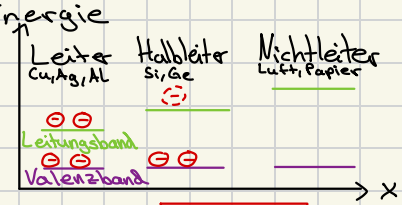
1. Elektrischer Gleichstrom (DC) + → −

Grundbegriffe

- Elementarladung e: kleinste elektr. Ladung $\approx 1{,}60218 \cdot 10^{-19}\,[C = As]$
- Elektron $q_- = -e$
- Proton $q_+ = +e$
- gesamte Ladung Q: überschüssige Ladungsträger $\begin{cases} Q>0 \rightarrow q\text{-Mangel} \\ Q<0 \rightarrow q\text{-Überschuss} \end{cases} Q = \sum_{v=1}^{n} q_v$
- Werkstoffklassifikation:



- Elektr. Feld mit elekr. Feldstärke $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}\left[\frac{N}{As} = \frac{V}{m}\right]$
- Homogenes elektr. Feld: parallele Feldlinien, $|\vec{E}| = \text{const.}$; $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$
- Potential φ: Fähigkeit Arbeit zu leisten
- Elektr. Spannung $U = E \cdot l$ [V]
- Elektr. Strom: gerichtete Bewegung von Ladungsträgern (techn. Stromrichtung von I entgegengesetzt physik. Stromrichtung von q_-)
- Elektr. Stromstärke I: $DC: I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ $AC: i(t) = \frac{\partial Q(t)}{\partial t}$ [A]
- Elektr. Stromdichte $S = \frac{I}{A} = \sigma \cdot E$ $\left[\frac{A}{m^2}\right]$; Maß für therm. Belastung
- ohmsches Gesetz: $U = R \cdot I$; bis 200°C gilt: $R = R_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot (\vartheta - \vartheta_0)]$ $[\alpha_0 = \frac{1}{K};\ \vartheta = \text{°C}]$
  - ↳ $\alpha_0 > 0$: Kaltleiter (↑ϑ → ↑R; PTC-Widerstand; Metalle) ↳ $\alpha_0 < 0$: Heißleiter (↑ϑ → ↓R; NTC-R; Li-Ionen)
- spez. Widerstand $\rho = \frac{1}{\sigma} \rightarrow R = \rho \cdot \frac{l}{A}$
- Elektr. Leitwert $G = \frac{1}{R}$ $\left[S = \frac{A}{\Omega}\right]$
- Elektr. Arbeit $W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} = |\vec{F}| \cdot |d\vec{s}| \cdot \cos(\alpha)$ [J = Nm]
  - ↳ $W_{2\rightarrow 1} = -Q \cdot U = -W_{1\rightarrow 2}$
- Leistung $P = I \cdot U = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$ [W = A·V]

Kirchhoffsche Regeln

- Knoten k: Verzweigungsstelle, wo min. 3 Ströme fließen KG: k−1
- Zweig z: verbinde 2 Knoten MG: z−KG

- Knotenregel: $\sum_{v=1}^{n} I_v = 0$ { zufließender I: ⊕ ; abfließender I: ⊖

- Masche M: geschlossener Pfad von Knoten zu gleichem Knoten

- Maschenregel: $\sum_{m=1}^{n} U_m = 0$ { U-Pfeil in Umlaufrichtung: ⊕ ; U-Pfeil entgegen Umlauf: ⊖

Einfache Gleichstromkreise

- Reihenschaltung: $R_E = R_1 + R_2 + R_3$

  ↳ $\frac{U_1}{U_q} = \frac{R_1}{R_E}$; $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

- Parallelschaltung: $\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

  ↳ $\frac{I_1}{I} = \frac{R_E}{R_1}$; $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$

- Einsetzmethode: 1. Ersatzschaltbild zeichnen

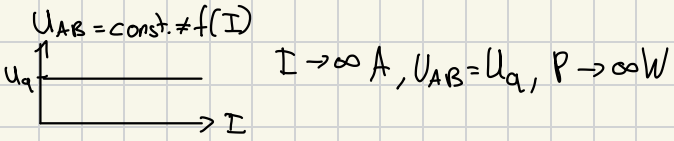
  2. Strom- und Spannungspfeile eintragen

  3. Maschen- und Knotenregel

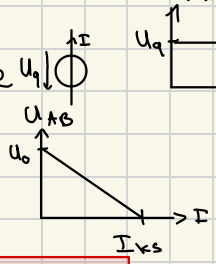
  4. Ohmsches Gesetz anwenden

Quellen

- Ideale Spannungsquelle



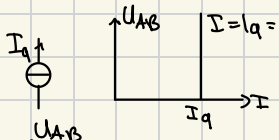
- Reale Spannungsquelle



{ Leerlauf: $R_L = \infty$, $I = 0$, $U_{AB} = U_0$; Kurzschluss: $R_L = 0$, $I = I_K$, $U = 0$

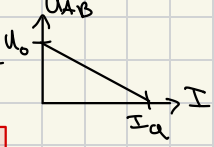
$$U_{AB} = -\frac{U_0}{I_K} \cdot I + U_0 = U_0 - R_i \cdot I$$

- Ideale Stromquelle



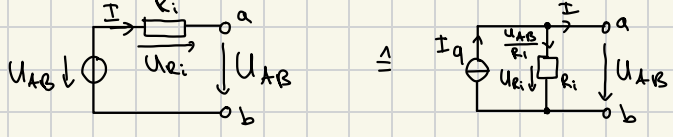
$I = I_q$, $U \to \infty$ V, $P \to \infty$ W

- Reale Stromquelle



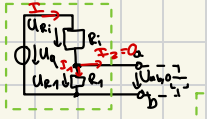
$$I = I_q - \frac{1}{R_i} \cdot U_{AB}$$

- Quellenwandlung: ESB reale Spannungsquelle ⇄ ESB reale Stromquelle

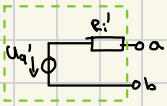


-Ersatzspannungsquelle-Methode:

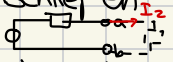
1. Zweig mit gesuchter Größe herausnehmen



2. Real. Schaltung als reale Spannungsquelle modellieren



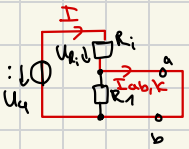
3. Entfernten Zweig zwischen a und b wieder anschließen



→ ges. U_q', R_i': 1. Zweig herausnehmen, Leerlaufspannung zwischen a und b berechnen:

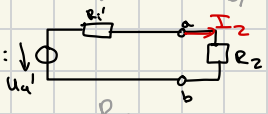
$$U_{ab,0} \stackrel{!}{=} U_q' \qquad U_{ab,0} = U_{R_1} = U_q \cdot \frac{R_1}{R_1+R_i}$$

2. Klemmen a und b kurzschließen, $I_{ab,k}$ berechnen:



$$I_{ab,k} = \frac{U_q}{R_i} \qquad R_i' = \frac{R_1 \cdot R_i}{R_1+R_i} = \frac{U_{ab,0}}{I_{ab,k}}$$

3. Berechnen von I_2:

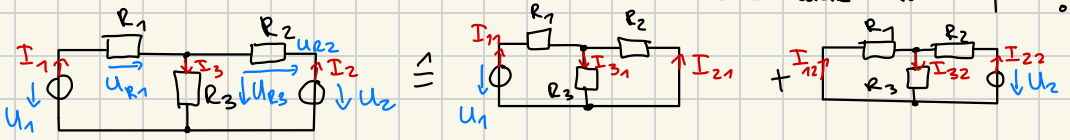


$$I_2 = \frac{U_q'}{R_2+R_i'} \qquad I_2 = U_q \cdot \frac{R_1}{R_2 \cdot R_1 + R_2 R_i + R_1 R_i}$$

