

Grundlagen

Grundlagen Mechanik:

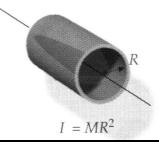
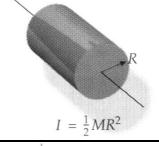
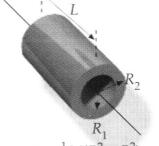
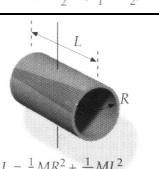
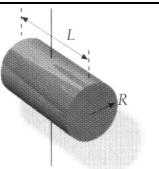
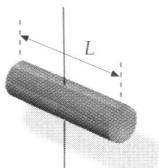
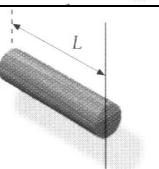
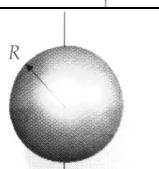
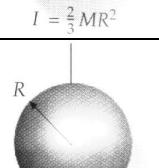
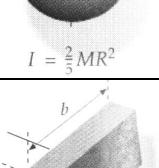
Translatorische Bewegung:			Rotatorische Bewegung:		
Grösse	Symbol	Einheit	Grösse	Symbol	Einheit
Weg	s	m	Winkel	φ	1
Geschwindigkeit	$v = \frac{ds}{dt}$	m/s	Kreisfrequenz	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	1/s
Beschleunigung	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	m/s ²	Winkelbeschl.	$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$	1/s ²
Kraft	$F = m \cdot a$ m : Masse	N kg	Drehmoment	$M = J \cdot \dot{\omega}$ J : Trägheitsmoment	Nm kg m ²
Impuls	$B = m \cdot v$	kg m/s	Drall	$D = J \cdot \omega$	kg m ² /s
Leistung	$P = F \cdot v$	W		$P = M \cdot \omega$	W
Energie	$W = \int p(t) \cdot dt$	Ws		$W = \int p(t) \cdot dt$	Ws
kin. Energie	$W_{kin} = \frac{mv^2}{2}$	Ws		$W_{kin} = \frac{J\omega^2}{2}$	Ws
pot. Energie	$W_{pot} = \int F(s)ds$	Ws		$W_{pot} = \int M(\varphi)d\varphi$	

Gegenüberstellung Kapazität und Induktivität:

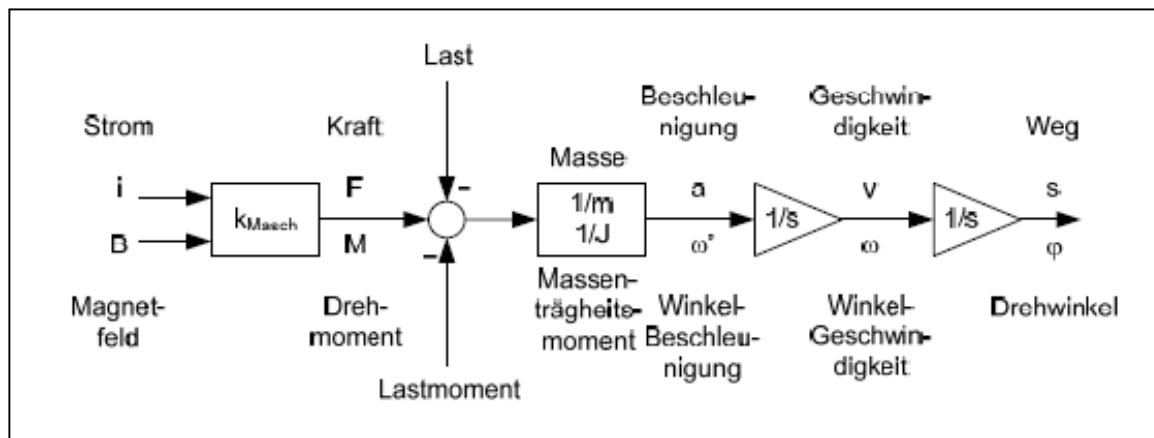
Zentrifugalkraft:	$F = \frac{m * v^2}{r} = m * r * \omega^2$	
-------------------	--	--

Drehmoment, Trägheitsmoment:

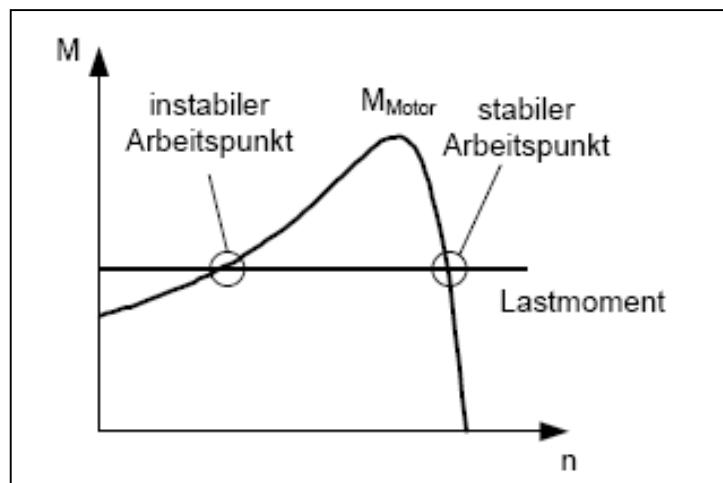
$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$ nicht! $\vec{\tau} = \vec{F} \times \vec{r}$	τ = Drehmoment [N m] F = Angreifende Kraft l = Hebelarm r = Abstand Kraft – Drehpunkt φ = Winkel zwischen F und r
$\tau_{res} = I \cdot \alpha$ Def: $\tau = F \cdot l = F \cdot r \cdot \sin \varphi = F_{tan} \cdot r$	I = Trägheitsmoment (\neq I = Kraftstoss) $I = [kg \cdot m^2]$

$a_{cm} = r \cdot \alpha$	Rollen ohne Rutschen
$I = I_{cm} + m \cdot h^2$	Kramersche Regel I_{cm} = Trägheitsmoment im Schwerpunkt h = Abstand Drehachse – Schwerpunkt
Zylinderhülle um Achse $I = m \cdot r^2$	
Silder Zylinder um Achse $I = \frac{1}{2}m \cdot r^2$	
Hohlzylinder um Achse $I = \frac{1}{2}m \cdot (r_1^2 + r_2^2)$	
Zylinderhülle um Mittelpunkt $I = \frac{1}{2}m \cdot r^2 + \frac{1}{12}m \cdot l^2$	
Silder Zylinder um Mittelpunkt $I = \frac{1}{4}m \cdot r^2 + \frac{1}{12}m \cdot l^2$	
Stab um Mitte $I = \frac{1}{12}m \cdot r^2$	
Stab Aussenrum $I = \frac{1}{3}m \cdot r^2$	
Kugelhülle $I = \frac{2}{3}m \cdot r^2$	
Kugel $I = \frac{2}{5}m \cdot r^2$	
Block durch den Mittelpunkt $I = \frac{1}{12}m \cdot (a^2 + b^2)$	

Wirkungskette elektrischer Maschinen:



Arbeitspunkte elektrischer Maschinen:



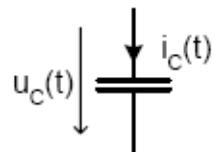
Ein stationärer Arbeitspunkt stellt sich dort ein, wo sich in der Drehzahl-Drehmomentkennlinie $M(n)$ die Kurve für das von der Maschine abgegebene Moment M_{Motor} mit der Kurve, die das Lastmoment beschreibt, schneidet. Man unterscheidet stabile und instabile Arbeitspunkte.

