

Gleichstrom

Knotenregel $\sum I_k = 0$

Knoten gleichung $K_G = (K-1)$

Maschenregel $\sum U_m = 0$

Maschengleichung $M_G = 2 \cdot (K-1)$

parallel: g ! Spannung

Stromteilerregel $I_N = I_{ges} \frac{R_N}{\sum R_{ges}}$

Spannungsteilerregel $U_{AB} = U_{ges} \frac{R_N}{\sum R_{ges}}$

Reine g ! Strom

Reinenschaltung $R_g = R_1 + R_2 + R_3$

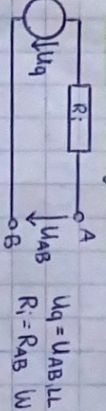
Parallelschaltung $R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$

$I_A = \frac{U}{R_{ges}}$

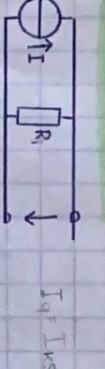
Verlustleistung $P_v = U \cdot I = I^2 R_v = \frac{U^2}{R_v}$

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

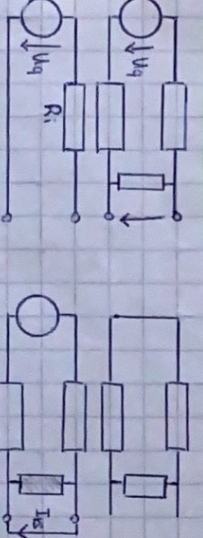
Ersatzspannungsquelle



Ersatzstromquelle



Ersatzwiderstand

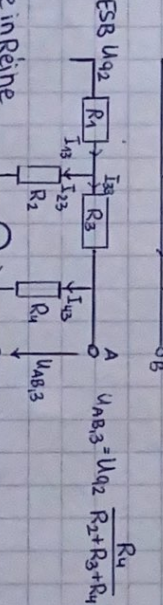
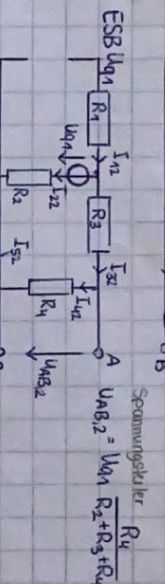
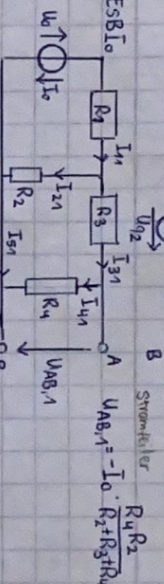
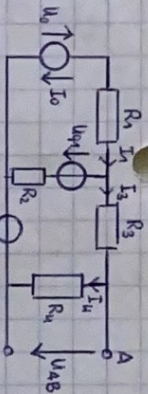


überlagerungssatz: lineares Netzwerk

anwendbar auf lineare Größen (Strom & Spannung)

Spannungsquelle durch K_S ersetzen $P_v = 0 \Delta U \rightarrow U_{AB} = 0V \rightarrow I_{AB} = I_{KS}$

Stromquelle durch L ersetzen $R_i = \infty \Omega \rightarrow I_{AB} = 0A \rightarrow U_{AB} = U_{AB,LL}$



Leistung: Widerstände

Quelle

Bilanz

Verlustleistung: zu groß $\rightarrow$ Überhitzung

$P < 0$ gibt Leistung ab

$P > 0$ nimmt Leistung auf

Spannungsquelle wird durch Kurzschluss ersetzt

Kurzschlussstrom parallel zum K_S $=$ Wirkungslos

Energie

proh $W_q = U \cdot I \cdot t$

proh in Wärme R $W_r = R_L I^2 t$

SSK messschmittsch: Es werden durch verändern von R_L mehrere Werte paare (U_{AB}, I_{AB}) aus Strom- & Spannungsmessungen bestimmt und diese in einem Diagramm grafisch dargestellt z.B. $U_{AB, max}$