-Überlagerungssatz-Methode:

bei mehreren Quellen, Lineare Netzwerke

- U-Quelle kurzschließen ϕ → |
- I-Quelle offen ϕ → °



$$I_1 = I_{11} + I_{12}$$
$$I_2 = I_{21} + I_{22}$$
$$I_3 = I_{31} + I_{32}$$

Stromteilerregel: gegeben: I_{ges}, 2 parallele R

$$I_1 = I_{ges} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

$$I_2 = I_{ges} \cdot \frac{R_1}{R_1+R_2}$$

2. Elektrischer Wechselstrom (AC)

reine Wechselgröße:



A = B ; i(t) = Augenblickswert

- Wechselstrom: 1) $i(t) = i(t+n \cdot T)$ 2) $\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) \cdot dt = 0$
- Wechselspannung: 1) $u(t) = u(t+n \cdot T)$ 2) $\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot dt = 0$

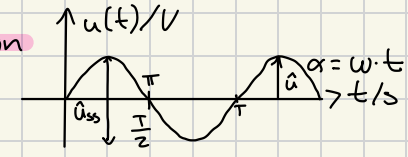
Mischgröße:



A ≠ B ; i(t) = periodisch

- $\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) \cdot dt \neq 0$

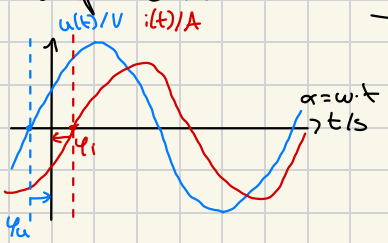
Sinusfunktion



$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\alpha) \quad , \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f \quad , \quad U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$

↑ Momentanwert ↑ Effektivwert

Nullphasenverschiebung



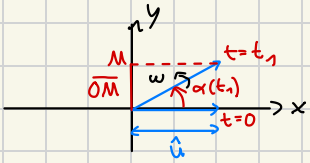
$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)$

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

$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ $\begin{cases} >0 \rightarrow \text{Spannung eilt vor} \\ =0 \rightarrow \text{in Phase} \\ <0 \rightarrow \text{Spannung eilt nach} \end{cases}$

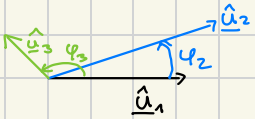
Berechnung Wechselstromkreisen

- Zeigerdarstellung von AC-Kreisen (=Sinusförmige Wechselspannungsgrößen als Vektoren):



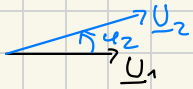
$\overline{OM} = \hat{u} \cdot \sin(\alpha(t_1)) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t_1)$

- Amplitudenzeiger-Darstellung:



$u_1(t) = \hat{u}_1 \cdot \sin(\omega t)$, $u_2(t) = \hat{u}_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$, $u_3(t) = \hat{u}_3 \cdot \sin(\omega t + \varphi_3)$

- Effektivwertzeiger-Darstellung:



$u_1(t) = \hat{u}_1 \cdot \sin(\omega t)$, $u_2(t) = \hat{u}_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$; $U_1 = \frac{\hat{u}_1}{\sqrt{2}}$, $U_2 = \frac{\hat{u}_2}{\sqrt{2}}$

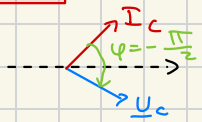
- **Widerstand R:**

↳ Amplitudenvergleich: $\hat{u}_R = R \cdot \hat{i}_R$ ↳ Phasenvergleich: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0$

- **Kapazität C:** $i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$

↳ Amplitudenvergleich: $\hat{u}_C = \frac{1}{\omega C} \cdot \hat{i}_C$, $U_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I_C$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ (Kapazitiver Blindwiderstand)

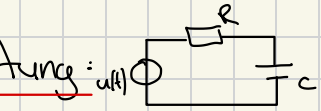
↳ Phasenvergleich: $\varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2}$; $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$



- **Induktivität L:** $u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$

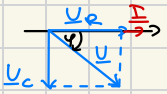
↳ Amplitudenvergleich: $\hat{u}_L = \omega L \hat{i}_L$; $X_L = \omega L$ ↳ Phasenvergleich: $\varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2}$; $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = +\frac{\pi}{2}$

- **RC-(Reihen)-Schaltung:**



$I = I_C = I_R$; $U_R = R \cdot I$; $U_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I$; $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C$

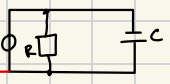
↳ Effektivwertzeigerdiagramm:



$U = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$; $Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ [Ω] (Scheinwiderstand)

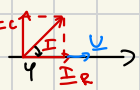
$\varphi = -\arctan\left(\frac{1}{\omega C \cdot R}\right)$

- **RC-(Parallel)-Schaltung:**



$I_R = \frac{U}{R}$; $I_C = U_C \cdot \omega \cdot C$; $\underline{U} = \underline{U}_R = \underline{U}_C$; $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C$

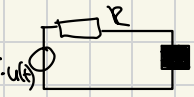
↳ Effektivwertzeigerdiagramm:



$U = \frac{I}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C)^2}}$; $Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C)^2}}$

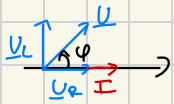
$\varphi = -\arctan(\omega C R)$

-RL-(Reihen)-Schaltung:



$\underline{U}_R + \underline{U}_L = \underline{U}$; $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; $\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$

↳ Effektivwert-ZD:

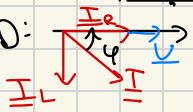


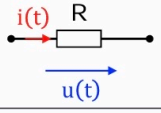
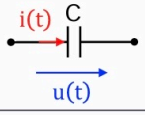
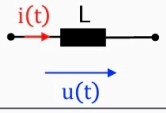
-RL-(Parallel)-Schaltung:

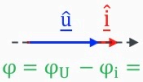
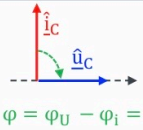
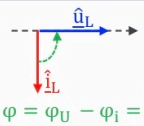
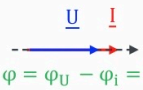
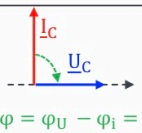
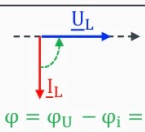


$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L$; $Z = \frac{\omega L \cdot R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$; $\varphi = \arctan\left(\frac{R}{\omega L}\right)$

↳ Effektivwert-ZD:



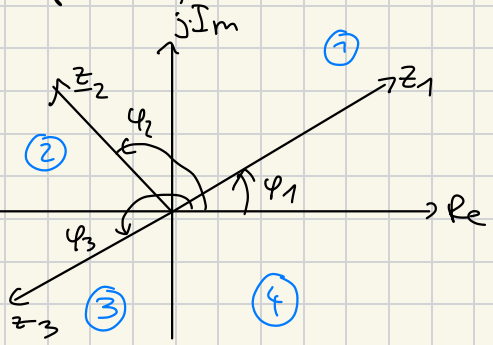
	Widerstand R	Kapazität C	Induktivität L
Schaltsymbol			
Kenngleichung	$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$	$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{L}$	$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{L} \cdot N^2$
Zusammenhang Strom und Spannung	$u(t) = R \cdot i(t)$	$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$	$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$
Amplitudenverhältnis	$\hat{u} = R \cdot \hat{i}$	$\hat{u} = \underbrace{\frac{1}{\omega C}}_{X_C} \cdot \hat{i}$	$\hat{u} = \underbrace{\omega L}_{X_L} \cdot \hat{i}$