Anlaufmomente:

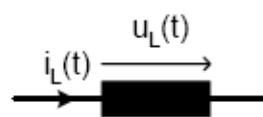
$$\begin{aligned} \text{Generatorbetrieb: } M_{\text{el}} &= M_{\text{mech}} - M_{\text{reib}} \\ \text{Motorbetrieb: } M_{\text{mech}} &= M_{\text{el}} - M_{\text{reib}} \end{aligned}$$

Gegenüberstellung Kapazität – Induktivität:

Kapazität

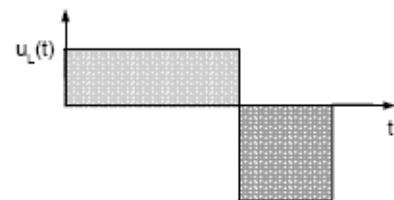
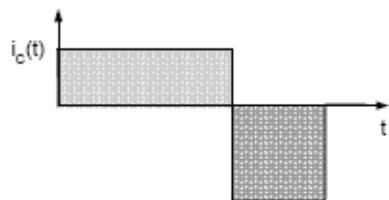


Induktivität



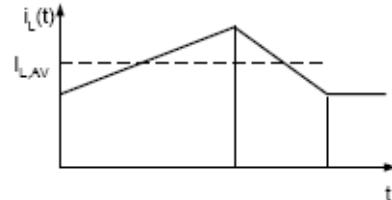
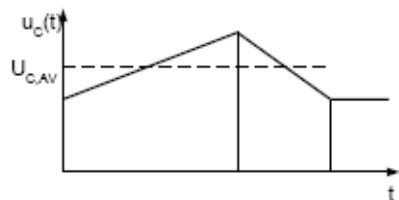
$$i_C = C \frac{du}{dt}$$

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$



$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{t}{C} I_C$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt = \frac{t}{L} U_L$$



$$i_C = C \frac{du}{dt}$$

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

Kurzschluss: $i_C \rightarrow \infty$

Leerlauf: $u_L \rightarrow \infty$

Grundelemente

$i(t) = u(t) / R$	$P = U_{eff} \cdot I_{eff}$	Ohmscher Widerstand R	$[R] = V / A = \Omega$
$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$	$W_{Feld} = C \cdot U^2 / 2$	Kapazität C	$[C] = A \cdot s / V = F$
$u(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_C(t) \cdot dt + K$	K = Integrationskonstante, meist ungleich $U_C(0)$	Die Spannungsänderung ist proportional zum fliessenden Strom. Die Spannung über der Kapazität kann nicht sprungartig ändern! Der Strom eilt der Spannung um 90° vor (nur bei sinusförmigen Signalen)	
$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$	$W_{mag} = L \cdot I^2 / 2$	Induktivität L	$[L] = V \cdot s / A = H$
$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int u_L(t) \cdot dt + K$	K = Integrationskonstante, meist ungleich $I_L(0)$	Die Stromänderung ist proportional zur anliegenden Spannung. Der Strom durch die Induktivität kann nicht sprunghaft ändern! Der Strom eilt der Spannung um 90° nach (nur bei sinusförmigen Signalen)	

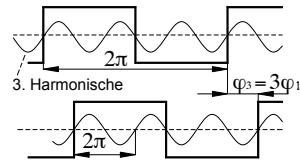
Mittelwerte periodischer Größen

$\bar{u} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(\omega t) d(\omega t)$	Reine Wechselgrösse: $\bar{u} = 0$	Gleichwert \bar{u} Arithmetischer Mittelwert t_1 = Anfangszeitpunkt T = Dauer des betrachteten Abschnittes
$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x^2(\omega t) d(\omega t)}$		Effektivwert U / U_{eff} Quadratischer Mittelwert T = Periodendauer
$U = \sqrt{\underbrace{U_0^2}_{DC-Anteil} + \underbrace{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}_{AC-Anteil}}$		Effektivwert von Mischgrössen U_0 = Gleichanteil U_1 = Effektivwert der Grundschwingung (1. Oberwelle)

Leistungen pro Phase

$p(t) = u(t) \cdot i(t)$	Leistungs-Momentanwert p(t)
$P = \frac{1}{T_P} \cdot \int_0^{T_P} u(t) \cdot i(t) \cdot dt$	Leistungs-Mittelwert P T_P = Periodendauer der Leistung $[P] = W$
$S = U \cdot I$ Effektiv-, nicht Mittelwerte!	Scheinleistung S $[S] = VA$
$Q_{tot} = \sqrt{S^2 - P^2}$	Gesamte Blindleistung Q_{tot} $[Q] = var$
$Q_{Gs} = U \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi)$ Q _{GS} entsteht durch L und C (\Rightarrow Phasenverschiebung)	Grundschwingungsblindleistung Q _{GS}
$Q_{Vz} = \sqrt{Q_{tot}^2 - Q_{Gs}^2}$ $Q_{Vz} = U \cdot \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} I_v^2}$ Q _{VZ} entsteht durch Schaltvorgänge (\Rightarrow Ströme nicht mehr sinusförmig \Rightarrow Oberschwingungen)	Verzerrungsblindleistung Q _{VZ} U = Effektivwert der Spannung I _v = Strom-Effektivwert der v-ten Oberschwingung
$\lambda = P / S$ Bei sinusförmigen Grössen: $\lambda = \cos(\varphi)$	Leistungsfaktor λ φ = Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

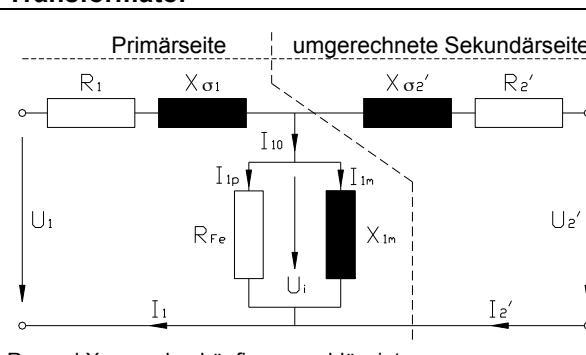
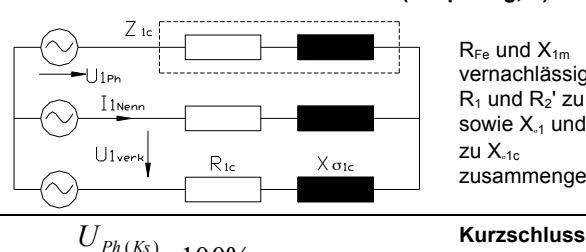
Qualitäts-Kennwerte von Wechselgrößen

$k = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}{U}} = \sqrt{\frac{U^2 - U_1^2}{U}}$ <p>2. Formel gilt nur bei reiner Wechselgröße! Sonst auch Gleichanteil quadratisch subtrahieren!</p>	Klirrfaktor k U = Effektivwert der v-ten Oberschwingung U = Effektivwert der ges. Spannung	Manchmal wird Oberschwingungsanteil auf die Grundschwingung anstatt auf den gesamten Effektivwert bezogen.
$k_s = \hat{U}/U$	Scheitelfaktor ks	Verhältnis von Scheitelwert \hat{U} und Effektivwert U periodischer Größen
$w = \frac{U_{\sim}}{U_d} = \sqrt{\frac{U^2 - U_d^2}{U_d}}$	Welligkeit w U _~ = Effektivwert der überlagerten Wechselspannung U _d = Gleichspannung U = Effektivwert der gesamten Spannung	
 <p> $\varphi_v = v \cdot \varphi_1$ Elimination von Oberschwingungen: $\varphi_v = 180^\circ \cdot n_u$ </p>	Phasenverschiebung verzerrter Größen φ_1 = Phasenverschiebung des Signals / der Grundschwingung φ_v = Phasenverschiebung der v-ten Oberwelle n_u = ungerade ganze Zahl	

Fourierreihe

$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot \omega_T \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n \cdot \omega_T \cdot t)$	Fourierreihen-Darstellung $\omega_T = 2\pi/T$
$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \cos(n \cdot \omega_T \cdot t) \cdot dt$ $b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \sin(n \cdot \omega_T \cdot t) \cdot dt$	Fourier-Koeffizienten Winkel und Zeit nicht verwechseln! $x = \omega \cdot t$ <ul style="list-style-type: none"> gerade Funktionen ($x(-t) = x(t)$; symmetrisch zur y-Achse): nur a_n-Glieder (Kosinus), alle $b_n = 0$ ungerade Funktionen ($x(-t) = -x(t)$; symm. zum Ursprung): Nur b_n-Glieder, (Sinus), alle $a_n = 0$
$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot x) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n \cdot x)$	Fourierreihen-Darstellung Periode 2π
$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} x(x) \cdot \cos(n \cdot x) \cdot dx$ $b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} x(x) \cdot \sin(n \cdot x) \cdot dx$	Fourier-Koeffizienten Fourierkoeff. 2π periodisch <ul style="list-style-type: none"> gerade Funktionen ($x(-t) = x(t)$; symmetrisch zur y-Achse): nur a_n-Glieder (Kosinus), alle $b_n = 0$ ungerade Funktionen ($x(-t) = -x(t)$; symm. zum Ursprung): Nur b_n-Glieder, (Sinus), alle $a_n = 0$

