

GLEICHSTROM

Ohm'sches Gesetz

$$U = R \cdot I$$

$$R = \frac{U}{I}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

elektrische Leistung

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

Leitwert $G = \frac{1}{R}$ $[G] = \frac{1}{\Omega} = S$ (Siemens)
 $I = G \cdot U$

Cl. Stromdichte $S = \frac{I}{A} [S] = A \cdot m^{-2} = \frac{A}{m^2}$
 Cl. Leistung = die pro Zeiteinheit geleistete Cl. Arbeit
 $[P] = W = \frac{J}{s}$

Cl. Arbeit $W = Q \cdot U [W] = J$
 Arbeit wird in Widerstand in Wärme umgesetzt
 l-Leitertlänge
 Cl. Spannung $U = E \cdot l$

spezifischer Widerstand

Cl. Stromstärke $I = \frac{Q}{t}$ Ladung
 $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ l-Leitertlänge
 A - Querschnittsfläche

spez. Leitfähigkeit $\sigma = \frac{1}{\rho} [S \cdot m]$
 $\rho_0 < 0$: Halbleiter mit Zunahme von T sinkt R
 $\rho_0 > 0$: Kaltleiter mit Zunahme von T steigt R
 $R = R_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot (T - T_0)]$

Knoten: verzweigungsstelle, an der min. 3 Ströme ab-/zufließen
 Zweig: Verbindung zwischen 2 Knoten

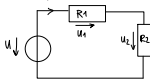
Knotenregel: zufließender Strom positiv (addieren)
 abfließender Strom negativ (subtrahieren)

Masche: geschl. Pfad im Netzwerk, der sich nicht selbst schneidet, d.h. jeder Knoten nur 1 mal

$KG = K - 1$ → es werden $KG = K - 1$ & $MG = Z - (K - 1)$ unabhängige Knoten- & Maschengleichungen benötigt
 $MG = Z - (K - 1)$

Reihenschaltung: $R_{ges} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$
 $L_{ges} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$
 $C_{ges} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

Spannungsteiler: Spannung teilt sich auf
 Strom ist gleich



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

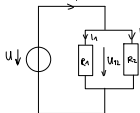
$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

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

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

Parallelschaltung: $R_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$
 $L_{ges} = L_1 + L_2$
 $C_{ges} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$

Stromteiler: Spannungsabfall an allen Widerständen gleich
 Strom teilt sich auf



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

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

$$I = I_1 + I_2$$

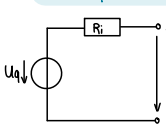
Erzeugerzählfeldsystem: → Zählfeile in unterschiedliche Richtung

$u \cdot i$ → abgegebene Leistung
 $-u \cdot i$ → aufgenommene Leistung

Verbraucherzählfeldsystem: → Zählfeile in selbe Richtung

$u \cdot i$ → abgegebene Leistung
 $u \cdot i$ → aufgenommene Leistung

Ersatzspannungsquelle

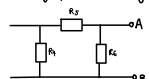


$$U_q = U_{AB,LL}$$

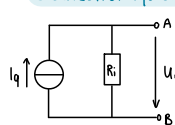
$$I_{KS} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}} = \frac{U_q}{R_i}$$

Ersatzwiderstand bzgl. Klemme AB: alle Widerstände, wo der Strom noch durchfließen kann, R_{AB} = wenn man Strom- und Spannungsquellen weglässt

→ Achtung! R_{AB} so bestimmen, dass man von rechts in das Netzwerk schaut



Ersatzstromquelle



$$I_{KS} = I_q$$

$$R_{AB} = R_i$$

I_q entspricht dem Strom bei K_S der Klemmen AB

Kurzschluss: $R = 0 \Omega$, Spannung ist 0, Strom max.

Leerlauf: $R = \infty \Omega$, Strom ist 0, Spannung max.

alle Quellen bis auf eine herausnehmen und Netzwerkgleichungen für die Teilsysteme lösen

Ersatzleitwert $G_E = G_1 + G_2 + G_n$

→ allg. Teilströme verhalten sich umgekehrt als Widerstände → durch ↑ R fließt der ↓ Strom (Leitwerte verhalten sich gleich)

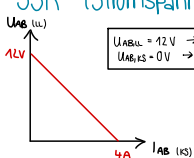
die von den Quellen abgegebene Leistung wird in den Widerständen in Wärme umgewandelt und abgegeben

Überlagerungssatz: darf angewendet werden, wenn das elektrische Netzwerk linear ist

Behandlung der Quellen: Spannungsquellen werden kurzgeschlossen $R = 0 \Omega$
 Stromquellen werden durch Leerlauf ersetzt $R = \infty \Omega$

nur lineare Größen können überlagert werden (Spannungen & Ströme)
 → keine Leistungen

SSK (Stromspannungskennlinie)

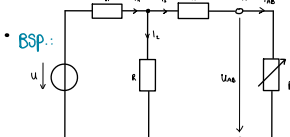


$$U_{AB,LL} = 12V \rightarrow I_{AB,LL} = 0A$$

$$U_{AB,K_S} = 0V \rightarrow I_{AB,K_S} = 4A$$

Wie wird SSK messtechnisch ermittelt? es werden durch Verändern von R_L mehrere Wertepaare (U_{AB}/I_{AB}) aus Strom- und Spannungsmessungen bestimmt und diese in einem Diagramm grafisch dargestellt z.B. U_{AB} über I_{AB}

Weshalb kann SSK anhand von zwei Messpunkten ermittelt werden? das Netzwerk ist linear, da es nur aus linearen Zweipolen besteht. Somit ist die Strom-Spannungskennlinie eine Gerade. Eine Gerade ist durch zwei Punkte vollständig bestimmt



U bestimmen durch Spannungsteiler: $U_{AB,LL} = U \cdot \frac{R}{R+R} = U \cdot \frac{1}{2} = 12V$
 $\rightarrow U = 2 \cdot 12V = 24V$

R bestimmen: $I_{AB,K_S} = \frac{U_q}{R_i} = \frac{U_{AB,LL}}{R_i} \rightarrow R_i = \frac{R \cdot R}{R+R} + R = \frac{3}{2} R$
 $\rightarrow 4A = \frac{24V}{\frac{3}{2} R} \rightarrow 4A = \frac{24V}{\frac{3}{2} R} \rightarrow R = \frac{24V}{12A} = 2 \Omega$

SSK mit Stromquelle (gleiches Netzwerk wie links)

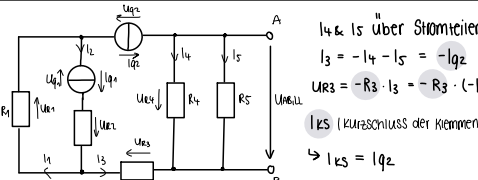
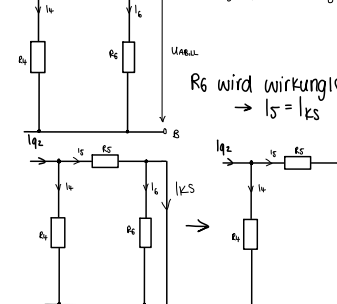
Strom I bestimmen: $I_{AB,K_S} = 4A$ → Stromteiler $I_{AB,K_S} = I \cdot \frac{R}{R+R}$
 $\rightarrow I_{AB,K_S} = I \cdot \frac{1}{2} = 4A \rightarrow I = 8A$

R bestimmen: $R = \frac{U_{AB,LL}}{I} = \frac{12V}{8A} = 1.5 \Omega$

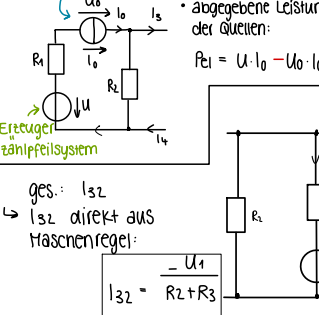
von Stromquelle gelieferte Energie $W_q = W = R_{ges} \cdot I^2 \cdot t$

