

Grundlagen

Komplexe Zahlen

$z = a + bi$
 $|z| = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot r$
 $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(z)}{\text{Re}(z)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$
 $z = |z| \cdot e^{i\varphi} = |z| \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi)$

Rechenregeln
 $z_1 \cdot z_2 = (r_1 \cdot e^{i\varphi_1}) \cdot (r_2 \cdot e^{i\varphi_2}) = r_1 \cdot r_2 \cdot e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}$
 $\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}$
 $\Rightarrow z = -j \cdot X_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ}$
 $\Rightarrow z = j \cdot X_L = X_L \cdot e^{j90^\circ}$

Einheiten

SI: m, kg, N, s, A, mol, K, cd
Spannung: $V = \frac{W}{A} = \frac{J}{C} = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3} = \frac{Nm}{As}$
Leistung: $W = VA = \frac{J}{s} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = \text{var}$
Widerstand: $R = \frac{V}{A} = \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} = \frac{1}{S}$ (Siemens)
Kapazität: $F = \frac{C}{V} = \frac{s}{\Omega} = \frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}$
Ladung: $C = As$ (Coulomb)
Induktivität: $H = \Omega s = \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}$ (Henry)
Strom: $A = C s^{-1}$ (Ladung pro Zeiteinheit)
Strömlichkeit: $S = I/A \neq \text{Siemens}; S = \frac{1}{\Omega}$

Weiteres

Elementarladung: $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ (Proton)
Feldstärke: $E = \frac{V}{d}$
Spannung: $U = E \cdot d = \varphi_1 - \varphi_2$ (Potentialunterschied)
Strom: $i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \Rightarrow I = \frac{Q}{t} = \frac{qQ}{At}$
Spez. Widerstand: $\rho [\Omega] = 1 \Omega m$
 $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$
Temperatur: $\rho(T) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot (T - T_0))$
Temperaturkoeffizient: $R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot (T - T_0))$
Bezugsgrößen: $S = \frac{1}{\rho} [S] = 1 \text{ Sm}^{-1}$
Spez. Leitfähigkeit: $W = Q \cdot U [W] = J = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$
Arbeit:

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

Geometrie

Kreis: $A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2$
 $U = 2\pi r = \pi \cdot d$

Gleichstrom

Allgemein

$U = R \cdot I$ (Ohmsches Gesetz)
 $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ (elek. Leitwert)
 $P = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$ (Leistung) $= \frac{W}{t}$
 $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$

Gleichstromkreise

1) Knotenregel: $\sum I_K = 0$ $KG = K-1$
2) Maschenregel: $\sum U_M = 0$ $HG = Z - KG = Z - (K-1)$

$\rightarrow$ Gleichungen: $KG \cdot HG = Z$

Reihenschaltung

$\Rightarrow I = \text{const}$
 $R = R_1 + R_2$
Spannungsteilerregel: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ bzw. $U_1 = \frac{R_1}{R_{\text{ges}}} \cdot U_{\text{ges}}$

Parallelschaltung

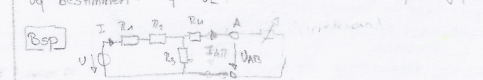
$\Rightarrow U = \text{const}$
 $\left(\frac{1}{R} \right) = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \rightarrow R_1 = R_2: R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$
Stromteilerregel: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ bzw. $I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

Reale Spannungsquelle

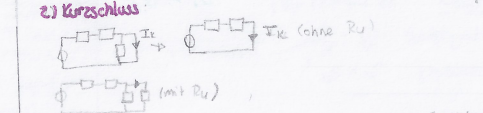
U_0 - Leerlaufspannung
 I_K - Kurzschlussstrom
 $\Rightarrow U = U_0 - R_i \cdot I$

Ersatzspannungsquelle

R_i bestimmen: Variante 1 $\rightarrow$ Spannungsquellen (KS) Strom (L) Widerstände addieren
 Variante 2 $\rightarrow R_i = \frac{U_0}{I_K}$ $U_0 = U_q$
 $\rightarrow$ Gleichung für reale Spannungsquelle



