Gleichstrom

$U = R I \qquad I = U/R \qquad R = U/I$

parallel:

$\frac{1}{R_g} = \sum_i \frac{1}{R_i}$ $\quad i=2: R_{ges} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

$C_g = C_1 + C_2 + \dots$ $\quad \frac{1}{L_g} = \sum_i \frac{1}{L_i}$

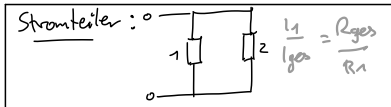
Reihe:

$R_g = R_1 + R_2 + \dots$

$L_{ges} = L_1 + L_2 + \dots$

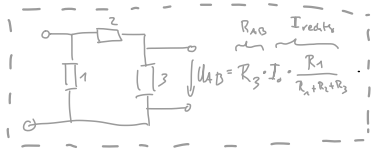
$\frac{1}{C_g} = \sum_i \frac{1}{C_i}$

Stromteiler:

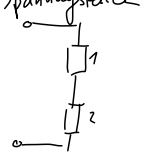


$\frac{I_1}{I_{ges}} = \frac{R_{ges}}{R_1}$

$I_1 = I_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$



Spannungsteiler



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

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



Leistung:

$P = U \cdot I$

$P = R I^2$

$P = U^2/R$

$P < 0$ nimmt Leistung auf

$P > 0$ gibt Leistung ab

$1\ \text{Wh} \hat{=} 3600\ \text{J}$

Ws

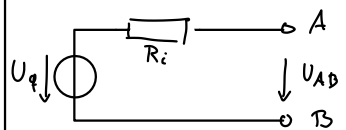
$P = W/t = \frac{Q}{t} \cdot U$

Knotengleichungen $\quad KG = K - 1$

Maschengleichungen $\quad MG = Z - (K-1)$

SUPERKNOTEN ! unbekannt sind I oder U → kleineres ! mind. 3 Stäbe pro Knoten

Ersatzspannungsquelle

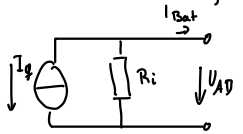


$I_{KS} = U_q / R_i$

$U_q = U_{AB,LL}$

$R_i = R_{AB}$

Ersatzstromquelle



$I_q = I_{Kurzschluss}$

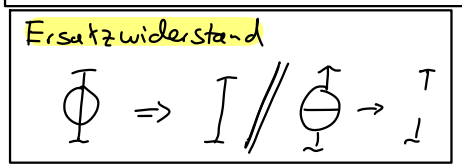
$I_{Bat} = I_q - \frac{U_{Bat}}{R_i}$

$R_i = R_{AB}$

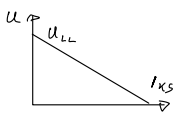
$R_{ers} = \frac{U_{ABLL}}{I_{ABKS}}$

Durch den Kurzgeschlossenen A-B-Zweig

Ersatzwiderstand



Geradengl. Allg: $y = mx + c$



$m = -\frac{U_{LL}}{I_{KS}}$

$c = U_{LL}$ ideale Stromquelle

$U_{AB}(I) = U_{LL} - \frac{U_{LL}}{I_{KS}} \cdot I$

$I(U_{AB}) = I_q \cdot \frac{1}{R_i} \cdot U_{AB}$

Überlagerungssatz anwendbar auf lineare Größen (I & U)

nicht P !

Spannungsquelle → KS $\quad R = 0$

Stromquelle → LL $\quad R = \infty$

Leitwert $Y = 1/R$, verrechnet sich wie R

$\arg(\underline{z}) = -\arg(\underline{Y})$

Kaltleiter besitzen bei kleinerer Temp. kleineren Widerstand

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$

Ladungsmenge $\quad Q = neV = neAvt$

Strom $\quad I = Q/t = neAv$ $\quad n$: Dichte

$[I] = A = Cs^{-1}$

Spannung $\quad U = W/q = El$ $\quad l$: Leiterlänge

$W = EqL \qquad E = \rho S$

Stromdichte $\quad S = I/A = \sigma \cdot E \qquad [S] = A/m^2$

spez. Leitfähigkeit $\quad \sigma = 1/\rho \qquad [\sigma] = S/m$

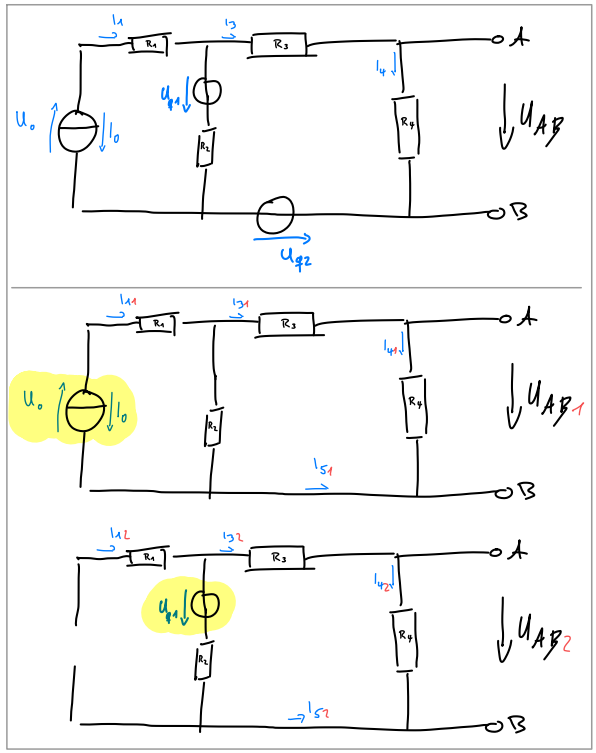
spez. Widerstand $\quad \rho = \frac{E}{S} = \frac{U \cdot I}{lA} \qquad [\rho] = \Omega$