Bsp.: ESQ: ges: I_v, U_{AB}, P_v
 $I_v = R_i + R_v$
 $U_{AB} = I_v \cdot R_v$
 $P_v = R_v \cdot I_v^2$
 $R_v = R_i \rightarrow P_{v,max} = \frac{U_q^2}{4 \cdot R_i}$

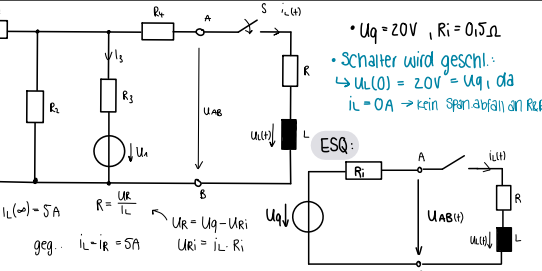
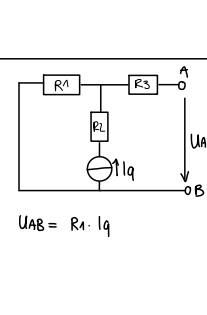
I_{KS} ist gesucht: Teil der Ausgangsschaltung



Verbraucherzählfeldsystem



Wie groß ist R nach zeitl. Zlg: $I_L(\infty) = 5A$



$U_q = 20V, R_i = 0.5 \Omega$
 Schalter wird geschl.:
 $U_{L(0)} = 20V = U_q$, da $I_L = 0A \rightarrow$ kein Spannungsabfall an R_i

ESQ: $K1: I_1 - I_2 - I_4 = 0$
 $M1: U_{R2} - U_{R1} - U_{R4} = 0$
 $I_2 = I_1 - I_4$ (1)
 $I_1 = I_2 - I_4$ (2)
 $\rightarrow U_0 = U_{R2} - U_{R4}$
 $= R_2 \cdot I_2 - R_4 \cdot I_4$ (3)
 (1) in (2)
 $U_0 = R_2 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_4 - R_4 \cdot I_4$
 $\rightarrow$ nach I_1 auflösen

EINSCHWINGVORGÄNGE

Kondensator = ^{Speicher der Energie} Energiespeicher, muss stetig verlaufen d.h. darf nicht springen (keine ∞ große Leistung möglich) $\rightarrow$ danach kommt es zu einem Ausgleichsvorgang

$\rightarrow$ Spannung kann sich nicht sprungförmig ändern, da ∞ Strom nötig wäre

$Q = C \cdot U \rightarrow C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$ für Plattenkondensator $\rightarrow$ allg. $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$

Arbeit: $W = \frac{1}{2} C U^2$ **Grundgesetz** $i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$ $[C] = 1F = 1 \frac{As}{V}$

stationär gilt: Kondensator = vollgeladen $i_{C,stat} = 0A$, $u_{C,stat} = U_0$

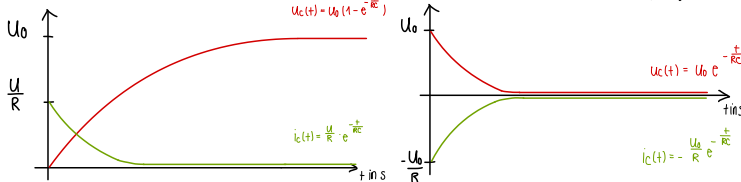
$\rightarrow$ es gilt: $u_C(t=0_s) = u_C(t=0_+)$

$\rightarrow$ Energie kennzeichnende Größe ist **Kondensatorspannung** $u_C(t)$

Einschalten (Ladevorgang)

$\tau = RC$

Ausschalten (Entladevorgang)



• Zustand vor dem Schaltvorgang (Schalter offen): Kondensator ungeladen $\rightarrow u_C(t=0_-) = 0V$

• Ausgleichsvorgang (Schalter wird geschlossen): $t = 0_+$ s: Kondensator wirkt wie Kurzschluss, Spannung darf nicht springen $\rightarrow u_C(t=0_+) = 0V$

• stationärer Endzustand (Schalter unendlich lang geschlossen): $t \rightarrow \infty$ s
Kondensator ist vollständig aufgeladen $\rightarrow$ stationärer Zustand $\rightarrow i_C(t \rightarrow \infty) = 0A$
 $\rightarrow$ Kondensator wirkt wie ein LL $\rightarrow \infty$ großer Widerstand $\rightarrow u_C(t \rightarrow \infty) = U$

• es kommt zu keinem Ausgleichsvorgang, wenn an Schaltanordnung kein Energiespeicher beteiligt ist (Strom / Spannung an R darf / kann springen)
 $\rightarrow$ wenn Energiespeicher beteiligt $\rightarrow$ Ausgleichsvorgang
(ungeladener Kondensator wird dazu geschaltet $\rightarrow$ Energiekennzeichnende Größe muss stetig ver.)

Speicher der mag. Energie

Spule = Energiespeicher, muss stetig verlaufen d.h. darf nicht springen (Stromdurchflossene Spule darf nicht abgeschaltet werden) $\rightarrow$ Energie kennzeichnende Größe muss stetig verlaufen

$\mu = \mu_0 \mu_r$

mag. Feldstärke $\vec{H} = \frac{1}{2\pi r} [H] \cdot 1Am$ mag. Flussdichte $\vec{B} = \mu \vec{H} [B] = 1Vs m^{-1} \cdot 1T$

Arbeit: $W = \frac{1}{2} L I^2$ Induktivität: $L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$ $[L] = 1H = 1Vs A^{-1} = \Omega s$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$

Grundgesetz

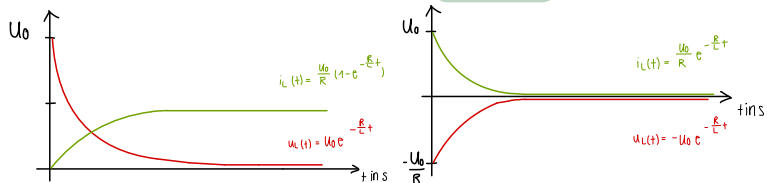
$$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

stationär gilt: Spule = KS $\rightarrow$ es gilt $i_L(t=0_s) = i_L(t=0_+)$

$\rightarrow$ Energiekennzeichnende Größe ist **Spulenstrom** $i_L(t)$ wegen zeitlicher Ableitung

Einschalten

Ausschalten



• Zustand vor dem Schaltvorgang (Schalter offen): Spule ist stromlos $\rightarrow i_L(t=0_-) = 0A$

• Ausgleichsvorgang (Schalter wird geschlossen): $t = 0_+$ s: Spule wirkt wie ein LL $\rightarrow i_L(t)$ darf nicht springen $\rightarrow i_L(t=0_+) = 0A$ (wirkt wie ∞ großer Widerstand)

• stationärer Endzustand (Schalter unendlich lang geschlossen): $t \rightarrow \infty$ s
stationärer Endwert von $i_L(t)$ ist erreicht $\rightarrow$ mit MR, OG Strom bestimmen
 $\rightarrow$ Spule wirkt wie ein KS (wie ein Widerstand mit 0Ω) $\rightarrow u_L(t \rightarrow \infty) = 0V$

• beim Schließen des Schalters fallen die Spannungen u_R, u_L ab

• wann kommt es zu einem Ausgleichsvorgang? $\rightarrow$ Bed. 1: mind. 1 Energiespeicher
Bed. 2: es verändert sich etw. z.B. Schalter umlegen

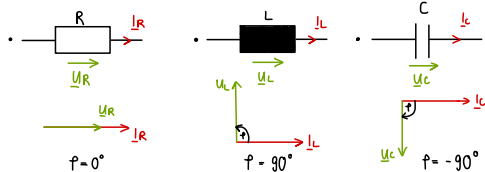
• Was passiert für $t \geq t_3$ mit der im Kondensator C gespeicherten Energie?
 $\rightarrow$ der Kondensator wird kontinuierlich über R_2 entladen. In R_2 wird die anfangs gespeicherte Energie in Wärme umgewandelt & an die Umgebung abgegeben