1) Leerlauf: $U_{AB} = U_0$ (Spannungsteilerregel) $\rightarrow$ kein Strom mehr durch R_L
2) Kurzschluss:



Leistung: entspricht nicht der Leistung wie im ursprünglichen Netzwerk (ursprünglich)
 $P = U \cdot I$
 $P_q = U_q \cdot I$

Reale Stromquelle

$\Rightarrow I = I_q - \frac{U}{R_i}$
 $(\text{Kurzschluss}) = I_q = \frac{U_0}{R_i}$

Überlagerungssatz

$\rightarrow$ Strome / Spannungen addieren (linear Überlagerung)
 Voraussetzung: Linearität: lineares Netzwerk & lineare Größen

Wechselstrom

Grundgesetze

$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)$
 $i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)$
Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
Effektivwert: $U = |U| = U_{\text{eff}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$ bzw. $I_{\text{eff}} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$
Ohmscher Widerstand: $\varphi = 0$ $\rightarrow$ Strom & Spannung sind in Phase

Induktivität

$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = \omega \cdot L \cdot \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2})$
 $\varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2}$ (Spannung eff. voraus)
 $\varphi_L = \varphi_u - \varphi_i = \frac{\pi}{2}$

Kapazität

$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{\hat{i}}{\omega C} \sin(\omega t + \varphi_i - \frac{\pi}{2})$
 $\varphi_u = \varphi_i - \frac{\pi}{2}$ (Spannung eff. nach)
 $\varphi_C = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$

Impedanz: $Z = j \cdot X_L = j \cdot \omega \cdot L = X_L \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$
 $U = Z \cdot I$
 $I = -j \cdot U \cdot Y_C = -j \cdot \frac{1}{X_C}$

Gleichstromanteile: wirken wie Kurzschlüsse

Leistung: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

Blindleistung: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

Reale Leistung: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

Gleichstromanteile: werden nicht durchgelassen: Leerlauf

Leistung

1) Scheinleistung: $S = U \cdot I_{\text{eff}} [VA]$
 $S = P + jQ$
 $|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$

2) Wirkleistung: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi [W]$
 $\rightarrow 0$ für L/C
 $\rightarrow P = U \cdot I$ für rein ohmsch

3) Blindleistung: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi [var]$
 $Q_C = X_C \cdot I^2$
 $Q_L = X_L \cdot I^2$
 $\Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Zeigendiagramm

1) **Reihenschaltung:** Spannungen werden addiert
 $U = I \cdot (R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}) = I \cdot (R + j(X_L - X_C))$
 $U = I \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \cdot e^{j\varphi}$
 $U = I \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \cdot e^{j\varphi}$
 $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right)$ **Vorzeichen:** $Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(X_L - X_C)$

2) **Parallelschaltung:** Ströme werden addiert (Admittanzen)
 $I = U \cdot (\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C) = U \cdot (\frac{1}{R} + j(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}))$
 $I = U \cdot \sqrt{ \frac{1}{R^2} + (\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})^2 } \cdot e^{j\varphi}$
 $I = U \cdot \sqrt{ \frac{1}{R^2} + (\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})^2 } \cdot e^{j\varphi}$
 $\varphi = \tan^{-1} \left(R \cdot (\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}) \right)$ **Vorzeichen:** $Y = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C = \frac{1}{R} + j(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})$

3) Vorgehen
 - Elemente in Reihe $\rightarrow$ Spannung ermitteln
 - Parallele Zellen $\rightarrow$ Spannungen gleichsetzen (Thales Kreis!)
 - Ströme addieren

Strom & Spannungsverlauf
 - ohmsch
 - induktiv $\varphi_L = 90^\circ - \frac{\pi}{2}$
 - kapazitiv $\varphi_C = -90^\circ - \frac{\pi}{2}$

Schwingkreise
 - periodischer Energieaustausch zw. 2 Speichern = Schwingungen
 - einfachster Schwingkreis: Kombination Spule + Kondensator
 - Resonanzfrequenz $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (Minimierung der Impedanz: Z ist reelle Größe (durch Variation der Frequenz))

- Schwingkreis $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{Z_0}{R}$ mit $Z_0 = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$
 - Spannung $U_L = U_C = Q \cdot U_R = Q \cdot R \cdot I = Z_0 \cdot I$
 - Strom bei ω_0 : $I = \frac{U}{R}$

