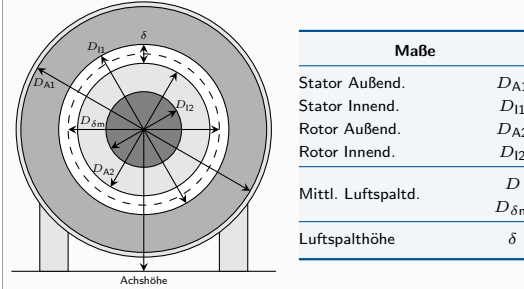


## 1. Grundlagen

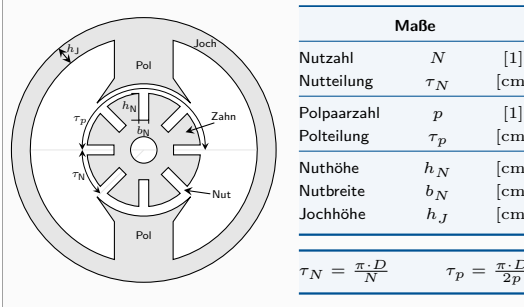
### 1.1. Größen

magnetische Größen		
Durchflutung (magnetische Spannungsquelle)	$\Theta$	[A]
Fluss	$\Phi$	[Vs]
verketteter Fluss	$\Psi$	[Vs]
mag. Flussdichte	$\vec{B}$	$\left[\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}\right]$
mag. Feldstärke	$\vec{H}$	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}}\right]$
magnetische Spannung	$V_m$	[A]
magnetischer Widerstand	$R_m$	$\left[\frac{\text{A}}{\text{Vs}}\right]$
Streuziffer	$\sigma$	[1]
elektrische Größen		
Stromdichte	$\vec{s}$	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2}\right]$
dielektrische Verschiebung	$\vec{D}$	$\left[\frac{\text{As}}{\text{m}^2}\right]$
el. Feldstärke	$\vec{E}$	$\left[\frac{\text{V}}{\text{m}}\right]$
Strombelag	$a$	$\left[\frac{\text{A}}{\text{Vs}}\right]$
spezifischer Widerstand	$\rho$	[Ω m]
mechanische Größen		
Drehmoment	$M$	[Nm]
Massenträgheitsmoment	$J$	$\left[\text{kg m}^2\right]$
Spulenwindungszahl	$w_{\text{Sp}}$	[1]
effektive Windungszahl	$w_{\text{eff}}$	[1]
Luftspalthöhe	$\delta$	[mm]
scheinbarer Luftspalt	$\delta'$	[mm]
effektiver Luftspalt	$\delta''$	[mm]
Anzahl der Leiter pro Nut	$Z_N$	[1]
Zahl der Einzelspulen (Kommutatorsegmente)	$Z_K$	[1]
ideelle Eisenlänge	$l_i$	[m]
bewickelbare Nutfläche	$A_N$	$\left[\text{m}^2\right]$
magnetisch aktiver Winkel	$\beta_M$	[rad]
Drehzahl	$n$	$\left[\frac{1}{\text{s}}\right]$
Rotornutenzahl	$N$	[1]
Rotornutenzahl pro Pol	$Q$	[1]
Anzahl paralleler Zweige	$a$	[1]
Näherungsfaktoren		
Carterfaktor	$k_C$	[1]
Eisenfüllfaktor	$k_{\text{Fe}}$	[1]
Eisenfaktor (Magnetisierungsbedarf Eisen)	$k_\mu$	[1]
Nutfüllfaktor	$k_Q$	[1]
<div> <div>Permeabilität <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}</math></div> <div>Permittivität <math>\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}</math></div> </div>		

### 1.1.1. Allgemeine Maschinenbegriffe - Durchmesser



### 1.1.2. Allgemeine Maschinenbegriffe - Abmessungen



### 1.2. Grundlegende Gleichungen

1.2.1. Maxwell	
$\text{rot } \vec{H} = \vec{s} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\text{rot } \vec{H} = \vec{s} \quad (< 10\text{kHz})$	
1.2.2. Durchflutungs- und Induktionsgesetz	
Durchflutungsgesetz	Induktionsgesetz
$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_{A_L} \vec{s} d\vec{A} = \sum i = \Theta$	$u_i = \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \iint_A \vec{B} d\vec{A} \right)$
$\oint_L \vec{E} d\vec{l} + u_i = 0$	
1.2.3. Kenngrößen	
magnetische Größen	elektrische Größen
$\Phi = \iint \vec{B} d\vec{A}$	$I = \iint \vec{s} d\vec{A}$
$V_m = \int \vec{H} d\vec{l}$	$U = \int \vec{E} d\vec{l}$
$\Theta = w \cdot I$	
$R_m = \frac{V_m}{\Phi} = \frac{l}{\mu \cdot A}$	$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{A}$
$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$	$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$
$\Psi = \Phi \cdot w = L \cdot i$	
magnetisch wirksame Fläche	
$A = k_{\text{Fe}} \cdot A_{\text{geometrisch}}$	

### 1.3. Entstehung des Drehmoments

#### 1.3.1. Lorenzkraft

$$\vec{F}_L = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$$

#### 1.3.2. Drehmoment

$$M_D = F \cdot r = M_L + M_R + J \frac{d\omega}{dt}$$

$$m_d(t) = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \int_{-\frac{l_i}{2}}^{\frac{l_i}{2}} \int_0^{2\pi} a(\vartheta, z, t) B_\delta(\vartheta, z, t) d\vartheta dz$$

#### 1.3.3. Strombelag

$$a = \int \vec{s} d\vec{l} = \frac{\partial \sum i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \iint_A \vec{s} d\vec{A} \right] = -\frac{\partial \Theta}{\partial t}$$

$$\text{mittlerer Strombelag} \quad a_m = \frac{b_N}{\tau_N} \cdot A_N = \frac{\sum \Theta_N}{\tau_p} \quad \text{Amplitude} \quad A_N = \frac{Z_N \cdot i}{b_N} = \frac{\Theta_N}{b_N}$$