Transformator

 <p>R_{Fe} und X_{1m} werden häufig vernachlässigt.</p>	Ersatzschaltbild (einphasig) U_2' = umgerechnete Sekundärspannung R_1 = primärer Wicklungswiderstand (Kupferverluste) X_1 = primäre Streuinduktivität R_{Fe} = Ersatzwiderstand für Eisenverluste (Ummagnetisierung) X_{1m} = Hauptreaktanze U_i = induzierte Spannung (Sekundär-Leerlaufspannung) I_{10} = Leerlaufstrom
Vereinfachtes Ersatzschaltbild (dreiphasig, Y)  <p>Z_{1c} = Kombinierte Impedanz des Trafos $U_{Ph(Ks)} = \sqrt{3} \cdot U_{Ph}$</p>	Übersetzung ü $\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ $U_2' = U_2 \cdot \ddot{u}$ $I_2' = I_2 / \ddot{u}$ $X_{\sigma 2}' = X_{\sigma 2} \cdot \ddot{u}^2$ <p>Ströme / Spannungen werden mit \ddot{u}, Impedanzen mit \ddot{u}^2 auf die andere Trafoseite umgerechnet. Umrechnungen gelten nur im Leerlauf.</p>
	$I_{Nenn} = \frac{S_{Ph}}{U_{Ph Nenn}}$ $Z_{1c} = \frac{U_{Ph(Ks) Nenn}}{I_{Nenn}}$ <p>S_{Ph} = Scheinleistung pro Phase $U_{Ph Nenn}$ = Nenn-Phasenspannung $U_{Ph(Ks)}$ = Phasenspannung bei Nennstrom im Kurzschlussbetrieb Z_{1c} = Kombinierte Impedanz des Trafos $U_{1 verk} = \sqrt{3} \cdot U_{Ph}$</p>

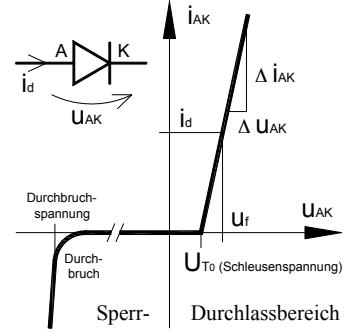
$\varepsilon_R = \frac{U_{Rlc}}{U_{Ph\ Nenn}} \cdot 100\% = \varepsilon_K \cdot \cos(\varphi_K)$	Nötige Phasen-Spannung, damit am kurzgeschlossenen Ausgang Nennstrom fließt. Primär- und sekundärseitig tritt gleichzeitig Nennstrom auf.
$\varepsilon_X = \frac{U_{X\sigma lc}}{U_{Ph\ Nenn}} \cdot 100\% = \varepsilon_K \cdot \sin(\varphi_K)$	

Kurzschlussspannung U_{Ph} (KS)

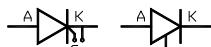
ε_K = relative Kurzschlussspannung in %
 ε_R = ohmscher Anteil der Kurschlussspannung
 ε_X = induktiver Anteil der Kurschlussspannung
 φ_K = Verschiebung zwischen Phasenspannung und Leiterstrom der entsprechenden Phase im Kurschluss
 Die Absolutwerte der Kurzschlussspannungen sind für Primär- und Sekundärseite verschieden, die relativen Werte jedoch identisch.

Diode

$r_d = \frac{\Delta u_{AK}}{\Delta i_{AK}} = \frac{1}{\text{Kurvensteigung}}$	Differentieller Widerstand r_d
$u_f = U_{T_0} + r_d \cdot i_d$	Durchgangsspannung $u_f(t)$
$p = u_f \cdot i_d = U_{T_0} \cdot i_d + r_d \cdot i_d^2$ $P = \frac{U_{T_0}}{T} \cdot \int_0^T i_d \cdot dt + \frac{r_d}{T} \cdot \int_0^T i_d^2 \cdot dt$ $P = U_{T_0} \cdot I_{d\text{ mittel}} + r_d \cdot I_{d\text{ eff}}^2$	Verlustleistung $p(t) / P$ U_{T_0} = Schleusenspannung (konstant) $I_{d\text{ mittel}}$ = Mittelwert des Diodenstromes $I_{d\text{ eff}}$ = Effektivwert des Diodenstromes



Thyristor



Abschaltbare Elemente



- Sperrt solange in Vorrätsrichtung, bis er durch einen Steuerimpuls am Gate gezündet wird
- Lässt sich nicht über das Gate ausschalten, sondern leitet solange, bis ein minimaler Haltestrom unterschritten wird

- Lassen sich über die Steueranschlüsse ein- und ausschalten.
- Ventilwirkung gleich wie bei Diode
- Beispiele: GTO, Leistungstransistoren, MOSFET, IGBT, IGCT

Verluste am Schalter

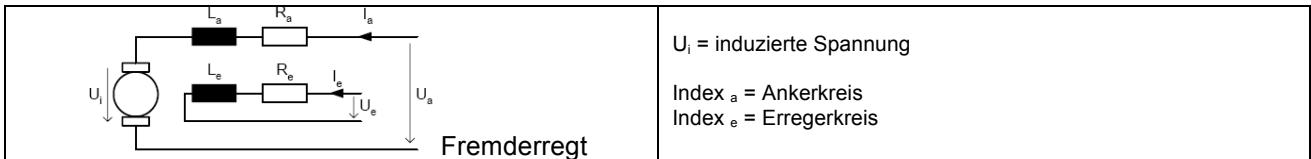
$$\text{Gesamtverluste} = \text{Schaltverluste} + \text{Durchlassverluste} + \text{Sperr- und Blockierverluste} + \text{Steuerleistung}$$

Schaltverluste:

$E_{ein} = \int_0^{T_{ein}} u(t) \cdot i(t) \cdot dt$	$E_{aus} = \int_0^{T_{aus}} u(t) \cdot i(t) \cdot dt$
$P_{V,Schalt} = (E_{ein} + E_{aus}) \cdot F$	$F = \text{Schaltfrequenz}$

Gleichstrommaschine

Ersatzschaltbild



Generatorbetrieb

$U_i = c \cdot \phi \cdot \omega_m$ Die Statorwicklung wird gespeist, es entsteht ein magn. Fluss Φ . Wenn der Rotor dreht, wird an der Rotorwicklung eine Spannung U_i induziert, die vom Kollektor mechanisch gleichgerichtet wird.	Mittelwert der induzierten Rotorspannung U_i c = Maschinenkonstante $[c] = 1$ ϕ = magnetischer Fluss $[\phi] = V \cdot s$ ω_m = Winkelgeschwindigkeit des Rotors $[\omega_m] = s^{-1}$
---	---

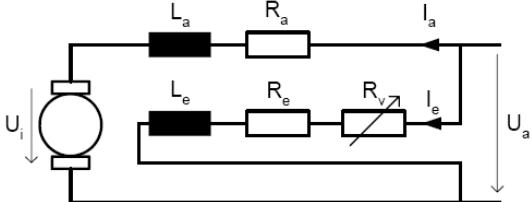
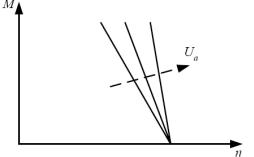
Motorbetrieb, Im Verbraucherpfilsystem, positiv wenn Motorbetrieb.