	Widerstand R	Kapazität C	Induktivität L
Effektivwertverhältnis	$U = R \cdot I$	$U = \frac{1}{\omega C} \cdot I = X_C \cdot I$	$U = \omega L \cdot I = X_L \cdot I$
Zeigerdiagramm (Amplitude)	 $\varphi = \varphi_U - \varphi_i = 0$	 $\varphi = \varphi_U - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$	 $\varphi = \varphi_U - \varphi_i = \frac{\pi}{2}$
Zeigerdiagramm (Effektivwert)	 $\varphi = \varphi_U - \varphi_i = 0$	 $\varphi = \varphi_U - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$	 $\varphi = \varphi_U - \varphi_i = \frac{\pi}{2}$

Komplexer Widerstand $\underline{Z}$ (≙ Impedanz)

$\underline{Z} = r \cdot e^{j\cdot\varphi}$; $\varphi = \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(\underline{z})}{\mathrm{Re}(\underline{z})}\right)$

$\varphi = \arg(x+jy)$ =
- $\arctan\left(\frac{y}{x}\right)$: $x>0$ (①④)
- $\arctan\left(\frac{y}{x}\right)+\pi$: $x<0, y\geq 0$ (②)
- $\arctan\left(\frac{y}{x}\right)-\pi$: $x<0, y<0$ (③)
- $\frac{\pi}{2}$: $x=0, y>0$
- $-\frac{\pi}{2}$: $x=0, y<0$
- — : $x=0, y=0$



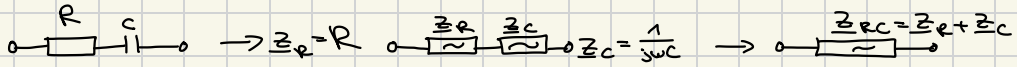
- Differentation: $\frac{d}{dt}(\underline{z}) = j\omega\cdot\underline{z}$
- Integration: $\int \underline{z}\,dt = \frac{1}{j\omega}\cdot\underline{z}$
- beliebiger Zeitpunkt: $\boxed{\mathrm{Im}\{\underline{U}\}\cdot\sqrt{2} = \hat{u}\cdot\sin(\omega t+\varphi_u) = u(t)}$
- **Widerstand R**: $\underline{U}_R = R\cdot\underline{I}_R$
- **Kapazität C**: $\underline{U}_C = \underline{Z}_C\cdot\underline{I}_C$; $\boxed{\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}} = -jX_C$; $X_C = \frac{1}{\omega C}$

  - $\omega\approx 0$: $X_C\to\infty$ Leerlauf
  - $0<\omega<\infty$: $X_C = \frac{1}{\omega C}$ $i_C(t) = C\cdot\frac{du_C(t)}{dt}$
  - $\omega\to\infty$: $X_C\approx 0$ Kurzschluss

- **Induktivität L**: $\underline{U}_L = \underline{Z}_L\cdot\underline{I}_L$; $\boxed{\underline{Z}_L = j\omega L} = jX_L$; $X_L = \omega L$

  - $\omega\approx 0$: $X_L\approx 0$ Kurzschluss
  - $0<\omega<\infty$: $X_L = \omega L$ $u_L(t) = L\cdot\frac{di_L(t)}{dt}$
  - $\omega\to\infty$: $X_L\to\infty$ Leerlauf

- **RC-Reihenschaltung**: $\underline{Z} = R + \frac{1}{j\omega C} = R - j\cdot\frac{1}{\omega C}$; $U = Z\cdot I$ (Z = Scheinwiderstand)



- Admittanz $\boxed{\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}}$; $\underline{Y}_R = \frac{1}{R}$; $\underline{Y}_C = j\omega C$; $\underline{I} = \underline{Y}\cdot\underline{U}$
- **RC-Pass**:

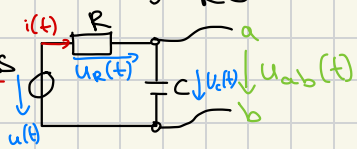
gegeben: $u(t) = \hat{u}\cdot\sin(\omega t)$
gesucht: $u_{ab}(t)$ abh. von ω

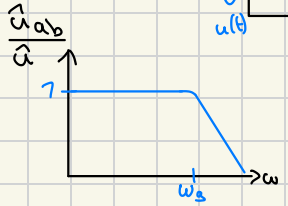
1) Niedrige Frequenzen: $\omega = 0 \to \frac{1}{\omega C}\to\infty$; $i(t)\approx 0$ $\to u_{ab}(t) = u(t)$

2) Hohe Frequenzen: $\omega\to\infty \to \frac{1}{\omega C}\to 0$; $i(t)\approx 0$ $\to u_{ab}(t)\approx 0$

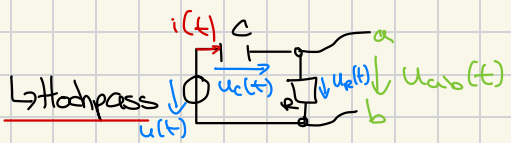
3) allgemein: $\omega_g = 2\pi f_g = \frac{1}{RC}$

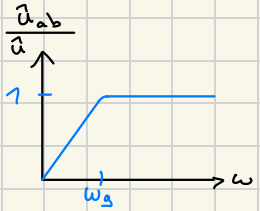
↳ Tiefpass





↳ Hochpass





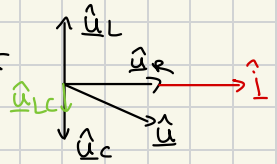
- Blindspannung $\hat{u}_B$: $U_B = U \cdot \sin(\varphi)$
- Wirkspannung $\hat{u}_w$: $U_w = U \cdot \cos(\varphi)$
- Wirkstrom $\hat{i}_w$: $I_w = I \cdot \cos(\varphi)$
- Blindstrom $\hat{i}_B$: $I_B = I \cdot \sin(\varphi)$
- Leistung: $p(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cdot (\cos(\varphi_u - \varphi_i) - \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i))$
- Arbeit: $W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt$
- Blindleistung: $p(t) = P + p_{2f}(t)$; $P = \frac{1}{T_0} \int_0^T p(t) \cdot dt$ (= arithm. Mittelwert)
  - $p(t) > 0 \rightarrow i(t)$ & $u(t)$ gleiches VZ
    - ↳ Quelle $\xrightarrow{\text{Energie}}$ Verbraucher
  - $p(t) < 0 \rightarrow i(t)$ & $u(t)$ verschiedenes VZ
    - ↳ Quelle $\xleftarrow{\text{Energie}}$ Verbraucher
- Wirkleistung $\boxed{P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)}$
- Scheinleistung $\boxed{\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I} = P + jQ}$
- Effektivwert: $P_{DC} = P$; $I = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T i^2(t) dt}$; $U = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T u^2(t) dt}$

Wirkleistung P	Blindleistung Q	Scheinleistung S
$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ (33)	$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$ (34)	$S = U \cdot I$ (35)
P: Verbrauchte Leistung	Q: Leistung die zwischen Verbraucher und Quelle verschoben wird	S: Größe für Dimensionierung von Schaltungen
$[P] = 1W$	$[Q] = 1VAR = 1W$	$[S] = 1VA = 1W$
$\cos(\varphi)$ = Leistungsfaktor	VAR: Volt Ampere Reaktiv	

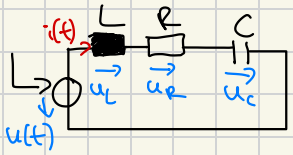
	R ($\varphi = 0$)	L ($\varphi = \frac{\pi}{2}$)	C ($\varphi = -\frac{\pi}{2}$)	Einheit
Wirkleistung $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$	$U \cdot I$	0	0	W
Blindleistung $Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$	0	$U \cdot I$	$-U \cdot I$	VAR
Scheinleistung $S = U \cdot I$	$U \cdot I$	$U \cdot I$	$U \cdot I$	VA

Schwingkreis (= Systeme mit min. 2 Energiespeichern)