#### 1.3.4. Felderregerekurve

$$V(\vartheta) = \Theta(\vartheta) = -\frac{D}{2} \int a_{\text{ges}}(\vartheta) d\vartheta$$

### 1.4. Effektiver Luftspalt

Magnetfeld wegen Nuten inhomogen. Ausgleich durch Carterfaktor  $k_C$  (ungenutzt  $k_{C_i} = 1$ ):

$$\delta' = k_C \cdot \delta \quad k_C = \frac{k_{C1} \cdot k_{C2}}{\text{Stator Rotor}} \quad k_{C_i} = \frac{\tau_{N_i}}{\tau_{N_i} - \gamma_i \cdot \delta}$$

$$\delta'' = k_\mu \cdot k_{\text{Abfl}} \cdot \delta' \quad \gamma_i = \frac{\left(\frac{b_{N_i}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{N_i}}{\delta}\right)} \quad k_\mu = 1 + \frac{V_m \text{Fe}}{2 \cdot V_m \delta'}$$

### 1.5. Streuung

#### 1.5.1. Polstreuung

$\Phi_E$ : Gesamtfluss durch Polspule

$\Phi_{Eh}$ : Hauptfluss

$\Phi_{E\sigma}$ : Streufluss

$$\Phi_E = \Phi_{Eh} + \Phi_{E\sigma} = (1 + \sigma_E) \cdot \Phi_{Eh}$$

$$\sigma_E = \frac{\Phi_{E\sigma}}{\Phi_{Eh}}$$

#### 1.5.2. Nut- und Zahnkopfstreuung

$\Phi_N$ : Gesamtfluss der in Nuten gebetteten Spulen

$\Phi_{Nh}$ : Hauptfluss

$\Phi_{N\sigma}$ : Streufluss (Nut- & Zahnkopfstreuung)

$$\Phi_N = \Phi_{Nh} + \Phi_{N\sigma} = (1 + \sigma_N) \cdot \Phi_{Nh}$$

$$\sigma_N = \frac{2 \cdot \Phi_{N\sigma}}{\Phi_{Nh}}$$

#### 1.5.3. Stirmstreuung

$\Phi_S$ : Gesamtfluss Stirmstreuung

$\Phi_{Sh}$ : Hauptfluss Stirmstreuung

$\Phi_{S\sigma}$ : Streufluss Stirmstreuung

$$\text{gesamte Streuziffer: } \sigma_{\text{ges}} = \frac{\Phi_{S\sigma}}{\Phi_{Sh}} \quad \Phi_S = \Phi_{Sh} + \Phi_{S\sigma} = (1 + \sigma_{\text{ges}}) \cdot \Phi_{Sh}$$

$$\sigma_S = \frac{\Phi_{S\sigma}}{\Phi_{Sh}}$$

#### 1.5.4. Induktivitäten

Hauptinduktivität:  $L_h = \frac{\Psi_h}{i}$

$$\text{Gesamte Streuinduktivität: } L_\sigma = \frac{\Psi_\sigma}{i} = \sigma \cdot L_h$$

$$\text{Totale Induktivität: } L_{\text{ges}} = \frac{\Psi_{\text{ges}}}{i} = (1 + \sigma) \cdot L_h$$

### 1.6. Spulen

Spulenwindungszahl

Nebeneinanderliegende Spulenseiten pro Nut

Wellenwicklung

Schleifenwicklung

$$w_{\text{Sp}} = \frac{Z_N}{2 \cdot u}$$

$$u = \frac{Z_N}{N}$$

$$a = 2$$

$$a = 2 \cdot p$$

### 1.7. Verluste

#### 1.7.1. Kupferverluste

$$P_{\text{Cu}} = R \cdot I^2$$

#### 1.7.2. Reibungsverluste

• Ventilationsverluste (Verwirbelung im Kühlmittel, Strömungsverluste)

• Lagerreibung

• Reibung an Kontaktflächen (z.B. Schleifringe, Kommutator)

#### 1.7.3. Hystereseverluste

$$P_{\text{FeH}} = m_{\text{Fe}} \cdot v_{15\text{H}} \cdot \frac{f}{50\text{Hz}} \cdot \left(\frac{B}{1,5\text{T}}\right)^2$$

$$\text{Verlustziffer: } v_{15\text{H}} (f = 15\text{Hz}, B = 1,5\text{T}) \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}}\right] \quad (\text{Herstellangabe})$$

#### 1.7.4. Wirbelstromverluste

$$P_{\text{FeW}} = m_{\text{Fe}} \cdot v_{15\text{W}} \cdot \left(\frac{f}{50\text{Hz}}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5\text{T}}\right)^2$$

$$\text{Verlustziffer: } v_{15\text{W}} (f = 15\text{Hz}, B = 1,5\text{T}) \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}}\right] \quad (\text{Herstellangabe})$$

#### 1.7.5. Gesamte Eisenverluste

$$P_{\text{Fe}} = m_{\text{Fe}} \cdot v_{\text{Fe}15} \cdot \frac{f}{50\text{Hz}} \cdot \left(\frac{B}{1,5\text{T}}\right)^2$$

### 1.8. Leistung

#### 1.8.1. mechanische Leistung

$$P_m = 2\pi \cdot n \cdot M_i = \omega_m \cdot M_i$$

#### 1.8.2. elektrische Leistung

$$P_{\text{el}} = U \cdot I$$

### 1.9. Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{auf}}}$$

$$\eta_{\text{Motor}} = \frac{P_m}{P_{\text{el}}}$$

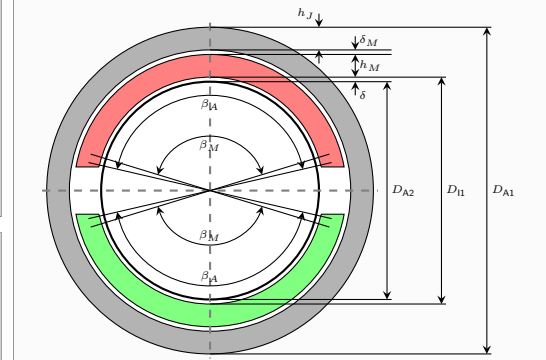
$$\eta_{\text{Generator}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_m}$$