$m_{el} = c \cdot \phi \cdot i_a$ $M_{el} = c \cdot \phi \cdot I_a$ $M_{el} = M_{Welle} + M_R + J \frac{d\omega_m}{dt}$	Drehmoment m/M $[M] = N \cdot m$ i = momentaner Strom I = Mittelwert des Rotorstrom (≠ Effektivwert!) m_{el} = momentanes Drehmoment M_{el} = Mittelwert des Drehmomentes (mittleres Lastmoment) M_R = Reibungsmoment J = Trägheitsmoment
$\omega_m \approx \frac{U_R}{c \cdot \phi}$ Verluste werden vernachlässigt Genau: $\omega_m = \frac{U_i}{c \cdot \phi}$	Winkelgeschwindigkeit des Rotors ω_m $[\omega_m] = s^{-1}$ U_R = an den Rotor angelegte Spannung
$u_a(t) = i_a(t) \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + u_i(t)$ $u_e(t) = i_e(t) \cdot R_e + L_e \cdot \frac{di_e(t)}{dt}$ $U_i = c \cdot \phi \cdot \omega_m$	Spannungsgleichung R_a = Gesamter Rotorwiderstand L_a = Gesamte Rotorinduktivität U_a = an den Rotor angelegte U u_i = induzierte Gegenspannung
$\phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e$	Erregerfluss ϕ $[\phi] = V \cdot s$

Fremderregte Maschine

$U_a = I_a \cdot R_a + U_i = c \cdot \phi \cdot \omega_m + R_a \cdot I_a$	Gilt für stationäre Bedingungen
$\omega_m = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{c \cdot \phi}$ und $M_{el} = c \cdot \phi \cdot I_a$ $\omega_m = \frac{U_a}{c \cdot \phi} - \frac{M_{el} \cdot R_a}{(c \cdot \phi)^2}$	Lastkennlinie
$\omega_{m0} = \frac{U_a}{c \cdot \phi}$ $n_0 = \omega_{m0} \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} [U / \text{min}]$	Leerlauf, ($M=0 \Rightarrow I_a=0 \Rightarrow U_a=U_i$) ω_{m0} = mechanische Leerlauf Kreisfrequenz n_0 = Leerlaufdrehzahl

Die Nebenschlussmaschine

	<p>Ersatzschaltbild</p> <p>U_i = induzierte Spannung</p> <p>Index _a = Ankerkreis Index _e = Erregerkreis</p> <p>R_v = Vorwiderstand (Einstellung der Erregung)</p>
$\phi = \frac{L_e \cdot I_e}{N_e} = \frac{L_e}{N_e} \cdot \frac{U_a}{R_e + R_v}$	<p>Erregerfluss ϕ $[\phi] = V \cdot s$</p>
$\omega_{m0} = \frac{U_a}{c \cdot \phi} = \frac{U_a}{c} \cdot \frac{1}{\frac{L_e \cdot U_a}{N_e (R_e + R_v)}} = \frac{N_e (R_e + R_v)}{c \cdot L_e}$	<p>Leerlaufdrehzahl des Rotors ω_m $[\omega_m] = s^{-1}$</p> <p>ω_m = Drehfrequenz Welle</p>
$\omega_m = \frac{N_e (R_e + R_v)}{c \cdot L_e} - \frac{R_a \cdot (R_e + R_v)^2 \cdot N_e^2}{(c \cdot L_e \cdot U_a)^2} \cdot M_{el}$	<p>Lastkennlinie</p> <p>Drehzahl</p> 
$P_{mech} = M \cdot \omega_m$ $P_{el} = U_e \cdot I_e + U_a \cdot I_a$ $\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}}$	

Die Seriemaschine

	<p>Ersatzschaltbild</p> <p>U_i = induzierte Spannung Index _a = Ankerkreis Index _e = Erregerkreis</p>
$\phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_a \quad I_e = I_a$	<p>Erregerfluss ϕ</p> $[\phi] = V \cdot s$
$\omega_m = \frac{U_a - (R_e + R_v) \cdot I_a}{c \cdot \frac{L_e}{N_e} \cdot I_a}$ $M_{el} = c \cdot \frac{L_e}{N_e} \cdot I_a^2 = c \cdot \phi \cdot I_a$	<p>Lastkennlinie</p>

Der Universalmotor (Kolektormotor)

	<p>Ersatzschaltbild</p> <p>Da der Universalmotor mit Gleichstrom und Wechselstrom betrieben werden kann werden mit Komplexen Größen gerechnet.</p> <p>U_i = induzierte Spannung Index _a = Ankerkreis Index _e = Erregerkreis</p>
$\underline{U}_e = \underline{I} \cdot R_e + j\omega \underline{L}_e \underline{I}$ $\underline{U}_a = \underline{I} \cdot R_a + j\omega \underline{L}_a \underline{I}$ $\underline{U}_i = c \cdot \underline{\Phi}_{de} \cdot \omega_m$	<p>Speisung</p> <p>Bei Speisung mit AC müssen die Induktivitäten berücksichtigt werden.</p> <p>ω_m = Drehfrequenz mech. Welle</p>
$\underline{U} = \underline{U}_a + \underline{U}_e + \underline{U}_i$ $\underline{U} = \underline{U}_i + \underline{I}(R_a + R_e) + j\omega \underline{I}(L_a + L_e)$	<p>Zeigerdiagramm</p>
$M_{el} = c \cdot \underline{\Phi}_{de} \cdot I = k \cdot I^2$ $\omega_m = \frac{U_i}{c \cdot \underline{\Phi}_{de}} = \frac{U_i}{k \cdot I}$	$k = \frac{c \cdot \underline{\Phi}_{de}}{I}$ $\omega_m \sim \frac{U_i}{\sqrt{M_{el}}}$ $M_{el} \sim I^2$ <p>c = Maschinen konstante k = Erregungskonstante</p>

Gleichstromsteller (Chopper)

Abwärtssteller

<p> $U_1 = \text{konst}$ $i_1(t)$ S D L $i_2(t)$ R $u_2(t)$ $u_{C2}(t)$ C </p>	<ul style="list-style-type: none"> Ausgangsspannung ist tiefer als Quellenspannung $U_1 = \text{Quellenspannung}$ $S = \text{Leistungsschalter, z.B. GTO}$ $D = \text{Freilaufdiode}$ $L = \text{Glättungsinduktivität im Lastkreis}$ $C = \text{Glättungskapazität im Lastkreis}$
$P_1 = U_1 \cdot I_{1,AV} = a \cdot U_1 \cdot I_{2,AV}$ $P_2 = U_{2,AV} \cdot I_{2,AV} = a \cdot U_1 \cdot I_{2,AV}$ $I_{1,AV} = a \cdot I_{2,AV}$	Leistungsaufnahme P $[P] = W$ Verlustfrei $P_1 = P_2$ $I_{1,AV} = \text{Mittelwert des Eingangstromes}$
$\frac{di_2}{dt} = \frac{U_1 - U_{2,AV}}{L}$ Stromrippelsteilheit steigender Strom t_{ein}	
$\frac{di_2}{dt} = -\frac{U_{2,AV}}{L}$ sinkender Strom t_{aus}	

Nichtlückender Betrieb

<p> Strom durch S Strom durch D T_{Ein} T_{Aus} T U_1 $U_{2,AV}$ </p>	$a = \frac{T_{\text{Ein}}}{T}$	Tastverhältnis a
	$U_{2,AV} = \frac{t_{\text{ein}}}{T} \cdot U_1 = \frac{T - t_{\text{aus}}}{T} \cdot U_1 = a \cdot U_1$	Mittelwert $U_{2,AV}$ der Ausgangsspannung $T = \text{Periodendauer}$ $T_{\text{Ein}} = \text{Zeit, während der S eingeschaltet ist}$ $T_{\text{Aus}} = \text{Zeit, während der S ausgeschaltet ist}$

Lückbetrieb

<p> T_{Ein} $\sim u_2(t)$ T_{Aus} U_1 $U_{2,AV}$ $i_2=0$ S leitend DF leitend DF + S gesperrt </p>	Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung ist lastabhängig! Mittelwert der Ausgangsspannung steigt bei Lückbetrieb	Chopper-Ausgangsspannung $u_2(t)$ (Bezeichnungen siehe folgende Skizze)
---	---	--