2 Messpunkte: lineares Netzwerk (bedeutet nur aus linearen Zweipol $\rightarrow$ SSK-Linie ist eine Gerade)

ideal: elektr. gestueter Schalter Diode

offen: Spannung positiv

zu: Spannung negativ

Kurzschlussstrom $I_{KS} = \frac{U_q}{R_i}$

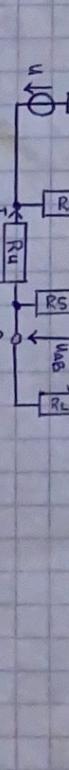
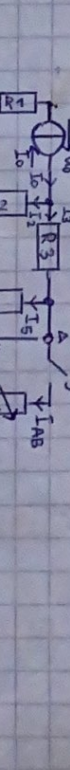
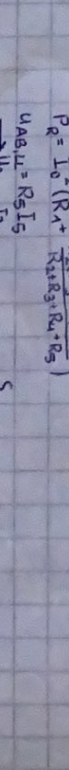
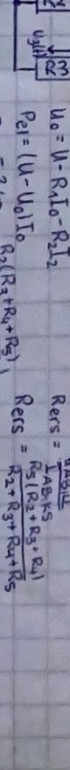
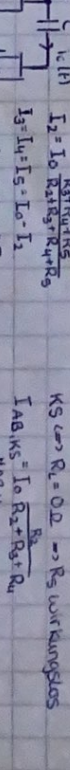
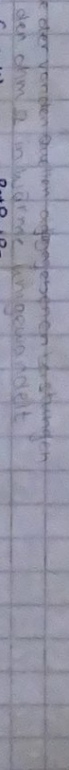
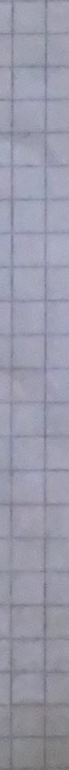
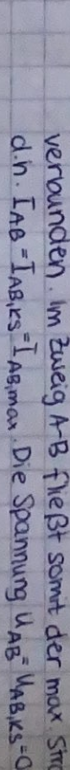
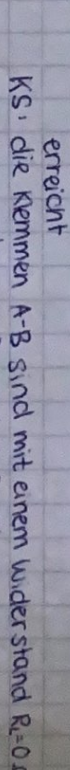
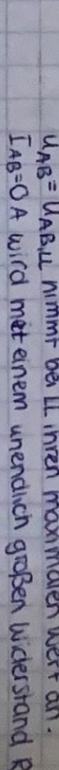
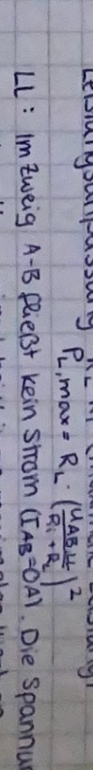
Leistungsanpassung $R_L = R_i$ (maximale Leistung)

$P_{L,max} = R_L \left(\frac{U_{AB,LL}}{R_i + R_L} \right)^2$

LL: im Zweig A-B fließt kein Strom ($I_{AB} = 0A$). Die Spannung $U_{AB} = U_{AB,LL}$ nimmt bei LL ihren maximalen Wert an.

$I_{AB} = 0A$ wird mit einem unendlich großen Widerstand R_L erreicht

KS: die Klemmen A-B sind mit einem Widerstand $R_L = 0\Omega$ verbunden. Im Zweig A-B fließt somit der max Strom d.h. $I_{AB} = I_{AB,KS} = I_{AB,max}$. Die Spannung $U_{AB} = U_{AB,KS} = 0V$



Wechselstrom

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

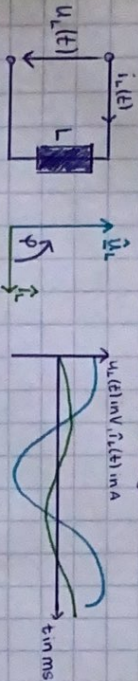
- u Momentanwert der Spannung
- $\hat{u}$ Scheitelwert (Amplitude)
- φ_u (Null-)Phasenwinkel
- ω Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

Spule

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = L \frac{d[\hat{i}_L \sin(\omega t + \varphi_i)]}{dt} = \omega L \hat{i}_L \cos(\omega t + \varphi_i) = \omega L \hat{i}_L \sin(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2})$$

$$\hat{u}_L = \omega L \hat{i}_L \quad \varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2} \text{ oder } \varphi_u - \varphi_i = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