WECHSELSTROM

TR auf DEG

ZEIGERDIAGRAMM

ϕ immer von I nach U



LUCL: u_C eilt dem Strom i_C um 90° voraus
 i_C eilt der Spannung u_C um 90° voraus

$\phi = \phi_U - \phi_I$

- ohmsch: $\phi = 0^\circ$
- ohmsch-induktiv: $0^\circ < \phi < 90^\circ$ gegen den Uhrzeigersinn
- induktiv: $90^\circ < \phi$
- ohmsch-kapazitiv: $-90^\circ < \phi < 0^\circ$ im Uhrzeigersinn
- kapazitiv: $\phi < -90^\circ$

Haschen bilden Knoten

$\hat{u}, \hat{i}$: Amplitude, Scheitelwert

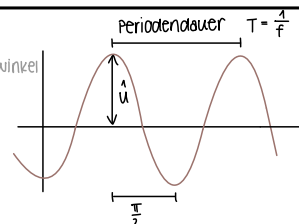
ϕ_i, ϕ_u : Phasenwinkel

Wechselspannung: $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \phi_u)$

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

$\rightarrow$ Momentanwerte von Spannung, Strom

$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ $[\omega] = 1 \frac{s}{s} = Hz$



$$\begin{aligned} Z_{RC} &= \frac{R + j\omega C}{1 + j\omega C R} = \frac{R - j\omega C R^2}{R^2 + \omega^2 C^2 R^2} \cdot \frac{R + j\omega C}{1 + j\omega C R} \\ &= \frac{R^2 - j\omega C R^2 + j\omega C R^2 + \omega^2 C^2 R^2}{R^2 + \omega^2 C^2 R^2} = \frac{R^2 - \omega^2 C^2 R^2 + j\omega C R^2}{R^2 + \omega^2 C^2 R^2} \\ &= \frac{R^2 - \omega^2 C^2 R^2}{R^2 + \omega^2 C^2 R^2} + j \frac{\omega C R^2}{R^2 + \omega^2 C^2 R^2} \end{aligned}$$

Phasenverschiebung $\phi = \phi_U - \phi_I$

$\rightarrow$ es gilt $u_R(t) = R \cdot i_R(t)$

$\hat{u} \sin(\omega t + \phi_u) = R \hat{i} \sin(\omega t + \phi_i)$

• bei L ist U vor Strom

• bei C ist I vor Strom

Bei Kondensator:

$\hat{i} = C \cdot \omega \cdot \hat{u}$ (-90°)

$\phi_i = \phi_u + \frac{\pi}{2} \Rightarrow \phi = \phi_u - \phi_i = -\frac{\pi}{2}$

Bei Spule:

$\hat{u} = L \cdot \omega \cdot \hat{i}$ ($+90^\circ$)

$\phi_u = \phi_i + \frac{\pi}{2} \Rightarrow \phi = \phi_u - \phi_i = +\frac{\pi}{2}$

Blindwiderstand:

Spule: $X_L = \omega \cdot L$ $[X_L] = \Omega$

$mH = 10^{-3} H$

immer mit f und F rechnen

Kondensator: $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ $[X_C] = \Omega$

$\mu F = 10^{-6} F$

$U_L = X_L \cdot I$

$U_L = Z_L \cdot I_L$

$Z_L = X_L \cdot e^{j90^\circ}$

$Z_L = j \cdot X_L$

$U_R = R \cdot I_R$

$U_C = X_C \cdot I$

$U_C = Z_C \cdot I_C$

$Z_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ}$

$Z_C = -j \cdot X_C$

$R = R \cdot e^{j0^\circ}$

Impedanz Z Bestimmung wie bei Gleichstrom (parallel- & reihenschaltung)

BSP: Reihenschaltung $Z_{RL} = R + Z_L \rightarrow Z_{RL} = (R + j \cdot X_L)$

Parallelschaltung $Z_{RC} = \frac{Z_R \cdot Z_C}{Z_R + Z_C}$

Effektivwert

U ist der Effektivwert von u

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

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

$\rightarrow u_R, u_C, u_L$ bestimmt man in dem man den Betrag von u_R, u_C, u_L berechnet

BSP: wenn $u = u_R + u_L$

$$\rightarrow u = |u| = \sqrt{u_R^2 + u_L^2}$$

Komplexe Zahlen

$b = \text{Im}(z)$

$a = \text{Re}(z)$

$$z = a + jb \quad |z| = z = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(z)}{\text{Re}(z)}\right) \text{ für } \text{Re}(z) > 0$$

$\phi = 180^\circ + \arctan\left(\frac{\text{Im}(z)}{\text{Re}(z)}\right) \text{ für } \text{Re}(z) < 0$

$$z = z \cdot e^{j\phi} = z \cdot (\cos(\phi) + j \sin(\phi)) \rightarrow z = \frac{z}{a} + j \frac{z}{b}$$

$$\text{konjugiert komplex: } z^* = a - jb = z \cdot e^{-j\phi}$$

Ohmscher Widerstand: $Z_R = R = R \cdot e^{j0^\circ}$

Spule: $Z_L = j \cdot X_L = X_L \cdot e^{j90^\circ}$

Kondensator: $Z_C = -j \cdot X_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ}$

Spannungen: $u = u \cdot e^{j\phi} = \text{Re}(u) + j \text{Im}(u)$

Ströme: $i = i \cdot e^{j\phi} = \text{Re}(i) + j \text{Im}(i)$

Merke: $Z_R = R \cdot e^{j0^\circ} \rightarrow e^{j0^\circ} = 1$

$Z_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ} \rightarrow e^{-j90^\circ} = -j$

$Z_L = X_L \cdot e^{j90^\circ} \rightarrow e^{j90^\circ} = j$

$e^{j180^\circ} = -1$

j darf nie im Nenner stehen

Merke: $\rightarrow$ erweitern oder mit Kehrwert multiplizieren

$$-j \cdot j = 1$$

$$j^2 = -1$$

$$-j^2 = 1$$

$$\frac{10V}{50 \cdot e^{-j20^\circ}} = \frac{10V}{50} \cdot e^{j20^\circ}$$

$$S = 700VA \cdot e^{-j70^\circ} \rightarrow S = 700VA \cdot (\cos(70^\circ) + j \sin(70^\circ)) \rightarrow (239 + j 657)VA$$

• **Additanz** (komplexer Leitwert)

allg. $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \Leftrightarrow \underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}}$

auch hier darf j nicht im Nenner stehen

$\underline{Y}_R = \frac{1}{R} = G$

$\underline{Y}_R = G \cdot e^{j0^\circ}$

$\underline{Y}_C = \frac{j}{X_C}$

$\underline{Y}_C = \frac{1}{X_C} e^{j90^\circ}$

$\underline{Y}_L = \frac{1}{jX_L}$

$\underline{Y}_L = \frac{1}{X_L} e^{-j90^\circ}$

• **Additanz für $R_L || C$**

$\underline{Y} = \frac{1}{R_L} + j \frac{1}{X_C}$

Wirkleistung

$P = \operatorname{Re}(\underline{S}) = \underline{U} \cdot \underline{I} \cdot \cos(\varphi) \quad [P] = W$

bei Kondensator & Spule ist $P = 0 W$

→ alternativ: $P = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$ Effektivwerte

$P_R = R \cdot I_R^2 \quad P = \frac{U_R^2}{R} + \frac{U_L^2}{R_L}$

Wirkleistungsaufnahme der Schaltung:

$P_W = R \cdot I_R^2 \quad 0: P_W = R \quad | \quad P_W = U_R \cdot I_R$

• **Resonanzfrequenz**

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

Bsp.: $f_R = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3} H \cdot C \cdot 10^{-6} F}$

Blindleistung

$Q = \operatorname{Im}(\underline{S}) = \underline{U} \cdot \underline{I} \cdot \sin(\varphi) \quad [Q] = var$

→ alternative Berechnung:

$Q = Q_L - Q_C$

$Q_L = X_L \cdot I^2 = X_L \cdot ((R \cdot A)^2 + (I \cdot A)^2)$

aus Teilblindleistungen $Q_C = X_C \cdot I^2 = X_C \cdot ((R \cdot A)^2 + (I \cdot A)^2)$

→ im Verbraucher: $Q_W = X_V \cdot I^2$ oder: $Q = \frac{U_L^2}{X_L} - \frac{U_C^2}{X_C}$

Ausgangsbedingung:

$\operatorname{Im}(\underline{Z}) = 0 \Omega$ bei $f = f_R$
imaginärteil der Impedanz verschwindet

$U_R, U_C, U_L \dots$ bestimmen
wenn $U_C = U_C \rightarrow U_C = |U_C - U_L| = 0$

Scheinleistung

$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I} = \sqrt{P^2 + Q^2} = |S| = S \quad [S] = VA$

I^* = Vorzeichenumkehrung für kartesische Form

Aussage: bei $f = f_R$ können die Spannungen an L & C viel größer werden, als die angelegte Spannung U – an R fällt die angelegte Spannung U ab

• unter welcher Bed. ist Resonanzfall gefährlich?

