

**Asynchronmaschine**

Formelzeichen	Beschreibung
$X_h$	Hauptreaktanzen [?]
$X_k$	Streuereaktanz [?]
$R'_2$ <sup>1)</sup>	Läuferwiderstand [Ω]
$P_\delta$	Luftspaltleistung = $P_{el}$ [W]
$P_{Cu2}$	Stromwärmeverluste/ohmsche Läuferverluste [W]
$P_{mech}$	mechanische Leistung [W]
$f_1$ <sup>2)</sup>	Ständerfrequenz [Hz]
$f_2$	Läuferfrequenz [Hz]
$\omega_{1/2}$	Sänder-/Läuferkreisfrequenz [ $\frac{1}{s}$ ]
$n_1$	Läuferdrehzahl (synchron) [ $\frac{1}{min}$ ]
$n = n_N$	Ständerdrehzahl (asynchron) [ $\frac{1}{min}$ ]
$s$	Schlupf [%]
$p$	Polpaarzahl
$I_\mu$	?
$I_1$	?
$I_2$	?
$M_A$	?
$U_A$	?
$I_A$	?
$\phi_N$	?

- 1) ' heißt die Läufergröße ist auf Ständer umgerechnet
- 2) Index 1 immer Ständergröße, Index 2 immer Läufergröße
- 3) \* heißt reduziert

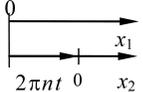
**Am Netz**

Voraussetzung für ein zeitlich konstantes Drehmoment ist ein mit konstanter Winkelgeschwindigkeit im Luftspalt umlaufendes, räumlich möglichst sinusförmig verteiltes magnetisches Feld.

**Grundfeld einer Drehstromwicklung:**

$$b_p(x, t) = B_p \cdot \cos(px - \omega_1 t) \tag{3.2.1}$$

Zusammenhang Ständer- und Läuferkoordinaten:



$$x_1 = 2\pi n t + x_2 \tag{3.3.1}$$

**Frequenz:**

$$f_2 = f_1 \cdot (1 - n \cdot p / f_1) = f_1 - p n \tag{3.3.2}$$

Bei stillstehendem Läufer ( $n = 0$ ) sind Sänder- und Läuferfrequenz gleich ( $f_2 = f_1$ ). Wenn sich der Läufer mit der **synchronen Drehzahl**

$$n = n_1 = f_1 / p = 1 - \frac{p \cdot n}{f_1} \tag{3.2.3}$$

dreht, so ist die Läuferfrequenz Null.

$$f_2 = s \cdot f_1 \tag{3.3.3}$$

**Schlupf:**

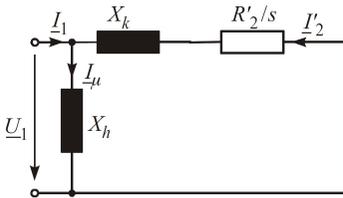
Bei Leerlauf ist  $s = 0$ , im Stillstand  $s = 1$ .

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f_1} = 1 - \frac{n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{3.3.4}$$

Prozentuale/relative Abweichung der Läuferdrehzahl von der **synchronen Drehzahl  $n_1$**  (bei Synchronmaschinen ist  $s = 0$ , bei ASM möglichst klein)

**Ersatzschaltbild**

Strangsgröße werden im ESB mit ' gekennzeichnet (sie unterscheiden sich nur durch die Phasenlagen)



$$I_\mu = I_1 + I_2 \tag{3.3.6}$$

**Kann sein, dass in der Formel die ' nicht passen?**

im Läufer **umgesetzte Leistung:** (Läuferverlustleistung)

$$P_\delta = 3 \cdot I_2' \cdot \frac{R_2'}{s} = s \cdot P_\delta + (1 - s) \cdot P_\delta = P_{Cu2} + P_{mech} \tag{3.3.7}$$

'Gesetz über die Spaltung der Luftspaltleistung':

**Stromwärmeverluste** in der Läuferwicklung:

$$P_{Cu2} = 3 \cdot I_2' \cdot R_2' = s \cdot P_\delta \tag{3.3.9}$$

**mechanische Leistung:**

$$P_{mech} = P_\delta - P_{Cu2} = P_\delta \cdot (1 - s) \tag{3.3.10}$$

**Drehmoment:**

$$M = \frac{P_{mech}}{2\pi n} = \frac{P_\delta(1 - s)}{2\pi n_1(1 - s)} = \frac{P_\delta}{2\pi n_1} \tag{3.3.11}$$