## 2. Permanentmagnete

### 2.1. Größen

Remanenzflussdichte	$B_r$	[T]
kritische Feldstärke (aus Kennlinie ablesen)	$H_{M,\text{krit}}$	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}}\right]$
Steigung Scherungsgerade	$k_{\text{SG}}$	[1]
Luftspalthöhe Permanentmagnet	$\delta_M$	[mm]
Länge der Magnete	$l_M$	[m]
Höhe Permanentmagnete	$h_M$	[m]
Sicherheitsfaktor	$\gamma_{\text{krit}}$	[1]

### 2.2. Allgemein



### 2.2.1. Flusssdichte

Luftspalt  $B_\delta = -\mu_0 \frac{h_M}{\delta'} H_M = B_M \frac{A_M}{A_\delta} (1 - \sigma)$

Permanentmagnet  $B_M = -\frac{h_M}{\delta'} \frac{A_\delta}{A_M} \frac{\mu_0}{1 - \sigma} H_M = -k_{SG} \cdot H_M$

### 2.2.2. Fluss

Luftspalt  $\Phi_\delta = (1 - \sigma) \Phi_M = B_\delta A_\delta$

Permanentmagnet  $\Phi_M = B_M A_M$

### 2.2.3. Fläche

Luftspalt  $A_\delta = \beta_M \frac{D}{2} l_i = \beta_M \frac{D}{2} l_2 \cdot k_{Fe}$

Permanentmagnet  $A_M = \beta_M \frac{D}{2} l_M$

Leiterquerschnitt  $A_L = \frac{A_N \cdot k_Q}{Z_N}$

### 2.2.4. Materialgrößen

$\sigma = k_{\sigma 1} \cdot k_{\sigma 2}$

### 2.2.5. Effektiver Luftspalt

$\delta' = k_{C2} \cdot (\delta + \delta_M)$

$\delta'' = (1 + k_\mu)$

$k_\mu = \frac{V_\mu}{2 \cdot H_\delta \cdot \delta'}$

### 2.3. Scherungsgerade

Arbeitspunktbestimmung	
1. Scherungsgerade: $B_M = -k_{SG} \cdot H_M$	
2. Materialkennlinie: $B_M = \mu_0 \mu_r H_M + B_r$	
3. Schneiden von Materialkennlinie und Scherungsgerade	
4. $\Rightarrow$ Arbeitspunkt: $H_M = -\frac{1}{\mu_0 \mu_r + k_{SG}} B_r$	

Luftspaltfluss im Arbeitspunkt:

$$\Phi_{\delta P} = (1 - \sigma) \cdot \frac{k_{SG}}{\mu_0 \mu_r + k_{SG}} \cdot B_r \cdot l_M \cdot \frac{D_{l1}}{2} \cdot \beta_M$$

Maximal zulässiger Ankerstrom:

$$I_{2, \max} = \frac{2\pi \cdot (h_M + \delta'')}{\omega_2 \cdot \beta_M} \cdot \left| (H_M'' - H_M) \frac{\mu_0 \mu_r + k_{SG}}{k_{SG}} \frac{1}{1 + \frac{\delta''}{h_M}} \right|$$

Maximal zulässige Feldstärke:  $H_M'' = \gamma_{krit} \cdot H_{M, \text{krit}}$

## 3. Gleichstrommaschine

### 3.1. Größen

Maschinenkonstante (Spannung)	$k_U$	[1]
Maschinenkonstante (Drehmoment)	$k_M$	[1]
Flusskonstante	$k_\Phi$	$\left[ \frac{Vs}{A} \right]$
Erregerstromkonstante	$k_E$	[1]
Ankerwindungszahl	$w_2$	[1]
Bürstenübergangsspannung	$U_B$	[V]
Kommutatorsegmentspannung	$U_S$	[V]

### 3.2. Systemgleichungen

$$U_A = R_{A, \text{res}} \cdot I_A + U_i + 2 \cdot U_B \quad w_2 = \frac{N_2 \cdot Z_N}{2a}$$

$$\Phi_E = k_\Phi \cdot I_E \quad k_U = 4p \cdot w_2$$

$$U_i = k_U \cdot \Phi_E \cdot n \quad k_M = \frac{k_U}{2\pi}$$

$$M_i = k_M \cdot \Phi_E \cdot I_A$$

$$M_i = M_R + M_L + J \frac{d\omega}{dt}$$

### 3.3. Verhalten

$I < I_N \rightarrow$  Reihenschlussverhalten  
 $I > I_N \rightarrow$  Nebenschlussverhalten

### 3.4. Gleichstrom-Nebenschlussmaschine

#### 3.4.1. ESB

#### 3.4.2. Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

$$n = \frac{U_A - 2 \cdot U_B}{k_U \cdot \Phi_E} - \frac{2\pi \cdot R_{A, \text{res}}}{(k_U \cdot \Phi_E)^2} \cdot M_i$$

#### 3.4.3. Wichtige Betriebspunkte

Anlaufmoment:  $(n = 0) \quad M_{i, \text{An}} = k_M \cdot \Phi_E \cdot I_{A, \text{An}}$

Leerlaufdrehzahl:  $(M_i = 0) \quad n_0 = \frac{U_A - 2 \cdot U_B}{k_U \cdot \Phi_E}$

Anlaufstrom:  $(n = 0) \quad I_{A, \text{An}} = \frac{U_A - 2 \cdot U_B}{R_{A, \text{res}}}$

$n = n_0 \cdot \left( 1 - \frac{M_i}{M_{i, \text{An}}} \right) \quad M_i = M_{i, \text{An}} \cdot \left( 1 - \frac{n}{n_0} \right)$