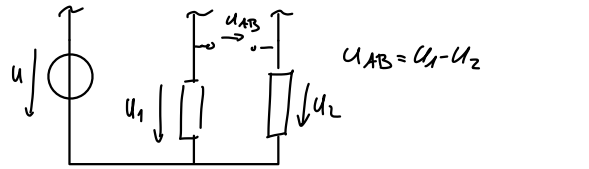
Widerstand $\quad R = \frac{E \cdot L}{SA} \qquad R = \rho \frac{l}{A}$

Temp: $\quad R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 - \alpha_0 (\vartheta - \vartheta_0))$

Heißleiter $\alpha_0 < 0$

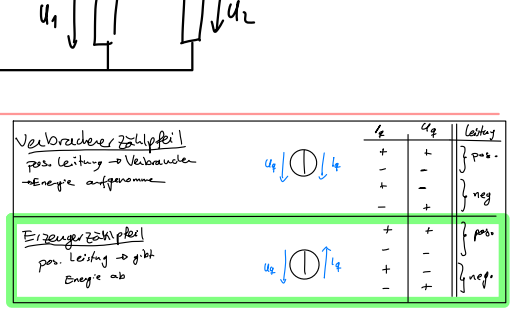
Kaltleiter $\alpha_0 > 0$





damit rechnen

Verbraucher Zählpfeil	I_q	U_q	Leistung
pos. Leistung → Verbraucher → Energie aufgenommen	+	+	pos.
	−	−	
	+	−	neg.
	−	+	
Erzeuger Zählpfeil	+	+	pos.
pos. Leistung → gibt Energie ab	−	−	
	+	−	neg.
	−	+	



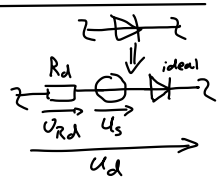
	Zeichen	$10^{\wedge}$
Peta	P	15
Tera	T	12
Giga	G	9
Mega	M	6
Hekto	h	2
Dezi	d	-1
Dico	P	-12
femto	f	-15

DIODE linearisieren: y-Wert danach Bezugswert y_0

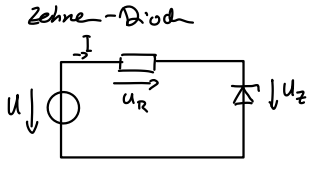
Messweite berechnen

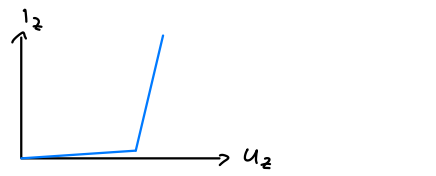
$S_n = S_0 \left[\lg(y_n) - \lg(0{,}01) \right]$

Abs zu y_n / Strecke 1 Dekade



Zehner-Diod





Wechselstrom

Kondensator:

real: 

$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$ Ω

$Z_C = -j X_C = X_C \cdot e^{j(-90°)}$ Ω

$Y_C = \frac{1}{Z_C} = j\omega C$

$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$

$W = \frac{1}{2} C U^2$ ← gespeicherte Energie

$Q_C = -X_C \cdot I^2$ ← Betrag [var]

Spule:

Blindwiderstand Real 

$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L$ Ω

$Z_L = j X_L = X_L \cdot e^{j90°}$ Ω

$Y_L = \frac{1}{j\omega L}$

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

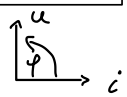
$W = \frac{1}{2} L I^2$

$Q_L = X_L \cdot I^2$ ← Betrag var

Phasenverschiebung:

$90° > \varphi > 0°$ → induktiv

$0° > \varphi > -90°$ → kapazitiv

$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ 

direktes Berechnen: → einfach über UI / U^2/R / $I^2 R$ (jw. Betrage)

→ $Q = Q_L - Q_C$ [siehe oben] ⚠

φ neg → ohm. kap.

φ pos → ohm. ind.

φ 0 → ohm.

Blindleistung (kompl. Widerstände)	$Q = U I \sin(\varphi) = \mathrm{Im}(S)$	[var]
Wirkleistung (norm. Wid.)	$P = U I \cos(\varphi) = \mathrm{Re}(S)$	[W]
Scheinleistung	$S = U \cdot I^*$	[VA]

Keine Blindleistung, wenn $\mathrm{Im}\{\underline{Z}\} \overset{!}{=} 0$

$Q > 0$ var → induktiv

$Q < 0$ var → kapazitiv

Man darf mit Dach- und Eff.Werten rechnen

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

$U = |\underline{U}|$ → Effektivwert $U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$ = Betrag

U = Momentanwert Spannung $\quad \hat{u}$ = Scheitelwert = Ampl.

