Gleichstrom [1]

Knotenregel: $\sum I_k = 0$ (Strom an einem Knoten)

Knotengleichung in Netzwerk: $KG = (k-1)$

Maschenregel: $\sum U_m = 0$ (Spannung in einer Masche)

Maschengleichung in NW: $MG = z-(k-1)$

Ohmsches Gesetz: $I = \frac{U}{R_{ges}}$

Reihenschaltung: $R_{ges} = \sum R_W = R_1 + R_2 \ldots + R_N$

Parallelschaltung: $R_{ges} \Rightarrow \frac{1}{R_{ges}} = \sum \frac{1}{R_W} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \ldots + \frac{1}{R_N}$

Spannungsteiler-Regel: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

Stromteiler-Regel: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ $\rightarrow I_2 = I_{ges} \rightarrow R_2 = R_{ges}$ über NWK Parallele R_5!!!
$\rightarrow I_1 = I_{gesucht} \rightarrow R_1 = R_{gesucht}$

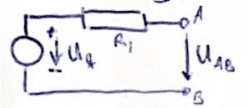
Spannungsabfall $\Delta U = U_{Quelle} - U_{Verbraucher}$

Leistung: $P = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$ [W] ~~Erg~~ **Energie:** $W = U \cdot I \cdot t$ [J] / 1J = Ws = V·A·s
1Wh = V·A·h

Wirkungsgrad: $\eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{Aufgewendet}} = \frac{P_{Nötig}}{P_{Quelle}}$

Reale Quelle: $U_{Klemme} = U_{Quelle} - R_{innen} \cdot I$

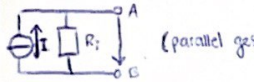
Ersatzspannungsquelle:



$U_q = U_{AB}$ (bei Leerlauf) $R_i = R_{1B}$
(in Reihe geschalten)

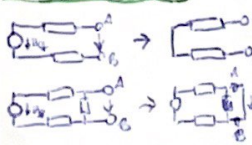
Überlagerungssatz: → möglich, wenn Netzwerke linear ist (U_{AB} überlagerungsfähig weil Spannung linear)
1) jeweils eine (bei mehreren) Quelle im Netzwerk lassen
2) Spannungsquelle durch Kurzschluss (KS) ersetzen ($R_i = 0\,\Omega$) → $U_{AB} = 0V$ → $I_{AB} = I_{KS}$
3) Stromquelle durch Leerlauf (LL) ersetzen ($R_i = \infty\,\Omega$) → $U_{AB} = U_{AB,LL}$ → $I_{AB} = 0A$

Ersatzstromquelle:



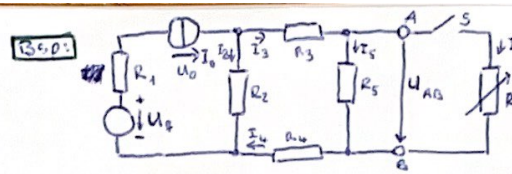
(parallel geschalten)

Ersatzwiderstand:



Spannungsquelle U_q wird durch KS ersetzt

$\Rightarrow I_{KS}$ und R_5 parrallel deswegen R_5 wirkungslos



$R_L = 0\,\Omega \ldots \infty\,\Omega$
$R_1 = 10\,\Omega$ $R_2 = 12\,\Omega$ $R_3 = 4\,\Omega$ $R_4 = 6\,\Omega$
$R_5 = 22\,\Omega$
$I_0 = 2{,}2\,A$ (Quellstrom)
$U_q = 20\,V$ (Quellspannung)

Schalter OFFEN:

1.1. a) $I_2 = ?$ $I_3 = ?$ $I_4 = ?$ $I_5 = ?$ ⇒ mittels Stromteilerregel: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \rightarrow \frac{I_2}{I_0} = \frac{R_0}{R_2}$
↳ $R_2 = R_2$, $R_0 \Rightarrow R_e' = R_3 + R_5 + R_4$; $\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3+R_5+R_4} = \frac{R_2+R_3+R_4+R_5}{R_2(R_3+R_5+R_4)} \Rightarrow R_0 = \frac{R_2(R_3+R_4+R_5)}{R_2+R_3+R_4+R_5}$
↳ $I_2 = I_0 \cdot \frac{1}{R_2} \cdot \frac{R_2(R_3+R_4+R_5)}{R_2+R_3+R_4+R_5}$
↳ KR: $0 = I_0 - I_3 - I_2 \rightarrow I_3 = I_0 - I_2 \Rightarrow I_3 = I_4 = I_5$

b) $U_{AB,LL} = ?$ (im Leerlauf wird U_{AB} maximal wert annehmen) (Strom wird nicht fließen)
↳ $U_{AB,LL} = R_5 \cdot I_5$

c) $U_0 = ?$ ⇒ mittels MR: $0 = U_q - U_0 - U_2 - U_1$
↳ $U_0 = U_q - U_2 - U_1 = U_q - R_2 \cdot I_2 - R_1 \cdot I_0$

1.2. a) $P_{el} = P_q - P_0 = U_q \cdot I_0 - U_0 \cdot I_0$
↳ $P_0 = I_0 \cdot U_0$, $P_q = U_q \cdot I_0$

b) $P_R = I_0^2 \cdot R_1 + I_0^2 \cdot R_{2345} = I_0^2 \left(R_1 + \frac{R_2(R_3+R_4+R_5)}{R_2+R_3+R_4+R_5}\right)$

$P_R = P_{el}$ → Bilanz stimmig/erfüllt
$P_R > P_{el}$ oder $P_R < P_{el}$ → Bilanz nicht erfüllt

Schalter ZU:

1.3. a) Kurzschluss führt mit $R_L = 0\,\Omega$ (R_5 = wirkungslos)
↳ mittels Stromteiler: $\frac{I_{AB,KS}}{I_0} = \frac{R_0}{R_{AB,KS}} \rightarrow I_{AB,KS} = I_0 \cdot R_0 \cdot \frac{1}{R_{AB,KS}} = \frac{R_2}{R_2+R_3+R_4} \cdot I_0$

b) $R_{ers} = ?$ (mittels $U_{AB,LL}$ & $I_{AB,KS}$)
↳ $R_{ers} = \frac{U_{AB,LL}}{I_{AB,KS}}$

c) $R_{ers} = ?$ (mittels Zusammenfassen der Widerstände)
↳ $R_{ers} = \frac{R_5(R_2+R_3+R_4)}{R_2+R_3+R_4+R_5}$ → b) = c) sind beide gleich! muss so sein

d) R_L wenn $P_L = P_{L\,max}$ → Leistungsanpassung
↳ $R_L = R_i = R_{ers} \Rightarrow P_L = R_L \cdot I_L^2 = R_L \cdot \left(\frac{U_{AB,LL}}{R_i + R_L}\right)^2$

KS: Kurzschluss
↳ Klemmen A-B mit: $R_L = 0\,\Omega$
↳ Zweig A-B mit: $I_{AB} = I_{AB,KS} = I_{AB,max}$ = maximaler Strom $\Rightarrow I_{KS} = \frac{U_q}{R_i}$
↳ Spannung in A-B mit: $U_{AB} = U_{AB,KS} = 0V$

LL: Leerlauf
↳ Klemmen A-B mit: $R_L = \infty\,\Omega$
↳ Zweig A-B mit: $I_{AB} = I_{AB,LL} = 0A$ ⇒ fließt KEIN Strom
↳ Spannung mit: $U_{AB} = U_{AB,LL} = U_{AB,max}$ ⇒ maximale Spannung

Schwingvorgänge [2] / Schaltervorgänge

Spule — (L)

Einheit: $1\,H = 1\,\Omega s = 1\,\frac{Vs}{A}$ ⇒ ist Energiespeicher

$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$ (A = Querschnitt Spule, l = Länge Spule) $\quad W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$ (Energieinhalt der Spule) $\quad \tau = \frac{L}{R}$

Energiekennzeichnend: Spulenstrom → Grund: stetig → darf nicht springen (Energie)

Energiespeicher: $u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$ ↳ Grund Einschwingvorgang