Je kleiner R wird, desto größer werden die Spannungen an L & C → bei zu großen Spannungen können L & C zerstört werden

• **Kompensation:** Annahme → Schaltung wirkt induktiv (vorher berechnete Blindleistung ist positiv)

→ **Kompensation durch Kondensator** (in diesem Fall wird Kondensator parallel zu U geschaltet)

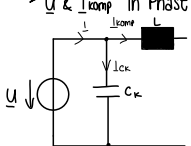
↳ vollständige Kompensation: $Q_{CK} = Q_L = 3210 var$

1. $Q_{CK} = \frac{U^2}{X_{CK}} = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_K \rightarrow C_K = \frac{Q_{CK}}{2\pi \cdot f \cdot U^2} = 214,2 \mu F$

2. $X_{CK} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_K} = 14,86 \Omega \rightarrow 3. \underline{I}_{CK} = \frac{U}{-jX_{CK}} = \frac{jU}{X_{CK}}$

3. $\underline{I}_{komp} = \underline{I} + \underline{I}_{CK}$

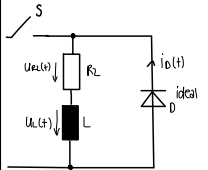
→ U & $\underline{I}_{komp}$ in Phase? → φ_u & φ_i berechnen



• Strom eilt Spannung voraus, wenn $\varphi_i > \varphi_u$

• **Einschwingvorgänge:**

wozu wird Diode benötigt? → wenn S geöffnet wird, kann der Spulenstrom über die Diode weiterlaufen



• Schalter wird geschl.:

$i_D(t=0+) = 0 A$

↳ Diode ist in Sperrrichtung

$u_D(t=0+) = -U$ (MR)

• Schalter ∞ lang geschl.:

$i_D(t=\infty) = 0 A$

↳ Diode ist in Sperrrichtung

$u_D(t=\infty) = U$ über (MR)

• Schalter wieder offen

$i_D(t_1) = R_1 + R_2$

↳ Strom fließt jetzt über Diode

$u_D(t_1) = 0 V$

↳ ideale Diode

• **Einschwingvorgänge:**

→ zeigen, dass Kondensator vor dem Schließen von S ungeladen war: d.h. $u_C(t < 0s) = 0 V$

↳ führt zu: $u_C(0) = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} (1 - e^0) = 0 V$

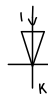
→ weil $u_C(t)$ stetig verläuft, muss $u_C(t < 0s) = 0 V$ sein

• $i_C(t < 0s) \rightarrow i_C(t) = C \cdot (u_C(t))' = C \cdot \left(\frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\tau_1} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \right)'$

$= C \cdot \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\tau_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}$

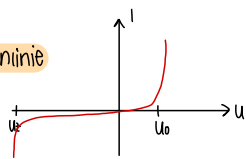
$i_C(0) = C \cdot \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\tau_1} \cdot 1$

DIODE



$U_{AK} = 0$ für $I > 0$
 $I = 0$ für $U_{AK} < 0$

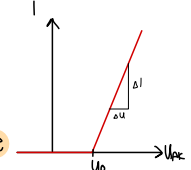
• **reale Diodenkennlinie**



• **ideale Diodenkennlinie**



• **linearisierte Diodenkennlinie**



• **Statischer Widerstand:** bezieht sich auf Wert des Widerstands in jedem Punkt der Stromspannungskennlinie

$R_S = \frac{U_A}{I_A}$

R_S kann positiv oder 0 sein

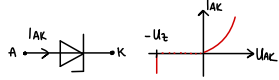
• **Differentieller Widerstand:** entspricht Wert des Widerstands, der einem kleinen Arbeitsbereich auf der Kennlinie zugeordnet ist

$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$

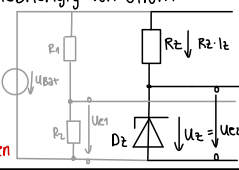
R_d kann positiv, negativ oder 0 sein

• **Zenerdiode:** zur Spannungsstabilisierung in Sperrrichtung

→ Durchbruchspannung nahezu unabhängig von Strom



• **Zenerdiode in OP-Schaltung:**



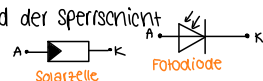
$U_Z = U_{Z0} + R_{Z0} \cdot I_Z$ (1) $\rightarrow$ 2 in 1

MR: $U_{Bat} = U_Z + R_Z \cdot I_Z$ (2) $\rightarrow$ nach U_Z auflösen

• Zenerdiode stellt für Komparator Referenzspannung zur Verfügung

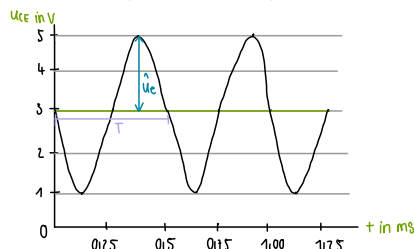
• **LED:** Emission von Licht; $W = U_0 \cdot e = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ U_0 : Diffusionsspannung

• **Solarzelle:** Licht setzt e^- frei → E-Feld der Sperrschicht beschleunigt e^- in Richtung n-schicht



KLEINSIGNALVERSTÄRKER

• Unterschied $u_a(t)$ & $u_e(t)$: $u_a(t)$ unterscheidet sich von $u_e(t)$ in der Amplitude u im Nullphasenwinkel
 $u_a(t)$ ist gegenüber $u_e(t)$ um 180° phasenverschoben → Minuszeichen



• Amplitude $\hat{u}_{ce} = 2 V$

• $U_{CE,AP} = 3 V$ (die Mitte) → $u_{ce} = 3 V - 2 V \cdot \sin(2\pi \cdot 2000 Hz \cdot t)$

• $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,5 ms} = 2000 Hz$

$V_i = \frac{i_a}{i_e}$

$V_u = \frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_e}$

$U_{Bat} = 2 \cdot U_{CE,AP}$

max. Aussteuerbarkeit für das sinusförmige Signal durch $U_{CE,AP} = 0,5 U_{Bat}$

• was bedeutet $C_1 = C_2 \rightarrow \infty F$: $X_C = \lim_{C \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi f C} = 0 \Omega$, d.h. Wechsel Signale kommen ungehindert durch

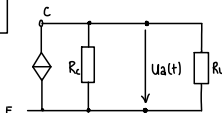
$u_e(t) = 10 mV \cdot \sin(\frac{2\pi}{1 ms} \cdot t) \rightarrow \hat{u}_e = 10 mV$

$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{1 ms} = 1 kHz$

$u_e = \frac{\hat{u}_e}{\sqrt{2}} = \frac{10 mV}{\sqrt{2}} = 7,071 mV$

$R_L = R_C$

$i_{C0} = \frac{u_a}{\frac{1}{2} R_L}$



• von Signalquelle abgegebene Leistung P_e , R_L im Lautsprecher R_L ($P = U \cdot I$)

$P_e = u_e \cdot i_e = \frac{\hat{u}_e}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{i}_e}{\sqrt{2}}$