→ Spannung eilt Strom um 90° voraus
↳ Magnetfeld wird in endlicher Zeit aufgebaut



komplexe Spule

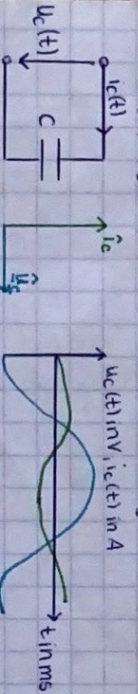
- induktiver Blindwiderstand $X_L = \omega L$
- induktiver Blindleitwert $Y_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L}$

Kondensator

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = C \frac{d[\hat{u}_C \sin(\omega t + \varphi_u)]}{dt} = \omega C \hat{u}_C \cos(\omega t + \varphi_u) = \omega C \hat{u}_C \sin(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{2})$$

$$\hat{i}_C = \omega C \hat{u}_C \quad \varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2}$$

→ Spannung eilt dem Strom um 90° nach
↳ elektr. Feld wird in endlicher Zeit aufgebaut

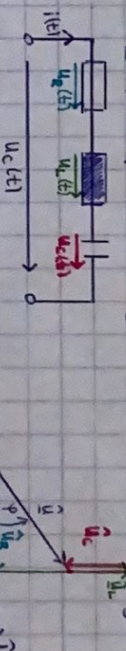


komplexer Kondensator

- kapazitiver Blindwiderstand $X_C = \frac{1}{\omega C}$
- kapazitiver Blindleitwert $Y_C = \omega C$

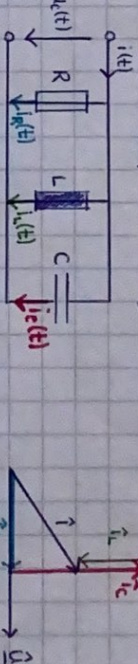
Reihenschaltung

- Wirkkomponente $\hat{u}_W = \hat{u} \cos(\varphi) \rightarrow$ Spannung parallel zum Strom
- Blindkomponente $\hat{u}_B = \hat{u} \sin(\varphi) \rightarrow$ Spannung senkrecht zum Strom



Parallelschaltung

- Wirkkomponente $\hat{i}_W = \hat{i} \cos(\varphi) \rightarrow$ Strom parallel zur Spannung
- Blindkomponente $\hat{i}_B = \hat{i} \sin(\varphi) \rightarrow$ Strom senkrecht zur Spannung



Resonanzfrequenz: Ausgangsbedingung

- $\lim_{\omega \rightarrow \omega_0} \text{Im}(Z) = 0 \Omega$ ffr
- gefährlich bei kleinem R $\rightarrow$ Spannungen bei L & C immer größer $\rightarrow$ Zerstörung
- Resonanz $\hat{u}_B = \hat{u}$
- Breite des Resonanzminimums über Güte Q

komplexe Zahlen

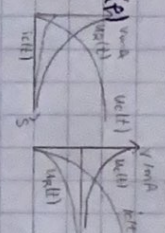
Kartesisch $z = a + jb$
 Polar $z = |z|(\cos(\varphi) + j\sin(\varphi))$
 Exponential $z = |z|e^{j\varphi}$

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

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

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad \text{wenn } \varphi > 0 \text{ Strom eilt voraus}$$

$\varphi < 0^\circ$ ohmsch-kapazitiv
 $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ ohmsch-induktiv



Reihenschwingkreis

$$f_0 = \frac{1}{2\pi LC}$$

R-C-Schwingkreis $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Güte $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

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

Resonanz $U_L = U_C = Z_0 I = Q U_R$

Kondensator $C = \frac{Q}{U} = \frac{1}{\omega^2 L}$

Parallel-Schaltung: alle C gleiche Spannung

Reihenschaltung: alle C gleiche Ladung

Energiespeicher $i_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$

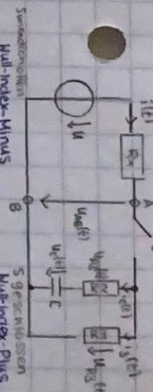
Spule $L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$

Parallel-Schaltung

Reihenschaltung

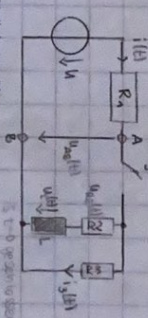
Energiespeicher $U_L(t) = L \cdot \frac{dI}{dt}$

keine unendlich großen Leistungen möglich



Kein Ausgichtsvorgang bei der Schaltanordnung ist kein Energiespeicher beteiligt (Strom & Spannung an R kann sofort nicht springen)