φ_u = Phasenwinkel $\left\{ \varphi_u = t_0 \cdot \frac{2\pi}{T} \right\}$ $\quad \omega$ = Kreisfrequenz $\quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

LEISTUNGEN MIT EFFEKTIVWERT / BETRAG !

SPULE

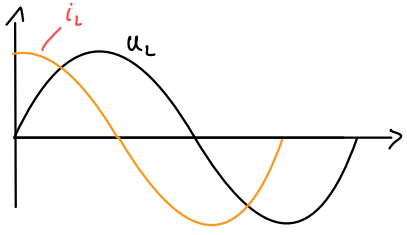
$U_L = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$

$\overset{!}{=} L \cdot \frac{d}{dt} \{\hat{i}_L \sin(\omega t + \varphi_i)\}$

$= \omega L \hat{i}_L \cos(\omega t + \varphi_i)$

$= \omega L \hat{i}_L \sin(\omega t + \varphi_i + \pi/2)$

$\hat{u}_L = \omega L \hat{i}_L$



Spannung eilt Strom um 90° voraus

↳ Magnetfeld wird in endlicher Zeit aufgebaut

Zeigerdiagramm

Reihe: $\underline{U}$ addieren

Parallel: $\underline{I}$ addieren

R	↑ $\underline{i}_R$	↑ $\underline{u}_R$	$\hat{\underline{i}}_R$ parallel zu $\hat{\underline{u}}_R$
L	↑ $\underline{U}_L$	→ $\underline{i}_L$	$\hat{\underline{u}}_L$ pos. senkrecht auf $\hat{\underline{i}}_L$
C	→ $\underline{U}_C$	↑ $\underline{i}_C$	$\hat{\underline{u}}_C$ neg. senkrecht auf $\hat{\underline{i}}_C$

$\underline{Z} = a + bi$ $\quad |\underline{Z}| = \sqrt{a^2 + b^2}$

$$\arg(\underline{Z}) = \begin{cases} \arctan(b/a) & a > 0 \\ \pi/2 & a = 0,\ b > 0 \\ \pi + \arctan(b/a) & b < 0 \\ 3\pi/2 & a = 0,\ b < 0 \end{cases}$$

$$\frac{1}{x + y \cdot i} = \frac{x - yi}{x^2 + y^2}$$

U Gleichgröße

$u(t)$ sinusförmig: Pol. wechselt, zeitl. Mittel 0

u Mischgröße

$R \cdot C = s$

KONDENSATOR:

Energiespeicher

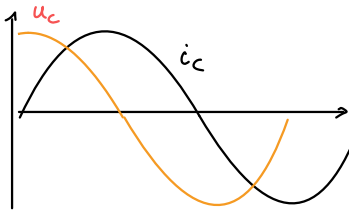
$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$

$\overset{!}{=} C \cdot \frac{d}{dt} \{\hat{u}_C \sin(\omega t + \varphi_u)\}$

$= \omega C \hat{u}_C \cos(\omega t + \varphi_u)$

$= \omega C \hat{u}_C \sin(\omega t + \varphi_u + \pi/2)$

$\hat{i}_C = \omega C \hat{u}_C$



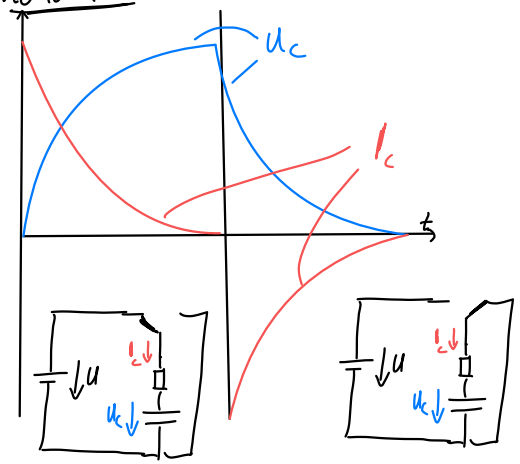
Spannung eilt dem Strom um 90° nach

↳ elektr. Feld wird in endlicher Zeit aufgebaut

DGL aufstellen: 1) Knotengleichung 2) Maschengleichung (groß) 3) ineinander einsetzen

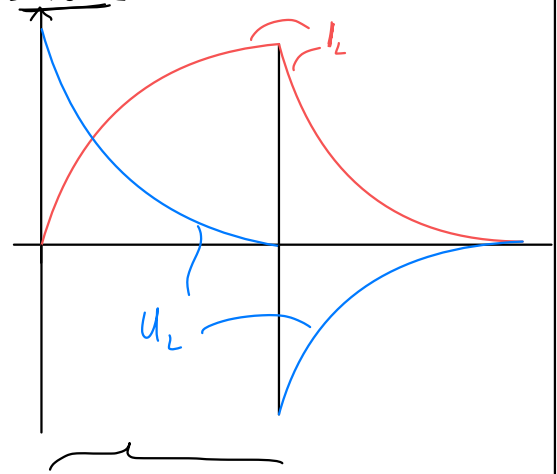
Zur Kompensation einer induktiven Blindleistung: Kondensator parallel
Kapazitive Bildwirt: Spule in Reihe