$P_L = \frac{u_a^2}{R_L} = \left(\frac{\hat{u}_a}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_L}$

$V_u = \frac{P_L}{P_e}$

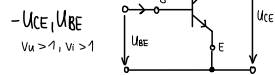
$R_L = R_C$ bedeutet Leistungsanpassung

BIPOLARTRANSISTOR

Transistor = Reihenschaltung zweier Dioden

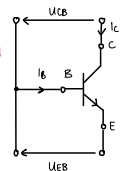
• Funktion: Signalverstärker / Schalter

Emitterschaltung



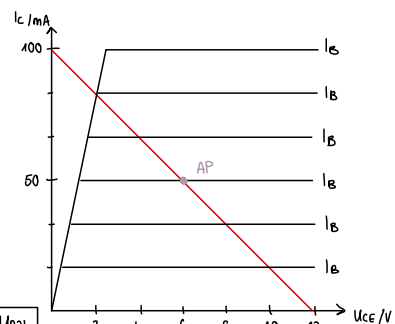
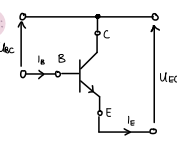
Basisschaltung

- U_{CB}, U_{EB}
- Hochfrequenztechnik
 $V_U \gg 1, V_i < 1$



Kollektorschaltung

- U_{BC}, U_{EC}
- Impedanzwandler
 $V_U < 1, V_i > 1$



• **Steuergesetz:** Basisstrom steuert den Kollektorstrom

• **Strom:** $I_C = \beta \cdot I_B$ wenn $R_{CE} = \infty \Omega \rightarrow I_C = I_{C0}$

• **Arbeitspunkt:** $\beta = \frac{I_{C(AP)}}{I_{B(AP)}}$ β = Stromverstärkung

• **Wechselstromverstärkung:** $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ $I_{C0} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta \cdot I_{B0} = \beta \cdot \frac{\Delta I_B}{\Delta I_B}$

• **Arbeitspunkteinstellung**

• **Strom:** $I_{C,max} = \frac{U_{Bat}}{R_C}$ wenn also AP korrekt eingestellt ist

Optimaler Aussteuerbereich

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

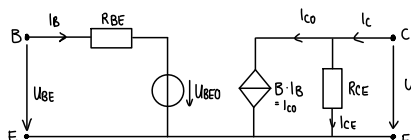
Basissstrom: $I_{B(AP)} = \frac{I_{C(AP)}}{\beta}$ $U_{Bat} = U_{CE} - \text{Achsenabschnitt}$ ($U_{Bat} = 12V$)

$$I_B = \frac{U_{BE} - U_{BE0}}{R_{BE}}$$

• $U_{Bat} = R_{BE} \cdot I_{B(AP)} + U_{BE0}$ mit Maschenregel
wenn $R_{BE} = 0 \Omega \rightarrow U_{BE} = U_{BE0}$

$$I_{C0} = I_C = \beta \cdot I_{B0}$$

Gleichstrom - ESB

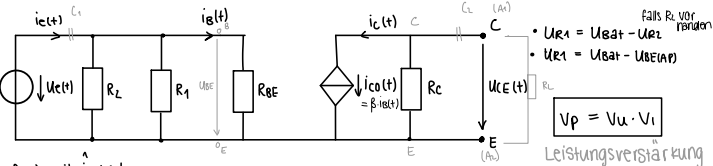


• $I_C(U_{CE}) = \beta \cdot I_B + \frac{U_{CE}}{R_{CE}}$ $I_B = \text{konst.}$

• $I_C(I_B) = \beta \cdot I_B + \frac{U_{CE}}{R_{CE}}$ $U_{CE} = \text{konst.}$

• $R_{CE} = \infty \Omega$ im ungesättigten Bereich des Transistors (Steigung = 0)

Wechselstrom - ESB



wenn $R_1 \gg R_{BE} \rightarrow R_1$ kann im ESB vernachlässigt werden

• $U_{R2} = U_{BE(AP)}$

• $U_{R1} = U_{Bat} - U_{R2}$ falls R_2 vor R_1 runden
• $U_{R1} = U_{Bat} - U_{BE(AP)}$

$$V_p = V_u \cdot V_i$$

Leistungsverstärkung

• **Zeitfunktionen:** $U_{CE}(t) = U_{CE(AP)} - \hat{U}_{CE} \cdot \sin(\omega \cdot t)$

$I_B = I_{B0} + \hat{I}_B \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{IB})$ mit $\hat{I}_B \ll I_{B0}$

• **Strom bei WS:** $i_C = I_{C0} + \beta \cdot \hat{I}_B \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{IB})$ mit $\hat{i}_C = I_{C0} + \beta \cdot \hat{I}_B$

$$\text{Amplitude } \hat{i}_C = \frac{\hat{U}_{CE}}{R_{CE}} + \frac{\hat{U}_{CE}}{R_1} + \frac{\hat{U}_{CE}}{R_2}$$

$$\text{Amplitude } \hat{U}_{CE} = R_C \cdot \hat{i}_{C0} [V] = U_a$$

$$\hat{I}_{C0} = \beta \cdot \hat{I}_B = \beta \cdot \hat{I}_E \text{ von } i_C(t) [mA]$$

$$\hat{I}_B = \frac{\hat{U}_{CE}}{R_{BE}} [\mu A]$$

$$\text{Spannungsverstärkung } V_u = \frac{\hat{U}_{CE}}{\hat{U}_{CE}}$$

keine Einheit

Verlustleistung

$$P_V = P_{V, BE} + P_{V, CE} = U_{BE} \cdot I_B + U_{CE} \cdot I_C$$

• $P_{Tot} = \text{max. zulässige Verlustleistung} = U_{CE} \cdot I_{C, max}$ [mW]

wenn $P_V \leq P_{Tot}$, dann zulässig für Dauerbetrieb

$$P_{L1AP1} = (U_{Bat} - U_{CE1AP1}) \cdot I_{C1AP1}$$

$$P_{V1AP1} = U_{CE1AP1} \cdot I_{C1AP1}$$

$$P_{L1AP2} = R_L \cdot I_{C1AP2}^2$$

$$P_L = \frac{U_L^2}{R_L}$$

$$P_V = \frac{U_{CE}^2}{R_L}$$

• Funktion der **Emitterschaltung**: Kleinsignalverstärker zur Verstärkung der Spannung $u_{CE}(t)$ → Emitter = "gemeinsamer Anschluss"

• **Widerstände** dienen zur Einstellung des Arbeitspunktes

• **Mischgröße**: besteht aus einem überlagerten Gleich- und Wechselanteil

• **Wechselgröße**: Polarität wechsell in regelmäßiger Wiederholung, wobei der zeitliche Mittelwert null ist

• **Kondensatoren** dienen zur Ein- bzw. Auskopplung der Wechselspannungsanteile & blockieren Gleichspannungsanteile

* C_E blockiert die Gleichspannung U_{Bat} gegen $u_{CE}(t)$ & koppelt $u_{CE}(t)$ ein

* C_C blockiert den Gleichspannungsanteil im Mischsignal u_{CE} & lässt nur den Wechselanteil $u_{CE}(t)$ durch

→ Ausgangssignal ist eine Wechselspannung

• **Rückwirkungskennlinien** geben an, um welchen Betrag U_{BE} bei einer Änderung von U_{CE} geändert werden muss, damit der Basisstrom I_B konstant bleibt: $U_{BE} = f(U_{CE}; I_B)$

• AP_2 kann durch Verändern des Basisstroms (vergrößern von R_2) eingestellt werden: $R_2 \uparrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow AP$

AP ist zulässig für Dauerbetrieb, falls er unterhalb der Verlustleistungshyperbel liegt