Ausgichtsvorgang: Schaltanordnung ist Energiespeicher beteiligt -> ungeladener Kondensator wird aufgeladen, Energiespeicher (Strom & Spannung) muss stetig verlaufen



Null-Index-Minus $t=0^-$ vor Schaltvorgang $i_L = 0A$
 $U_C = 0V$ vor Schaltvorgang
 $U_L = 0V$ vor Schaltvorgang
 $U_R = 0V$ vor Schaltvorgang

mag. Feldstärke $|\vec{H}| = \frac{I}{2\pi r}$ [A/m]
 mag. Flussdichte $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ [T]
 Permeabilität $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
 mag. Fluss $\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\varphi)$ [Vs]
 verknüpfte Fluss $\Psi = N \Phi = LI$
 Induktivität $L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{A}{l}$ [H]

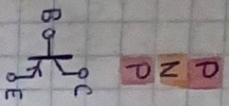
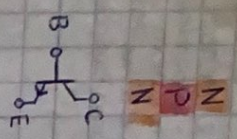
Verknüpfung $\Psi = LI$
 Induktivität $L = \frac{\Psi}{I}$

Verknüpfung $\Psi = LI$
 Induktivität $L = \frac{\Psi}{I}$

Verständliche Blindleistungskompensation $X_C = \frac{R_V^2 + X_L^2}{X_L}$

Verständliche Blindleistungskompensation $X_C = \frac{R_V^2 + X_L^2}{X_L}$

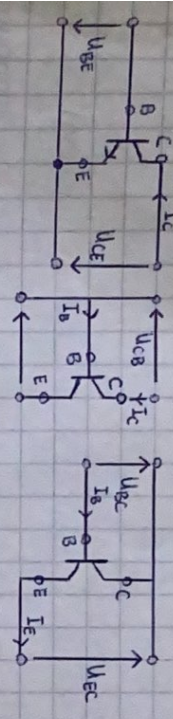
Transistor



→ aus 3 unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten aufgebaut
→ Elektroden Emitter (E), Basis (B), Kollektor (C)

$$U_{BE,N} = R_{BE} \cdot I_{B,N} + U_{BE0}$$

Grundschaltungen



Emitterschaltung Basisschaltung Kollektorschaltung

Gemeinsamer Anschluss Versärkung des Eingangssignals Wechselspannungs-Signals (Mehrfachverstärker)

Arbeitspunkte: Einstellen durch Gleichspannungsquellen und R_C

C_E, C_A : Ein- & Auskoppeln der Wechselspannungsanteile

→ Ausgangssignal Wechselspannung

→ "blockieren" Gleichspannungsanteile

$R_C = \infty \Omega$, Steigung der Kennlinie g ist 0

AP = $U_{CE}(AP) = \frac{1}{2} U_{Bat}$ max Verstärkung im Transistor

AP einstellen: Veränderung des Basisstroms $I_B = I_E \Rightarrow AP$

Erhöhung des Basisstroms: keine AP Änderung, Transistor "übersteuert" & befindet sich in "Sättigung"

Wechselgröße: Phasität wechselt in regelmäßiger Wiederholung und zeitlicher Mittelwert ist Null

Mischgröße: Größe aus Überlagerten Gleich- & Wechselanteil

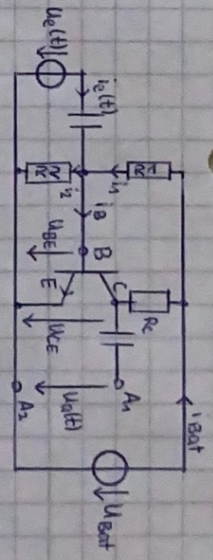
Spannungsverstärkung $V_u = \frac{\hat{U}_{CE}}{\hat{U}_E}$

max Signalamplitude $\hat{U}_{Emax} = \frac{1}{2} U_{Bat}$

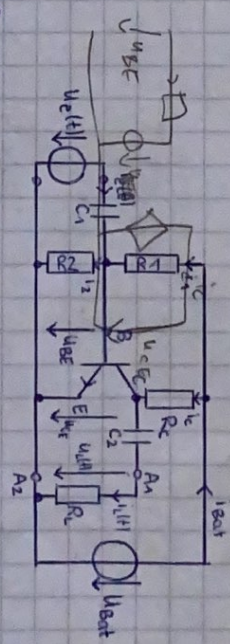
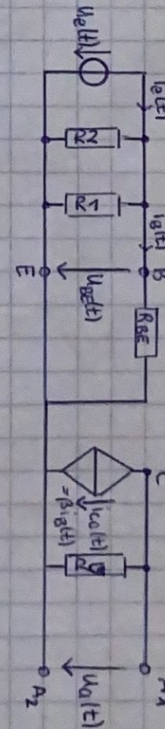
Zusammenhang $\hat{U}_E$ & Effektivwert $U_E = \frac{\hat{U}_E}{\sqrt{2}}$