Kondensator



R_C für $t=0 \to 0$
R_C für $t=\infty \to \infty$

SPULE



R_L für $t=0 \to \infty$
R_L für $t=\infty \to 0$

DC

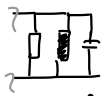
energiekennzeichnend: $U_C \to$ stetig $\swarrow$ I_L
sonst Leistung ∞

$\omega = 0\,s^{-1} \to$ Spule ist Kurzschluss, Kond. ist Leerlauf
$\omega = \infty\,s^{-1} \to$ Kondensator ist Kurzschluss, Spule ist Leerlauf
$\omega = \omega_R \to$ parallel sind sie Leerlauf

AC

Resonanzfrequenz: Imaginärteil Impedanz verschwindet $\sum_i X_i \stackrel{!}{=} 0$
$\mathrm{Im}(\underline{Z}) = 0\,\Omega$ $f = f_R$ $Q = 0$
$\to$ kleiner Widerstand

AC



$\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L \to f_R = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$\varphi_r = 0$ Resonanzströme
$I_{r,C} = I_{r,L} = \omega_r C U = U/\omega_r L$ für
$\omega_r L = 1/\omega_r C < R$ größer als U/Z_r

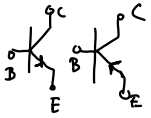


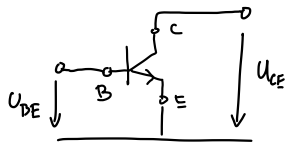
$\omega L = \frac{1}{\omega C} \to f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

f_R: Strommaximum
Widerstandsminimum
Spannungen an C & L viel höher als U !

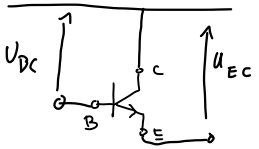
TRANSISTOR

N	P
P	N
N	P

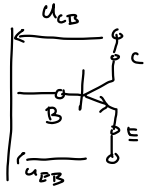




Emitterschaltung



Kollektorschaltung



Basisschaltung

gemeinsamer Anschluss
Kleinsignalverstärker oder Schalter

Arbeitspunkt: einstellen durch Gleichspannungsquelle, Kondensatoren koppeln Gleichspannung aus/ein

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

↳ max. Verlustleistung in Transistor & größte Aussteuerung

einstellen AP durch Basisstrom

$R \uparrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow AP$

$\hat{u}_{CE,max} = \frac{1}{2} U_{Bat}$ $\quad \hat{u}_{e,max} = \frac{\hat{u}_{CE,max}}{V_u}$

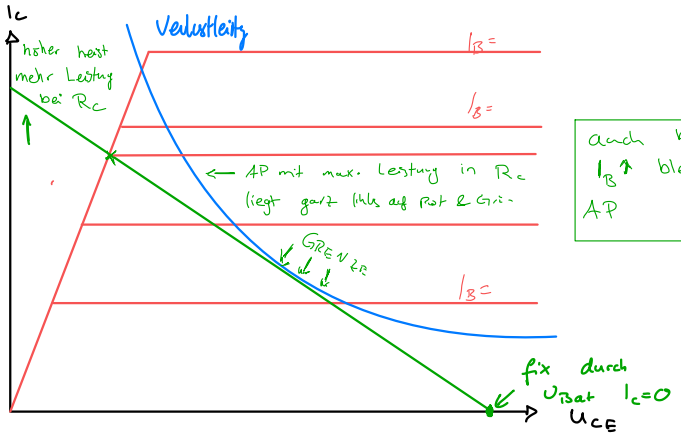
Verlustleistung: oft Basis-Emitter-Kreis vernachlässigt.

Spannungsverstärkung $V_u = \frac{\hat{u}_{CE}}{\hat{u}_E}$ bzw. $= \frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_e}$

Stromverstärkung (DC) $B = I_C / I_B$

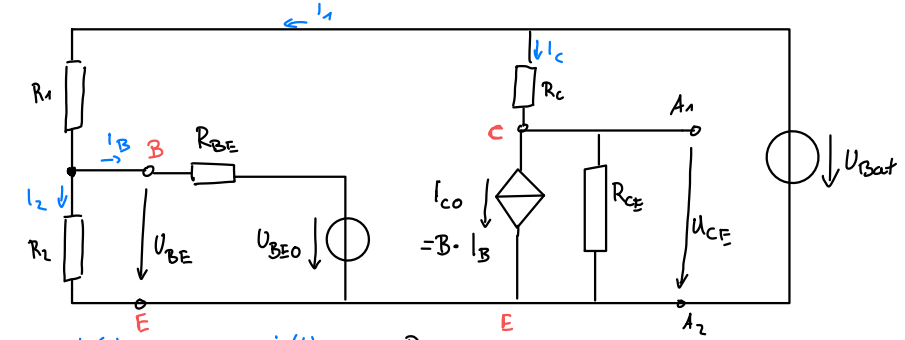
LEISTUNGEN MIT EFFEKTIVWERT/BETRAG!