**Wirkungsgrad:**

$$\eta = \frac{P_{Welle}}{P_{el}} \tag{1}$$

**Stromortskurve**

**Leitwertstromortskurve(?????)**

$$s = 0 : \quad \underline{Y}_0 = \frac{-j}{X_R} \tag{2}$$

$$s = \infty : \quad \underline{Y}_\infty = \frac{-j}{X_R} - \frac{j}{X_K} \tag{3}$$

**Kreismitelpunkt:**

$$\underline{Y} = \frac{-j}{X_R} - \frac{j}{2X_K} \tag{4}$$

**Kreisradius:**

$$r = \frac{1}{2X_K} \tag{5}$$

Leerlaufstrom/Magnetisierungsstrom:  $I_0 = I_\mu (0|0) - P_0$

Ständerstrom  $I_1 (0|0) - P$

Läuferstrom  $I_2' P - P_0$

$$\overline{P_k C} \sim (3) \cdot R_2' I_{2k}' (= 2\pi n_1 M_A) \tag{6}$$

\*Faktor 3 nur bei Sternschaltung

$$\overline{P_0 B} \sim I_2'^2 \tag{7}$$

$$\overline{P_0 C} \sim I_{2k}'^2 \tag{8}$$

Läuferstromwärmeverluste:

$$\overline{AB} = \frac{\overline{P_0 B}}{\overline{P_0 C}} \cdot \overline{P_k C} \sim \frac{I_2'^2}{I_{2k}'^2} (3) \cdot R_2' I_{2k}'^2 = P_{Cu2} \tag{9}$$

Luftspaltleistung/elektrisch aufgenommene Leistung:

$$\overline{PB} \sim P_{el} = P_\delta \tag{10}$$

mechanische Leistung:

$$\overline{PA} \sim P_{mech} = P_\delta - P_{Cu2} \tag{11}$$

**Y-Schaltung:**  $P_{Cu2} = 3R_2' I_2'^2$

**Δ-Schaltung:**  $P_{Cu2} = R_2' I_{2L}'^2$

**Parameterbeiche:**

**motorischer Beiche:**  $s \leq s \leq 1$

$s = 0$ : Synchronismus, Leerlauf

$s = 1$ : Stillstand, Kurzschluss

**generatorischer Bereich:**  $s < 0$

Luftspaltleistung wird negativ, Asynchronmaschine geht ohne Schaltungsänderung in Generatorbetrieb

**Gegenstrombremsbereich:**  $s > 1$

Drezahl n wird negativ ( $n = n_1(1 - s)$ )

- Läufer dreht entgegen der Umlaufrichtung des Luftspaltfeldes.
- In diesem Bereich nimmt die ASM mechanische Leistung über die Welle und elektrische Leistung aus dem Netz auf.
- Gesamte aufgenommene Leistung wird in Stromwärme umgesetzt.

$$M_A = \left(\frac{U_A}{U_A^*}\right)^2 \cdot M_A^* \tag{12}$$

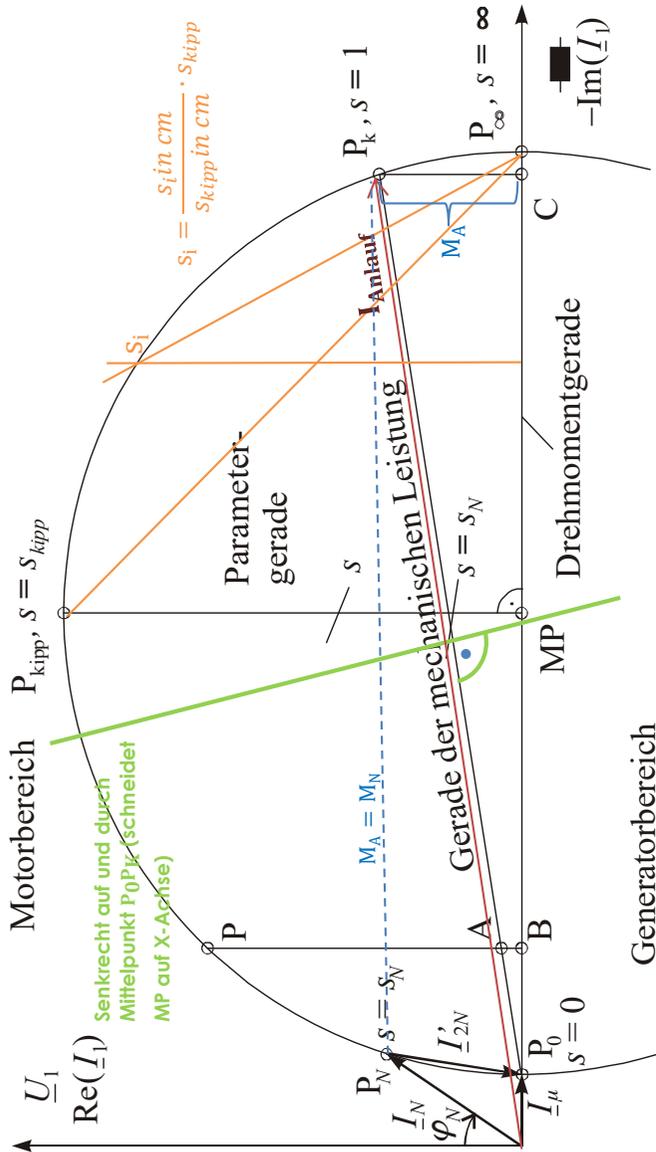
$$I_A = \frac{U_N}{U_N^*} \cdot I_A^* \tag{13}$$