Energieinhalt muss stetig verlaufen (keine ∞ Leistungen möglich)

$t = 0s$, $u(0) = U$, $i(0) = 0A$ ⇒ LL

$t = \tau$, $u(\tau) = \frac{1}{e} \cdot U$, $i(\tau) = \frac{U}{R} \cdot (1 - \frac{1}{e})$

$t = \infty$, $u(\infty) = 0V$, $i(\infty) = \frac{U}{R}$ ⇒ KS

↳ stationär gilt: Spule = KS

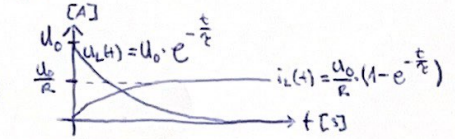
Einschalten:

$U = u_L(t) + (i_L(t) \cdot (\Sigma R))$

$U = u_L(t) + u_R(t)$

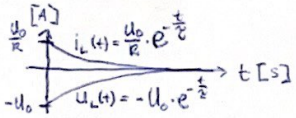
Differentialgleichung: $U = i_L(t) \cdot R + L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$

Zeitkonstante: $\tau = \frac{L}{R}$



Ausschalten:

Differentialgleichung: $0 = i_L(t) \cdot R + L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$



Parallelschaltung: $\frac{1}{L_e} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \dots + \frac{1}{L_N} = \sum_N \frac{1}{L_N}$

Reihenschaltung: $L_e = L_1 + L_2 \dots + L_n = \sum_N L_n$

Kondensator — ||— (C)

Einheit: 1F

$C = \frac{Q}{U} = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$ (A = Fläche Elektroden, d = Abstand, $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ = Proportionalitätskonstante) $\quad W = \frac{1}{2} C \cdot U^2$ (in C gespeicherte Energie) $\quad \tau = R \cdot C$

Energiekennzeichnend: Kondensatorspannung

Energiespeicher: $i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$ → Grund: stetig → muss stetig verlaufen & keine ∞ Leistungen ↳ Grund Einschwingvorgang

$t = 0S$, $u(0) = 0V$, $i(0) = \frac{U}{R}$ ⇒ KS

$t = \tau$, $u(\tau) = U \cdot (1 - \frac{1}{e})$, $i(\tau) = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{e}$

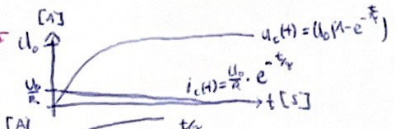
$t = \infty$, $u(\infty) = U$, $i(\infty) = 0A$ ⇒ LL

↳ Grund: voll aufgeladen, wenn stationär

Laden:

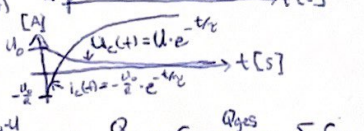
$U = u_C(t) + (i_C(t) \cdot \Sigma R) = u_C(t) + u_R(t)$

Differentialgleichung: $U = \underbrace{R \cdot C}_{\tau} \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t)$



Entladen:

Differentialgleichung: $0 = R \cdot C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t)$



Parallelschaltung: $Q_e = Q_1 + Q_2 \dots + Q_N = \sum_N C_N \cdot U \Rightarrow C = \frac{Q}{U} \Rightarrow C_e = \frac{Q_{ges}}{U} = \sum_N C_N$

Reihenschaltung: $U_e = U_1 + U_2 \dots + U_N = \sum_N \frac{Q}{C_N} \Rightarrow C = \frac{Q}{U} \Rightarrow \frac{1}{C_e} = \frac{U}{Q} = \sum_N \frac{1}{C_N}$

Reihenschwingkreis (C & L)

Resonanzfrequenz: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$

Güte: $Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{Z_0}{R}$ $\quad \omega_0 \cdot C = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$

Schwingwiderstand: $Z_0 = \omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$

Spannungen: $U_L = U_C = Z_0 \cdot I = Q \cdot R \cdot I = Q \cdot U_R$

↳ $Q_L = \frac{U^2}{X_L}$ $\quad Q_C = \frac{U^2}{X_C}$ gleich mit $|U = U_{R2}|$?

magnetisches Feld

magn. Feldstärke: $|\vec{H}| = \frac{1}{2\pi r}$ $\left[\frac{A}{m}\right]$

magn. Flussdichte: $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ $[1\,T = \frac{Vs}{m^2}]$ → $1\,T = 10^4\,G$ (Gauß)

Permeabilität: $\mu_0 \cdot \mu_r = \mu$

abs. Permeabilität: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A \cdot m}$

magn. Fluss: $\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\varphi)$ $[Vs = Wb\ (\text{weber})]$ → $1\,Vs = 10^8\,M\,(\text{Maxwell})$

verketteter Fluss (mit Induktivität L): $\Psi = N \cdot \Phi = L \cdot I$

Widerstand R	Spule, L	Kondensator C
$\underline{U}_R = \underline{Z}_R \cdot \underline{I}_R$	$\underline{U}_L = \underline{Z}_L \cdot \underline{I}_L$	$\underline{U}_C = \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_C$
$\underline{Z}_R = R$	$\underline{Z}_L = j\omega L = j \cdot X_L$	$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \cdot X_C$
$\underline{Z}_R = R \cdot e^{0^\circ j}$	$\underline{Z}_L = X_L \cdot e^{90^\circ j}$	$\underline{Z}_C = X_C \cdot e^{-90^\circ j}$
$\underline{Y}_R = \frac{1}{R} = G$	$\underline{Y}_L = \frac{1}{j\omega L} = \frac{1}{jX_L}$	$\underline{Y}_C = j\omega C = \frac{j}{X_C}$
$\underline{Y}_R = G \cdot e^{0^\circ j}$	$\underline{Y}_L = -j\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_L} e^{-90^\circ j}$	$\underline{Y}_C = \frac{1}{X_C} \cdot e^{90^\circ j}$

$|Z|$ = Impedanz = Z = $Z e^{\varphi j}$ $\quad |Y| = \frac{1}{|Z|}$ = Admittanz

Z: Para: $\frac{1}{Z_{ges}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$ Reihe: $Z_{ges} = Z_1 + Z_2$

komplexe Zahlen

kartesisch: $z = a + jb$ (a Real, b Imag) $\quad$ polar: $z = |z|(\cos(\varphi) + j\sin(\varphi))$ $\quad$ exponential: $z = |z| \cdot e^{\varphi j}$

$|z| = \sqrt{Re(z)^2 + Im(z)^2}$

$e^{\varphi j} = \cos(\varphi) + i\sin(\varphi)$

$\varphi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{Im(z)}{Re(z)}\right), & Re(z) \geq 0 \\ \pi + \arctan\left(\frac{Im(z)}{Re(z)}\right), & Re(z) < 0 \end{cases}$

$j = \sqrt{-1} \Rightarrow \frac{1}{j} = -j \Rightarrow j^2 = -1$

$z_1 + z_2 = (a_1 \pm a_2) + j \cdot (b_1 \pm b_2)$

$z_1 \cdot z_2 = (a_1 a_2 - b_1 b_2) + j \cdot (a_1 b_2 + a_2 b_1) = r_1 r_2 \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)}$

$\frac{z_1}{z_2} = \frac{a_1 + jb_1}{a_2 + jb_2} = \frac{(a_1 + jb_1)(a_2 - jb_2)}{a_2^2 + b_2^2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)}$ (mit $(a_2 - jb_2)$ erweitern)

$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ ⇒ wenn $\varphi > 0$, strom eilt voraus

$\varphi < 0°$ ⇒ ohmisch-kapazitiv

$0° < \varphi < 90°$ ⇒ ohmisch-induktiv

Ersatzimpedanz von $R_1 R_2 LC$ Schaltkreis: wie Parallel / Reihe addieren

Gesamtimpedanz: $\underline{z} = z_R + z_L + z_C \Rightarrow \underline{z} = R + X_{Lj} - X_{Cj}$; $|z| = \sqrt{Re^2 + Im^2}$