### 3.5. Gleichstrom-Reihenschlussmaschine

#### 3.5.1. ESB

$R_{A, \text{res}} = R_V + R_A + R_E || R_P$

### 3.5.2. Systemgleichungen

$$I_E = k_E \cdot I_A \quad \text{mit } k_E = \begin{cases} 1 & \text{für } R_P \rightarrow \infty \\ 0 & \text{für } R_P = 0 \\ \frac{R_P}{R_P + R_E} & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\Phi_E = k_\Phi \cdot I_E = k_\Phi k_E \cdot I_A$$

$$M_i = k_M \cdot \Phi_E \cdot I_A = k_M k_\Phi k_E \cdot I_A^2$$

$$U_i = k_U \cdot \Phi_E \cdot n = k_U k_\Phi k_E \cdot I_A \cdot n$$

### 3.5.3. Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

$$M_i = k_M k_\Phi k_E \cdot \frac{(U_A - 2 \cdot U_B)^2}{(k_U k_\Phi k_E \cdot n + R_{A, \text{res}})^2}$$

Anlaufmoment:  $(n = 0) \quad M_{i, \text{An}} = k_M k_\Phi k_E \cdot \left( \frac{U_A}{R_{A, \text{res}}} \right)^2$

### 3.6. Permanenterrregte Gleichstrommaschine

#### 3.6.1. ESB

#### 3.6.2. Systemgleichungen

Maximaler Ankerstrom:  $I_{A, \max} = I_L \cdot a = S \cdot A_L \cdot a$

Maximale Ankerspannung:  $U_{A, \max} = U_S \cdot \frac{Z_K}{2 \cdot p}$

## 4. Wechselfeld - Drehfeld

4.1. Größen		
Stator	Index 1	
Rotor	Index 2	
Ordnungszahl der Oberwellen	$\nu$	[1]
elektrische Frequenz	$f$	[Hz]
elektrische Kreisfrequenz	$\omega$	$\left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
	$\omega = 2\pi f$	
mechanische Kreisfrequenz	$\omega_m$	$\left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
Phasenwinkel	$\varphi$	[rad]
Strangachsenwinkel	$\vartheta$	[rad]
Strangspannung	$U_1$	[V]
Strangstrom	$I_1$	[A]
komplexe Scheinleistung	$\underline{S}$	[VA]
Wirkleistung	$P$	[W]
Blindleistung	$Q$	[Var]
Strangzahl	$m$	[1]
Windungszahl pro Strang	$w_1$	[1]
Lochzahl (Nuten pro Pol und Strang)	$q$	[1]
Nutwinkel	$\alpha_N$	[rad]
Spulenwinkel	$\alpha_{Sp}$	[rad]
Polwinkel	$\alpha_p$	[rad]
Spulenweite	$W_{Sp}$	[cm]
Zonungsfaktor	$\xi_Z$	[1]
Sehnungsfaktor	$\xi_S$	[1]
Nutschlitzbreitenfaktor	$\xi_N$	[1]
Schrägungsfaktor	$\xi_{Schr}$	[1]

4.2. Stern & Dreieckschaltung		
<b>Sternschaltung</b>	<b>Dreiecksschaltung</b>	
$U_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$	$U_1 = U_N$	
$I_1 = I_N$	$I_1 = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$	

### 4.3. Allgemeines zu Wechselgrößen

$$\underline{a}^\nu = e^{j\nu \frac{2\pi}{3}} \quad \underline{a}^0 + \underline{a}^1 + \underline{a}^2 = 0$$

$$\underline{a}^2 = \underline{a}^* = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

$$x(t) = \sqrt{2} \cdot X \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\vec{x}(t) = \frac{1}{3} \cdot [x_A(t) + \underline{a} \cdot x_B(t) + \underline{a}^2 \cdot x_C(t)] = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \underline{X} \cdot e^{j\omega t}$$

$$\underline{X} = X \cdot e^{j\varphi}$$

#### 4.3.1. Wechselfeld

$$B(\vartheta, t) = \hat{B} \cdot \cos(\vartheta - \vartheta_0) \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

#### 4.3.2. Drehfeld

$$B(\vartheta, t) = \hat{B} \cdot \cos((\vartheta - \vartheta_0) - (\omega t - \varphi))$$

#### 4.4. Einfluss realer Luftspalt

$$\text{Wicklungsfaktor: } \xi(\nu) = \xi_Z(\nu) \cdot \xi_S(\nu) \cdot \xi_N(\nu)$$

$$w_{\text{eff}} = w_{\text{Sp}} \cdot \xi(\nu)$$

$$\alpha_N = \frac{2\pi}{N} \quad \alpha_{\text{Sp}} = W_{\text{Sp}}(\text{absolut}) \cdot \alpha_N \quad \alpha_P = \frac{2\pi}{2p}$$

##### 4.4.1. Zonung

Erhöhung der Lochzahl  $q$   
(Beschränkt durch  $N_{\text{max}} = \frac{D\pi}{\tau_{N,\text{min}}}$ ) mit  $\tau_{N,\text{min}} \approx 1 \text{ cm}$

$$w_{\text{eff}} = q \cdot w_{\text{Sp}} \cdot \xi_Z(\nu)$$

$$\xi_Z(\nu) = \frac{\sin\left(q \cdot \nu \cdot \frac{\alpha_N}{2} p\right)}{q \cdot \sin\left(\nu \cdot \frac{\alpha_N}{2} p\right)} = \frac{\sin\left(\nu \frac{\pi}{2} \frac{q}{Q}\right)}{q \cdot \sin\left(\nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{Q}\right)}$$