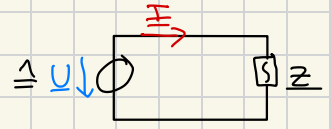
- Reihen-RLC-Schwingkreis: $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C + \underline{U}_L$
  - ↳ Amplitudenwertzeiger



$\hat{u} = \hat{i} \cdot Z$; $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$; $\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right)$



≙



$\underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$; $\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}$

- Güte $\boxed{Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}}$

ω	ωL	$\frac{1}{\omega C}$	Z	φ	I
$\omega \to 0$	≈ 0	$\to \infty$	$\to \infty$	$-\frac{\pi}{2}$	$\to 0A$
$\omega = \omega_0$	$\omega_0 L$	$\frac{1}{\omega_0 C}$	R	0	$I = \frac{U}{R}$
$\omega \to \infty$	$\to \infty$	$\to 0$	$\to \infty$	$\frac{\pi}{2}$	$\to 0A$

3. Elektromagnetismus $N \to S$

Kondensator: $Q = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A \cdot E = C \cdot U$

$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{l}$

$i(t) = C \cdot \frac{d}{dt} u(t)$

- Laden: $U = RC \cdot \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t)$

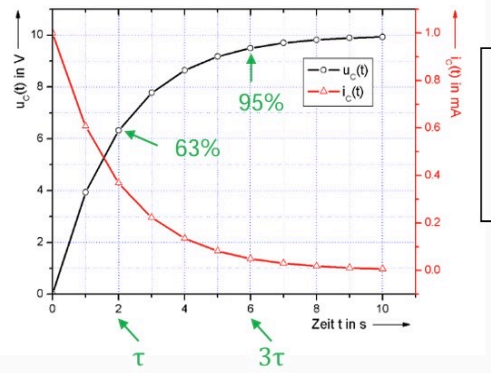
$u_c(t) = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$; $\tau = RC$

$i(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

- Parallelschaltung: $C_E = C_1 + \dots C_n$
- Reihenschaltung: $\frac{1}{C_E} = \frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_n}$

Ladevorgang

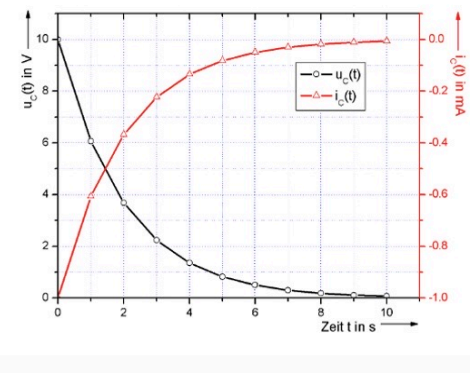
$u_C(t) = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ $\quad i_C(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$



U = 10V
R = 10kΩ
C = 200µF
τ = 2s

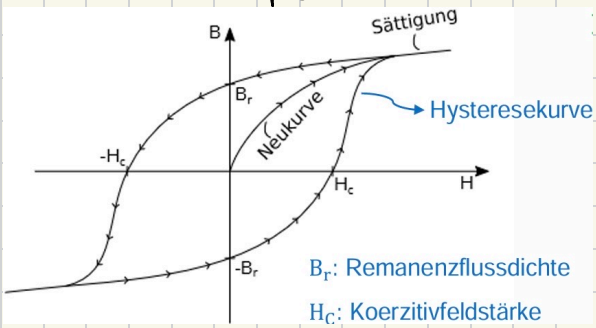
Entladevorgang

$u_C(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ $\quad i_C(t) = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$



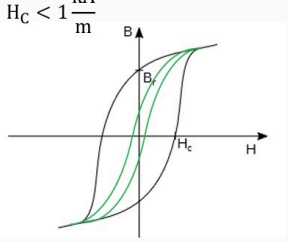
Magn. Felder

- allg: $\vec{B} = f(\vec{H})$
- Vakuum: $B = \mu_0 \cdot H$



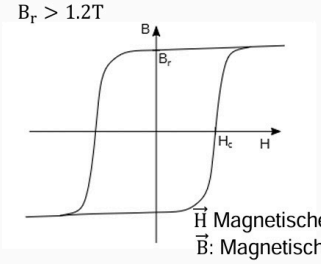
Weichmagnetische Werkstoffe:

$H_C < 1 \frac{kA}{m}$



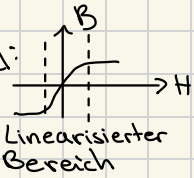
Hartmagnetische Werkstoffe (Permanentmagnete):

$B_r > 1.2T$



$\vec{H}$ Magnetische Feldstärke
$\vec{B}$: Magnetische Flussdichte

- Vereinfachung von weichmagn. Material:



$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

- allg: $\phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \iint_A |\vec{B}| \cdot |d\vec{A}| \cdot \cos(\alpha)$
- hom. Feld und $\perp$ Fläche: $\phi = B \cdot A$
- Elektromagnetismus: Durchflutungsgesetz: $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = N \cdot I$; $H = \frac{I}{2\pi r}$
- Induktivität; allg: $N \cdot I \sim N \cdot \phi \rightarrow \psi = L \cdot I$

→ Stabspule: $L = N^2 \cdot \underbrace{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{l}}_{=\Lambda}$ [H]

→ AC: $u_L = L \cdot \frac{d}{dt} i(t)$

→ Parallelschaltung: $\frac{1}{L_E} = \frac{1}{L_1} + \dots \frac{1}{L_n}$

→ Reihenschaltung: $L_E = L_1 + \dots L_n$

4. Halbleiter

spez. elektr. Widerstand

- 3D ρ: $\rho = R \cdot \frac{A}{l}$ [$\Omega \cdot m$] bei Würfel: $\rho = \frac{U}{I} \cdot L$
- 2D-Schichtwiderstand R_{sq}: $R_{sq} = \frac{\rho}{d}$; $R = \frac{L}{b} \cdot R_{sq}$

Energiebänder-Modell

- Leiter: Valenzband mit q_- (teilbesetzt) & überlappt mit Leitungsband (da auch q_-)
  - frei bewegliche q_-
- Isolatoren: VB mit q_- voll & keine q_- in LB → Bandabstand groß
  - q_- in festen Atombindungen
  - $E_G > 4eV$

- Halbleiter: - geringer Bandabstand

- q- aus VB in LB → q- Fehlstelle → Loch → Defekt -q-

- Generation: Entstehung q- -Loch-Paar

- Rekombination: umgekehrt

- Leitfähigkeit ↑ mit Temp. ↑

- intrinsischer Halbleiter: Anzahl q- ≙ Anzahl Löcher

- Bsp. Si, Ge

→ Dotierung (= Einbau von Fremdatomen in regelmäßige Kristallgitter) → gezielte Beeinflussung der Leitfähigkeit

1) Einbau von Atomen mit 3 Valenz-q- → Loch (frei beweg.) in VB → p-dotiert

2) Einbau von Atomen mit 5 Valenz-q- → 5. Valenz-q- (frei beweg.) wird nicht benötigt → wenig Energieaufwand → n-dotiert

! Dotier-Atome sind elektr. neutral!