**Maßstäbe:**

Strom:  $m_I$  gewählt (Leiterstrom) Einheit: A/cm

Leistung:  $m_P = \sqrt{3} U_N m_I$  Einheit: W/cm

Drehmoment:  $m_M = m_P / (2\pi n_1)$  Einheit: Nm/cm



**Stationär**

ToDo: Eintragen der Abkürzungen in das Abkürzungsverzeichnis!!!

ESB von magnetisch gekoppelten Stromkreisen einfügen  
Spannungsgleichungen der beiden Stromkreise

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_{1\sigma}) \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1h} \cdot \underline{I}_\mu \quad (14)$$

$$\underline{U}'_2 = (R'_2 + j\omega L'_{2\sigma}) \cdot \underline{I}'_2 + j\omega L_{2h} \cdot \underline{I}_\mu \quad (15)$$

ESB zweier magnetisch gekoppelter Stromkreise fehlt noch

**Streuzyffer**

$$\sigma_1 = \frac{L_{1\sigma}}{L_{1h}} \quad (16)$$

**Gesamtstreuung**

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_1) \cdot (1 + \sigma_2)} = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{M^2}{M(1 + \sigma_1) + M(1 + \sigma_2)} \quad (17)$$

Strangströme für Feldmaxima

$$b_u(t) = B \cdot \cos(\omega t) = \text{Re}(b_u(t) \cdot e^{j\epsilon_0}) \quad (18)$$

$$b_v(t) = B \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) = \text{Re}(b_v(t) \cdot e^{j\epsilon_0} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}) \quad (19)$$

$$b_w(t) = B \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) = \text{Re}(b_w(t) \cdot e^{j\epsilon_0} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (20)$$

$$b_{res}(t) = \text{Re}(e^{j\epsilon_0} (b_u(t) + \underline{a} \cdot b_v(t) + \underline{a}^2 \cdot b_w(t))) \quad (21)$$

Definition des Raumzeigers

$$\vec{B} = \frac{2}{3} (b_u(t) + \underline{a} \cdot b_v(t) + \underline{a}^2 \cdot b_w(t)) \quad (22)$$

Raumzeiger von Strömen

$$\vec{I} = \frac{2}{3} (i_u(t) + \underline{a} \cdot i_v(t) + \underline{a}^2 \cdot i_w(t)) \quad (23)$$

bei symmetrischen Ströme

$$i_u(t) + i_v(t) + i_w(t) = 0 \quad (24)$$

Stromraumzeiger

$$\vec{I}_1 = \frac{2}{3} (i_u(t) + \underbrace{(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})}_{e^{j\frac{2\pi}{3}}} \cdot i_v(t) + \underbrace{(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})}_{e^{j\frac{4\pi}{3}}} \cdot i_w(t)) \quad (25)$$

Ersatzströme

$$I_{1\alpha} = \text{Re}(\vec{I}_1) = i_u(t) \quad (26)$$

$$I_{1\beta} = \text{Im}(\vec{I}_1) = \frac{i_v(t) - i_w(t)}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