##### 4.4.2. Sehnung

Kürzung der Spulenweite  $W_{\text{Sp}}$  (nicht bei Einschnittwicklung möglich)

$$w_{\text{eff}} = q \cdot w_{\text{Sp}} \cdot \xi_S(\nu)$$

$$\xi_S(\nu) = \sin\left(\nu \frac{\pi}{2} \frac{W_{\text{Sp}}}{\tau_p}\right) = \sin\left(\nu \frac{\alpha_{\text{Sp}}}{\alpha_P} \frac{\pi}{2}\right)$$

##### 4.4.3. Nutschlitzbreite

$$w_{\text{eff}} = w_{\text{Sp}} \cdot \xi_N(\nu)$$

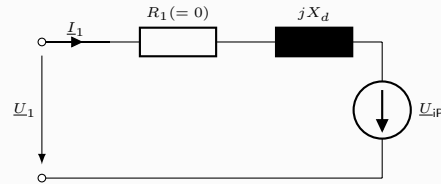
$$\xi_N(\nu) = \frac{\sin\left(\nu \frac{b_N}{D}\right)}{\nu \frac{b_N}{D}}$$

### 5. Synchronmaschine

#### 5.1. Größen

Erregerstrom	$I_2$	[A]
induzierte Polradspannung	$\underline{U}_{\text{iP}}$	[V]
synchrone Reaktanz	$X_d$	[Ω]
Selbstinduktivität	$L$	[H]
Koppelinduktivität (von Rotor nach Stator)	$M_{21}$	[H]
Polradwinkel	$\vartheta$	[rad]
Phasenwinkel von $\underline{Z}_1$	$\varphi_{Z1}$	[rad]
Netzleistung (Wirkleistung)	$P_1$	[W]
innere elektrische Leistung	$P_W$	[W]
Drehfeldleistung	$P_\delta$	[W]
mechanische Leistung	$P_m$	[W]
Erregerleistung	$P_E$	[W]
Leerlaufkurzschlussstrom	$\underline{I}_{K0}$	[A]
Dreisträngiger Dauerkurzschlussstrom	$\underline{I}_{K\text{III}}$	[A]
Leerlaufkurzschlussverhältnis (LKV)	$\frac{\underline{I}_{K0}}{\underline{I}_N}$	[1]
Verketteter Fluss Permanentmagnet	$\underline{\Psi}_{\text{PM}}$	[Vs]

#### 5.2. ESB



$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_{\text{iP}}$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_d$$

$$X_d = X_{1h} + X_{1\sigma} = 2\pi f \cdot (L_{1h} + L_{1\sigma})$$

$$|\underline{U}_{\text{iP}}| = U_{\text{iP}} = \omega M_{21} \sqrt{2} \cdot I_2$$

$$\sigma = \frac{L_{1\sigma}}{L_{1h}}$$

#### 5.3. Systemgleichungen

$$\vec{u}_1 = R_1 \cdot \vec{i}_1(t) + \frac{\partial \vec{\Psi}_1(t)}{\partial t}$$

$$\vec{\Psi}_1 = L_1 \cdot \vec{i}_1(t) + M_{21} \cdot \vec{i}_2(t)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2(t) + \frac{\partial \Psi_2(t)}{\partial t}$$

$$\Psi_2 = L_2 \cdot i_2(t) + 3 \cdot M_{21} \cdot (\vec{i}_1(t) e^{-jp\vartheta m} + \vec{i}_1^*(t) e^{jp\vartheta m})$$

#### 5.4. Wichtige Gleichungen

##### 5.4.1. Synchrone Drehzahl Luftspaltfeld

$$n_{\text{syn}} = n_N = \frac{f_1}{p}$$

##### 5.4.2. Drehmoment

$$M_K \sim \frac{U_1}{f_1}$$

$$M_i = -\frac{3p}{\omega_1} \cdot \left[ \frac{U_1 \cdot U_{\text{iP}}}{Z_1} \cdot \sin(\vartheta - \varphi_{Z1}) + \frac{U_{\text{iP}}^2}{Z_1} \cdot \sin(\varphi_{Z1}) \right]$$

Kippmoment:

$$M_K = \frac{3p}{\omega_1} \cdot \frac{U_1 \cdot U_{\text{iP}}}{Z_1} = \frac{3p}{\omega_1} \cdot U_1 \cdot I_{K\text{III}}$$

$$R_1 = 0 \Rightarrow \varphi_{Z1} = 0 \Rightarrow M_i = -M_K \cdot \sin(\vartheta)$$

##### 5.4.3. Leistung

$$\underline{S}_1 = m_1 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^*$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos(\varphi) = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi)$$

$$P_W = 3 \cdot U_{\text{iP}} \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi)$$

$$P_\delta = \omega_m \cdot M_i = P_W - 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2$$

$$P_m = 2\pi \cdot n \cdot (M_i - M_R) = \omega_m \cdot (M_i - M_R) = P_\delta - P_R$$

$$P_E = U_2 \cdot I_2$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_1 + P_{VE}}$$

#### 5.5. Betriebsbereiche

Bei Leerlauferrregung ( $I_2 = I_{20}$ ):  $\Rightarrow U_1 = U_{\text{iP}}$

Bei linearer Leerlaufkennlinie ( $X_d = \text{const.}$ ):  $I_2 = I_{20} \cdot \frac{U_{\text{iP}}}{U_1}$

##### 5.5.1. Leerlauf ( $I_1 = 0$ )

$$I_{20} = \frac{U_{\text{iP}}}{\omega M_{21} \sqrt{2}} = \frac{U_1}{\omega M_{21} \sqrt{2}}$$

##### 5.5.2. Kurzschluss ( $U_1 = 0$ )

$$I_{K\text{III}} = \frac{U_{\text{iP}}}{Z_1}$$

$$I_{K0} = I_{K\text{III}}(I_{20}) = \frac{U_1}{Z_1}$$

##### 5.5.3. Betriebsarten

$\vartheta$  zwischen dem Zeiger von  $\underline{U}_1$  nach  $\underline{U}_{\text{iP}}$

