th}$ & $U_{DS,sat} \leq U_{DS}$; $I_{DS} = \frac{K_{nfp}}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2$

$U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th}$

Operationsverstärker

Differenzspannung

$U_A = U_+ - U_-$

ESB

$U_A = A_{OL} U_A$

Gegenkopplung ($U_A \rightarrow$ inv. Eingang)

$U_A = -\frac{R_2}{R_1} U_e$; $U_A = 0V$

$U_u = \frac{U_A}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$; wenn $R_2 = R_1$; $U_u = -1$

Mittkopplung ($U_A \rightarrow$ nicht inv. Eingang)

$U_A = (1 + \frac{R_2}{R_1}) U_e$

$U_u = \frac{U_A}{U_e} = (1 + \frac{R_2}{R_1})$

Impedanzwahl (Gegenkopplung)

$R_1 = \infty, R_2 = 0$

$U_A = U_e$; $U_u = 1$

Differenzverstärker: $U_A = A_d (U_{e2} - U_{e1})$

Bedingung: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \rightarrow U_A = \frac{R_2}{R_1} (U_{e2} - U_{e1})$

Verstärkung gesamt: $U_u = \frac{U_A}{U_e}$

Inv. Addierer

$U_A = -(\frac{R_2}{R_1} U_{e1} + \dots)$

mehrere Eingangssignale über R an inv. Eingang

Subtrahierer

$U_A = \frac{R_2}{R_1} (U_{e2} - U_{e1})$

Inv. Integrator

$U_A = -\frac{1}{R_1 C_1} \int U_e(t) dt + U_A(t=0)$

R am Eingang; C im Rückkopplungszweig

Inv. Differenzierer

$U_A = R_1 C_1 \frac{dU_e(t)}{dt}$

C am Eingang; R im Rückkopplungszweig

Inv. Schmitt-Trigger

$U_{ein} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_A$

$U_{aus} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{at}$

Nicht-Inv. Schmitt-Trigger

$U_{ein} = -\frac{R_1}{R_2} U_A$

$U_{aus} = -\frac{R_1}{R_2} U_{at}$

Transformator

$L_1 = \frac{W_1 \cdot \Phi_1}{\delta}$

$u(t) = L \cdot \frac{d i(t)}{dt}$

Übersetzungsverhältnis

$\bar{u} = \frac{U_1}{U_2}$; $\bar{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$

mit beliebigen passiven Zweipol Z_L

$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2 + Z_L}$; $Z_{EW} = (R_1 + j\omega L_1) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2 + Z_L}$

$\frac{U_2}{U_1} = \frac{j\omega M \cdot Z_L}{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2 + Z_L) + \omega^2 M^2}$

Kopplungskonst.

$k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}$

verlustlos ($R_1 = R_2 = 0$)

$\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{k \cdot \bar{u}}{1 + \frac{Z_L}{j\omega L_2}}$; $\frac{U_2}{U_1} = \frac{k}{\bar{u}} \cdot \frac{1}{1 + j\omega L_2 \frac{1-k^2}{Z_L}}$

ideal ($|\frac{Z_L}{j\omega L_2}| \ll 1$; verlustlos, stromlos)

$\frac{Z_2}{Z_1} = -\bar{u}$; $Z_{EIN} = \bar{u}^2 \cdot \frac{Z_L}{Z_1} = \bar{u}$

Gleichstrommaschine

Erregerkreis: Magnetfeld durch Spule

$P_{VF} = \frac{U_{VF}^2}{R_F}$

$\Phi = k_F \cdot I_F$

Ankerkreis: Drehmomentbildung

$U_A = R_A \cdot I_A + U_i$

$I_A = \frac{U_A - U_i}{R_A}$

$P_{VA} = R_A \cdot I_A^2$

$U_i = c \cdot \Phi \cdot \Omega$

$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A$

$M = M_i - M_R$

Schaltzeichen

Fremderregung

Permanentmagnetenerregung

Reihenschlussenerregung

$n(M_i) = \frac{U_A}{2\pi c \cdot \Phi} - \frac{R_A}{2\pi (c \cdot \Phi)^2} \cdot M_i$; $\Omega(M_i) = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M_i$