$I_2 = 6 \cdot I_B \rightarrow I_2$ ausrechnen $\rightarrow U_{BE}$ ↓
$R_1 \leftarrow I_1 \leftarrow R_2$



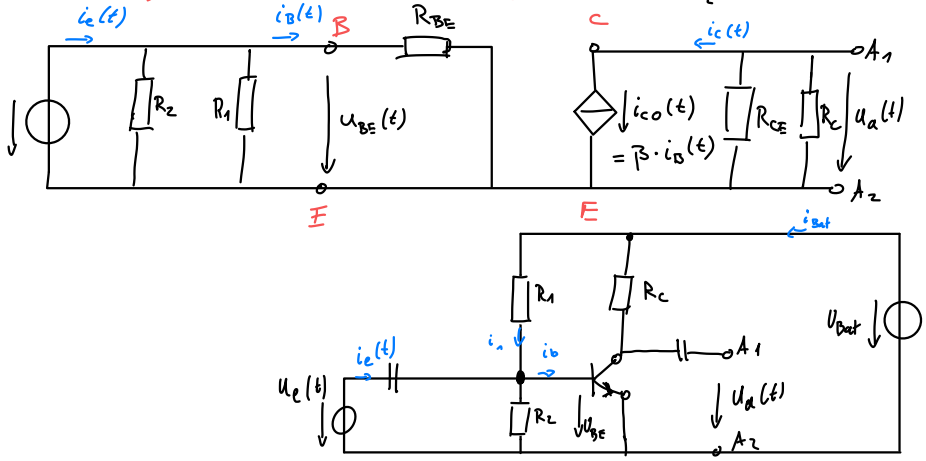
auch bei $I_B \uparrow$ AP	bleibt	bei $I_B \downarrow$ neuen Pot-Gr. in Schnittpunkt

Gleichstrom



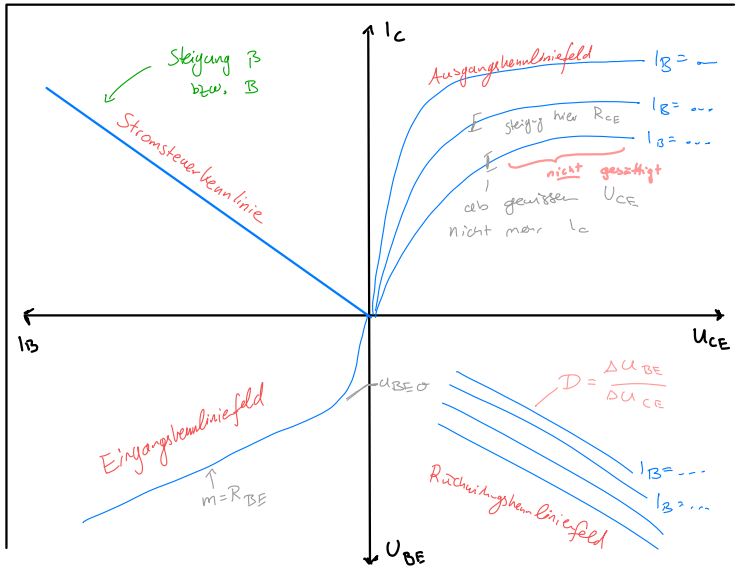
Wechselstrom

$u_e(t)$



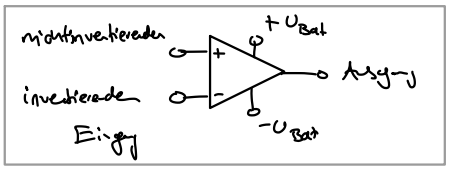
hier oft Annahme $C \rightarrow \infty$ F
$\Rightarrow$ 0 Ω

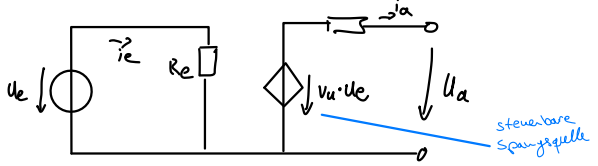
Die Kondensatoren:
- blocken Gleichspannung U_{Bat} gegen $u_e(t)$ & koppeln $u_e(t)$ ein
- Blockt Gleichspannung des Mittelpunkts als U_{CE}



OPAMP

Eigenschaften idealer OP: (1) Eingangswiderstand ∞ → $R_E = \infty\,\Omega$ → kein Strom in OP
(2) Ausgangswiderstand $R_A = 0\,\Omega$ → ideale Spannungsquelle
(3) Ausgangsspannungsquelle ist gesteuert mit Spannungsverstärkung v des unbeschalteten OP $v = \infty$ / Open-Loop Verstärkung $A_{OL} = \infty$