Abwärtssteller mit Standartgleichstromlast

<p> $U_1 = \text{konst}$ $i_1(t)$ S D L $i_2(t)$ R $u_2(t)$ U_0 $U_{2RU}(t)$ </p>	<ul style="list-style-type: none"> Ausgangsspannung ist tiefer als Quellenspannung $U_1 = \text{Quellenspannung}$ $S = \text{Leistungsschalter, z.B. GTO}$ $D = \text{Freilaufdiode}$ $L = \text{Induktivität der Last}$ $R = \text{Widerstand der Last}$ $U_0 = \text{Gegenspannung der Last (z.B. } U_i \text{ eines Motors)}$
$U_{2,AV} = R \cdot I_{2,AV} + U_0$ $I_{2,AV} = \frac{U_0 - U_{2,AV}}{R}$	Spannung und Strom in der Last $I_{2,AV} = \text{Mittelwert des Laststromes}$ $U_{2,AV} = \text{Mittelwert des Lastspannung}$

Aufwärtssteller

<p> $U_1 = \text{konst}$ $i_1(t)$ L S D $i_2(t)$ $u_s(t)$ $u_2(t)$ C R $i_L(t)$ </p>	<ul style="list-style-type: none"> Ausgangsspannung ist höher als Quellenspannung $U_1 = \text{Quellenspannung}$ $S = \text{Leistungsschalter, z.B. GTO}$ $D = \text{Freilaufdiode}$ $L = \text{Glättungsinduktivität}$ $C = \text{Glättungskapazität im Lastkreis}$
---	---

$\int U_l \cdot dt = U_1 \cdot t_{ein} + (U_1 - U_2) \cdot t_{aus} = 0$ mit $a = \frac{t_{ein}}{T}$ $U_{2,AV} = \frac{U_1}{1-a}$	Ausgangsspannung
$I_{2,AV} = I_{1,AV} \cdot (1-a) = \frac{U_{2,AV}}{R}$	Ausgangstrom

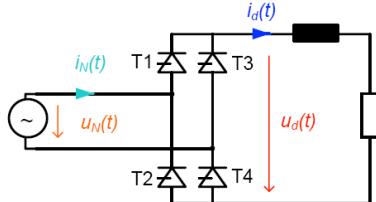
Fremdgeführte Stromrichter

Schaltungsarten

M1 	Einpulsige Mittelpunktsschaltung. Einfachster Gleichrichter. Heute nicht mehr verwendet wegen DC-Komponente im Transformatorstrom.
M2 	Zweipulsige Mittelpunktsschaltung. Selten verwendet wegen aufwändigem, schlecht ausgenutzenem Transformator. z.T. auch als zweiphasig bezeichnet.
M3 	Dreipulsige Mittelpunktsschaltung. Heute nicht mehr verwendet wegen DC-Komponente im Transformatorstrom.
B2 <p>oder</p>	Zweipulsige Brückenschaltung. Gebräuchlichste Schaltung für kleinere Leistungen
B6 	Doppelstern-Saugdrossel-Schaltung, sechspulsig. Aufwändiger Transformator und zusätzliche Saugdrossel. Einsatzgebiet bei sehr hohen Strömen und kleinen Spannungen.

<p>sechspulsige Brückenschaltung</p>	<p>Doppelstern-Saugdrossel-Schaltung, sechspulsig. Aufwändiger Transformator und zusätzliche Saugdrossel. Einsatzgebiet bei sehr hohen Strömen und kleinen Spannungen.</p>
<p>Ungesteuerte B2 mit R-Last → Steuerwinkel 0°</p> <p>$U_{di0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi u_d \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_N = 0.900 \cdot U_N$</p>	<p>U_{di0} Idealer Gleichspannungs-Mittelwert (Spannungsabfälle vernachlässigt) bei Steuerwinkel $\alpha = 0$ dito, beim aktuellen Steuerwinkel α I_d zeitlich konstanter Gleichstrom $i_N(t)$ zeitlicher Verlauf des Netzstromes</p>
<p>Gesteuerte B2 mit R-Last → Steuerwinkel einstellbar</p> <p>$U_{dia} = \frac{1}{\pi} \int_\alpha^\pi u_d \cdot d(\omega \cdot t) = U_{di0} \cdot \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}$</p> <p>$U_{dia} = U \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot (1 + \cos(\alpha)) = \frac{U_{di0}}{2} \cdot (1 + \cos(\alpha))$</p>	<p>Kurvenform bei einer B2- Schaltung mit ohmscher Last und einem Steuerwinkel von ca 60°</p> <p>U_{di0} Idealer Gleichspannungs-Mittelwert (Spannungsabfälle vernachlässigt) bei Steuerwinkel $\alpha = 0$ dito, beim aktuellen Steuerwinkel α I_d zeitlich konstanter Gleichstrom $i_N(t)$ zeitlicher Verlauf des Netzstromes α Zündwinkel</p>
<p>Ungesteuerte B2 mit L- Glättung → Steuerwinkel 0°</p> <p>$U_{di0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi u_d \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_N = 0.900 \cdot U_N$</p>	<p>Kurvenform der ungesteuerten B2- Schaltung mit idealer Stromglättung ($L_d = \infty$)</p>

Gesteuerte B2 mit L-Glättung → Steuerwinkel 60°



$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} u_d \cdot d(\omega \cdot t) = U_{di0} \cdot \cos(\alpha) = \frac{1}{\pi} \cdot \hat{U}_N \cdot 2 \cdot \cos(\alpha)$$

$$\alpha_{max} < \pi - \omega f$$

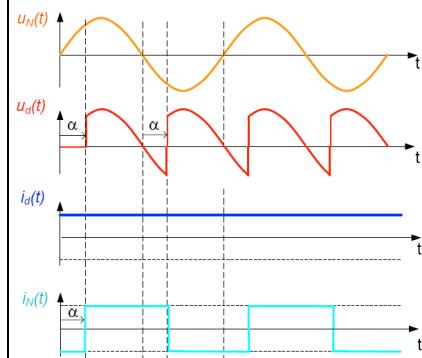
mit: α = Zündwinkel

mit: $\alpha > 90^\circ$: wird von Last Leistung ins Netz gespeist
(Wechselrichterbetrieb)

Leistung bei idealer L-Glättung:

$$P_{di\alpha} = U_{di\alpha} \cdot I_d = U_{di0} \cdot \cos(\alpha) \cdot I_d = P_{di0} \cdot \cos(\alpha)$$

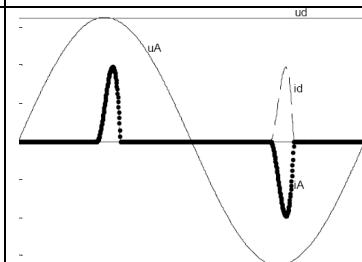
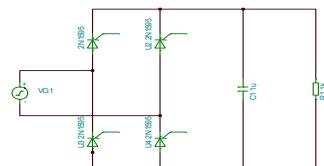
(Skript Seite 11)



Kurvenform der gesteuerten B2-Schaltung mit $L_d = \infty$ und α ungefähr 60°

Bei einem Zündwinkel von 90° wird die mittlere Ausgangsspannung Null.

Gesteuerte B2 mit C Last → Steuerwinkel 0°



Steuerkennlinien

R-Last:

$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_d \cdot d(\omega t) = U_{di0} \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}$$

L-Glättung:

$$U_{di\alpha} = U_{di0} \cos(\alpha) \quad (0^\circ < \alpha < 180^\circ)$$

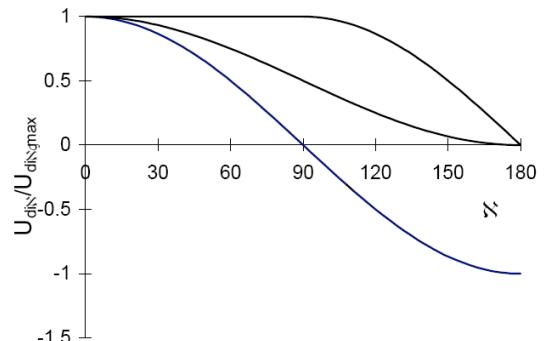
Bei Betrieb mit $\alpha > 90^\circ$ Wechselrichterbetrieb, der eine „aktive Last“ bedingt, z.B. Generatorbetrieb einer GM.