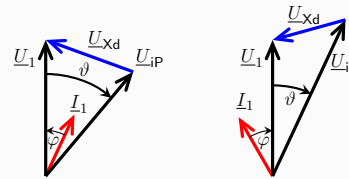
$\varphi$  zwischen dem Zeiger von  $\underline{I}_1$  nach  $\underline{U}_1$

$\underline{I}_2$  eilt  $\underline{U}_{\text{iP}}$  um  $90^\circ$  nach

**Phasenschieberbetrieb:**  $\vartheta = 0$  ( $R_1 = 0$  VZS - Betrieb am starren Netz)

- Betrieb im Leerlauf
- reine Blindleistungsabgabe bzw. -aufnahme
- $\cos(\varphi) = 0 \Rightarrow$ 
  - untererregt:  $\Rightarrow \varphi = 90^\circ$
  - übererregt:  $\Rightarrow \varphi = -90^\circ$

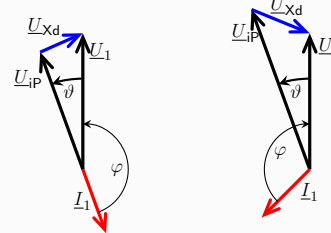
**Motorbetrieb:**  $\vartheta < 0$  ( $R_1 = 0$  VZS - Betrieb am starren Netz)



untererregt  $\varphi > 0$

übererregt  $\varphi < 0$

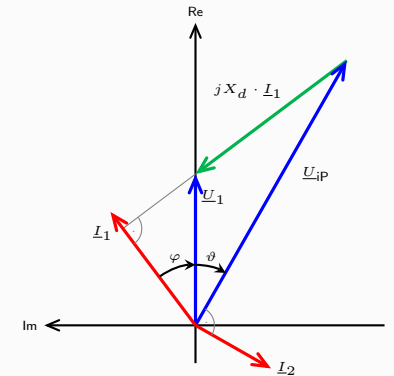
**Generatorbetrieb:**  $\vartheta > 0$  ( $R_1 = 0$  VZS - Betrieb am starren Netz)



untererregt  $\varphi > 0$

übererregt  $\varphi < 0$

#### 5.6. Zeigerdiagramm



#### 5.7. Stromortskurve

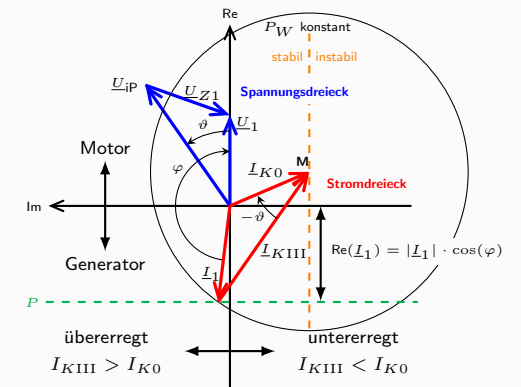
$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{K0} - \underline{I}_{K\text{III}}$$

$$\underline{I}_{K\text{III}} = \frac{U_{\text{iP}}}{U_1} \cdot \underline{I}_{K0} \cdot e^{j\vartheta}$$

$$\underline{I}_{K0} = -\frac{U_1}{Z_1} \cdot j e^{j\varphi_{Z1}}$$

##### Stromortskurve

1.  $\underline{U}_1$  auf reelle Achse legen
2. Richtung von  $\underline{U}_{\text{iP}}$  einzeichnen
3.  $\underline{I}_{K0}$  einzeichnen  
bei  $R_1 = 0$ :  $\underline{I}_{K0}$  eilt  $\underline{U}_1$  um  $90^\circ$  nach
4. konstante Erregung: Kreis um Spitze von  $\underline{I}_{K0}$  mit Radius  $I_{K\text{III}}$
5. Richtungen von  $\underline{I}_{K\text{III}}$  und  $\underline{I}_1$  festgelegt durch  $\varphi$  bzw.  $\vartheta$
6. bei  $R_1 = 0$ : Verlängerung von  $\underline{U}_{\text{iP}} \perp \underline{I}_{K\text{III}}$



## 5.8. dq-Darstellung

### Zeigerdiagramm

1.  $\underline{U}_1$  auf reelle Achse legen
2.  $\underline{I}_1$  einzeichnen
3. Richtung von  $\underline{U}_{iP}$  legt  $d$  und  $q$  Achse fest ( $\vartheta = \text{unbekannt} \Rightarrow \text{weiter bei Trick}$ )
4. Zerlegung von  $\underline{I}_1$  in  $\underline{I}_d$  und  $\underline{I}_q$
5. Spannungsabfall an  $X_d = |X_d \cdot \underline{I}_d|$
6. Spannungsabfall an  $X_q = |X_q \cdot \underline{I}_q|$
7.  $\underline{U}_{iP} = \underline{U}_1 - jX_d \cdot \underline{I}_d - jX_q \cdot \underline{I}_q$

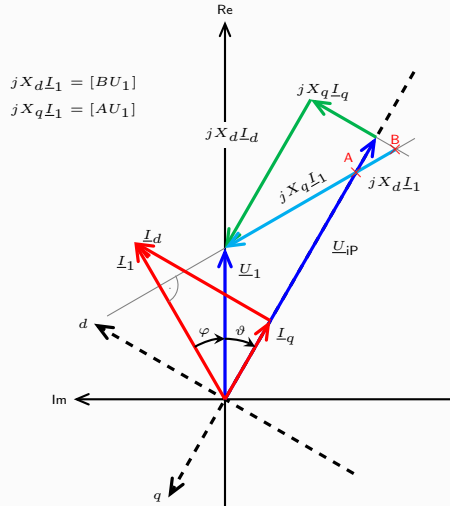
### Trick

1.  $\vartheta = \arg(\underline{U}_1 - jX_q \cdot \underline{I}_1) \Rightarrow$  Richtungsgerade von  $\underline{U}_{iP} (||jX_d \underline{I}_d)$
2.  $\underline{U}_{iP} =$  Senkrechte von  $\underline{U}_1 - jX_d \cdot \underline{I}_d$  auf Richtungsgerade