→ PN-Übergang (p-/n-dotiert zusammenfügen):

1) Diffusion von q- und Löcher

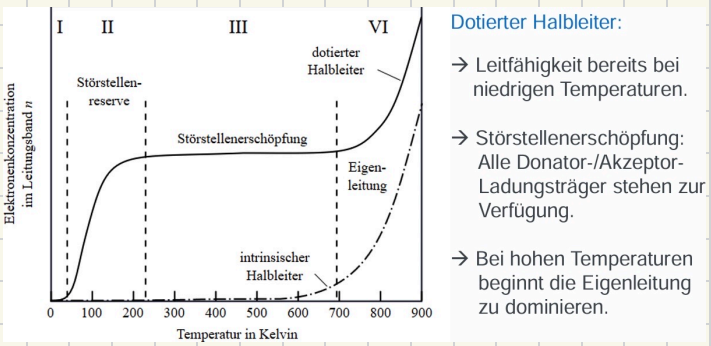
2) Rekombination von q- -Loch-Paare

→ elektr. Feld (≙ Diffusionsstrom)

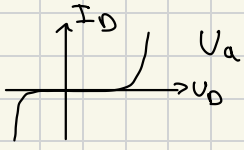
→ Sperrschicht wird breiter

→ bei Umpolung der Spannungsquelle wird $\vec{E}$ in Sperrschicht kleiner → Stromfluss → pn-Übergang leitet

=> Stromfluss nur in eine Richtung: polaritätsabh. Leitfähigkeit ≙ Diode



$U_q = R_V \cdot I_D + U_D$; $I_D = \frac{U_q - U_D}{R_V}$



$U_q > U_S$ → leitet

- Gerade zeichnen: 1. Punkt: $U_D = 0V \rightarrow I_D = \frac{U_q}{R_V}$

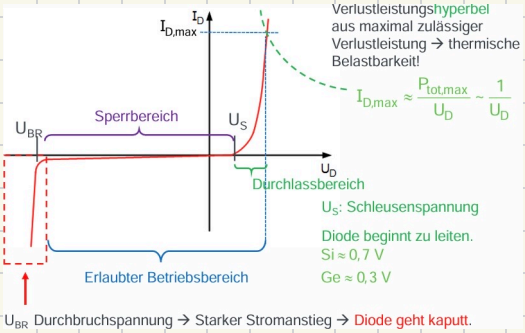
2. Punkt: $I_D = 0A \rightarrow U_D = U_q$

- Vereinfachung Diodenkennlinie: I_D

1) Diode sei Ideal: sperrend $U_D < 0, I_D = 0$; leitend $U_D = 0, I_D > 0$ → U_D → kein Spannungsabfall $U_{sch} = 0$

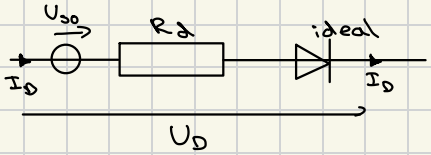
2) sperrt: $U_D < U_S$; leitet: $U_D = U_S$ → const. Spannungsabfall $U_{sch} = U_S$

3) Linearisierung der Kennlinie um einen AP: $\frac{\Delta I_D}{\Delta U_D} = \frac{1}{R_d}$



Tangentengleichung: $I_D(U_D) = \frac{U_D - U_{SO}}{R_d}$

lineares ESB:



- Shockley-Diodengleichung: $I_D(U_D) = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}} - 1\right)$ für $U_D > 0$

$I_S \approx 10^{-12}\,A \ldots 10^{-6}\,A$: stark Temp.abh.

sonst: $I_D \approx -I_S$

n = Emissionskoeffizient

$U_T = \frac{k_B \cdot T}{e} \approx 25mV$ bei 20°C

$k_B \approx 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

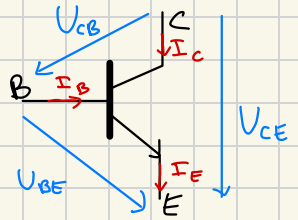
Art	Anwendung
Gleichrichterdiode	Gleichrichterschaltungen
Schaltdiode	Ungesteuerte Schalter, Gleichrichter, Verpolungsschutzschaltung, Freilaufdiode
Zener-Dioden	Erzeugung von Referenzspannungen, Spannungsstabilisierungsschaltung, Schutzdiode
Laserdiode, Photodiode, Leuchtdiode (LED)	Strahlungsemission, Strahlungsmessung, Fernbedienungen, Lichtschranken LED: Beleuchtung, Anzeigen
Kapazitätsdiode	Senderabstimmung bei Rundfunkempfängern
Kleinsignaldioden	Nachrichtentechnik (Modulator, Demodulator, Mischer), Einfache Dioden-Logik
Es gibt noch einige „Sonderformen“: Tunneldiode (Hochfrequenz), Gunn-Diode (Mikrowellenerzeugung), Avalanche-Photodiode, …	

Transistor

↳ Bipolartransistor: q- (=n) und Löcher (=p); npn-Bipolartr. B(asis) — C(ollektor) / E(mitter)

↳ Unipolartransistoren / Feldeffekttransistor: q- (=n) oder Löcher (=p); n-Kanal-MOSFET — G(ate), D(rain), S(ource)

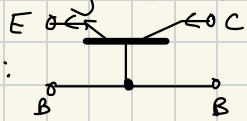
- Vereinfachung npn-Bipolartr.:



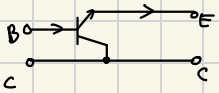
$I_E = I_B + I_C$
$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$
} Kennlinienverläufe abh. von Transistor-Grundschaltung

- Transistor-Grundschaltung (= welcher Anschluss als gemeinsamer für Eingang / Ausgang)

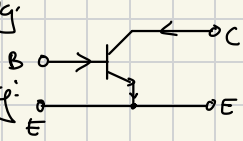
↳ Basis-Schaltung:



↳ Kollektor-Schaltung:



↳ Emitter-Schaltung:



→ I_B ↑ dann Kennlinie ↑

↳ Eingangskennlinie: keine abh. von U_{CE} + Linearisierung um AP → $R_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$

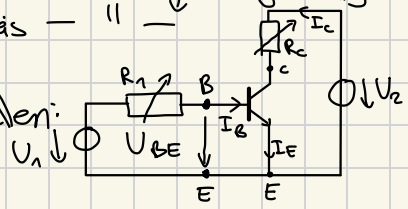
↳ Stromverstärkungskennlinie: Ursprungsgerade + unabh. von U_{CE} → $B = \frac{I_C}{I_B}$ (B = Gleichstromverstärkungsfaktor)

↳ $i_c(t) = \beta \cdot i_B(t)$ $\beta = B$ i.d.R. (β = Wechselstromverhalten)

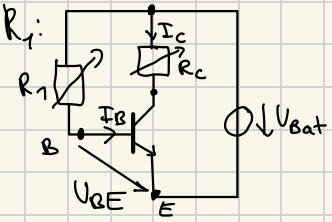
↳ max. Verlustleistungen nicht überschreiten: B-E-Kreis: $P_{V,BE} = U_{BE} \cdot I_B$
K-E-Kreis: $P_{V,CE} = U_{CE} \cdot I_C$
} $P_V = U_{BE} \cdot I_B + U_{CE} \cdot I_C$
i.d.R. $P_{V,CE} \gg P_{V,BE} \rightarrow P_V \approx P_{V,CE}$

↳ Praktisches Vorgehen zu AP: 1. B-E-Kreis über Vorwiderstand an Spannungsquelle
2. K-E-Kreis — " —
↕ Strombegrenzung ↕ gemeinsame / verschiedene

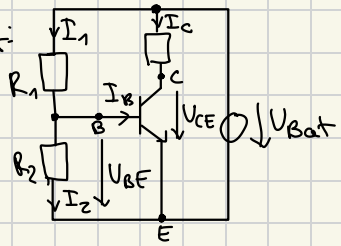
↳ Schaltung mit getrennten Spannungsquellen:



↳ Schaltung mit gemeinsamer U_{Bat} mit R_1:



↳ Schaltung mit gemeinsamer U_{Bat} und Spannungsteiler:



↳AP-Einstellung:

1) Transistor durch lineares Ersatzschaltbild

2) $R_C = \frac{U_{Bat} - U_{CE(AP)}}{I_{C(AP)}}$; $I_{CO(AP)} = I_{C(AP)} \sim \frac{U_{CE(AP)}}{R_{CE}}$; $I_{B(AP)} = \frac{I_{CO(AP)}}{B}$; $U_{BE(AP)} = R_{BE} \cdot I_{B(AP)} + U_{BEO}$ ($U_{BE2} = R_2 \cdot I_2$)

R_{CE}: aus Ausgangskennlinie; R_{BE}, U_{BEO}: aus B-E-Diodenkennlinie

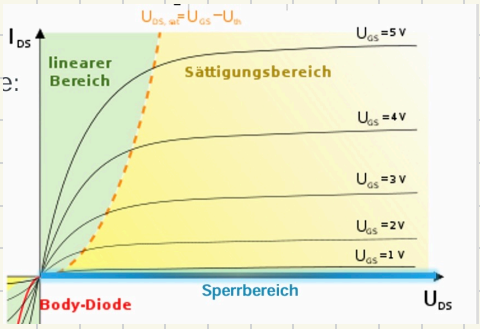
3) $I_2 = q \cdot I_B$ (Querstromverhältniss)

4) Gleichung der Arbeitsgerade: $I_C = \frac{U_{Bat} - U_{CE}}{R_C}$

- 1. Punkt: $U_{CE} = 0V \rightarrow I_C = \frac{U_{Bat}}{R_C}$
- 2. Punkt: $I_C = 0A \rightarrow U_{CE} = U_{Bat}$

⇒ Transistor = Einstellbarer Widerstand, befindet sich in Sättigung

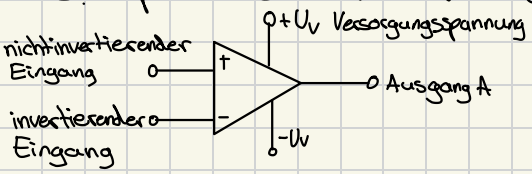
- Class-D-Verstärker (Audiosignalverstärker): 1) PWM: vergleicht Pegel in Rechteckschwingung
  ↳ 95%, Energiefluss bidirectional
  ↳ C wird aufgeladen durch Energiefluss zurück zum Versorger
  2) MOSFET: verstärken PWM-Signal
  3) Low Pass Filter: Signal wird von höheren Frequenzanteilen gefiltert
- Linear-Verstärker: linear, ineffizient (50%); Energiefluss von Versorgung zur Last
- MOSFET (= Feldeffekttransistoren über Steuerspannung)
  ↳ n-Typ (Elektronen) / p-Typ (Löcher)
  ↳ Anreicherungstyp (normal-aussperrend) / Verarmungstyp (normal-anleitend)
  - $U_{th} < 0V$: NMOS-Verarmungstyp, PMOS-Anreicherungstyp
  - $U_{th} > 0V$: NMOS-Anreicherungstyp, PMOS-Verarmungstyp



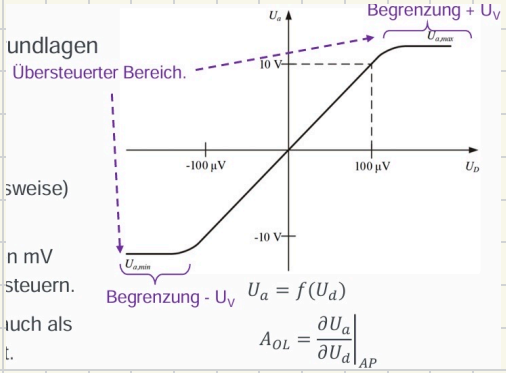
- Sperrbereich: $U_{GS} < U_{th}$: $I_{DS} \approx 0$; $U_T = \frac{k_B \cdot T}{q}$; Emissionsfaktor $n = 1 + \frac{C_D}{C_{Dielektrikum}}$; $C_D \hat{=}$ Verarmungs-Kapazität
- linearer Bereich: $U_{GS} > U_{th}$: $U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th}$; $U_{DS} \approx 0 \rightarrow R_{DS,ON}$; $I_{DS} = K_{n/p} \cdot \left((U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2}\right)$;

  $K_n = \mu_n \cdot C'_{Dielektr.} \cdot \frac{W_n}{L_n}$; $K_p = \mu_p \cdot C'_{Dielektr.} \cdot \frac{W_p}{L_p}$ (μ: Ladungsträgerbeweglichkeit; W → Weite; L → Länge)
- Sättigungsbereich: $U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th}$; $U_{GS} \geq U_{th}$ und $U_{D,sat} \leq U_{DS}$: $I_{DS} = \frac{K_{n/p}}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2$

5 Operationsverstärker (OP)



- symmetrische U_V: z.B. $\pm$ 15V
- Differenzspannung $U_d = U_+ - U_-$
- Ausgangsspannung U_a = const. ≈ ideale Spannungsquelle
- wenn Aussteuergrenze erreicht ist, steigt U_a nicht an → übersteuert
- Leerlaufverstärkungsfaktor sehr groß ≈ $A_{OL} \approx \infty$
- Ströme in OP-Eingang sehr klein ≈ Eingangswiderstand $R_e = \infty\,\Omega$

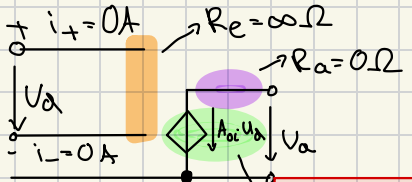


→ keine Ströme in OP-Eingänge

→ keine Maschen durch OP

→ Gegenkopplung: $U_d = 0$

- elektr. Ersatzschaltbild:



$U_a = A_{OL} \cdot U_d = f(U_d)$ { $+U_V$ für $U_d > 0V$; $-U_V$ für $U_d < 0V$

⇒ Vergleich der Spannungen U_+ / U_-

$U_d = 0V$

- Gegenkopplung: Rückführung von U_a auf invertierenden Eingang { → Spannungsverstärkung auf endliche Werte → linearer Arbeitsbereich

↳ U_e über R_1 an invert. Eingang; U_a über R_N an invert. Eingang

↳ $\frac{U_e}{R_1} + \frac{U_a}{R_N} = 0$; $U_a = -\frac{R_N}{R_1} \cdot U_e$; $V_u = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_N}{R_1}$

↳ U_a von beschalteten OP-Verstärker so, dass U_e-Differenz = 0V

- Mitkopplung: Rückführung von U_a auf nichtinvert. Eingang { Verstärkung ∞ bereich größer im übersteuerten Bereich

↳ $V_u = \frac{u_a}{u_e} = (1 + \frac{R_2}{R_1})$; $u_a = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot u_e$ → Vz nicht beeinflusst

↳ wenn $R_1 = \infty\,\Omega$, $R_2 = 0\,\Omega$: $V_u = \frac{u_a}{u_e} = 1$; $u_a = u_e$ → Impedanzwandler

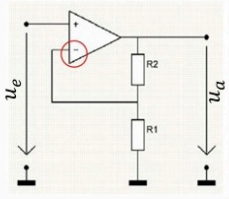
$\rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R_E : u_a = -\frac{R}{R_E}(u_1+u_2+u_3)$

$\rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R : u_a = -1(u_1+u_2+u_3)$

$\rightarrow u_+ = u_- :$

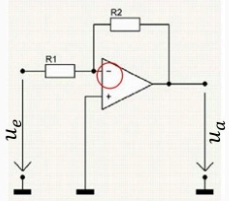
$u_+ = u_2 \cdot \frac{R_4}{R_2+R_4}$

$u_- = \frac{R_1}{R_1+R_3} \cdot u_a + u_1\left(1-\frac{R_1}{R_1+R_3}\right)$



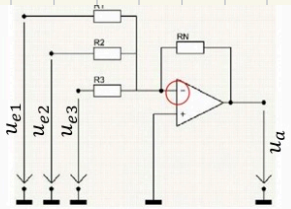
Nichtinvertierender Verstärker

$u_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_e$



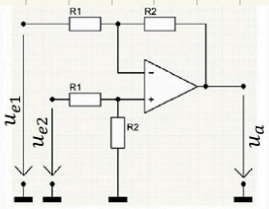
Invertierender Verstärker

$u_a = -\frac{R_2}{R_1} u_e$



Invertierender Addierer

$u_a = -\left(\frac{R_N}{R_1} \cdot u_{e1} + \frac{R_N}{R_2} \cdot u_{e2} + \frac{R_N}{R_3} \cdot u_{e3}\right)$