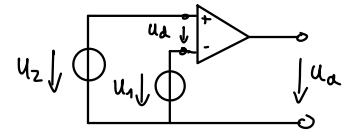


ohne Rückkopplung

$u_a \xrightarrow{u_{ab}} u_b$ $\quad u_{ab} = u_a - u_b$

↳ Komparator

Vergleich 2 Spannungen



(1) $u_2 > u_1 \rightarrow u_d > 0 \rightarrow u_a = +U_{Bat}$
(2) $u_2 = u_1 \rightarrow u_d = 0 \rightarrow u_a = 0\,V$
(3) $u_2 < u_1 \rightarrow u_d < 0 \rightarrow u_a = -U_{Bat}$

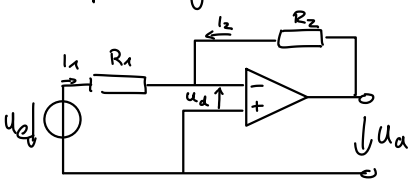
mit Rückkopplung

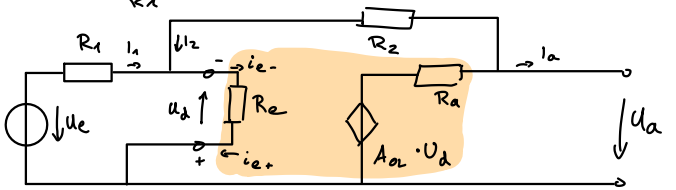
- Rückkopplung = Rückführung eines Teils der Ausgangsspannung des OPs auf einen der beiden Eingänge → Einstellen Spannungsverstärkung auf endliche Werte
- Mitkopplung: Addition rückgekoppelten Spannung auf Eingangsspannung
- Gegenkopplung: Rückführung auf invertierenden OP-Eingang

↳ invertierender Verstärker

(Sonderfall: Inverter $R_2 = R_1 \rightarrow v_u = -1$)

Spannungsverstärker $V_u = -\frac{R_2}{R_1}$ durch (-1) invertiert $u_a(t) = -\frac{R_2}{R_1} u_e(t)$

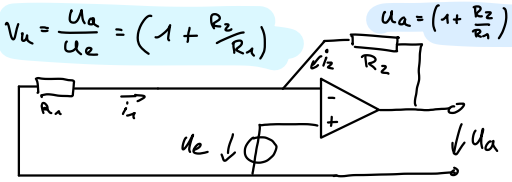


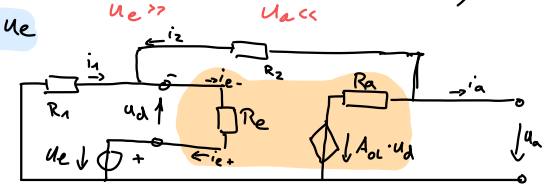


↳ nicht-invertierender Verstärker

Rückführung auf nicht-invert. Eingang, Gegenkopplung über R_2 über R_1 auf Masse (Sonderfall: Impedanzwandler $R_1 \rightarrow \infty\,\Omega$, $R_2 = 0\,\Omega \rightarrow V_u = 1$)

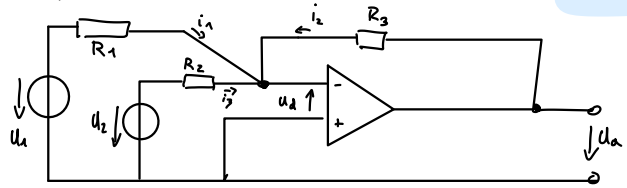
$V_u = \frac{u_a}{u_e} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ $\quad u_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_e$ $\quad u_e >> \quad u_a <<$





↳ Addierer

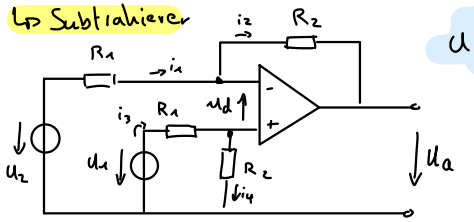
$u_a = -R_3\left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2}\right)$



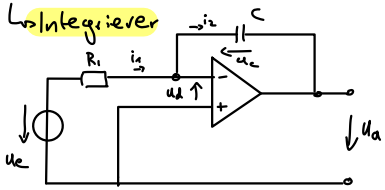
u_d: zu null volt, weil Gegenkopplung das erzeugt, damit Ausgangsspg endliche Werte annimmt