### 5.8.1. Systemgleichungen

$$\begin{aligned} U_d &= R_1 \cdot I_d - \omega_1 L_q \cdot I_q \\ U_q &= R_1 \cdot I_q + \omega_1 L_d \cdot I_d + \sqrt{2} \cdot U_{iP} \\ U_{iP} &= \sqrt{2} \cdot \omega_1 M_{21} \cdot I_2 \\ U_2 &= R_2 \cdot I_2 \\ M_i &= 3 \cdot p \cdot M_{21} \cdot I_2 \cdot I_q \end{aligned}$$

### 5.8.2. Zeigerdiagramm



## 5.9. Schenkelpollläufer

### 5.9.1. Drehmoment ( $R_1 = 0$ )

$$M'_i = -\frac{m_1 \cdot p}{\omega_1} U_1 \left[ \frac{U_{iP}}{X_d} \sin(\vartheta) + \frac{U_1}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\vartheta) \right]$$

### Reluktanzmoment (Reaktionsmoment):

$$M_r = -\frac{m_1 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\vartheta)$$

Vollpolläufer entwickeln kein Reluktanzmoment wegen  $L_d = L_q$ .  
Maximales Reluktanzmoment bei  $|\vartheta| = 45^\circ$ .

### 5.9.2. Systemgleichungen

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_d + \underline{U}_q + \underline{U}_{iP} \\ &= jX_d \cdot \underline{I}_d + jX_q \cdot \underline{I}_q + \underline{U}_{iP} \\ I_1 &= \underline{I}_d + \underline{I}_q \end{aligned}$$

## 5.10. Permanentterregte Synchronmaschine

### 5.10.1. Betriebsverhalten

$$\begin{aligned} \underline{\Psi}_1 &= L_1 \underline{I}_1 + \underline{\Psi}_{PM} & \Psi_{PM} &= \xi \cdot w_1 \cdot \hat{\Phi}_\delta \\ \underline{\Psi}_d &= L_d \underline{I}_d + \underline{\Psi}_{PM} & \Psi_q &= L_q \underline{I}_q \end{aligned}$$

$$U_{iP} = \sqrt{2} \omega_1 \cdot \Psi_{PM}$$

### 5.10.2. Drehmoment

$$M_D = \frac{m_1}{2} \cdot p \cdot [\Psi_{PM} \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d I_q]$$

äquivalent zu  $M_D$  Schenkelpollläufer

### 5.10.3. Betriebsarten

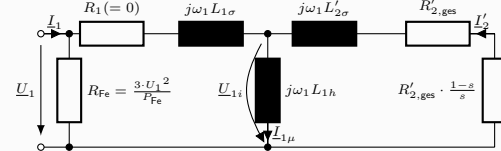
- symmetrischer Betrieb
- EC-Betrieb als BLDC

## 6. Asynchronmaschine

### 6.1. Größen

Übersetzungsverhältnis	$\ddot{u}$	[1]
Schlupf	$s$	[1]
Kippschlupf	$s_K$	[1]
Kippmoment	$M_K$	[Nm]
Bezogener Statorwiderstand	$\rho_1$	[1]
Bezogener Rotorwiderstand	$\rho_2$	[1]
Hilfsgröße	$\Delta\rho_1$	[1]
Rotor-Statorwärmeverluste	$P_{Cu}$	[W]
Magnetisierungsstrom	$\underline{I}_{1\mu}$	[A]
Rotor-Vorwiderstand	$R_{2V}$	[Ω]

## 6.2. ESB



### 6.2.1. Übersetzungsverhältnis

Bei Schleifring-ASM gilt:  $M_{21} = M_{12} = M$

$$\ddot{u} = \frac{L_{1h}}{M} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \cdot \frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} \cdot \frac{1}{\xi_{Schr}} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \cdot \frac{w_{1,eff}}{w_{2,eff}} \cdot \frac{1}{\xi_{Schr}}$$

$$\begin{aligned} R'_{2,ges} &= \ddot{u}^2 \cdot R_{2,ges} & R'_{2,ges} &= R'_2 + R'_{2V} \\ \underline{U}_2 &= \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{1i} & L'_{2\sigma} &= \ddot{u}^2 \cdot (L_{2\sigma} + L_{2Schr}) \\ \underline{I}_2 &= \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_2 \end{aligned}$$

### 6.3. Systemgleichungen

$$\begin{aligned} \ddot{u}_1 &= R_1 \cdot \ddot{i}_1 + \frac{\partial \ddot{\Psi}_1}{\partial t}, & \ddot{\Psi}_1 &= L_1 \cdot \ddot{i}_1 + M \cdot \ddot{i}_2 \cdot e^{jp\vartheta m} \\ 0 &= R_{2,ges} \cdot \ddot{i}_2 + \frac{\partial \ddot{\Psi}_2}{\partial t}, & \ddot{\Psi}_2 &= L_2 \cdot \ddot{i}_2 + M \cdot \ddot{i}_1 \cdot e^{-jp\vartheta m} \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_i - M_R - M_L \end{aligned}$$

## 6.4. Wichtige Größen

### 6.4.1. Schlupf

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} = \frac{\omega_{syn} - \omega_m}{\omega_{syn}} = \frac{\omega_1 - p \cdot \omega_m}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Gegenstrombremse	Motor	Generator
$s > 1$	$1 > s > 0$	$s < 0$

### 6.4.2. Drehzahl

$$\begin{aligned} \text{synchrone Drehzahl} & & \text{Nenn Drehzahl} \\ n_{syn} &= \frac{f}{p} & n_N &= n_s (1 - s_N) \end{aligned}$$