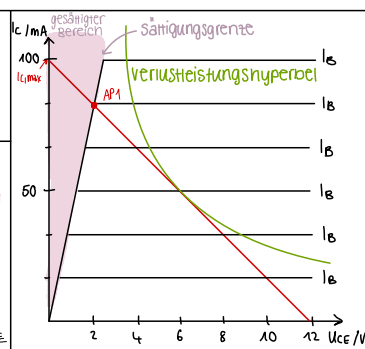
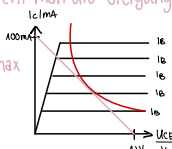
• **max. Verlust-Leistung** wird umgesetzt bei $\frac{U_{Bat}}{2}$ → max. Verlustleistung darf nicht dauerhaft überschritten werden, weil der Transistor sonst überhitzt & durchbrennt → d.h. er geht kaputt

• **Warum $U_{CE, AP} = \frac{1}{2} U_{Bat}$?** → damit ein symmetrisches Wechselspannungssignal nach beiden Seiten maximal ausgereicht werden kann (keine Verzerrung durch "Abschneiden" von Signalkuppen)

• **Spulen** können nicht verwendet werden, da sie für Gleichstrom einen Kurzschluss darstellen & diesen somit nicht blockieren können

• $P_{Tot} = U_{CE} \cdot I_{C, max, zul}$ → man sucht sich Punkt auf der Verlustleistungshyperbel, entnimmt dann den Wert für U_{CE} und $I_{C, max, zul}$ und berechnet damit P_{Tot}

Arbeitsgerade bestimmen: bei U_{Bat} anfangen (meistens immer 12V), dann zieht man die Steigung der AP so lang hoch, bis sie die **Verlustleistungsgerade** tangiert
→ I_C -Abschnitt ist dann mein $I_{C, max}$



• $R_{CE} = \infty \Omega$, da die Steigung der Kennlinien im ungesättigten Bereich 0 ist

$P_{Tot} = U_{CE} \cdot I_{C, max, zul}$ → beliebige Wertepaare auf der Hyperbel nehmen

$$R_{L, min} = \frac{U_{Bat}}{I_{C, achs}}$$

• um einen neuen AP einzustellen kann I_B verändert werden
→ z.B. durch $\uparrow R_2 \rightarrow \downarrow I_B$

• wenn R_{CE} nicht ∞ ist, dann gilt:

$$I_{R_{CE1AP}} = \frac{U_{CE1AP}}{R_{CE}} \quad I_{B1AP} = \frac{I_{C01AP}}{\beta}$$

$$I_{C01AP} = I_{C1AP} - I_{R_{CE1AP}}$$

• **Innenwiderstand (Ausgangswiderstand)** R_a bzgl. der Klemmen $A_1 - A_2$

$$R_a = \frac{R_{CE} \cdot R_C}{R_{CE} + R_C}$$

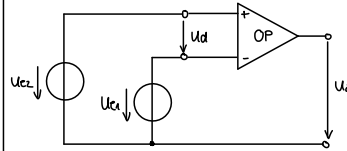
$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{I_{C0}} \cdot \frac{R_a \cdot R_L}{R_a + R_L}$$

• wenn Kondensatoren nicht $C_1, C_2 \rightarrow \infty F$ sind, dann müssen sie im WS-ESB eingezeichnet werden

OPERATIONSVERSTÄRKER

TR auf [R]

KOMPARATOR



- Funktion: vergleichen zweier Spannungen mit hoher Präzision
- wenn OP ohne Rückkopplung → Komparator

Steuergesetz: $U_a = A_{OL} \cdot U_d = A_{OL} (U_{e2} - U_{e1})$

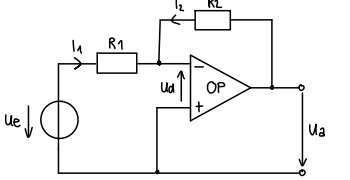
- $U_a = U_{a,max} = +U_{Bat}$ für $U_{e2} > U_{e1} \rightarrow U_d > 0$
- $U_a = U_{a,min} = -U_{Bat}$ für $U_{e2} < U_{e1} \rightarrow U_d < 0$
- $U_a = 0 V$ für $U_{e1} = U_{e2} \rightarrow U_d = 0$

- + nicht invertierender Eingang
- invertierender Eingang

idealer Operationsverstärker

- $R_e \rightarrow \infty \Omega \rightarrow$ keine Ströme im Eingang
- Leerlaufverstärkung $A_{OL} \rightarrow \infty$
- Ausgangswiderstand $R_a = 0 \Omega \rightarrow$ Ausgang verhält sich wie ideale Spannungsquelle
- Frequenzbereich: $0 Hz \leq f \leq \infty$
- OP ist symmetrisch ($U_{e2} = U_{e1} \rightarrow U_a = 0 V$)
- kein Rauschen, keine Temperaturabhängigkeit

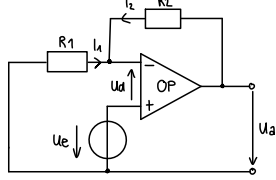
Invertierender Verstärker



$$U_a = U_e \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \quad V_u = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- Sonderfall: $R_1 = R_2 \rightarrow V_u = -1$ Invertier
- sehr hohe Spannungen können präzise gemessen werden

Nichtinvertierender Verstärker

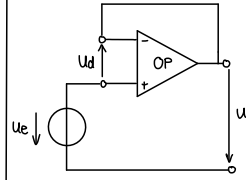


$$U_a = U_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad V_u = \frac{U_a}{U_e} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

- es wird zum Kopieren von niedrigohmigen Verbrauchern an Quellen mit hohen Innenwiderständen benutzt

Spannungsfolger

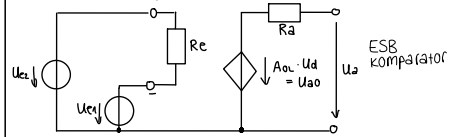
Impedanzwandler



$$U_a = U_e \quad V = 1$$

- ∞ hoher Eingangs- & Ausgangswiderstand
- Signalquelle wird nicht belastet
- Ausgangsspannung ist ideal

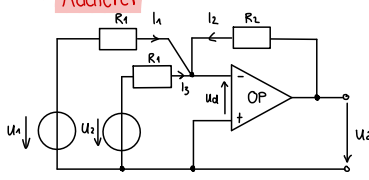
- Zenerdiode (U_z) stellt für den Komparator eine Referenzspannung zur Verfügung



- $U_z < 0$: Halbleiter mit Zunahme von U sinkt R
- $U_z > 0$: Kaltleiter mit Zunahme von U steigt R

Addierer

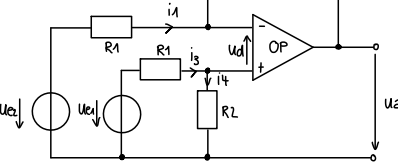
Invertierender Addierer



$$U_a = -\frac{R_3}{R_1} (U_{e1} + U_{e2}) \quad V_u = \frac{U_a}{U_{e1} + U_{e2}} = -\frac{R_3}{R_1}$$

- andere Spannungen können addiert & gleichzeitig verstärkt werden

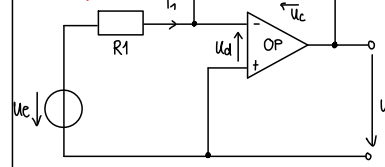
Subtrahierer



$$U_a = \frac{R_3}{R_1} (U_{e1} - U_{e2}) \quad V_u = \frac{U_a}{U_{e1} - U_{e2}} = \frac{R_3}{R_1}$$

- Spannungen werden subtrahiert und verstärkt

Integrierer



$$U_a(t) = -\frac{1}{RC} \int U_e dt$$

Bsp: geg. Diagramm von $U_e(t) \rightarrow U_e(t) = 2V \cdot t \cdot \epsilon[0,3] \quad U_a = U_c = 0V \quad \text{für } t > 0.5$

- $U_a(t) = -\frac{1}{RC} \int U_e(t) dt = -\frac{1}{RC} \cdot (U_e(t) + k_1)$
- $\rightarrow = -\frac{1}{5} (2Vt + k_1)$ Zeitfunktion von $U_a(t)$ für $0.5 \leq t \leq 3.5$
- $U_a(1-0.5) = -\frac{1}{5} (2V \cdot 0.5 + k_1)$
- $0V = -\frac{1}{5} (1V + k_1) \rightarrow k_1 = 0V$
- $\rightarrow U_a(t+3.5) = -\frac{1}{5} (2V \cdot 3.5) = -6V$

$$U_a = U_c$$

- für $U_a > U_v$ geht OP in Begrenzung, da er am Anfang nicht mehr Spannung liefern kann als der Begrenzer