↳ komplexer Schwinwiderstand

Leistung & Arbeit

↳ kapazitiv: negativ Q, induktiv: positives Q

Blindleistung: $Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) = Im(S)$ $[var]$

Wirkleistung: $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = Re(S)$ $[W]$

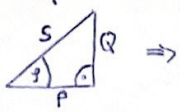
Scheinleistung: $S = U \cdot I^*$ $[VA]$

$I^* = I e^{j(\varphi_u - \varphi_i)}$ / Gegenteil $I = a + jb \Rightarrow I^* = a - jb$

$U = I \cdot |\underline{z}|$ $\quad \frac{1}{I} = \frac{a + jb}{I = \sqrt{a^2 + b^2}}$

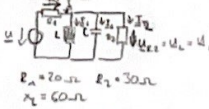
$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2 + U_C^2}$

↳ zweipole Leistungsdreieck:



$\Rightarrow |S| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\varphi))^2 + (U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi))^2} = U_{eff} \cdot I_{eff}$

$\underline{S} = P + jQ = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = U \cdot I \cdot (\cos(\varphi) + j\sin(\varphi)) = \underline{U} \cdot \underline{I} \cdot e^{j\varphi}$ ⇒ komplexe Scheinleistung



$R_1 = 20\,\Omega$, $R_2 = 30\,\Omega$

$X_L = 60\,\Omega$

$X_C = 30\,\Omega$ (kapazitiv)

$\underline{Z}_L = jX_L$ $\quad \underline{Z}_C = \frac{1}{j} X_C = -jX_C$

$\underline{Z}_R = R$

$Z_{ges} = \frac{Z_L Z_C}{Z_L + Z_C} = \frac{60 \cdot 30\,\Omega^2}{j\,30\,\Omega} = -j60\,\Omega$

$Z_{PLC} = \frac{Z_{ges} \cdot Z_{R2}}{Z_{ges} + Z_{R2}} = \frac{-j60 \cdot 30\,\Omega^2}{30\,\Omega + (-j60\,\Omega)} = \frac{-j60 \cdot 30\,\Omega^2}{30\,\Omega - j60\,\Omega} = -j12{,}\overline{4}\,\Omega \cdot \frac{1}{e^{j26{,}5651°}} = -j12{,}\overline{4}\,\Omega\, e^{-j26{,}5651°}$

$Z_{R2PLC} = Z_{R2} + Z_{PLC} = 20\,\Omega - j12{,}\overline{4}\,\Omega\, e^{j26{,}5651°}$ ↳ $90 - 63{,}4349 = 26{,}5651$

$= 20\,\Omega + (12{,}\overline{4}\,\Omega \cdot (\cos(-26{,}5651) + j\sin(-26{,}5651))) = 20\,\Omega + 24\,\Omega - j12\,\Omega = 44\,\Omega - j12\,\Omega$

→ weitere art Q zu berechnen: mittels Teilblindleistungen: $Q = Q_L - Q_C$

Wechselstrom [3]

Sinusförmige Wechselspannung: $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u)$ (Momentanwert, Amplitude, Kreisfrequenz, Phasenwinkel)

$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ $[\frac{1}{s}]$ (Kreisfrequenz, Periodendauer [s], Frequenz)

$f = \frac{1}{T}$ $[\frac{1}{s} = Hz]$

$\varphi_u = \frac{2\pi}{T} \cdot t_p$ ↳ Nullphasenübergangsdifferenz

Sinusförmiger Wechselstrom: $i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i)$

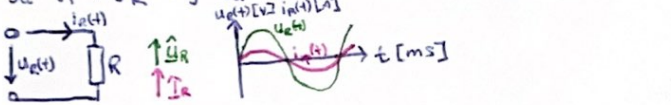
↳ sinus: $\hat{i} = \sqrt{2} \cdot I$

Widerstand R

$u_R(t) = R \cdot i_R(t)$

$\hat{u}_R = R \cdot \hat{i}_R$

$\varphi_u = \varphi_i$ / $\varphi_R = \Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0°$ ⇒ Strom & Spannung in Phase



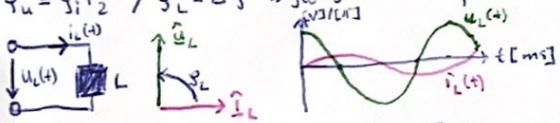
Spule L

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

$i_L(t) = \hat{i}_L \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i)$, $u_L(t) = \underbrace{\omega \cdot L}_{X_L} \cdot \hat{i}_L \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i + \frac{\pi}{2})$ ($\hat{u}_L$)

$\hat{u}_L = \underbrace{\omega \cdot L}_{X_L} \cdot \hat{i}_L$ $\hat{i}_L = Y_L \cdot \hat{u}_L$

$\varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2}$ / $\varphi_L = \Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 90°$ ⇒ Spannung eilt Strom 90° voraus



induktiver Blindwiderstand: $X_L = \omega \cdot L$ $[\Omega]$

induktiver Blindleitwert: $Y_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega \cdot L}$

komplexe Impedanz: $\underline{Z}_L = j \cdot X_L = j \cdot \omega \cdot L = X_L \cdot e^{90°j}$

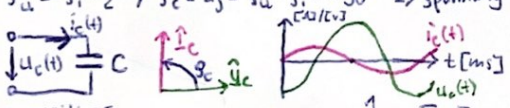
Kondensator C

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

$u_C(t) = \hat{u}_C \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u)$, $i_C(t) = \underbrace{\omega \cdot C}_{Y_C} \cdot \hat{u}_C \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u + \frac{\pi}{2})$ ($\hat{i}_C$)

$\hat{i}_C = \underbrace{\omega \cdot C}_{Y_C} \cdot \hat{u}_C$ $\hat{u}_C = X_C \cdot \hat{i}_C$

$\varphi_u = \varphi_i - \frac{\pi}{2}$ / $\varphi_C = \Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -90°$ ⇒ Spannung eilt Strom 90° nach

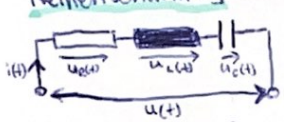


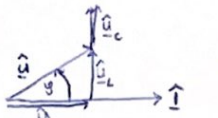
~~kapazitiver~~ ~~induktiver~~ Blindwiderstand: $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ $[\Omega]$

~~kapazitiver~~ ~~induktiver~~ Blindleitwert: $Y_C = \omega \cdot C$

komplexe Impedanz: $\underline{Z}_C = -j \cdot X_C = X_C \cdot e^{-90°j} = \frac{1}{j\omega C}$

Reihenschaltung

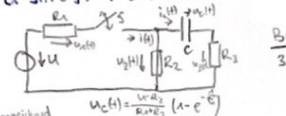




Wirkkomponente: $\hat{u}_W = \hat{u} \cdot \cos(\varphi)$ ↳ U parallel zu Strom

Blindkomponente: $\hat{u}_B = \hat{u} \cdot \sin(\varphi)$ → U senkrecht zu Strom

Bsp (2) Schaltvorgänge Kondensator



2.1 a) Zusammenhang $u_C(t)$ & $i_C(t)$

↳ $i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$

b) Welche von $i_C(t)$ / $u_C(t)$ Energie kennzeichnend bzw muss gestetigt für diese Größe?