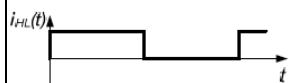
C-Last (Spitzenwertgleichrichtung):

$$U_{di\alpha} = U_I \sqrt{2} \quad (0^\circ < \alpha < 90^\circ)$$

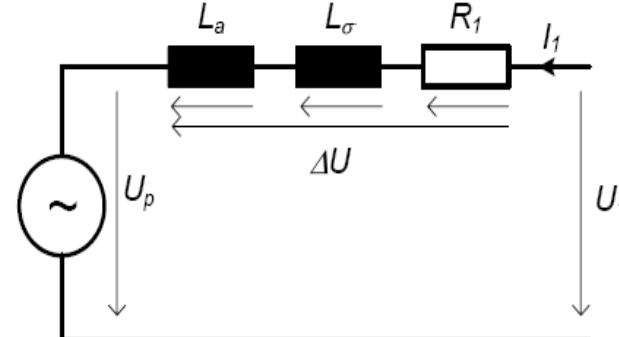
$$U_{di\alpha} = U_I \sqrt{2} \sin(\alpha) \quad (90^\circ < \alpha < 180^\circ) \text{ (selten)}$$

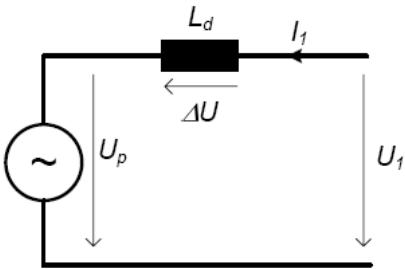
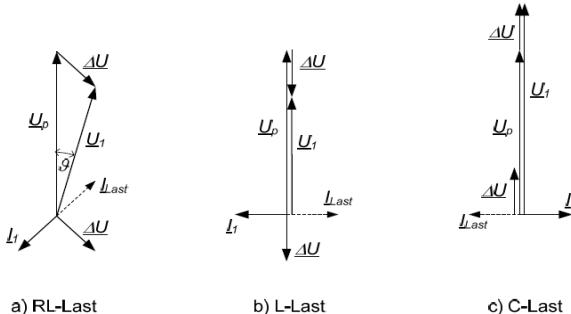
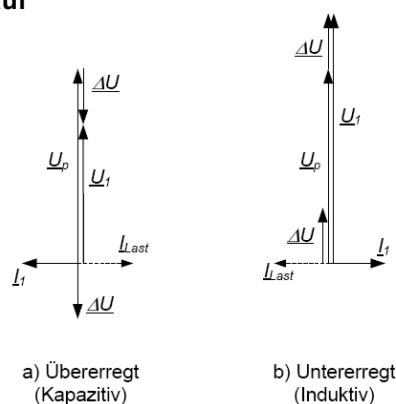
Steuerkennlinien B2-Schaltung

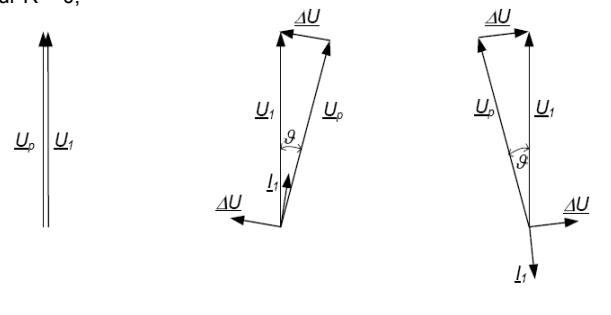
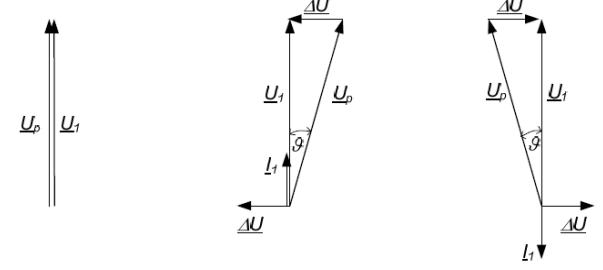


<p>Leistung bei L-Glättung bei B2</p> <p>Wirkleistung, Gleichstromleistung</p> $P_{di\alpha} = I_d \cdot U_{di\alpha} = I_d \cdot U_{di0} \cos(\alpha) = P_{di0} \cos(\alpha)$ <p>Sekundäre Scheinleistung</p> $I_{N_rms} = I_d$ $S_N = U_{N_rms} \cdot I_{N_rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{di0} \cdot I_d = P_{di0} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \cdot P_{di0}$ <p>Leistungsfaktor</p> $\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P_{di\alpha}}{1.11 \cdot P_{di0}} = \frac{\cos(\alpha)}{1.11}$	<p>I_d ist konstant</p> <p>Der Netzstrom, bzw. der Strom in der Transformatorensekundärwicklung, ist rechteckförmig mit der Amplitude I_d. Der Transformator muss also auf das 1.11-fache der übertragenen Wirkleistung ausgelegt werden. Wenn α grösser wird, sinkt die Wirkleistung noch weiter ab.</p>
<p>Belastung der Halbleiter bei L-Glättung bei B2</p> $i_{HL_eff} = \sqrt{\frac{1}{2}} I_d$ $i_{HL_avg} = \frac{1}{2} I_d$	 <p>Der Gleichstrom hat folgenden zeitlichen Verlauf in einer der Dioden</p>

Synchronmaschine

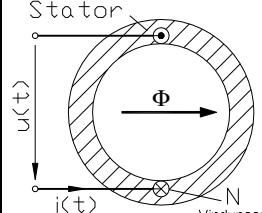
<p>Vollpolmaschine</p>  $L_d = L_a + L_o$	<p>Ersatzschaltung</p> <p> L_a = Hauptinduktivität L_o = Streuinduktivität R_1 = Wicklungswiderstand U_1 = Statorklemmenspannung U_p = Polradspannung L_d = Induktivität der Statorwicklung </p>																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>p</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>n_{sym} / min</td><td>3000</td><td>1500</td><td>1000</td><td>750</td><td>600</td></tr> </tbody> </table> <p>für $f_s = 50 \text{ Hz}$ Netz</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>p</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>n_{sym} / min</td><td>3600</td><td>1800</td><td>1200</td><td>900</td><td>720</td></tr> </tbody> </table> <p>für $f_s = 60 \text{ Hz}$ Netz</p> <p>berechnet mit Formel $n_{sym} = \frac{f_s}{p} \cdot 60$</p>	p	1	2	3	4	5	n_{sym} / min	3000	1500	1000	750	600	p	1	2	3	4	5	n_{sym} / min	3600	1800	1200	900	720	<p>Drehzahl symmetrisch n_{sym}</p> <p> p = Polpaarzahl f_s = Statorfrequenz n_{sym} = Drehzahl Rotor </p>
p	1	2	3	4	5																				
n_{sym} / min	3000	1500	1000	750	600																				
p	1	2	3	4	5																				
n_{sym} / min	3600	1800	1200	900	720																				
$P = M_{mech} \omega_{mech} = 3(U_{1d} I_{1d} + U_{1q} I_{1q} - R_1(I_{1d}^2 + I_{1q}^2))$ <p>Ohmsche Verluste vernachlässigt:</p> $P = \omega_{mech} \cdot M_{mech} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin(\vartheta) = 3 \cdot U_p \cdot I_{1q}$ $M_{mech} = p \cdot M_{el}$	<p>Moment und Kreisfrequenz</p> <p> M_{mech} = Moment an der Welle ω_{mech} = Kreisfrequenz an der Welle ω_{el} = Maschine dreht ohne Berücksicht. $p = 1$ ω_1 = Speisekreisfrequenz Stator 3 = Anzahl Phasen! </p>																								