Leistung
 - Augenblicksleistung: $p(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{\hat{u}}{2} \cdot \frac{\hat{i}}{2} \cdot (\cos(\varphi_u - \varphi_i) + \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i))$
 - Mittelwert $\rightarrow$ doppelfrequenter Anteil kompensiert sich
 $P = \frac{1}{T} \int p(t) dt = \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cdot \cos \varphi$

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)
 - rein ohmsch: $P = P_{\text{mittel}} = \frac{U^2}{R}$

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

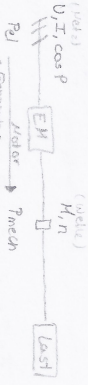
Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

Leistungsfaktor: $\cos \varphi$ (so oft möglich bei 1 liegen, z.B. über Blindleistungskompensation)

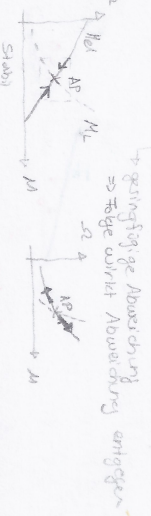
Gleichstrommaschine

Allgemein EM

elektrische Maschine → Energieumwandler



Arbeitspunkt stabil für: $\Omega > \Omega_{AP} \rightarrow M_e > M_{el}$
 $\Omega < \Omega_{AP} \rightarrow M_e < M_{el}$



Elektromagnetismus

konvergieren: $\vec{H}_{mag}$, Feldstärke
 $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ (Vektor)
 $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{B}_{res}$ (Hysteresekurve)
 $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{B}_{res}$ (Hysteresekurve)
 $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{B}_{res}$ (Hysteresekurve)

Stromflussdichte $\vec{B}$ (Vektor)
 $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{B}_{res}$ (Hysteresekurve)
 $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{B}_{res}$ (Hysteresekurve)

Durchflutungssatz: $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_k$ (Amperesche Regel)
 $\vec{H} = \frac{1}{l} \cdot \sum I_k$ (Amperesche Regel)
 $\vec{H} = \frac{1}{l} \cdot \sum I_k$ (Amperesche Regel)

Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

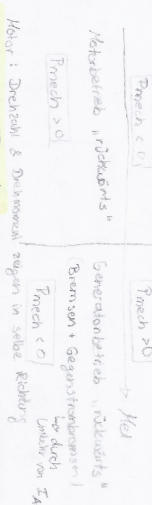
Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

Induktionssatz: $U(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Faradaysche Induktion)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)
 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ (Magnetischer Fluss)

Benutzerschnittstelle

Benutzerschnittstelle



Allgemeine Formeln

mechan. Winkelgeschwindigkeit ω
 $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ (in 1/min)
 $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ (in 1/min)

Kraft auf Rotor: $T_{el} = 2 \cdot U \cdot I_A \cdot \sin \alpha$
 $T_{el} = 2 \cdot U \cdot I_A \cdot \sin \alpha$
 $T_{el} = 2 \cdot U \cdot I_A \cdot \sin \alpha$

Widerstand Rotor: $R_{el} = \frac{2 \cdot U}{I_A}$
 $R_{el} = \frac{2 \cdot U}{I_A}$
 $R_{el} = \frac{2 \cdot U}{I_A}$

Magnetfeld: $B = \frac{\Phi}{A}$
 $B = \frac{\Phi}{A}$
 $B = \frac{\Phi}{A}$

Induzierte Spannung: $U_g = 2 \cdot U \cdot \sin \alpha$
 $U_g = 2 \cdot U \cdot \sin \alpha$
 $U_g = 2 \cdot U \cdot \sin \alpha$

Ersetzschaltbild (Stromrichterbrücke bei Generator!)