↳ Kondensatorspannung $u_C(t)$ darf/kann nicht springen

c) Verhalten Kondensator $t = 0s$ (Spule geschlossen ist) & $t \to \infty s$ (vorher lange geschlossen)

↳ $t = 0s$: Verhalten wie beim Kurzschluss ($U = 0V$ & $i = \frac{U}{R}$)

↳ $t \to \infty s$: Verhalten wie beim Leerlauf ($U = R$ & $i = 0A$)

2.2. S bei $0s = t$ geschlossen

a) mittels (1)Gl: $u_C(t) = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}})$ zeigen dass Kondensator vorm schließen ungeladen war ($u_C(t < 0s) = 0V$)

↳ $\tau_1 = 0 \Rightarrow u_C(t) = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (1 - e^0) = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (1 - 1) = 0V$

b) τ_1 [ms] & u_{Cstat} [V] berechnen wenn $t \to \infty s$

↳ τ_1: in Gl (1) einsetzen: $\tau_1 = 200\mu F \cdot (30\Omega + \frac{40\Omega \cdot 80\Omega}{40\Omega + 80\Omega}) \cdot 10^{-6} = 7{,}2 \cdot 10^{-3}s \Rightarrow 7{,}2\,ms$

↳ u_{Cstat}: in ersten Teil von $u_C(t)$ einsetzen: $u_{Cstat} = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 12V$

c) Berechnen von $i_C(t = 0s)$ bei Einschaltzeitpunkt

↳ $i_1(0s) = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}$ einsetzen ($\frac{R_1 R_2}{R_2 + R_3}$)

↳ $\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow R_{23} + R_1 = R$

↳ $i_C(t) = i(0) \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$ = Stromteiler! $\frac{i_C(t)}{i(t)} = \frac{R(t)}{R_C(t) \to R_3}$

d) $u_C(t_4)$ & $i_C(t_4)$ bei $t_4 = 1{,}8\tau_1$ Berechnen

$u_C(t_4) = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t_4}{\tau_1}})$ einsetzen $\Rightarrow 10{,}02V \cdot e^{-\frac{t_4}{\tau_1}} \cdot (-\frac{t_4}{\tau_1})$

$i_C(t_4) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot \frac{d}{dt}(\frac{UR_2}{R_1 + R_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}})) = C \cdot \frac{UR_2}{R_1 + R_2} \cdot (-e^{-\frac{t_4}{\tau_1}} \cdot (-\frac{1}{\tau_1}))$

↳ einsetzen $\Rightarrow 0{,}0591A = 55mA$

2.3. S wird bei $t_1 = 1{,}8\tau_1$ geöffnet

a) $u_C(t) = k \cdot e^{-\frac{t - t_4}{\tau_2}}$ | $t = t_4$ gegeben $\Rightarrow u_C(t) = 10{,}02V$ von 2.2 d)

$10{,}02V = k \cdot e^0 = k$

b) Kondensatorspannung bei $t \to \infty s$

↳ $u_{Cstat}(\infty) = 0V$ weil Entladung über $R_2 = \text{od } R_3$ geschieht

c) Größe $i_C(t = t_4)$ (kurz nach dem öffnen von S)

↳ $i_C(t_4) = -\frac{u_C(t_4)}{R_2 + R_3}$

d) $u_C(t_2) = 2V \Rightarrow t_2 = ?$

$u_C(t_2) = 2V = k \cdot e^{-\frac{(t_2 - t_4)}{\tau_2}}$

↳ $k = 10{,}02V$

↳ $\tau_2 = (R_2 + R_3) \cdot C = 9ms$

↳ $t_4 = 1{,}8\tau_1$ | $\tau_1 = 7{,}2ms$

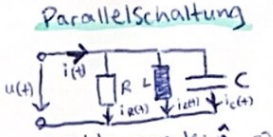
$\frac{2V}{10{,}02V} = e^{\frac{-(t_2 - t_4)}{\tau_2}}$ | ln

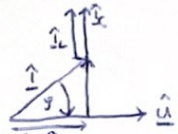
$\ln(\frac{2}{10{,}02}) = -\frac{(t_2 - t_4)}{\tau_2}$

$\ln(\frac{2}{10{,}02}) \cdot (-\tau_2) + t_4 = t_2$

$t_2 = 27{,}46ms$

Parallelschaltung

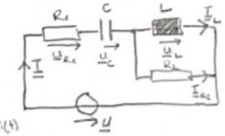




Wirkkomponente: $\hat{i}_W = \hat{i} \cos(\varphi)$ $\hat{I}_R$

Blindkomponente: $\hat{i}_B = \hat{i} \sin(\varphi)$

Bsp (3) Wechselstrom



3.1. a) L von Spule [mH] & C von Kondensator [µF]

↳ $X_L = \omega \cdot L \Rightarrow L = \frac{X_L}{2\pi f}$ $(1H = 10^3 mH)$

↳ $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C}$ $(1F = 10^6 \mu F)$

b) Unterschied Spule & Kondensator bei sinusförmiger u(t) bzw i(t)

↳ Spule: Spannung eilt Strom 90° voraus

↳ Kondensator: Spannung eilt Strom 90° nach

3.2. a)

↳ Berechnen von $\underline{Z}_{RC}$ von Reihenschaltung R_2 & C

↳ $\underline{Z}_{RC} = \underline{Z}_{R_2} + \underline{Z}_C = R_2 + (-jX_C) = 6\Omega - 60\Omega$

↳ $\underline{Z}_{RL}$ von Parallelschaltung R_2 & L

↳ $\frac{1}{\underline{Z}_{RL}} = \frac{1}{\underline{Z}_{R_2}} + \frac{1}{\underline{Z}_L} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{jX_L} \Rightarrow \underline{Z}_{RL} = \frac{6 \cdot 33}{6 + j \cdot 33} \cdot (\frac{6 - j33}{6 - j33}) = \frac{6 \cdot 33 \cdot (6 - j33)}{6^2 + 33^2} \Rightarrow (5{,}31 + j29{,}03)\Omega$

↳ $\underline{Z} = \underline{Z}_{RC} + \underline{Z}_{RL} = (6 - j60)\Omega + (5{,}31 + j29{,}03)\Omega = (11{,}31 - j30{,}97)\Omega$

↳ $\underline{I} = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{100V}{\underline{Z}_{RC} + \underline{Z}_{RL}} = \frac{100V}{31{,}97\Omega \cdot e^{-69{,}93°}} = 3{,}13 \cdot A \cdot e^{j69{,}93°} \Rightarrow I = 3{,}13A$

↳ $U_L = \underline{Z}_{RL} \cdot \underline{I} = 110{,}14V$ / $I_L = \frac{U_L}{X_L} = 3{,}06A$ / $I_{R2} = \frac{U_R}{R_2} = \frac{U_L}{R_2} = 0{,}918A$

b) Komplexe Scheinleistung, Wirkleistung, Blindleistung

↳ $\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = 100V \cdot 3{,}13A \cdot e^{j69{,}93°} = 313{,}4\,VA \cdot e^{j69{,}93°} = (162{,}25 + j269{,}12)VA$

↳ $\underline{S} = P + jQ \Rightarrow P = Re(\underline{S}) = 162{,}25W$ $Q = Im(\underline{S}) = 269{,}12var$ $\Rightarrow 0° < \varphi$ → kapazitiv

c) Wirkleistung & Blindleistung aus Teilleistungen

↳ $P = I^2 \cdot R_2 + I_L^2 \cdot R_2 = 162{,}25W$

↳ $Q = X_L \cdot I_L^2 - X_C \cdot I^2 = -277{,}5var$

3.3. $\underline{U}_L$ & $\underline{U}$ sollen 90° phasenverschoben sein : $X_C = X_{C1} = X_L \cdot \frac{R_2 + R_2}{R_2}$ / gilt U_L gegenüber U 90° voraus

a) X_{C1} [Ω] berechnen

↳ $X_{C1} = X_L \cdot \frac{R_2 + R_2}{R_2} = 36\Omega \cdot \frac{6\Omega + 12\Omega}{12\Omega} = 37{,}8\Omega$

b) $X_C = X_{C1}$ folgendes berechnen:

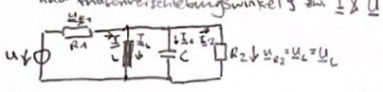
↳ $\underline{Z} = \underline{Z}_{RC} + \underline{Z}_{RL} = (6 - j37{,}8)\Omega + (5{,}31 + j33{,}03)\Omega = (11{,}31 - j4{,}77)\Omega$

↳ $\underline{I} = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{100V}{(\underline{Z}_{RC} + \underline{Z}_{RL})\Omega} = \frac{100V}{16{,}91\Omega \cdot e^{-14{,}68°}} = 6{,}02A\,e^{j14{,}68°}$

↳ $\underline{U}_L = \underline{Z}_{RL} \cdot \underline{I} = (5{,}31 + j33{,}03)\Omega \cdot 6{,}02A\,e^{j14{,}68°} = 34{,}48\Omega e^{j81{,}39°} \cdot 6{,}02A\,e^{j14{,}68°} = 207{,}57Ve^{j95{,}93}$

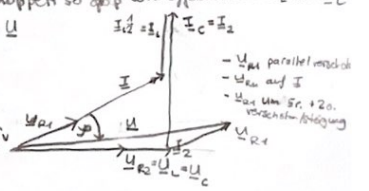
↳ $\varphi_{UL} = 89{,}93° \approx 90°$ ⇒ $\varphi > 0°$ ⇒ $\underline{U}_L$ eilt $\underline{U}$ um 90° vor.