- Frequenzabhängige Schaltung: Kondensator dient als "Speicher", in dem die Eingangsspannung U_e über die Zeit aufaddiert wird $\rightarrow$ Integration über Zeit

- Widerstände sind Spannungsteiler & dienen zur Erzeugung einer Referenzspannung (U_{e1}, U_{e2})
- Schaltung nennt man Spannungsteiler

- Rückkopplung: die Rückführung eines Teils der Ausgangsspannung des OPs auf eine der beiden Eingänge $\rightarrow$ Spannungsverstärkung kann auf endliche Werte eingestellt werden
- Gegenkopplung: Eingangs- (differenz) Spannung wird subtrahiert auf den invertierenden Eingang
- Mittkopplung: Eingangs- (differenz) Spannung wird addiert auf nichtinvertierenden Eingang

- wenn R_2 größer wird, dann wird U_{e2} größer, damit wird t_1 größer und t_2 kleiner $\rightarrow$ die Breiten der Pulse mit $U_a = +U_v$ werden dadurch schmaler & die Breiten mit $U_a = -U_v$ breiter

- Zweck vorwiderstand R_v : wird für die Einstellung des Arbeitspunktes (der LED) benötigt (Strombegrenzung)

- Heiß- oder Kaltleiter? $\rightarrow$ Kaltleiter wenn mit abnehmender Temp. der Widerstand kleiner wird (U kleiner $\rightarrow$ Widerstand kleiner)

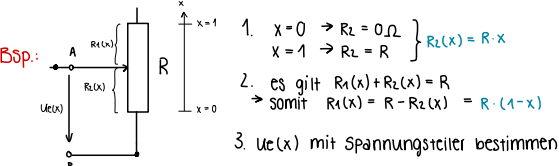
- wenn Widerstände parallel zu dem Widerstand von U_e viel größer sind, können sie in der Parallelschaltung zu dem Widerstand praktisch vernachlässigt werden

- Spannungsteiler anwendbar, wenn im OP kein Strom fließt (ideal)

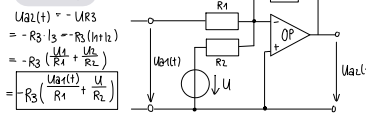
- Zweck der Referenzspannung: über die Referenzspannung können die Umschaltunkte der Komparatoren eingestellt werden, d.h. wann die Ausgangsspannungen von $+15V$ auf $-15V$ bzw. $-15V$ auf $+15V$ springen

- die Differenzspannung wird durch eine Gegenkopplung zu null erzwungen, damit die Ausgangsspannung endliche Werte annehmen kann

- Begrenzung: Ausgangsspannung des OP kann minimal nur $-U_v$ und maximal nur $+U_v$ annehmen



Addierer



Zeitfunktion:

$$U_e(t) = \hat{U}_e \sin(2\pi f t)$$

Effektivwert:

$$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = U$$

Periodendauer:

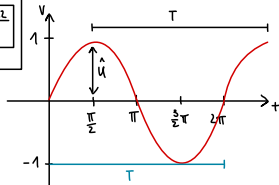
$$T = \frac{1}{f} \quad [Hz]$$

Spannungen mit Spannungsteiler bestimmen

$U_d(t)$ mit MR

$$U_c = \text{Spannungsteiler anwenden} \quad \text{Bsp: } U_{e1} = \frac{U_{Bat} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

wenn Periodendauer $T = 10s$ & Funktion 2π , dann ist bei $2\pi \cdot 10s$ & bei π dann $5s \rightarrow$ zeichnen



Wann leuchtet LED?

$U_{d2} > 0 \rightarrow$ LED leuchtet!

$$U_{a1}(v) - U_{ref1} > 0$$

$$U_{a1}(v) - 11.8V > 0$$

$$U_{e1} \cdot \left(1 + \frac{R_3(v)}{R_1} \right) - 11.8V > 0$$

$$R_4(v) > \left(\frac{11.8V}{5V} - 1 \right) \cdot R_3$$

$$R_4(v) > 1360 \Omega$$

$$v > 90^\circ$$

LED leuchtet für $v > 90^\circ$

- zeitpunkt $t = t_1$ zu dem die Spannung $U_a(t)$ für $t > 0s$ zum ersten Mal springt

$$\rightarrow U_e(t_1) = U_{e2} = 6V \rightarrow 9V \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t_1}{T}\right) = 6V$$

auf RAD stellen!

$$\rightarrow t_2 = \frac{T}{2} - t_1, \quad t_3 = T + t_1$$

GLEICHSTROMMASCHINE

- Elektrische Maschinen sind Energiewandler
- wandeln el. Leistung in mechanische Leistung um
- Richtung des Energieflusses legt die Betriebsart MOTOR o. Generator fest

el. Leistung bei 1~WS: $P_{el} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$

el. Leistung bei 3~WS: $P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi)$

Wirkungsgrad allg.

$$\eta = \frac{\text{genutzte Leistung}}{\text{gesamte aufgenommene Leistung}} \quad [\text{in \%}]$$

Motorbetrieb

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{P_{mech}}{P_A + P_F}$$

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{P_{mech,AP1}}{U_{Bat} \cdot I_{A,AP1}}$$

$$\eta = \frac{P_N}{P_{el,N}} \quad \begin{matrix} P_N: \text{Nennleistung} \\ P_A: \text{Ankerleistung} \\ P_F: \text{Erregerleistung} \end{matrix}$$

Generatorbetrieb

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech} + P_F} = \frac{P_{el}}{P_A + P_{AV} + P_{FV}}$$

$$\eta_{GSM} = \frac{P_{mech,N}}{P_{mech,N} + P_A \cdot I_A^2 + R_F \cdot I_F^2} \quad P_{AV}: \text{Ankerverlust}$$

Maschinenkonstante

$$C = \frac{2N}{\pi} \cdot p$$

$$C \cdot \Phi = \frac{U_i}{2 \cdot \pi \cdot n_N} \quad [Vs]$$

mech. Winkelgeschwindigkeit

Drehfrequenz $\Omega = 2\pi n$ $n[\text{min}^{-1}] \cdot s^{-1}$

$$\Omega = \frac{U_{ind}}{C \cdot \Phi} \quad C \cdot \Phi = \frac{U_i}{2\pi n} \quad [Vs]$$

LEISTUNGEN

Elektrische Leistung

$$P_{el,A} = U_A \cdot I_A \quad P_{el,F} = U_F \cdot I_F$$

$$P_{el} = P_{el,A} + P_{el,F} \quad P_{el} = U_A \cdot I_A$$

* wenn I_A auf U_q eingestellt nimmt man U_q statt U_A

← wenn steht von GM abgegebene P_{el} , dann ohne Erreger

Erregerverluste

$$P_{VF} = R_F \cdot I_F^2$$

$$P_V = U_F \cdot I_F$$

$$P_V = P_F$$

Polpaarzahl p

Ankerverluste

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

$$P_{VA} = U_{RA} \cdot I_A$$

$$P_{VA} = P_{el,A} - P_{mech,N} \quad \text{Motor}$$

$$P_{VA} = P_{mech,N} - P_{el,N} \quad \text{Generator}$$

$$P_{VA} \neq P_A$$

gesamte Verluste

$$P_{Vges} = P_{el,N} - P_{mech,N} \quad \text{Motor}$$

$$P_{Vges} = P_{mech,N} - P_{el,N} \quad \text{Generator}$$

$$P_{Vges} = P_{VA} + P_{VF}$$

innere mechanische Leistung

$$P_{mech,ii} = U_i \cdot I_A$$

$$P_{mech,ii} = \Omega \cdot M_i$$

$$P_{mech,ii} = M_N \cdot 2\pi \cdot n$$

oder P_{mech} durch Wirkungsgrad η

abgegebene mechanische Leistung

$$P_{mech} = M \cdot 2\pi \cdot n$$

$$P_{mech} = U_i \cdot I_A$$

$$P_{mech} = P_{el,A} - P_{VA} \quad \text{Motor}$$

$$P_{el} - P_{Vges}$$

Reibungsverlustleistung

$$P_{VR} = P_{mech,ii} - P_{mech}$$

$$P_{VR} = \Omega \cdot M_R$$

Reibungsmoment

$$M_R = \frac{P_R}{\Omega} = \frac{P_R}{2\pi \cdot n} \quad [Nm]$$

Motor-nennleistung: $P_N = P_{mech,N}$

Generator-nennleistung: $P_N = P_{el,N}$

Nennmoment

$$M_N = (C \cdot \Phi) \cdot I_A$$

[Nm] (vs. A!)