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

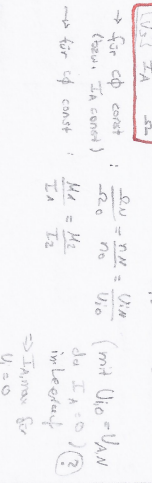
Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Statorstrom: $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$
 $I_A = I_A$

Übersicht Formeln

Übersicht Formeln



Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

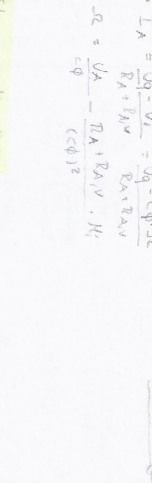
Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Spannungskennlinie

Formeln: Mit Verlusten in Ankerkreis

Formeln: Mit Verlusten in Ankerkreis



Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Steuerelemente

Halbleiterelemente

Halbleiter: 4. Hauptgruppe (z.B. Silizium, Germanium)
 • Kristallstruktur tetraedisch
 • tiefe Temperaturen: elektrisch nichtleitend
 • hohe Temp.: freie bewegliche Elektronen
 → Leuchtgleichheit

Leitfähigkeit im Vakuum
 → elektr. Leitfähigkeit
 • Leitfähigkeit durch negative Ladungsträger
 • Leitfähigkeit durch positive Ladungsträger

2. n-Leitung: α wandern im Leitungsband von $\ominus$ zu $\oplus$
 • Leitung durch negative Ladungsträger
 • Leitfähigkeit von positiver Ladungsträger

3. p-Leitung: β wandern im Leitungsband von $\oplus$ zu $\ominus$
 • Leitung durch positive Ladungsträger
 • Leitfähigkeit von positiver Ladungsträger

Extraktion: gezielte Verunreinigung von Kristall durch Fremdatome
 1) n-dotiert: S, Hauptgruppe $\rightarrow$ zusätzliche e^- (Donator)
 2) p-dotiert: 3. Hauptgruppe $\rightarrow$ Defizitelektron (Akzeptor)
 → Änderung spez. Widerstand, bei hoher T: nicht relevant

Linearisierung
 1) statischer Widerstand (R_S)
 → Widerstand in einem jeden Punkt der Kennlinie
 $R_S = \frac{U_A}{I_A} = \frac{m \cdot U_A}{m \cdot I_A} = m \cdot \tan(\alpha)$
 2) differentieller Widerstand (R_D)
 in Punkt a : m_a mg/mg: Kennlinie

3) Linearitätswert (R_L)
 $R_L = \frac{dU}{dI} = m \cdot \tan(\alpha)$
 → Widerstand der kleinen Rechtecke zugeordnet
 → pos., neg., 0 (R_L kann neg. werden)
 • Linearitätswert: $R_S = R_D$

Graphische Methode
 • Gegeben: $U_A, R_S, R_D, U_{A0}, U_{A1}$
 • Gesucht: I_A, U_A, U_{A0}, U_{A1}
 • Methode der Ersatzspannungsquelle
 1) $I=0$ Kennlinie von R_D : U_A
 2) Zuerst linearer Widerstand zu Ersatzspannung
 $U_{A0} = U_A - R_D \cdot I_A$ (Ersatzspannung)
 3) Schnittpunkt: $U_{A0} = U_{A1} = U_{A2}$

Analytische Methode
 • Umrechnung von R_D herum
 $U_A = U_{A0} + R_D \cdot I$ (Ersatzspannung)
 $R_D = \frac{U_A - U_{A0}}{I}$ (spez. Widerstand)
 $U_A = U_{A0} + R_D \cdot I$ (Leitungsformung)

LED: $\rightarrow$ n-Übergang: Sprünge von e^- von Valenz $\rightarrow$ Leitungsband und umgekehrt
 • nicht LED für Emission von Licht

Diode

Verwendung: Gleichrichter, Spannungsmessung, Schutz nicht leitend

Schaltbild
 • U_D : Durchspannung
 • I_D : Durchstrom
 • R_D : Differenzwiderstand
 • U_{D0} : Durchspannung bei $I_D = 0$
 • I_{D0} : Durchstrom bei $U_D = 0$

Formeln
 $U_D = U_S + R_D \cdot I$
 $I_D = \frac{U_D - U_{D0}}{R_D}$
 $R_D = \frac{dU_D}{dI_D}$ (differenzieller Widerstand)
 $U_S = U_D - R_D \cdot I$ (Ersatzspannung)