Zeigerdiagrammaufgabe: qualitatives Zeigerdiagramm + alle Spannungen & Ströme und Effektivwert I_C vom Strom $\underline{I}_C$ doppelt so groß wie Effektivwert I_L von $\underline{I}_L$ und phasenverschiebungswinkel φ zu $\underline{I}$ & $\underline{U}$



⇒ Schaltung ist mit R und φ ist negativ

$-90° < \varphi < 0°$ → ohmsch-kapazitiv



Phasenverschiebung: Zeigerdiagramm!

→ mit R:

ohmsch → $\varphi = 0°$ in phase

ohmsch-ind → $0° < \varphi < 90°$ U eilt I voraus

ohmsch-kap → $-90° < \varphi < 0°$ U eilt I nach

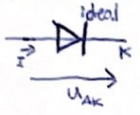
→ ohne R:

kapazitiv: $-90° < \varphi < 0°$ → U eilt I ~~voraus~~ nach

induktiv: $0° < \varphi < 90°$ → U eilt I voraus

Kleinsignalverstärker / Diode / Bipolartransistor [4]

ideale Diode:



↳ $U_{AK} = 0$ bei $I > 0$

↳ $I = 0$ bei $U_{AK} < 0$ (Anode ist negativer als Kathode)

↳ repräsentiert elektrisch gesteuerten Schalter

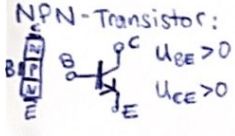
↳ leitet wenn $U_{AK} > 0$ ist & sperrt wenn $U_{AK} < 0$

Bipolartransistor:

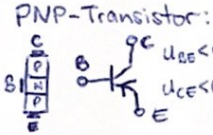
↳ Weiterentwicklung der Halbleiterdiode, aus 3 unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten aufgebaut

↳ Bi weil: Elektronen- und Löcherleitung

NPN-Transistor:



PNP-Transistor:



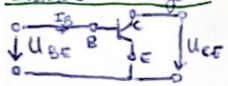
(B) = Basis
(C) = Kollektor
(E) = Emitter

↳ Reihenschaltung zweier Dioden mit: Basis-Emitter-Diode in Durchlassrichtung
Basis-Kollektor-Diode in Sperrrichtung

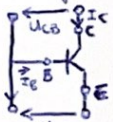
↳ Stromverstärkung:
$I_C > I_B$ (in der Regel)
I_C mit steigendem I_B ebenfalls ansteigt

Funktion npn-Emitterschaltung Bipolartransistor:
↳ Verstärkung Eingangs-Wechselspannungs Signal (Kl.Sig. Verst.)

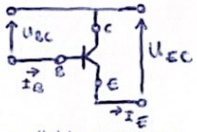
Grundschaltungen:



Emitterschaltung



Basisschaltung



Kollektorschaltung

Arbeitspunkt:

$R_{CE} = \infty\,\Omega$, Steigung der Kennlinie ist 0

$AP = U_{CE}(AP) = \frac{1}{2} U_{Bat}$ ⇒ max Verlustleistung im Transistor die umgesetzt wird/entsteht

AP einstellen: Basisstrom I_B verändern: $\uparrow R \rightarrow \downarrow I_B$ ⇒ AP

Erhöhung des I_B: keine AP-Änderung da Transistor übersteuert & in Sättigung

Wechselgröße: Größe bei der Polarität in regelmäßiger Wiederholung wechselt & zeitlicher Mittelwert = 0

Mischgröße: Größe aus überlagertem Gleich- & Wechselanteil

Spannungsverstärkung: $V_u = \frac{\hat{U}_{CE}}{\hat{U}_E}$ ⇒ Beziehung zw. Eingangs- & Ausgangswechselspannung

max. Signalamplitude: $\hat{u}_{E,max} = \frac{1}{2} U_{Bat} \cdot \frac{1}{V_u}$

Gleichstromverstärkung: $B = \frac{I_{CA}}{I_{BA}} \rightarrow B = \frac{I_{C(AP)}}{I_{B(AP)}}$ ⇒ B nur mittels Kennlinienfeld:

$B = \frac{I_{CO}}{I_B} = \frac{\text{max } I_C \text{ an Arbeitsgerade}}{\text{max } I_B \text{ vom max Punkt}}$

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

Zusammenhang $\hat{u}_e$ & U_e (Effektivwert): $U_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{u}_e$

$U_{BE,N} = U_{BED} + R_{BE} \cdot I_{B,N}$

V_p = Leistungsverstärkung = $|V_u \cdot V_I|$

Stromverstärkung: $V_I = B \cdot \frac{R_A}{R_A + R_{BE}} = \beta$

ESB – Gleichstrom:

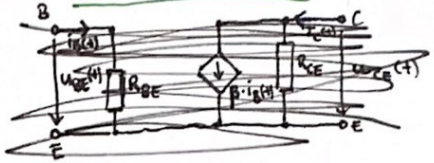


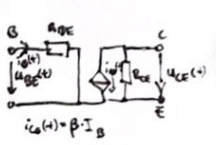
◈: gesteuerte Stromquelle: ◈

↳ $I_{CO} = B \cdot I_B = I_C = I_{C\,AP} - I_{RCE,AP}$

beliebiger Arbeitspunkt A gilt: $I_{CA} = B \cdot I_{BA} = I_{CA}$

ESB – Wechselstrom:





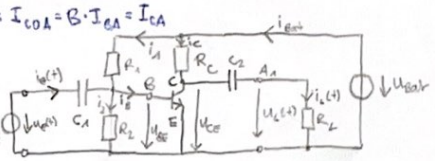
Bsp: Kleinsignalverstärker

4.1. Gleichstrom-ESB

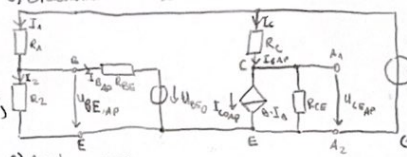
a) Warum $C_A > C_2$ im ESB belanglos

↳ $X_{C_A} = X_{C_2} = \infty\,\Omega$

↳ jeweilige Zweige fallen weg



b) Gleichstrom-ESB zeichnen



($1A = 10^3\,mA = 10^6\,\mu A$)

c) Berechnen von:

↳ $I_{RCE,AP}$ via R_{CE} ⇒ $I_{RCE_{AP}} = \frac{U_{CE_{AP}}}{R_{CE}} = \frac{6V}{1200\,\Omega} = 5 \times 10^{-3}\,A = 5mA$

↳ $I_{CO\,AP}$ ⇒ $I_{CO_{AP}} = I_{C\,AP} - I_{RCE,AP} = 60mA - 5mA = 55mA$

↳ $I_{B\,AP}$ ⇒ $I_{CO_{AP}} = B \cdot I_{B_{AP}}$ ⇒ $I_{B_{AP}} = \frac{I_{CO_{AP}}}{B} = \frac{55mA}{250} = 0,22\,mA = 220\,\mu A$

↳ R_C ⇒ $R_C = \frac{U}{I} = \frac{U_{Bat} - U_{CE_{AP}}}{I_{C_{AP}}} = \frac{12V - 6V}{60 \times 10^{-3}\,A} = 100\,\Omega$

d) R_1 & R_2 bestimmen mit $I_2 = 6\,I_{B_{AP}} = 6 \cdot 0,22\,mA = 1,32\,mA$

↳ $I_{B_{AP}} = 1,32\,mA$ | $U_{BE_{AP}} = U_{BE_0} + U_{R_{BE}} = U_{BE_0} + R_{BE} \cdot I_{B_{AP}} = 0,6V + 150\,\Omega \cdot 220 \times 10^{-6}\,A = 0,633\,V$