$\hat{I}_B = \frac{U_E}{R_{BE}}$ $\hat{I}_{C,0} = R_{CB} \hat{I}_B$ $\hat{I}_E = \frac{U_E}{R_E} + \frac{U_E}{R_{BE}}$

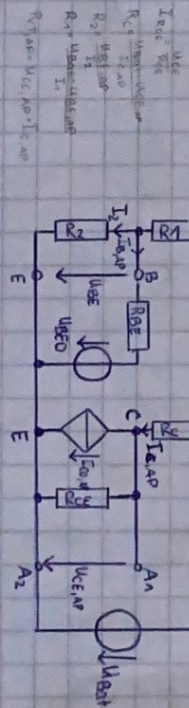
$\hat{I}_{A,0} = \frac{P_{A,0}}{R_{A,0}}$ Leistung mit Effektivwerten! $P = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$



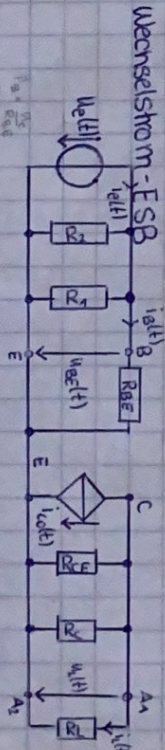
ESB - Wechselsstrom



Gleichstrom-ESB



Wechselstrom-ESB



$$R_{A,0} = \frac{R_A}{\sqrt{2}}$$

$$R_{B,0} = \frac{R_B}{\sqrt{2}}$$

$$R_{C,0} = \frac{R_C}{\sqrt{2}}$$

$$R_{E,0} = \frac{R_E}{\sqrt{2}}$$

$$R_{F,0} = \frac{R_F}{\sqrt{2}}$$

$$R_{G,0} = \frac{R_G}{\sqrt{2}}$$

$$R_{H,0} = \frac{R_H}{\sqrt{2}}$$

$$R_{I,0} = \frac{R_I}{\sqrt{2}}$$

$$R_{J,0} = \frac{R_J}{\sqrt{2}}$$

$$R_{K,0} = \frac{R_K}{\sqrt{2}}$$

$$R_{L,0} = \frac{R_L}{\sqrt{2}}$$

$$R_{M,0} = \frac{R_M}{\sqrt{2}}$$

$$R_{N,0} = \frac{R_N}{\sqrt{2}}$$

$$R_{O,0} = \frac{R_O}{\sqrt{2}}$$

$$R_{P,0} = \frac{R_P}{\sqrt{2}}$$

$$R_{Q,0} = \frac{R_Q}{\sqrt{2}}$$

$$R_{R,0} = \frac{R_R}{\sqrt{2}}$$

$$R_{S,0} = \frac{R_S}{\sqrt{2}}$$

$$R_{T,0} = \frac{R_T}{\sqrt{2}}$$

$$R_{U,0} = \frac{R_U}{\sqrt{2}}$$

$$R_{V,0} = \frac{R_V}{\sqrt{2}}$$

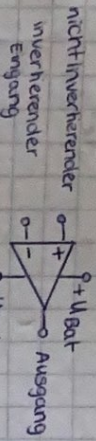
$$R_{W,0} = \frac{R_W}{\sqrt{2}}$$

$$R_{X,0} = \frac{R_X}{\sqrt{2}}$$

$$R_{Y,0} = \frac{R_Y}{\sqrt{2}}$$

$$R_{Z,0} = \frac{R_Z}{\sqrt{2}}$$

Operationsverstärker



nicht invertierender Eingang

invertierender Eingang

ideal: Eingangswiderstand $R_e = \infty \Omega$ ($\Rightarrow$ im Eingang fließen keine Ströme)