Ideale Diode
 $I_D > 0 \rightarrow U_D = 0$
 $I_D < 0 \rightarrow U_D < 0$
 $I_D = 0 \rightarrow U_D = 0$

Kennlinie
 • Durchbruchdiode: Diode leitet nicht
 • Durchbruchdiode: Diode leitet $\rightarrow$ Stromfluss

Zapfendiode
 • Durchbruchspannung unabhängig vom Strom (konstant)
 • Spannungsabfallung: Behälter in Serie
 • Strom durch: Kennlinie nicht linear

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Bipolartransistor

Verwendung: Schalter, Signalverstärker
 • Laststromverstärkung des Verhältnisses wird bestimmt

Schaltbild
 1) PNP: R_D
 2) NPN: R_D

Grundschaltungen
 1) Emitterfolger: $U_D > 1, V_A > 1$
 2) Basisansteuerung: $U_D > 1, V_A < 1$

3) Kollektorschaltung
 $V_A < 1, V_A > 1$

Gleichstrom
 • $I_E = I_C + I_B$
 • $U_{BE} = U_{BE0} + R_{BE} \cdot I_B$
 • $U_{CE} = U_{CE0} + R_{CE} \cdot I_C$

Widerstand
 • R_{BE}
 • R_{CE}

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Spannungs- und Stromkennlinie
 • U_D vs I_D
 • I_D vs U_D

Kennlinien

Stromverstärkung
 • β_{DC}
 • β_{AC}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

Eingangs-
 • I_B
 • U_{BE}

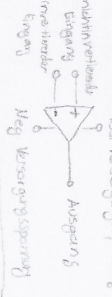
Operationsverstärker

→ Invertierverstärker: Verstärkung durch negative Rückkopplung
 → nicht invertierend: Verstärkung durch positive Rückkopplung

- 1) Eingangswiderstand: möglichst groß
- 2) Ausgangswiderstand: möglichst klein
- 3) Verstärkungsfaktor: möglichst groß

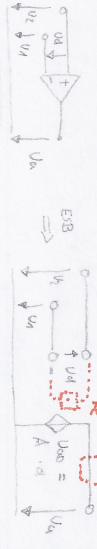
→ Ideal OP

- $R_i \rightarrow \infty, R_o \rightarrow 0, \beta \rightarrow 1$
- Frequenzbereich: $f \ll f_{cl}$ bis f_{ch}
- OP vollständig spannungsteiler
- kein Rauschen, keine Temperaturabhängigkeit
- Betriebsspannung: U_a, U_e linear



$U_a = (1 + R_f/R_i) \cdot U_e$
 $= G \cdot U_e$
 Pos. Versorgungsspannung
 Neg. Versorgungsspannung

Open-loop-Betrieb

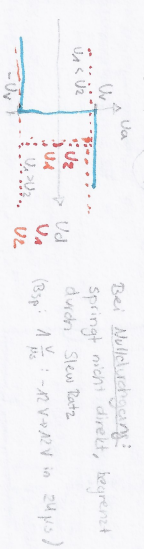


→ ohne Rückkopplung: Komparator

Verhalten:
 $U_d > 0$: $U_a \rightarrow U_{a,max}$; $U_d < 0$: $U_a \rightarrow U_{a,min}$
 $U_d = 0$: $U_a = 0$

Komparator

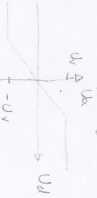
→ U_a gibt einen Wert aus Vergleich von U_1 & U_2 zurück
 $U_a = \begin{cases} U_{a,max} & \text{für } U_1 > U_2 \\ U_{a,min} & \text{für } U_1 < U_2 \\ 0 & \text{für } U_1 = U_2 \end{cases}$



Rückkopplung

• negative Verstärkung einer Schaltung durch Kopplung eines Teils der Ausgangsspannung auf den invertierenden Eingang (-)
 • Gegenkopplung: • niedrige kapazitive Spannung wird von Eingangs- spannung subtrahiert

2) Mitkopplung: • rückgekoppelte Spannung wird addiert

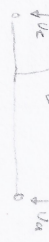


Es gilt: $-U_a$ ist proportional zum Spannungsfall im Rückkopplationszweig
 - Gegenkopplung stellt sich so ein, dass $U_a = 0$ gilt