↳ $R_2 = \frac{U_1}{I} = \frac{U_{BE_{AP}}}{I_2} = \frac{0,633V}{1,32 \times 10^{-3}\,A} = 479,54\,\Omega$

↳ KR: $0 = I_A - I_1 - I_{B_{AP}}$ ⇒ $I_A = I_2 + I_{B_{AP}} = 1,32\,mA + 0,22\,mA = 1,54\,mA$

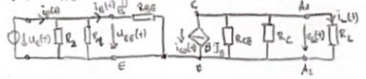
↳ $R_A = \frac{U_1}{I} = \frac{U_{Bat} - U_{BE_{AP}}}{I_A} = \frac{12V - 0,633V}{1,54 \times 10^{-3}\,A} = 7381,17\,\Omega = 7,381\,k\Omega$

e) Transistor Verlustleistung $P_{VT_{AP}}$

↳ $P = U \cdot I$ ⇒ $P_{VT_{AP}} = U_{CE_{AP}} \cdot I_{C_{AP}} = 6V \cdot 60 \times 10^{-3}\,A = 0,36\,W = 360mW$

4.2. Wechselstromverhalten

a) Vervollständigen vom ESB



b) Berechnen von:

↳ $\hat{i}_B$ Amplitude des Wechselanteils von Basisstrom i_B ⇒ $\hat{i}_B = \frac{U}{R} = \frac{\hat{U}_E}{R_{BE}} = \frac{12mV}{150\,\Omega} = 0,08\,mA = 80\,\mu A$

↳ $\hat{i}_{CO}$ vom i_{CO} ⇒ $\hat{i}_{CO} = B \cdot \hat{i}_B = 250 \cdot 0,08\,mA = 20\,mA$

↳ R_a (Lamen bzw. Außenwiderstand) bezüglich unbelastete A1-A2 Klemmen ⇒ $\frac{1}{R_a} = \frac{1}{R_{BE}} + \frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_{1000\,\Omega}} + \frac{1}{R_{100\,\Omega}} = 0,01083\,\frac{1}{\Omega}$ ⇒ $R_a = 92,31\,\Omega$

↳ $\hat{U}_L$ von $U_L(t)$ ⇒ $\frac{\hat{U}_L}{\hat{i}_{CO}} = \frac{R_L}{R_a}$ ⇒ $\hat{U}_L = \hat{i}_{CO} \cdot \frac{R_a R_L}{R_a + R_L} = 20mA \cdot \frac{92,31\,\Omega \cdot 92,3\,\Omega}{92,31\,\Omega + 92,3\,\Omega} = 923,05mV = 0,923V$

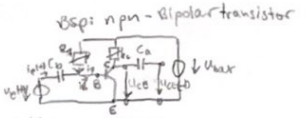
↳ P_L ⇒ $P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = \frac{U_{eff}}{R_L} = \frac{(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{U}_L)^2}{R_L} = \frac{(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0,923)^2 V^2}{92,3\,\Omega} = 4,615 \times 10^{-3}\,W = 4,615\,mW$

↳ P_e an $u_e(t)$ ⇒ $P_e = \frac{U^2}{R} = \frac{(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{U}_e)^2}{R_{ges}} = \frac{(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 12mV)^2}{109,112\,\Omega} = 0,65987\,\frac{mW^2}{\Omega} = 0,65987\,\mu W$

↳ R_{ges}: $\frac{1}{R_a} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ⇒ $R_{ges} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 450,286\,\Omega$; $\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_{ges}} + \frac{1}{R_{BE}}$ ⇒ $R_{ges_e} = 109,112\,\Omega$

↳ $V_p = \frac{P_L}{P_e}$ Leistungsverstärkung ⇒ $V_L = \frac{P_L}{P_e} = \frac{4,615 \times 10^{-3}\,W}{0,65987 \times 10^{-6}\,W} = 6993,802$

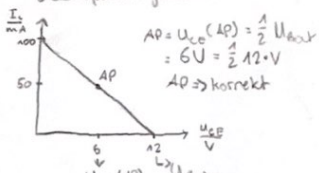
Bsp: npn-Bipolartransistor



WG: ... MG: ...

R_1 & R_E nötig zur AP-Einstellung

C_E & C_A nötig zur Ein- bzw. Auskopplung der Wechselspannungsanteile, "Blockieren" Gleichspannungsanteile.

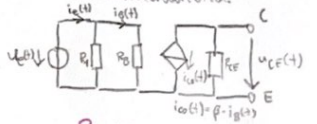


$AP = U_{CE}(AP) = \frac{1}{2} U_{Bat}$

$= 6V = \hat{=} 12 \cdot V$

AP ⇒ korrekt

Wechselstromersatzbild:



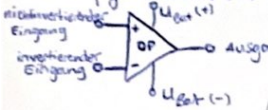
R_L / R_C nur mittels Kennlinien:

$= \frac{U_{Bat}}{I_{CO}} = \frac{U_{Bat}}{\text{max } I_C}$

↳ $P_{L\,AP2} = R_L \cdot I^2_{C\,AP}$

Operationsverstärker [5]

↳ einstufiger Verstärker / mehrstufiger Transistorverstärker



wenn ideal:
- keine Temp. Abhängigkeit
- kein Rauschen
- Frequenz: $0 \leq f \leq \infty$ Hz
- $U_{e2} = U_{e1} \Rightarrow U_a = 0$ V (OP symmetrisch)

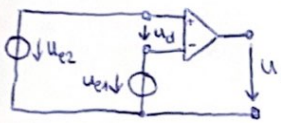
Anforderungen:

- Eingangswiderstand $R_e = \infty\,\Omega$ (möglichst groß) ⇒ im Eingang fließen keine Ströme
- Ausgangswiderstand $R_a = 0\,\Omega$ (möglichst klein) ⇒ Ausgang wie ideale Spannungsquelle
- Verstärkungsfaktor V_U / Open-Loop-Verstärkung $A_{OL} = \infty$ (Leerlaufverstärkung)

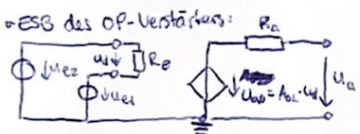
ohne Rückkopplung / Open-Loop-Betrieb

$U_d > 0$ (Differenzspannung) ⇒ $U_a = U_{a\,max} = +U_{Batt}$

$U_d < 0$ ⇒ $U_a = U_{a\,min} = -U_{Batt}$



▷ ESB des OP-Verstärkers:



↳ ohne Rück-/Gegenkopplung: Komparator ⇒ Vergleich zweier Spannungen ideal
↳ wegen hoher A_{OL}-Verstärkung

(+) U_a wie oben für $U_2 > U_1$ & $U_d > 0$

(-) U_a wie oben für $U_1 > U_2$ & $U_d < 0$

$U_a = 0$V für $U_1 = U_2$ & $U_d = 0$

mit Rückkopplung:

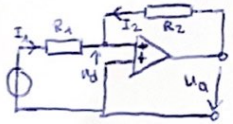
Rückkopplung = Zurückführen eines Teils der Ausgangsspannung U_a auf einen der Eingänge innerhalb des OPs

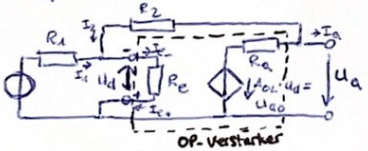
↳ Gegenkopplung: rückgekoppelte Spannung von Eingangsspannung subtrahieren
→ Rückführung der Ausgangsspannung auf invertierenden OP-Eingang

↳ Mitkopplung: Addition von rückgekoppelter Spannung und Eingangsspannung
→ Rückführung der Ausgangsspannung auf nichtinvertierenden OP-Eingang

1. invertierender Verstärker

Spannungsverstärkung $V_U = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$ (Sonderfall: Inverter Verstärker: $R_1 = R_2$, $V_U = -1$) ↳ Eingangsspannung wird umgekehrt/invertiert



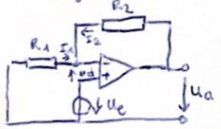


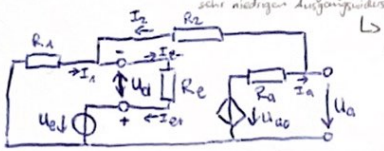
2. nicht invertierender Verstärker

Spannungsverstärkung $V_U = \frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ (Sonderfall: Impedanzwandler: $R_1 \to \infty\,\Omega$, $R_2 \to 0\,\Omega$, $V_U = 1$)

sehr hoher Eingangswiderstand / kann beim Verbraucher an niederohmigen Ausgangswiderstand

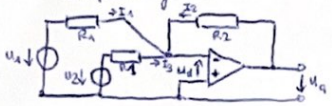
↳ wird zwischen Verbraucher & Quelle geschaltet und wandelt Quelle mit hohem R_i in Quelle mit niedrigem R_i um.