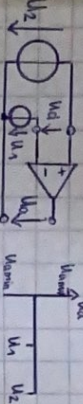
Open-Loop-Verstärkung $A_{OL} = \infty$

Ausgangsspannung der OP können nur die Werte der Versorgungsspannung der OP annehmen

ohne Rückkopplung

$U_A > 0 \Rightarrow U_A = U_{A,max} = +U_{Bat}$
 $U_A < 0 \Rightarrow U_A = U_{A,min} = -U_{Bat}$
 $U_A = U_{A,max} = +U_{Bat}$
 $U_A = U_{A,min} = -U_{Bat}$

- Komparator (Vergleich 2-er Spannungen)



Mit Rückkopplung

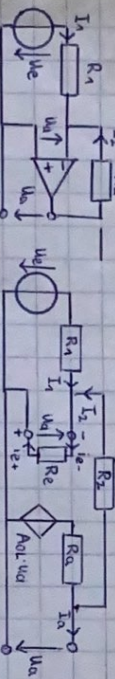
Unter Rückkopplung versteht man die Rückführung eines Teils der Ausgangsspannung des OPs auf einen der beiden Eingänge (mittels eines Rückkopplungsnetzwerks)

-> Mitkopplung & Gegenkopplung

Gegenkopplung: Rückführung der Ausgangsspannung auf invertierenden OP-Eingang

Mitkopplung: Addition der rückgeleiteten Spannung auf Eingangsspannung

- invertierender Verstärker (Sonderfall: Inverter $R_2 = R_1$, $V_u = -1$)

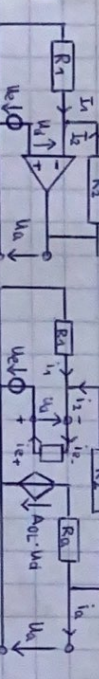


Spannungsverstärkung $V_u = -\frac{R_2}{R_1}$ durch -1 invertiert $u_A(t) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_E(t)$

- nichtinvertierender Verstärker (Sonderfall: Impedanzwandler $R_1 \rightarrow \infty \Omega$, $R_2 = 0 \Omega \rightarrow V_u = 1$)

über R_1 auf Masse angelegt

u_E wird nichtinvertierenden Eingang zugeführt



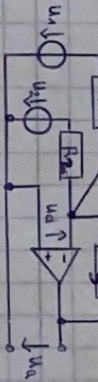
Spannungsverstärkung $V_u = \frac{U_A}{U_E} = (1 + \frac{R_2}{R_1})$

Grundelemente Summierer

- Addierer

analoge Spannungen werden addiert $\rightarrow$ verstärkt

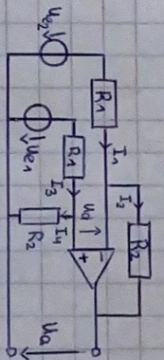
Spannungsverstärkung: Spannung addieren & mit Faktor $(-\frac{R_2}{R_1})$ multiplizieren



$$U_A = -R_3 \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} \right)$$

- Subtrahierer

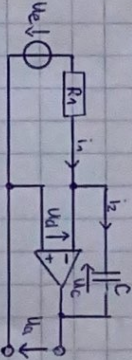
Differenz der Eingangsspannungen & Multiplikation mit Verstärkungsfaktor $(\frac{R_2}{R_1})$



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

- Integrierer

Ausgangsspannung $u_A =$ Integral der Eingangsspannung u_E



$$u_A = -\frac{1}{RC} \int u_E dt + K$$

Begrenzung: Eigenschaft, dass Ausgangsspannung des OP min nur $-U_v$ und max nur $+U_v$ annehmen kann

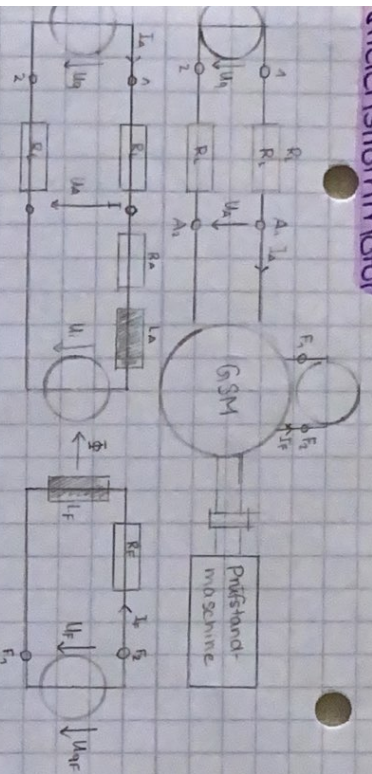
Widerstand $\hat{=}$ AP einstellen (Strombegrenzung)