1 Invertierender Verstärker

$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e$

$V_u = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$

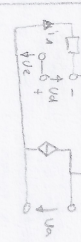


AusgangsgHT
 $U_d = 0$
 $I_1 = I_2$

2 Nicht-invertierender Verstärker

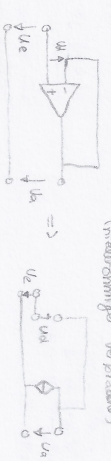
$V_u = \frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

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

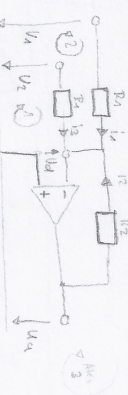


Beispiel: Impedanzwandler (Spannungsfollower)
 $R_1 \rightarrow \infty, R_2 = 0$: $V_u = 1 \rightarrow U_a = U_e$

• Koppen von nachfolgenden Verbrauchern an Quellen mit hohem Innenwiderstand (R_1), da Schaltlag haben R_1 hat
 [Quelle mit hohem $R_1 \rightarrow$ OP mit niedrigem R_1 (Pufferungsverstärker)]

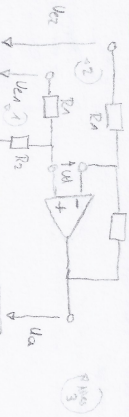


3 Addierer (Invertierend)



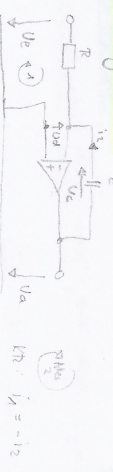
$U_a = -\frac{R_f}{R_1} \cdot (U_1 + U_2)$

4 Subtrahierer (Differenzverstärker)

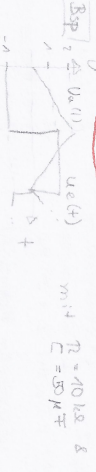


$U_a = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_1 - U_2)$

5 Integrator



Kondensatorladung: $i_C = C \cdot \frac{dU_c}{dt}$
 $U_a = -\frac{1}{RC} \int U_e dt + K$ mit $U_c = U_a$



→ Begrenzung bei Versorgungsspannung
 "OP geht in Begrenzung"

Bsp: Wechselstrom



$f = 50 \text{ Hz}$ $X_{C1} = 100 \Omega$ $R_2 = 50 \Omega$
 $X_L = 50 \Omega$ $X_{C2} = 50 \Omega$

1) $U_0 = 450 \text{ V} \rightarrow \text{Schaltw. eff. (H)}: \underline{I}_V = 0 \text{ A}$

• $\underline{Z}_{RC} = R \parallel \underline{Z}_{C1} = (25 - j \cdot 25) \Omega$

• $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{C2} = (25 + j \cdot 25) \Omega$

• $\text{Gr. Formel} \dots$

• $\underline{U}_2 = \underline{U}_0 - \underline{U}_L = \underline{U}_0 - (\underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1) = -j \cdot 100 \text{ V}$

$\hat{U}_2 = \sqrt{2} \cdot |\underline{U}_2| = \sqrt{2} \cdot 100 \text{ V} \approx 141,42 \text{ V}$

2) $U_0 = 450 \text{ V}$, $U_L = 50 \text{ V}$, $R_V = 25 \Omega$ (Schalter offen)

Wahlleistung $P_0 \rightarrow \text{mit Leistung, die am Ladestandard ausfällt}$

$P_0 = P_R + P_{R_V} = \frac{U_R^2}{R} + \frac{U_V^2}{R_V} \rightarrow \text{Parallel: } U_R = U_V$

$= \frac{U_R^2}{R} + \frac{U_R^2}{R_V} = 180 \text{ W}$

• Blindleistung Q_L (die in Spule umgesetzt wird)

$Q_L = \hat{U}_L \cdot \hat{I}_2^2 \quad \text{mit } |\underline{I}_2| = \frac{|\underline{U}_2|}{|\underline{Z}_2|} = \frac{|\underline{U}_2|}{\sqrt{2} \cdot 25}$

Handwritten signature or mark.