$\omega_{mech} = \frac{\omega_{el}}{p}$ $\omega_{el} = \omega_1 \cdot p$	Bei grösserer Polpaarzahl verkleinert sich die Drehzahl um den Faktor p und das Drehmoment vergrössert sich um den Faktor p	
	Vereinfachtes Ersatzschaltung Bei grossen Maschinen ist der Widerstand im Vergleich zu den Reaktanzen sehr klein und kann deshalb für viele Betrachtungen vernachlässigt werden. U_1 = Statorklemmenspannung U_p = Polradspannung L_d = Induktivität der Statorwicklung ($L_d = L_a + L_\sigma$)	
Zeigerdarstellungen: Inselbetrieb		Im Leerlauf
Für $R = 0$;		

Zeigerdarstellungen: nennerregte Maschine	Leistungsfaktor 1
Für $R = 0$;	
	
a) Leerlauf b) Motorbetrieb c) Generatorbetrieb	a) Leerlauf b) Motorbetrieb c) Generatorbetrieb
$U_p = j \cdot \omega_{el} \cdot \psi_p$ $ U_p = \omega_{el} \cdot \psi_p $ $\Delta U = j \cdot X_d \cdot I_1 + R_1 \cdot I_1$ $U_1 = U_p + \Delta U$ $I_1 = \frac{U_1 - U_p}{j \cdot X_d}$ $X_d = \omega \cdot L_d = \omega \cdot (L_a + L_\sigma)$ $U_1 = I_1 \cdot (R_1 + j \cdot \omega_1 \cdot L_d) + j \cdot U_p$ $I_1 = \frac{U_1 - U_p}{j \cdot X_d} = -j \cdot \frac{U_1 - U_p}{X_d} = -j \cdot \frac{\Delta U}{X_d}$	$\psi_p = \text{Polradfluss}$ $L_a = \text{Hauptinduktivität}$ $L_\sigma = \text{Streuinduktivität}$ $L_d = \text{Induktivität der Statorwicklung}$ $R_1 = \text{Wicklungswiderstand}$ $U_1 = \text{Statorklemmenspannung}$ $U_p = \text{Polradspannung}$ $X_d = \text{Statorimpedanz}$ Statorspannungsgleichung Synchrongenerator im Netzbetrieb

Asynchronmaschine

Feld der konzentrierten Einphasenwicklung

$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$	Der Fluss hängt nur von \hat{u} , N und ω , nicht aber von der Belastung oder der Rotor-Drehzahl ab!		$u(t) = \text{eingespeiste Spannung}$ $N = \text{Windungszahl}$ $\omega_1 = \text{Kreisfrequenz der Spannung}$ $\Phi_h = \text{magn. Fluss}$ $[\Phi] = V \cdot s$
$\Phi(t) = \hat{\Phi} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$	$\hat{\Phi} = \frac{\hat{u}}{N \cdot \omega_1}$		

Frequenzen

$\omega_{D1} = \omega_1 / p$	Maximale Drehzahl mit einem Polpaar!	Winkelgeschwind. des Drehfeldes $\omega_{D1} [\omega_{D1}] = s^{-1}$ $\omega_1 = \text{Kreisfrequenz der eingespeisten Wechselspannung (bei } 50 \text{ Hz} \Rightarrow 100 \cdot \pi)$ $\omega_{D1} = \text{Frequenz des Stator Drehfeldes}$ $p = \text{Polpaarzahl}$
$\omega_{D2} = \omega_{D1} - \omega_{\text{mech}}$		Winkelgeschwind. ω_{D2} vom Rotor gesehen Rotorkreis geschlossen Mechanische Frequenz des Rotors: $\omega_{\text{mech}} = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$
$\omega_2 = p \cdot \omega_{D2}$ $\omega_2 = \omega_1 - p \cdot \omega_{\text{mech}}$		Frequenz der im Rotor induzierten Größen ω_2
Falls $\omega_{D1} = \omega_{\text{mech}}$ ist $\omega_{D2} = \omega_2 = 0$		Leerlauf Es entsteht kein Moment, also dreht die Maschine im Leerlauf mit der Synchrongeschwindigkeit n_{syn}
$n_{\text{syn}} = \frac{\omega_1 \cdot 60}{p \cdot 2 \cdot \pi}$		Berechnung Synchrongeschwindigkeit n_{syn} Für $p = 1 : 3000$; $p=2: 1500$; $p=3:1000$

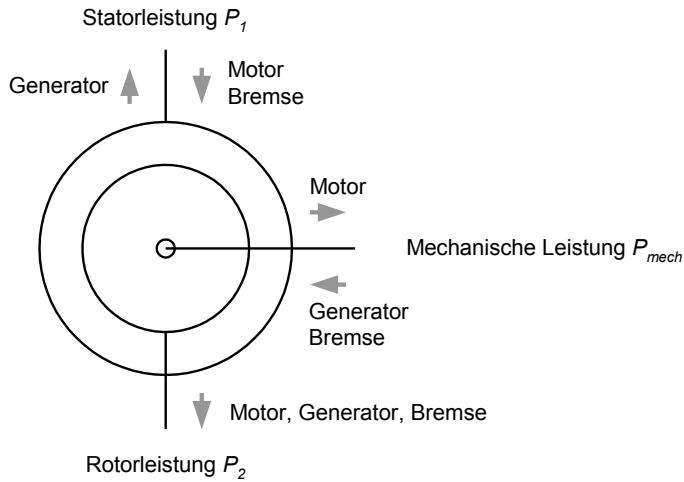
Schlupf

$s = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}} = \frac{\omega_{\text{syn}} - \omega_{\text{mech}}}{\omega_{\text{syn}}} =$ $= \frac{\omega_1 - p \cdot \omega_{\text{mech}}}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{f_2}{f_1}$	Stillstand: Gleiche Drehzahlen: Rotor schneller als Stator: (Generatorbetrieb) Entgegengesetzter Drehsinn: (Bremsbetrieb)	Schlupf s Relative Abweichung der Drehzahl von der Synchrongeschwindigkeit
--	--	--

Spannungen

$U_{h1} = \omega_1 \cdot N_1 \cdot \Phi_h = N_1 \cdot \frac{d\phi_h}{dt}$ $U_{h2} = \omega_2 \cdot N_2 \cdot \Phi_h = N_2 \cdot \frac{d\phi_h}{dt}$ $U_{h2} = s \cdot \frac{U_{h1}}{\dot{u}}$ $U_{h1} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot U_{h2} = \dot{u} \cdot \frac{1}{s} \cdot U_{h2}$	$U_{h1} = \text{induzierte Spannung in Statorwicklung}$ $U_{h2} = \text{induzierte Spannung in Rotorwicklung}$ $\dot{u} = \text{Übersetzungsverhältnis}$ Streuimpedanzen sind vernachlässigt (wie Trafo)
---	---

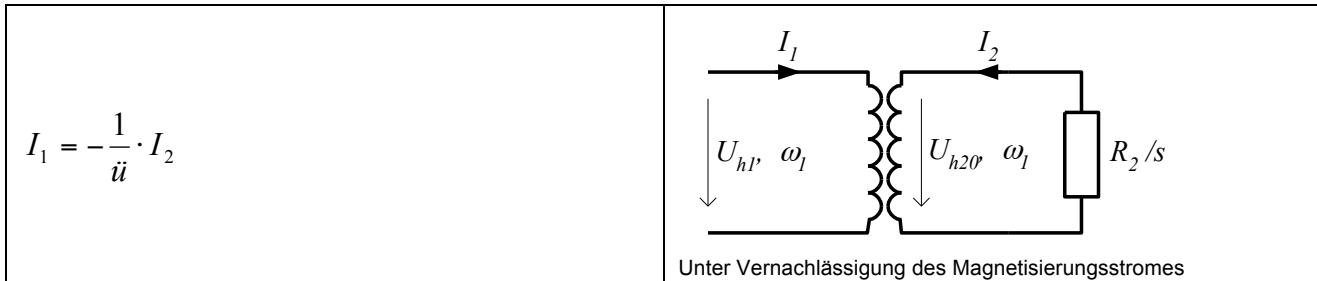
Übersicht der Leistungen:



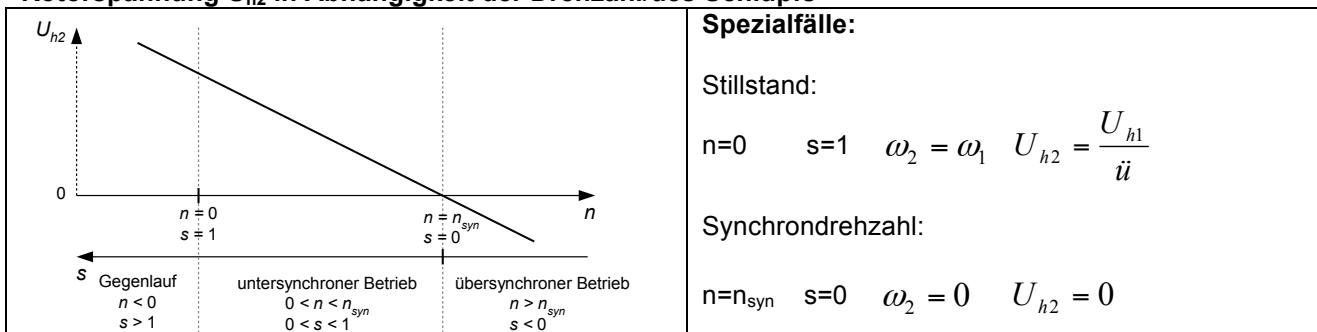
Wirkungsgrad:

Motorbetrieb:	$\eta = \frac{P_{mech}}{P_1} = 1 - s$ mit $0 < s < 1$
Generatorbetrieb:	$\eta = \frac{P_1}{P_{mech}} = \frac{1}{1 - s}$ mit $s < 0$

Ströme



Rotorspannung U_{h2} in Abhängigkeit der Drehzahl/des Schlupfs



Leistungen (einphasige Ersatzschaltung mit idealem Transformator)

$P_1 = -m \cdot I_1 \cdot U_1 =$ Stator: $= -m \cdot \frac{1}{i\dot{u}} \cdot I_2 \cdot \ddot{u} \cdot \frac{1}{s} \cdot U_{h2} = \frac{1}{s} \cdot P_2$ Rotor: $P_2 = -m \cdot I_2 \cdot U_{h2}$	Ersatzschaltbild idealer Trafo 	R_2 = Rotorwiderstand P_1 = Statorleistung P_2 = Rotorleistung m = Phasenzahl Vernachlässigt: Streuinduktivitäten, primärer Wicklungswiderstand, Magnetisierungsstrom und Eisenverluste
--	---	---

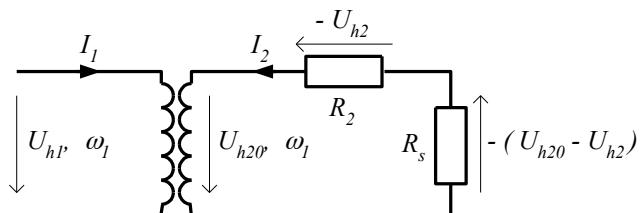
$$P_{\text{mech}} = P_1 - P_2 = (1-s) \cdot P_1$$

$$P_1 = P_2 + P_{\text{mech}}$$

$$P_2 = s \cdot P_1$$

Leistung an der Welle P_{mech}

Ersatzschaltbild mit Berücksichtigung der mechanischen Leistung in R_s



$P(R_s)$ = Die mechanische Leistung

Wirkungsgrad

$\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_1} = 1 - s$	$0 < s < 1$	Wirkungsgrad bei Motorbetrieb
$\eta = \frac{P_1}{P_{\text{mech}}} = \frac{1}{1-s}$	$s < 0$	Wirkungsgrad bei Generatorbetrieb

Kippschlupf s_k mit Statorwiderstand R_1

$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (\omega_1 \cdot L_{1\sigma} + \omega_1 \cdot L_{2\sigma}')^2}}$	Kippschlupf s_k mit Statorwiderstand R_1
$M_k = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + \omega_1 \cdot L_{1\sigma} + \omega_1 \cdot L_{2\sigma}')}}$	Dazugehöriges Kippmoment M_k

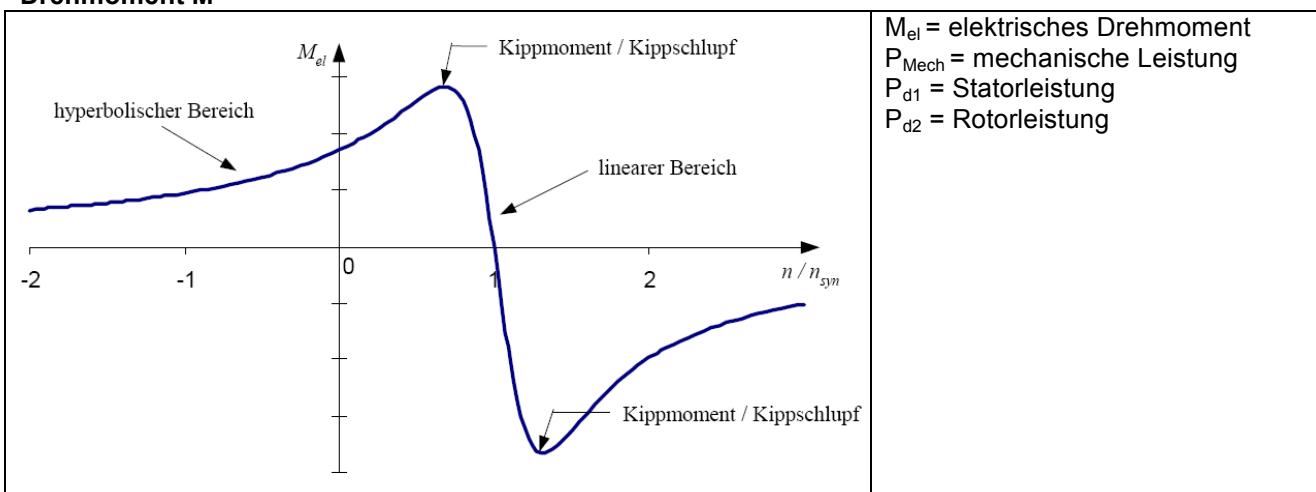
Kippschlupf s_k ohne Statorwiderstand R_1

$s_k = \frac{R'_2}{\omega_1 \cdot (L_{1\sigma} + L'_{2\sigma})}$	Kippschlupf s_k ohne Statorwiderstand R_1
$M_k = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot (L_{1\sigma} + L'_{2\sigma})} \cdot \frac{U_1^2}{\omega_1^2}$	Dazugehöriges Kippmoment M_k
$\frac{M_{el}}{M_k} = \frac{2}{s/s_k + s_k/s}$	Kloss'sche Formel M_{el} = elektrisches Drehmoment M_k = Kippmoment s = Schlupf s_k = Kippschlupf

T-Ersatzschaltbild für stationären Betrieb

	$\frac{R'_2}{s} = \ddot{u}^2 \cdot R_2 + \ddot{u}^2 \cdot R_s$ $L'_{\sigma 2} = \ddot{u}^2 \cdot L_{\sigma 2}$ $R'_s = \ddot{u}^2 \cdot R_s = (1-s)/s \cdot R'_2$ $R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2$ $\underline{I'_2} = \frac{\underline{I}_2}{\ddot{u}}$ $\underline{U'_2} = \ddot{u} \cdot \underline{U}_2$
--	---

Drehmoment M



$M_{el} = \frac{P_{mech}}{\omega_{mech}} = \frac{P_{d1}}{\omega_{d1}} = \frac{P_{d1} \cdot p}{\omega_1}$	Elektrisches Moment ohne Reibungsverluste Mit $P_{mech} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_s$ 3 = Anzahl Phasen
$M_{el} = \frac{3 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{U_{h20}^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (\omega_1 L_{2\sigma})^2} \cdot \frac{R_2}{s}$	Elektrisches Moment mit Berücksichtigung rotorseitiger Streureaktanz
$M_{el} = \frac{3 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (\omega_1 L_{1\sigma} + \omega_1 L_{2\sigma}')^2} \cdot \frac{R_2'}{s}$	Elektrisches Moment mit Berücksichtigung der Statordaten