↳ Subtrahierer

$u_a = \frac{R_2}{R_1}(u_1 - u_2)$



↳ Integrierer



Ausgangsspannung $u_a \hat{=}$ Integral der Eingangsspg u_e

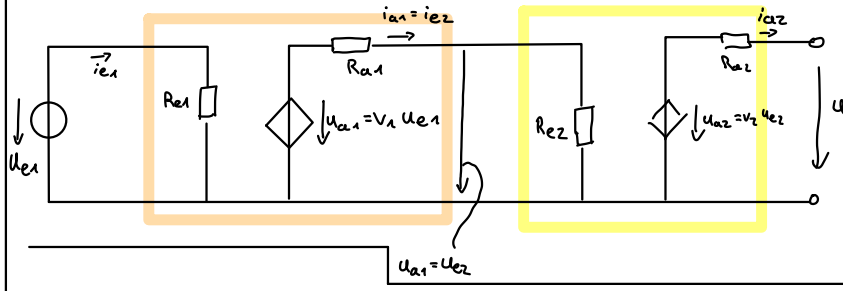
$u_a = -\frac{1}{RC}\int u_e\,dt + k$ $\quad u_a = -\frac{1}{RC}\int_{t_0}^{t} u_e(\tau)\,d\tau + k$ (k: integrations Konstante)

mit Spannungsverstärkung $v_u = -1/RC$

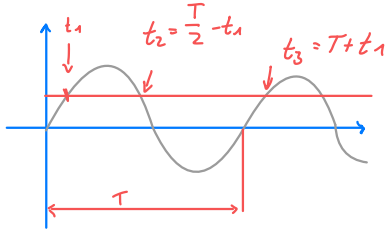
$\left[u_c = \frac{1}{C}\cdot\int i_2\,dt + k = -\frac{1}{RC}\int u_e\,dt + k\right]$

Begrenzung = Eigenschaft, dass $-U_v \leq u_a \leq U_v$

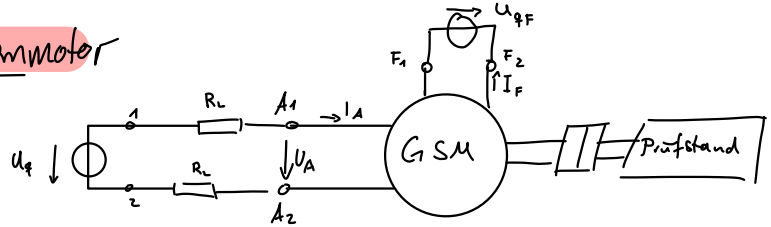
Widerstand → AP einstellen, Diode → stellt Referenzspg zu Verfügung, Referenzspg → Umschaltpunkte Komparator einstellen, Spannungsteiler, weil in OP kein Strom fließt

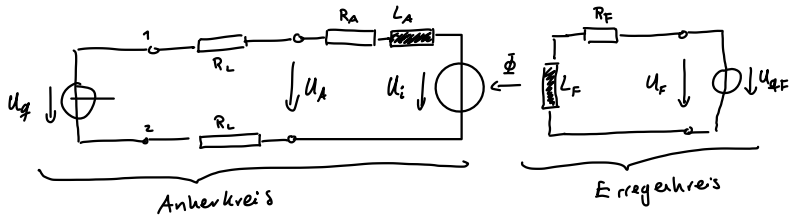


$u_{a1} = v_1 u_{e1}$
$u_{e2} = u_{a1} \cdot \frac{R_{e2}}{R_{a1} + R_{e2}}$
$u_{a2} = v_2 u_{e2}$
$u_{a2} = v_1 v_2 u_{e1} \cdot \frac{R_{e2}}{R_{a1} + R_{e2}}$



Gleichstrommotor





Induktivität vernachlässigbar/stationär: keine Spannungsabfälle an Induktivitäten
↳ alle Größen sind Gleichgrößen $\frac{dI}{dt} = 0 \Rightarrow U_L = 0\,V$

fremderregt: + Magnetfluss über Erregerstrom variiere
− Verluste in Erregerkreis

Leistungsbilanz Anker:
$U_A I_A = R_A I_A^2 + 2\pi n M_i$
$P_{mech,i}$
Erregerleistung ≙ ohmsche Verluste

Leistungen

$P_{el} = UI = I^2 \cdot R$

$P_{mech} = 2\pi n \cdot M = U_{i,N} \cdot I_{A,N}$

$P_{verlust} = P_{el} - P_{mech}$

innere Leistung $P_{mech,i} = I_A \cdot U_i$

Ankerverlust $P_{vA} = R_A \cdot I_A^2$

Nennstrom $I_{A,n} = \frac{P_N}{U_{A,n}\,\eta_n} = \frac{P_{mech}}{U_{i,n}} = \sqrt{\frac{P_{v,n}}{R_A}} = \frac{P_{el}}{U_A}$

Erregerspannung $U_i = U_{FN} \cdot I_F / I_{FN}$

Erregerstrom $I_{F,Ap} = I_{F,N} \cdot \frac{(c\Phi)_{AP}}{(c\Phi)_N} = I_{F,N} \cdot \frac{U_i}{U_{i,N}}$

ind. Spannung $U_{i,N} = P_{mech} / I_{A,N}$

$U_i = c \cdot \Phi \cdot \Omega$ (Winkelgeschw. $[s^{-1}]$, $\Omega = 2\pi n$)

$\Omega(M) = \frac{U_{A,N}}{(c\Phi)_{AP}} - \frac{R_A}{(c\Phi)^2_{AP}} \cdot M_{AP}$

$U_i = U_{A,N} - R_A \cdot I_{A,N}$

Stillstandstrom $I_{A,w} = I_{A,N} \cdot \frac{M_w}{M_N} = \frac{U_A}{R_A}$ ← Strom für $U_i = 0\,V$