Substrahierer

$u_a = \frac{R_2}{R_1} \cdot (u_{e2} - u_{e1})$

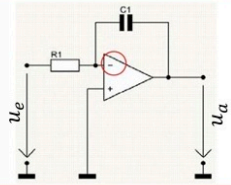
$\rightarrow R_1 = R_2 = R_I$

und $R_3 = R_4 = R_F$

$u_a = \frac{R_F}{R_I}(u_2 - u_1)$

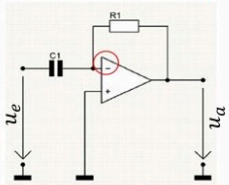
$\rightarrow R_I = R_F = R$

$u_a = u_2 - u_1$



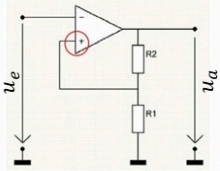
Invertierender Integrator

$u_a = -\frac{1}{R_1 \cdot C_1}\int u_e(t)dt + u_a(t=0)$



Invertierender Differenzierer

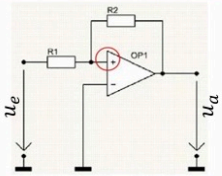
$u_a = -R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_e(t)}{dt}$



Invertierender Schmitt-Trigger

Einschaltschwelle $u_{ein} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \cdot u_{a-}$

Ausschaltschwelle $u_{aus} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \cdot u_{a+}$



Nicht-invertierender Schmitt-Trigger

Einschaltschwelle $u_{ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot u_{a-}$

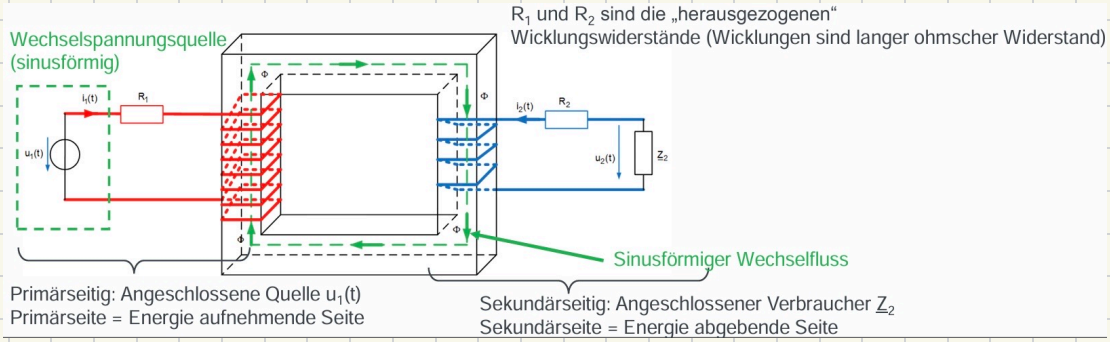
Ausschaltschwelle $u_{aus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot u_{a+}$

Integriert bis

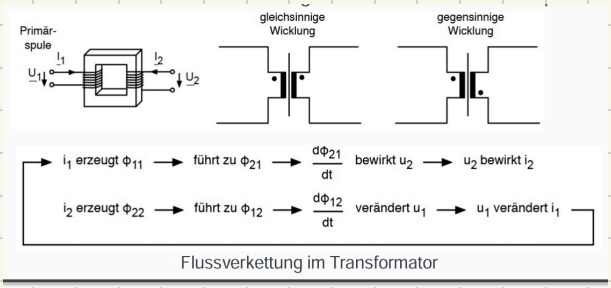
$u_a = U_{a,min} = -U_V$

Transformator (= nicht rotierende elektr. Maschine)

- für Erhöhen/Verringern von Wechselspannung



- Induktion $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$
- $\phi_{mag} = \int B \, \delta A$
- B const in geschlossener Schleife: $\phi_{mag} = B \cdot A$
- Induktivität $L_1 = \frac{w_1 \cdot \phi_m}{i_1}$
- Gegeninduktivität M in 2. Schleife: $w_2 \cdot \phi_{21} = M_{21} \cdot i_1$
- 2. Spule mit Strom i_2 betrieben: $w_2 \cdot \phi_{22} = L_2 \cdot i_2$
- Fluss von Spule 2 in Spule 1: $w_1 \cdot \phi_{12} = M_{12} \cdot i_2$
- $u(t) = L \cdot \frac{\delta i(t)}{\delta t}$



- $\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & j\omega L_2 \end{pmatrix}}_{\hat{=}\,\underline{Z}} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$

- mit Widerständen: $\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1+j\omega L_2 & j\omega M \\ j\omega M & R_2+j\omega L_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$

- Kopplungskonstante k: $k^2 = \frac{M^2}{L_1 \cdot L_2}$ $\begin{cases} k=1 & \text{perfekt, streulos} \\ k=0 & \text{keine} \end{cases}$

- Übersetzungsverhältnis $\bar{u}$: $\bar{u}^2 = \frac{L_1}{L_2}$; $\bar{u} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2}$

- Transformator mit beliebigen passiven Zweipol $\underline{Z}_L$ abgeschlossen: $\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = -\frac{j\omega M}{R_2+j\omega L_2+\underline{Z}_L}$

$$\underline{Z}_{EIN} = (R_1+j\omega L_1) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2+j\omega L_2+\underline{Z}_L}$$

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{j\omega M \cdot \underline{Z}_L}{(R_1+j\omega L_1)(R_2+j\omega L_2+\underline{Z}_L)+\omega^2 M^2}$$

- verlustloser Transformator ($R_1=0$, $R_2=0$): $\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = -\frac{k\cdot\bar{u}}{1+\frac{\underline{Z}_L}{j\omega L_2}}$; $\underline{Z}_{EIN} = j\omega L_1 \frac{(1+k^2)+\frac{\underline{Z}_L}{j\omega L_2}}{1+\frac{\underline{Z}_L}{j\omega L_2}}$; $\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{k}{\bar{u}} \cdot \frac{1}{1+j\omega L_2 \cdot \frac{1-k^2}{\underline{Z}_L}}$

- idealer Transformator: ($\left|\frac{\underline{Z}_L}{j\omega L_2}\right| \ll 1$) $\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = -\bar{u}$; $\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\bar{u}}$; $\underline{Z}_{EIN} = \bar{u}^2 \cdot \underline{Z}_L$

- Anwendungen: 1) kleinere U aus größeren U: Ladegeräte, Radio, PC, ...