Diode $\hat{=}$ stellt Referenzspannung zur Verfügung

Referenzspannung: Umschaltpunkte der Komparatoren einstellen $\rightarrow$ wann u_A springt

Spannungssteller, wenn in OP kein Strom fließt (ideal)

Gleichstrommotor



Induktivität vernachlässigbar: keine Spannungsabfälle an den Induktivitäten → alle Größen sind Gleichgrößen
dann gilt $\frac{dI}{dt} = 0$ und somit $u_L = 0V$

Fremderreger // permanenterregter Vorfall: Mglfluss über Erregerstrom variieren
Nachteil: Verluste im Erregerkreis

Vennleistung $P_{el,AN} = U \cdot I = I^2 R$

$$P_{mech,N} = 2\pi n_N M_N = U_g \cdot I_A - (R_A + R_F) I_A^2$$

$$P_{v,AN} = P_{el,AN} - P_{mech,N} = P_{AN} - P_{mech,N} = P_{AN} - P_N$$

$$I_{A,N} = \frac{P_N}{U_{A,N}} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N}} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{F,N} = I_{F,N} \cdot \frac{1}{c} \frac{E_g}{I_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

$$I_{A,N} = \frac{P_{mech,N}}{U_{A,N} - I_{A,N} R_A}$$

Asynchronmotor

Synchronendrehzahl $n_s = \frac{f}{p}$ f² Frequenz, p² Polpaarzahl

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s}$$

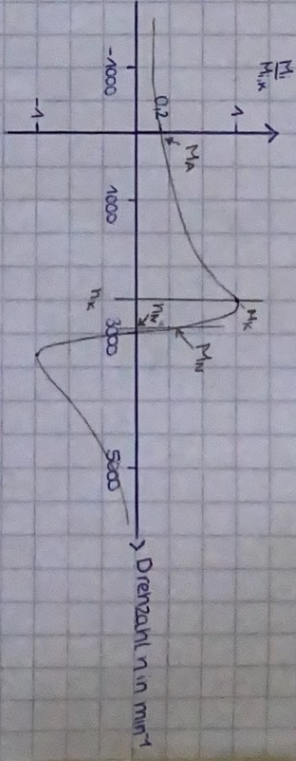
$$Kippmoment M_{k,cr} \sim \frac{1}{s^2}$$

$$Kippwupf s_{cr} \sim \frac{R_{sc}}{f_m}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{p}{s}$$

Betriebsbereiche: Untersynchroner Betrieb ($n < n_s$) → Motorbetrieb

nimmt elektr. Leistung auf, gibt mech. Leistung (Drehmoment) ab
Übersynchroner Betrieb ($n > n_s$) → Generator
Antrieb von außen, nimmt mech. Leistung auf, gibt el. Leistung ab
Gegenstrombereich ($n < 0$) → elektr. Bremse
nimmt mech. & elektr. Leistung auf



Dreieckschaltung

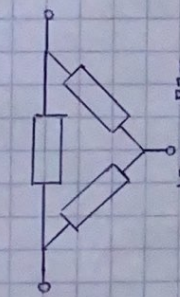
$$I_L = \sqrt{3} I_{str}$$

$$U_L = U_{str}$$

$$P_{elA} = 3 U_{str} \cdot I_{strA}$$

$$P_{elA} = 3 P_{elA}$$

$$I_{LA} = 3 I_{LV}$$



Sternschaltung

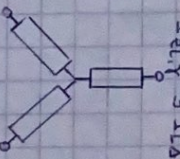
$$I_L = I_{str}$$

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

$$P_{elr} = 3 U_{str} \cdot I_{str} \cos(\varphi)$$

$$P_{elr} = \frac{1}{3} P_{elA}$$

$$I_{LV} = \frac{1}{3} I_{LA}$$



Verfahren: Verleines Anlaufmoment, gute Regelbarkeit
Nachteil: Kommutator und Kohlenkontakte → Verschleiß, Kummwuhnung