Koordinatentransformation  
ständerfeste Koordinaten: Index S

$$\vec{I}_1^S = \hat{I}_1 \cdot e^{j\beta_S} = \vec{I}_1^L \cdot e^{j\beta_L} \quad (28)$$

$$I_{1\alpha} = \hat{I}_1 \cdot \cos\beta_S \quad (29)$$

$$I_{1\beta} = \hat{I}_1 \cdot \sin\beta_S \quad (30)$$

läuferfeste Koordinaten: Index L

$$\vec{I}_1^L = \frac{\hat{I}_1 \cdot e^{j(\beta_S - \beta_L)}}{\vec{I}_1^S \cdot e^{-j\beta_L}} \quad (31)$$

Spannungsgleichung in Raumzeigerdarstellung

$$\vec{U}_1^S = R_1 \cdot \vec{I}_1^S + \frac{d\vec{\psi}_1^S}{dt} \quad (32)$$

Allgemein Flussverkettung

$$\psi = N \cdot \phi \quad (33)$$

Flussverkettung im Ständer

$$\vec{\psi}_1^S = l_1 \cdot \vec{I}_1^S + M \cdot \vec{I}_2^S \quad (34)$$

Flussverkettung des Ständers im rotierenden Koordinatensystem

$$\vec{\psi}_1^k = \vec{\psi}_1^S \cdot e^{j\beta_k} \quad (35)$$

Flussverkettung des Ständers im ständerfesten Koordinatensystem

$$\vec{\psi}_1^S = \vec{\psi}_1^k \cdot e^{j\beta_k} \quad (36)$$

Flussverkettung im Läufer

$$\vec{\psi}_2^S = l_2 \cdot \vec{I}_2^S + M \cdot \vec{I}_1^S \quad (37)$$

Ständerstromraumzeiger

$$\vec{I}_1^S = \frac{\vec{\psi}_1^S}{\sigma L_1} - \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \vec{\psi}_2^S \quad (38)$$

Läuferstromraumzeiger

$$\vec{I}_2^S = \frac{\vec{\psi}_2^S}{\sigma L_2} - \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \vec{\psi}_1^S = \frac{\vec{I}_2^S - \vec{I}_1^S}{1 + \sigma_2} \quad (39)$$

Ständerspannungsgleichung

$$\vec{U}_1^k = R_1 \cdot \vec{I}_1^k + \frac{d\vec{\psi}_1^k}{dt} + j\omega_k \cdot \vec{\psi}_1^k \quad (40)$$

Läuferspannungsgleichung

$$\vec{U}_2^k = R_2 \cdot \vec{I}_2^k + \frac{d\vec{\psi}_2^k}{dt} + j(\omega_k - \omega_L) \cdot \vec{\psi}_2^k \quad (41)$$

..... nachher geht es weiter

## Synchronmaschine

Formelzeichen	Beschreibung
$I_{KS}$	Kurzschlussstrom [A]
$U_{DC}$	Batteriegleichspannung bzw. Zwischenkreisspannung auch $U_{Bat}$ [V]
$\psi$	Statorfluss [Vs]
$\psi_d$	d-Komponente des Statorflusses [Vs]
$\psi_q$	q-Komponente des Statorflusses [Vs]
$\psi_{PM}$	Permanent Magnetfluss [Vs]
$p$	Polpaarzahl [-]
$U_{ph,max}$	maximale Phasenspannung [V]
$U_{ph}$	Phasenspannung [V]
$U_d$	d-Komponente der Statorspannung [V]
$U_q$	q-Komponente der Statorspannung [V]
$I_d$	d-Komponente des Statorstrom [A]
$I_q$	q-Komponente des Statorstrom [A]
$m_o$	Modulations Index [-]
$M$	Drehmoment [Nm]
$M_{Ref}$	Referenzdrehmoment [Nm]
$n$	mechanische Drehzahl [rpm]
$L_d$	d-Komponente der Induktivität der Statorwicklung [H]
$L_q$	q-Komponente der Induktivität der Statorwicklung [H]
$R_s$	Statorwiderstand [ $\Omega$ ]
$I_{max}$	maximaler Phasenstrom [A]
$\omega_{el}$	elektrische Winkelgeschwindigkeit [ $\frac{rad}{s}$ ]
$\omega_{mech}$	mechanische Winkelgeschwindigkeit [ $\frac{rad}{s}$ ]
$U_{EMF}$	induzierte Spannung (EMF = Elektrik Motoric Force) [V]
$u_{a,b,c}$	Strangspannungen [V]