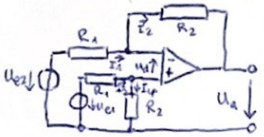
▷ 3. Addierer: $U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot (U_1 + U_2)$

↳ analoge Spannungen werden addiert
↳ Spannungen werden verstärkt



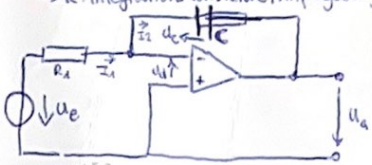
▷ 4. Subtrahierer: $U_a = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_1 - U_2)$

↳ Differenz der Eingangsspannungen
↳ Multipliziert ΔU_e mit Verstärkungsfaktor $(\frac{R_2}{R_1})$

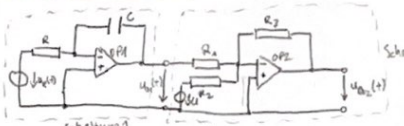


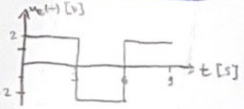
▷ 5. Integrierer: $U_a = -\frac{1}{RC} \cdot \int U_e dt + K$

↳ U_a (Ausgangsspannung) entspricht Integral von U_e
↳ $-\frac{1}{RC} = V_U$: Verstärkungsfaktor
↳ K: Integrationskonstante / Anfangsbedingung



Bsp: Operationsverstärker





5.1. OP1

a) welche OP-Grundschaltung?
↳ Integrierer

b) Zusammenhang $U_{a1}(t)$ & $U_e(t)$ ⇒ $U_{a1}(t) = f(U_e(t), R, C)$

↳ $U_{a1}(t) = -\frac{1}{RC} \cdot \int U_e dt$

c) $U_{a1}(t)$ mit $U_e(t) = 0$V $(t = 0s)$ für $0s \leq t \leq 3s$ & $U_{a1}(t = 3s)$ berechnen

↳ $U_{a1}(t) = -\frac{1}{10 \cdot 10^3\,\Omega \cdot 100 \cdot 10^{-6}\,F} \cdot \int_0^t 2V\,dt \Rightarrow U_{a1}(t = 0s) = -1\frac{1}{\Omega F} \cdot 2V \cdot t + k_1 = -2\frac{V}{s} \cdot t + k_1 = 0V \Rightarrow k_1 = 0 \Rightarrow U_{a1}(t) = -2\frac{V}{s} \cdot t$

↳ $U_{a1}(3s) = -2\frac{V}{s} \cdot 3s = -6V$

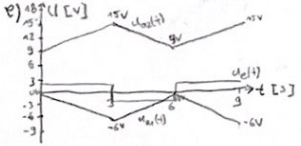
d) $U_{a1}(t)$ für $3s \leq t \leq 6s$ & $U_{a1}(6s)$ berechnen

↳ $U_{a1}(t) = -\frac{1}{\Omega F} \cdot \int_3^t -2V\,dt = -\frac{1}{s}\left[-2V \cdot t\right]_3^t = -\frac{1}{s}(-2Vt - (-2V \cdot 3s)) + k_2 = 2\frac{V}{s}(t - 3s) + k_2 = U_{a1}(t)$

↳ $U_{a1}(3s) = -6V = 2\frac{V}{s}(3 - 3) + k_2 \Rightarrow k_2 = -6V$

↳ $U_{a1}(6s) = 2\frac{V}{s}(6 - 3) - 6V = 6V - 6V = 0V$

e)



5.2. OP2

a) welche OP-Grundschaltung?
↳ invertierender Addierer

b) Zusammenhang $U_{a2}(t)$ & $U_{a1}(t)$ & U ⇒ $U_{a2}(t) = f(U_{a1}(t), U, R_1, R_2, R_3)$

↳ $U_{a2}(t) = -R_3\left(\frac{U_{a1}(t)}{R_1} + \frac{U}{R_2}\right)$

↳ Sonderfall: $U_{a2}(t) = -(U_{a1}(t) + U) \to R_1 = R_2 = R_3$

c) $U = -9$V, $R_1 = R_2 = R_3$ Berechnen von:

↳ $U_{a2}(0s) = -(U_{a1}(0s) + (-9V)) = -(0V - 9V) = 9V$

↳ $U_{a2}(3s) = -(U_{a1}(3s) - 9V) = -(-6V - 9V) = 15V$

↳ $U_{a2}(6s) = -(U_{a1}(6s) - 9V) = -(0V - 9V) = 9V$

d) $U_{a2}(t)$ wenn $U < -9$V ?

↳ $U_{a2}(t)$ wird bei Spannungen kleiner -9V die Betriebsspannung von 15V überschreiten, bedeutet es kommt in die Begrenzung

Elektrische Maschinen [6]

U=[V] cΦ=[Vs]
I=[A] M=[Nm]
P=[W] n=[s⁻¹ oder min⁻¹]
R=[Ω]

Wirkungsweise:

↳ elektrische Seite:
GS: $P_{el} = U \cdot I$ [W] $= I^2 R$
1~WS: $P_{el} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ [W]
3~WS: $P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi)$ [W]

↳ mechanische Seite
$P_{mech} = 2\pi \cdot n \cdot M$ [W] (M: Drehmoment [Nm])
$\Omega = 2\pi \cdot n$ (mech. Winkelgeschwindigkeit; n: Drehzahl [s^{-1} oder min^{-1}])
$P_{Reibung} = \Omega \cdot M_R$ (M_R: inneres Drehmoment)
$\Rightarrow P_{mech} = \Omega \cdot (M_i - M_R)$

Wirkungsgrad: $\eta = \frac{P_{nutz}}{P_{zu}}$

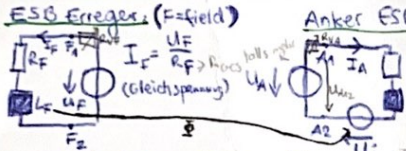
↳ $\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el,auf}} = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + P_{verlust}} = \frac{P_{el,auf} - P_{verlust}}{P_{el,auf}}$

$\eta_{mech} = \frac{P_{Hub}}{P_{mech}}$ ($P_{Hub} = m \cdot g \cdot h$ (Hubarbeit))

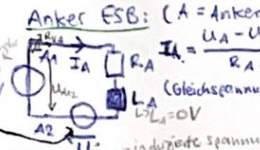
$\eta_{ges} = \eta_{GSM} \cdot \eta_{mech}$

Gleichstrommaschine (GSM)

ESB Erreger: (F=field)



Anker ESB: (A = Anker)



$I_A = \frac{U_A - U_i}{R_A}$ → ggf. R_{ges}
(Gleichspannung)
$L_A = 0V$

[Fremderregte GSM hier]

U_i = induzierte Spannung

magnetischer Fluss: $\Phi = k_F \cdot I_F \Rightarrow U_i$ von Geschw. & Stärke vom Magnetfeld abhängig