Stillstandmoment $M_{St} = M_N \cdot \frac{I_{A,St}}{I_{A,N}} = (c\Phi)_N \cdot I_{A,St}$

Drehmoment $M_{AP} = (c\Phi)_N \cdot I_{A,AP}$ [Vs] (N und AP tauschbar)

inneres Moment $M_i = (c\Phi)\, I_A$

$I_{A,St} < I_{A,w}$ läuft nicht von selbst an

$M_{St} < M_w$ − " −

Konstante $(c\Phi)_N = \frac{U_{i,n}}{\sqrt{2}\,n_N} = \frac{U_{i,n}}{2\pi\, n_N}$

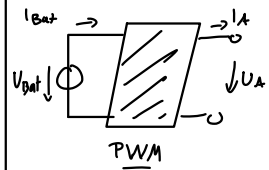
Wirkungsgrad $\eta_N = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + P_v} = \frac{P_{mech}}{\sum P_i}$

Ankerwiderstand $R_v = \frac{P_{v,N}}{I_{A,N}^2} = \frac{U_A - U_i}{I_{A,N}}$

ideale Drehzahl / Leerlaufdrehzahl $n_0 = \frac{U_A}{2\pi\,(c\Phi)}$ $\quad n_0 = \frac{U_{i0}}{U_{iN}} \cdot n_N$

$c\Phi$ verändert sich wenn sich U_p R_p I_F ändern

Tiefsetzsteller



PWM

$U_A = U_{Bat} \cdot \frac{T_{ein}}{T} = U_{Bat} \cdot m$ (Periode, Modulationsgrad)

$\Omega = \frac{1}{c\Phi}\left(U_A - R_A \cdot \frac{M_i}{c\Phi}\right)$ [keine Reibung]

Leerlauf: $M_i = 0$

Arbeit $[W] = J = Nm = Ws$ $\quad 1\,kW = 3{,}6 \cdot 10^6\,J$

$W = Q \cdot U$

mechanische Hubarbeit $W_{Hub} = m\,g\,h$ [J]

$W_{mech} = P_{mech} \cdot T$

$\eta_{med} = \frac{P_{Hub}}{P_{mech}} = \frac{W_{Hub}}{W_{mech}}$

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

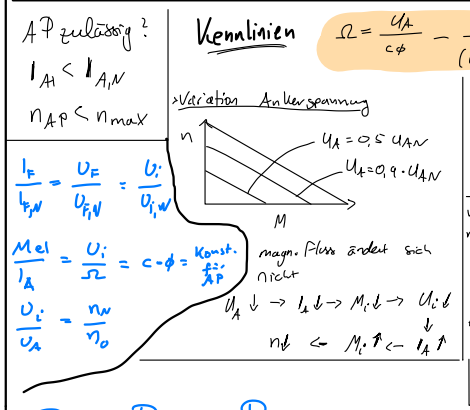
Zulässiger Betriebszustand wenn

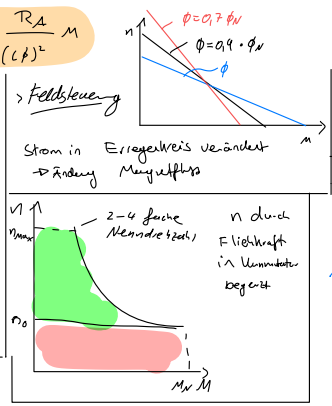
$I_{AP} < I_{AN}$ & $n_{AP} < n_{max}$

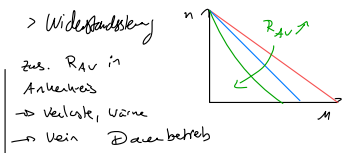
AP zulässig?
$I_A < I_{A,N}$
$n_{AP} < n_{max}$

Kennlinien

$\Omega = \frac{U_A}{c\Phi} - \frac{R_A}{(c\Phi)^2} M$





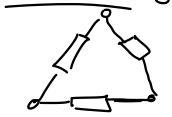


Vorteil GSM: hohes Anlaufmoment, gute Regelbarkeit

Nachteil Kommutation bringt Verschleiß & Verluste

$P_A = P_{VA} + P_{Reibung}$

Dreieckschaltung



$I_L = \sqrt{3}\, I_{str}$

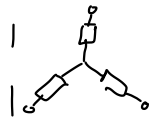
$U_L = U_{STR}$

$P_{el\Delta} = 3\,U_{STR} \cdot I_{STR}$

$P_{el\Delta} = 3 \cdot P_{el\curlyvee}$

$I_{L\Delta} = 3\, I_{L\curlyvee}$

Sternschaltung



$I_L = I_{str}$

$U_L = \sqrt{3}\, U_{str}$

$P_{el\curlyvee} = 3 U_{STR} \cdot I_{STR} \cos(\varphi)$

Fremderregt (ggü. Permerregt)	GSM
⊕ Magnetfluss variierbar	⊕ hohes Anlaufmoment, gute Regelbarkeit
⊖ Verluste im Erregerkreis	⊖ Kommutator/Kohlebürsten verschleiß oder Verlust