$$M_N = \frac{U_{iN}}{2\pi \cdot n_N} \cdot I_{AN}$$

$$M_N = \frac{P_{mech,N}}{\Omega} = \frac{P_{mech,N}}{2\pi \cdot n_N}$$

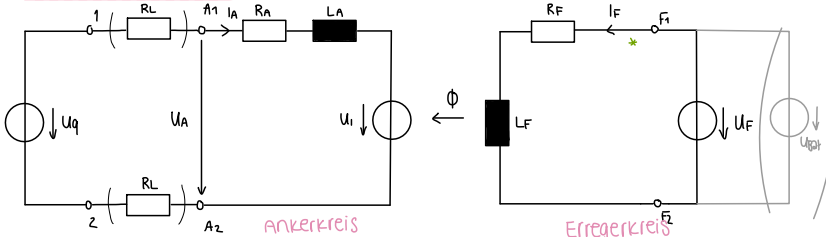
$$\text{BSP: } U_A = I_A \cdot R_A + U_{ind} \rightarrow U_A = \frac{U_i}{C \cdot \Phi} \cdot R_A + C \cdot \Phi \cdot \Omega$$

ESB: Motorbetrieb

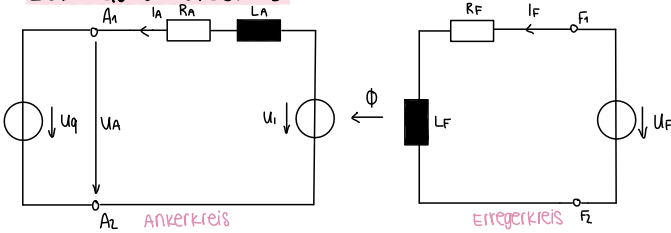
I_A immer von A_1

* R_V einzeichnen falls vorhanden

I_F immer von F_1



ESB: Generatorbetrieb



Nachteil des Vorwiderstands: in einem ohmschen Widerstand entstehen Stromwärmeverluste. Verluste mindern den Wirkungsgrad → Betrieb mit R_V führt zu ↓ Gesamtwirkungsgrad

mit einer Spule kann ein Magnetfeld im Stator der GSM erzeugt werden

im Motorbetrieb ist M_i positiv, im Generatorbetrieb negativ

keine Spannungsabfälle an den Induktivitäten (alle Größen sind Gleichgrößen), daher gilt $\frac{d\Phi}{dt} = 0 \rightarrow U_L = 0V \rightarrow$ dürfen vernachlässigt werden

Fremderregte GSM ggü. permanent-erregte GSM + Magnetfluss kann über Erregerstrom variiert werden
+ HÖRER Anlaufmoment → gute Regbarkeit
- Verluste im Erregerkreis
- kommutator & Kohlebürsten → Verschleiß, Kommutierung

M-n-Charakteristik ges: $M(n) = \frac{a-n}{b}$

Geg: $U_i = U_A - R_A \cdot I_A$ 1

$$U_i = (C \cdot \Phi) 2\pi n$$

$$M = (C \cdot \Phi) I_A \rightarrow I_A = \frac{M}{(C \cdot \Phi)}$$

$$\rightarrow 2 \& 4 \text{ in } 1: (C \cdot \Phi) 2\pi n = U_A - R_A \cdot \frac{M}{(C \cdot \Phi)}$$

$$n = \frac{U_A}{(C \cdot \Phi) 2\pi} - \frac{R_A}{(C \cdot \Phi)^2 2\pi} \cdot \frac{M}{(C \cdot \Phi)}$$

$$\rightarrow \text{nach } M \text{ auflösen: } M(n) = \frac{(C \cdot \Phi)^2 2\pi}{R_A} \cdot \frac{U_A}{(C \cdot \Phi)} - n$$

$$a = \frac{U_A}{(C \cdot \Phi) 2\pi} \quad \left[\frac{V}{Nm} \right]$$

$$b = \frac{R_A}{(C \cdot \Phi)^2 2\pi} \quad \left[\frac{1}{Nm^2} \right]$$

Einheiten mit berechnen

n_{AP} berechnen im AP gilt: $M(n) = M_L(n)$

$$1 \cdot 10^{-2} Nm - 70 \cdot 10^{-6} Nm \cdot n_{AP} = 1 \cdot 10^{-2} Nm - n_{AP}$$

$$1 \cdot 10^{-2} Nm - n_{AP} + 70 \cdot 10^{-6} Nm \cdot n_{AP} - 1 \cdot 10^{-2} Nm = 0 \rightarrow 1 \cdot 10^{-6} Nm$$

$$\rightarrow n_{AP}^2 + 70 \cdot 10^{-6} n_{AP} - 10000 \frac{1}{s^2} = 0$$

$$n_{AP1/2} = \frac{-70 \cdot 10^{-6}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{70 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^2 + 10000 \frac{1}{s^2}}$$

$$n_{AP1} = 70,948 \frac{1}{s} = 4256,87 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{AP2} = -140,948 \frac{1}{s} = -8456,87 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{AP1} = n_{AP} \quad \rightarrow \text{physikalisch sinnvoll!}$$

U_i ist gesucht: n_{AP} & P_{mech} gegeben

→ Maschine bilden: (1) $U_A = U_i - R_A \cdot I_{A,AP} + U_{i,AP}$

(2) $P_{mech} = U_{i,AP} \cdot I_{A,AP}$

→ (1) nach I_A auflösen & in (2) einsetzen

→ Quadratische Gleichung → p-q-Formel

zuverlässiger Betrieb, wenn $I_{A,AP1} < I_{AN}$

I_F ändert sich → Φ ändert sich

→ U_i ändert sich (U_A bleibt)

BSP: geg: $(C \cdot \Phi)_N$ & I_{AN} ($C \cdot \Phi)_{AP1}$ habe ich

bereits berechnet → $I_{A,AP1} = 2$

$$I_{F,AP1} = \frac{(C \cdot \Phi)_{AP1} \cdot I_{AN}}{(C \cdot \Phi)_N}$$

P_{mech} lässt sich auch mit Leistungsbilanz berechnen:

z.B. $P_{mech} = U_q \cdot I_A - 2 \cdot R_L \cdot I_A^2 - R_A \cdot I_A^2$

$$\frac{1}{s} \cdot 60 = \text{min}^{-1}$$

$$\frac{\text{min}^{-1}}{60 \text{ s min}^{-1}} = s$$

$$\frac{Vs}{A} = Nm$$

$$\frac{Nm}{s} = W$$

$$\frac{Vs}{A} = Nm$$

$$\frac{Nm}{s} = W$$

$$W = P \cdot t \quad W_{mech} = P_{mech} \cdot t \quad [kWh]$$

$$W_{hub} = m \cdot g \cdot h \quad m \text{ in kg, } g \text{ in } \frac{m}{s^2}, h \text{ in m}$$

$$\eta_{mech} = \frac{P_{mech}}{P_{el}}$$

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

Erregerleistung ist null bei einer permanent-erregten GSM

Vollastbetrieb $\hat{=}$ Nennbetrieb

L_A und (L_F) sind el. gesehen

wirkungslos bei stationären Verhältnissen

$$J = W_s = VAS = Nm = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$