$U_i = c \cdot \Phi \cdot \Omega = c \cdot (k_F \cdot I_F) \cdot (2\pi \cdot n) = \frac{P_{mech}}{I_A} = U_A - I_A \cdot R_A$ ⇒ Maschenregel

↳ $U_A = U_i + I_A \cdot R_A$

↳ Konstante: $c \cdot \Phi = \frac{U_i}{\Omega} = \frac{U_i}{2\pi n} = \frac{M_N}{I_{AN}}$

inneres Drehmoment: $M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A$ ($M = M_i - M_R$)

Schaltungsarten:
Fremderregte GSM → Anker & Erreger je eigene U-Quelle
Reihenschluss GSM → Erreger & Anker in Reihe (mit gemeinsamer Quelle)
Nebenschluss GSM → Erreger an derselben U-Quelle wie Anker angeschlossen (parallel)

Erregerstrom: $I_F = \frac{U_F}{R_F} = \frac{U_F}{R_{GS}} \Rightarrow I_{F_{AP}} = I_{FN} \cdot \frac{(c \cdot \Phi)_{AP}}{(c \cdot \Phi)_N}$

Nennstrom: $I_N = \frac{P_N}{U_{AN} \cdot \eta_N} = \frac{P_{mech}}{U_{iN}} = \frac{P_{verl,N}}{R_A}$
(am Anker)

Ankerstrom: $I_A = \frac{U_A - U_i}{R_A} = \frac{U_A - U_i}{R_{ges}}$

Drehzahldrehmoment-Kennlinie: $\Omega(M_i) = \left(\frac{U_A}{c \cdot \Phi}\right) \pm \frac{R_{vA} + R_{vErr}}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M_i$ [+ Generator, − Motor → meistens]

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

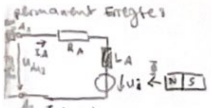
Stillstand ($U_i = 0V$):

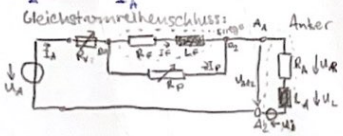
↳ Strom: $I_{A,K} = \frac{U_A}{R_A} \Rightarrow I_{AN} = I_{A,K} \cdot \frac{M_N}{M_W}$ [am Anker]

↳ Drehmoment: $M_{St} = M_N \cdot \frac{I_{A,A}}{I_{A,N}}$

Erregergrad (bei Gleichstrom-Reihenschluss): $\lambda = \frac{I_F}{I_A} = \frac{R_P}{R_P + R_F}$ (R_P: weiterer R im Erreger)
↳ hier dann bei Φ noch mit λ multiplizieren: $\Phi = k_F \cdot \underbrace{I_A \cdot \lambda}_{I_F}$

Ankerwiderstand: $R_A = \frac{P_{VA}}{I_A^2} = \frac{U_{AN} - U_{iN}}{I_A}$





Drehstrom Asynchronmaschine (ASM)

(wenn $n \geq n_S$ dann Generator)

Synchrondrehzahl: $n_S = \frac{f_N}{p}$ (f: Frequenz, p: Polpaarzahl) → $n < n_S$ ↳ Motorbetrieb

Schlupf: $s = \frac{n_S - n}{n_S} = 1 - \frac{n}{n_S}$ (n: Rotordrehzahl) [%]

Kippmoment: $M_{i,K} \approx \frac{U_S^2}{R_1 \cdot \Omega}$ (U_S: Strangspannung)

Kloss'sche Formel:
↳ bezieht M_i auf $M_{i,K}$

↳ $\frac{M_i}{M_{i,K}} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$ $\cos(\varphi) = \frac{P}{S}$

Kippschlupf: $s_K \approx \frac{R_2}{X_1}$

Dreiecksschaltung:



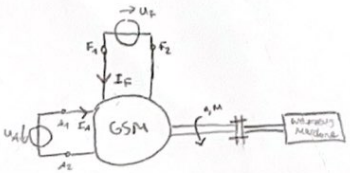
$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{Str}$
$U_L = U_{Str}$
$P_{el\Delta} = 3 \cdot U_{Str_\Delta} \cdot I_{Str_\Delta} = 3 \cdot P_{el\Delta}$
$I_{L\Delta} = 3 \cdot I_{LY}$

Sternschaltung:

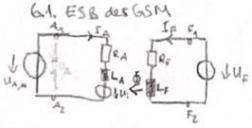


$I_L = I_{Str}$
$U_L = \sqrt{3} \cdot U_{Str}$
$P_{elY} = 3 \cdot U_{Str_Y} \cdot I_{Str_Y} \cdot \cos(\varphi)$
$P_{elY} = \frac{1}{3} \cdot P_{el\Delta}$
$I_{LY} = \frac{1}{3} I_{L\Delta}$

Bsp: Gleichstrommaschine



6.1. ESB des GSM



1 min = 60 s

6.2. Nennbetrieb
↳ $P_{AN} = P_{el\Delta} = U_{AN} \cdot I_{AN} = 220V \cdot 55A = 12100W = 12,1kW$
↳ $P_N = P_{mech} = 2\pi \cdot n_N \cdot M_N = 2\pi \cdot 1500 min^{-1} \cdot 70Nm \cdot 60^{-1} = 10995,57W = 10,996kW$
↳ $P_{VAN} = P_{AN} - P_N = 12,1kW - 10,996kW = 1,1kW$
↳ $R_A = \frac{P_{VAN}}{I_{AN}^2} = \frac{1,1kW}{(55A)^2} \cdot 10^3 = 0,364\Omega$
↳ $U_{iN} = U_{AN} - U_{R_A} = U_{AN} - R_A \cdot I_{AN} = 220V - 0,364\Omega \cdot 55A = 199,98V$
↳ $(c \cdot \Phi)_N = \frac{U_{iN}}{\Omega_N} = \frac{U_{iN}}{2\pi \cdot n_N} = \frac{199,98V}{2\pi \cdot 1500 min^{-1}} = 1,273Vs$
↳ $n_{0N} = \frac{220V}{2\pi(c\Phi)_N} = \frac{220V}{2\pi \cdot 1,273Vs} = 27,50525^{-1} = 1650,31 min^{-1}$
↳ $P_{VE_N} = U_{E_N} \cdot I_{E_N} = U_{E_N}^2 \cdot \frac{1}{R_{E_N}} = \frac{(200V)^2}{(100\Omega)} = 400W = 0,4kW$
↳ $\eta_N = \frac{P_N}{P_N + P_{VAN} + P_{VEN}} = \frac{10,996kW}{(10,996 + 1,1 + 0,4)kW} = 0,87996 = 87,996\% \approx 88\%$

6.3. Stillstand
↳ $I_{A_{St}} = \frac{U_{AN}}{R_A} = \frac{220V}{0,364\Omega} = 604,396A$ ⇒ sehr viel größer als $I_{AN} = 55A$ was zu Unzulässigkeit führt
↳ $M_{St} = M_N \cdot \frac{I_{A_{St}}}{I_{AN}} = 769,231Nm$ ($M_N = (c\Phi) \cdot I_{AN}$)
↳ $U_{A_{St}} = ?$ wenn $I_{A_N} \cdot 1,5 = I_{A_{N_{St}}}$
↳ $U_{A_{St}} = I_{A_{St}} \cdot R_A = 1,5 \cdot I_{A_N} \cdot R_A = 1,5 \cdot 55A \cdot 0,364\Omega = 30,03V$
↳ $M_{St} = M_N \cdot \frac{I_{A_{St}}}{I_{AN}} = M_N \cdot \frac{1,5 I_{AN}}{I_{AN}} = 70Nm \cdot 1,5 = 105Nm$

6.4. M-n-Charakteristik & stat. Drehzahl
↳ $(c \cdot \Phi) = ?$ wenn $M_{AP} = 0,5 M_N$ & $n_{AP} = 2000 min^{-1}$
↳ $\Omega = 2\pi \cdot n_{AP} = 2\pi \cdot 2000 min^{-1} (60s)^{-1} = 209,44 s^{-1}$
↳ $M_{AP} = 0,5 \cdot 70Nm = 35Nm$