2) hohe U aus kleineren U: Elektroschocker, Ölheizung

3) Hochspannungstechnik (sehr große Leistungen)

4) Impedanzwandler: $\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{w_1}{w_2}$; $\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = -\frac{w_2}{w_1}$; $\underline{Z}_1 = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 \cdot \underline{Z}_2$

5) Messwandler (Umsetzung hoher Spannungen), Signalübertragung

6. elektrische Maschinen

elektr. Seite	mech. Seite
- DC: $P_{el} = U \cdot I$	- Winkelgeschw.: $\Omega = 2\pi \cdot n$
- 1~AC: $P_{el} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$	- Leistung: $P_{mech} = \Omega \cdot M$
- 3~AC: $P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi)$	- Reibungsverluste: $P_R = \Omega \cdot M_R$

Elektrodynamisches Wirkprinzip

- Lorentz-Kraft auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld: $\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) = I \cdot l \cdot (\vec{e} \times \vec{B})$

- $\vec{F} = I\,(\vec{l} \times \vec{B})$ { stromdurchflossener Leiter: Kupfer mit $\sigma = 58 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$, $\delta = 8900 \frac{kg}{m^3}$; Magnetfeld: Permanentmagnete/Spulen; Eisen-(Kobalt-Nickel)-Legierungen } großes Gewicht

- Magnetfeld-Erzeugung: { durch Permanentmagnete: Gleichstrommaschine, Synchronmaschine ; durch Spulen: alle Maschine }

- Induktion: $u_{12}(t) = \int_2^1 (\vec{v}(t) \times \vec{B}(t)) \cdot d\vec{s} - w \cdot A(t) \cdot \frac{d\vec{B}(t)}{dt}$

  Bewegung des Leiters im Magnetfeld → Linearmotoren; zeitl. veränderliches Magnetfeld → Transformator; Minus bei rechtswendig: Daumen in Richtung $u_{12}(t)$, Finger in Richtung B

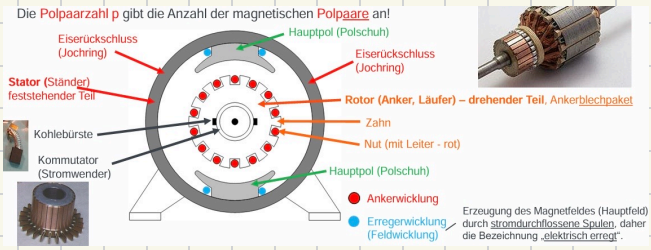
- Betriebszustände { Generator-Prinzip: $P_{mech} \rightarrow P_{el}$; Motor-Prinzip: $P_{mech} \leftarrow P_{el}$

Gleichstrommaschine GSM

- Warum benötigt? { oft nur Gleichspannung; als Universalmotor an Gleich- und Wechselspannung; Ausnutzen der Steuerbarkeit, Regelbarkeit, großen einfach verstellbaren Drehzahlbereichs

- Anwendungen: Spielzeug, Handy, Werkzeug, Schiff, Kran

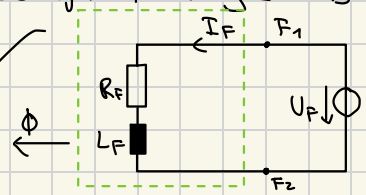
- Aufbau: 2-polig



- Funktionsweise: 1) Erregerwicklung an U_F schließen → I_F durch Spulen → magn. Feld

  2) Ankerkreis an U_A schließen → I_A über Kohlebürsten → stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld

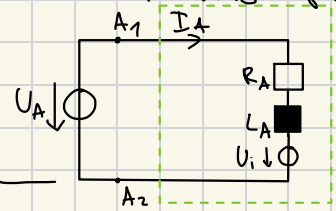
- ESB und Gleichungen: 1. Erregerkreis: Magnetfeld durch stromdurchflossene Spulen



fremderregte GSM

$I_F = \frac{U_F}{R_F}$; Verluste: $P_{VF} = \frac{U_F^2}{R_F}$; Magnetfluss $\Phi = k_F \cdot I_F \sim I_F$

2. Ankerkreis: Spule = reale Induktivität → L_A und R_A → Drehmomentbildung und U_i



$U_A = R_A \cdot I_A + U_i$; $I_A = \frac{U_A - U_i}{R_A}$

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

$U_i = c \cdot \Phi \cdot \Omega$; Drehmoment $M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A$; innere Drehmomente (elektr. erzeugt): $M = M_i - M_R$

→ Verbindung zw. elektr. und mech. Seite

→ I_A +: U_i nimmt E_{el} auf, gibt $E_{mech.}$ ab → Motorbetrieb

→ I_A −: U_i gib E_{el} ab, bekommt $E_{mech.}$ zurückgeführt → Generatorbetrieb

- 4-Quadrant-GSS: U_A ↑ → I_A

  1) $U_A > 0$, $I_A > 0$: nimmt P_{el} auf; Motor Rechtslauf

  2) $U_A > 0$, $I_A < 0$: gibt P_{el} ab: Generator Rechtslauf

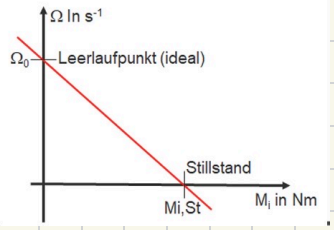
  3) $U_A < 0$, $I_A < 0$: nimmt P_{el} auf: Motor Linkslauf

  4) $U_A < 0$, $I_A > 0$: gibt P_{el} ab: Generator Linkslauf

Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie

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

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



6. Einführung in die elektrischen Maschinen

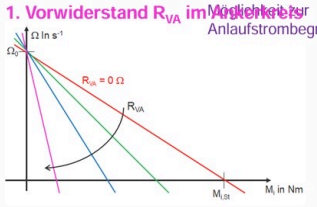
$$\Omega(M_i) = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{R_A + R_V}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M_i$$

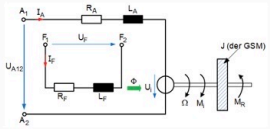
Die fremderregte GSM: Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie

Beeinflussungsmöglichkeiten:

1. Vorwiderstand R_{VA} im Ankerkreis

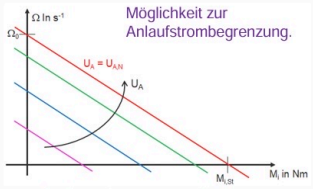
Möglichkeit zur Anlaufstrombegrenzung.



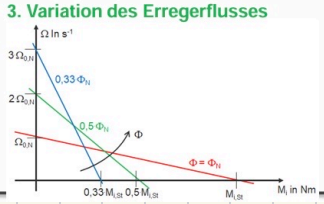


2. Verstellen der Ankerspannung

Möglichkeit zur Anlaufstrombegrenzung.

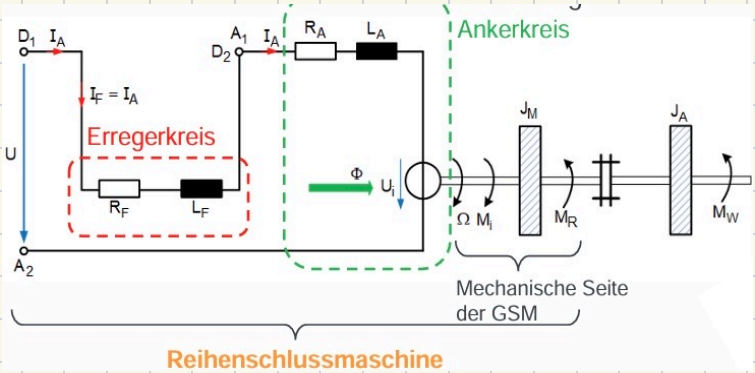


3. Variation des Erregerflusses

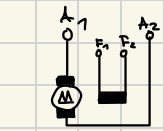


- permanentmagneterregte (PM)-GSM: Hauptfeld durch Permanentmagnet

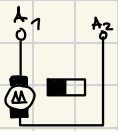
- Gleichstrom-Reihenschlussmaschine (GSRM): Erreger- und Ankerkreis in Reihe (Waschmaschine)



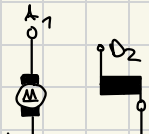
- Schaltzeichen:



Gleichstrommotor mit Fremderregung



Gleichstrommotor mit Permanentmagneterregung



Gleichstrommotor mit Reihenschlusserregung

→ Nachteil: hoher mech. Verschleiß der Schleifkontakte: Wartungsaufwand, Staub