### 6.4.3. Leistung

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= m_1 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \\ P_1 &= S_1 \cdot \cos(\varphi) = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) \\ P_{Netz} &= m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_N) = P_1 + P_{Fe} \\ P_\delta &= 2\pi \cdot n_{syn} \cdot M_i = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} \\ P_{mi} &= (1 - s) P_\delta = P_\delta - P_{Cu2} - P_{2V} = \omega_m \cdot M_i \\ P_m &= 2\pi \cdot n \cdot (M_i - M_R) = \omega_m \cdot (M_i - M_R) = P_{mi} - P_R \\ P_{Cu2} &= s \cdot P_\delta = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \end{aligned}$$

### 6.4.4. Phase

$$\text{ASM immer induktiv} \Rightarrow \varphi > 0$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_{1Z} - \varphi_{1N} \\ \varphi &= \begin{cases} \arctan\left(\frac{b}{a}\right) & \text{für } a > 0 \\ \arctan\left(\frac{b}{a}\right) + \pi & \text{für } a < 0, b \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{b}{a}\right) - \pi & \text{für } a < 0, b < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

### 6.4.5. Weitere Parameter

$$\begin{aligned} L_{1\sigma} &= \sigma_1 \cdot L_{1h} & L_1 &= L_{1h} + L_{1\sigma} \\ L'_{2\sigma} &= \sigma_2 \cdot L_{1h} & L'_2 &= L_{1h} \cdot (1 + \sigma_2) \\ L_\sigma &= \sigma \cdot L_1 = L_{1\sigma} + \frac{\xi_{Schr}}{1 + \sigma_2} L'_{2\sigma} \\ \rho_1 &= \frac{R_1}{\omega_1 L_1} & \rho_2 &= \frac{R_{2,ges}}{\omega_1 L_2} = \frac{R'_{2,ges}}{\omega_1 L_2} \\ \Delta\rho_1 &= \sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1}{\sigma}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2} \\ \sigma &= 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_1) \cdot (1 + \sigma_2)} = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \end{aligned}$$

## 6.5. Statorstrom

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\omega_1 L_1} \cdot \frac{\rho_2 + js}{\rho_1 \cdot \rho_2 - \sigma \cdot s + j(\rho_2 + s \cdot \rho_1)}$$

Anlaufstrom:

$$I_{1A} = |\underline{I}_1|(s=1) = \frac{U_1}{\omega_1 L_\sigma} \sqrt{\frac{1 + \rho_2^2}{(1 - \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\sigma})^2 + (\frac{\rho_1 + \rho_2}{\sigma})^2}}$$

Ideeller Kurzschlussstrom:

$$I_{1Ki} = |\underline{I}_1|(s \rightarrow \pm\infty) = \frac{U_1}{\omega_1 L_\sigma} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\rho_1}{\sigma})^2}}$$

Leerlaufstrom:

$$I_{10} = |\underline{I}_1|(s=0) = \frac{U_1}{\omega_1 L_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_1^2}}$$

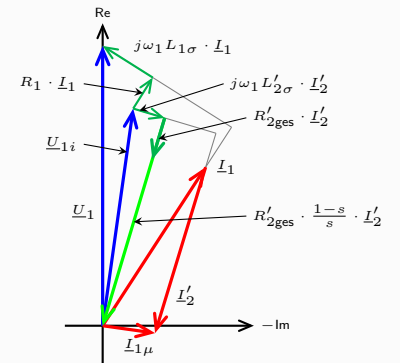
### 6.5.1. Magnetisierungsstrom

$$\underline{I}_\mu = \frac{\rho_2 + j \cdot s \cdot (\sigma - \sigma_1 \cdot (1 - \sigma))}{\rho_1 \cdot \rho_2 - \sigma \cdot s + j \cdot (\rho_2 + s \cdot \rho_1)} \cdot \frac{\underline{U}_1}{\omega_1 L_1}$$

## 6.6. Zeigerdiagramm

### Zeigerdiagramm

1.  $\underline{U}_1$  auf reelle Achse legen und  $\underline{I}_1$  einzeichnen
2.  $R_1 \underline{I}_1$  (gleiche Phasenlage wie  $\underline{I}_1$ )  
 $j\omega_1 L_{1\sigma} \underline{I}_1$  (eilt  $\underline{I}_1$  um  $90^\circ$  voraus)
3.  $\underline{U}_{1i} = \underline{U}_1 - R_1 \underline{I}_1 - j\omega_1 L_{1\sigma} \underline{I}_1$
4.  $\underline{I}_{1\mu} = \frac{\underline{U}_{1i}}{j\omega_1 L_{1h}}$  (eilt  $\underline{U}_{1i}$  um  $90^\circ$  nach)
5.  $\underline{I}'_2 = \underline{I}_{1\mu} - \underline{I}_1$
6.  $R'_{2,ges} \underline{I}'_2$  (parallel zu  $\underline{I}'_2$ )
7.  $j\omega_1 L'_{2\sigma} \underline{I}'_2$  (eilt  $\underline{I}'_2$  um  $90^\circ$  voraus)
8.  $R'_{2,ges} \cdot \frac{1-s}{s} \cdot \underline{I}'_2 = -\underline{U}_{1i} - R'_{2,ges} \underline{I}'_2 - j\omega_1 L'_{2\sigma} \underline{I}'_2$

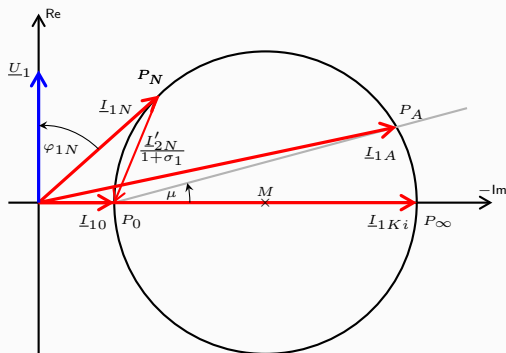


## 6.7. Stromortskurve

bei  $R_1 = 0$   $\tan(\mu) = s_K$

**Stromortskurve**  $R_1 = 0 \wedge R_{Fe} = 0$

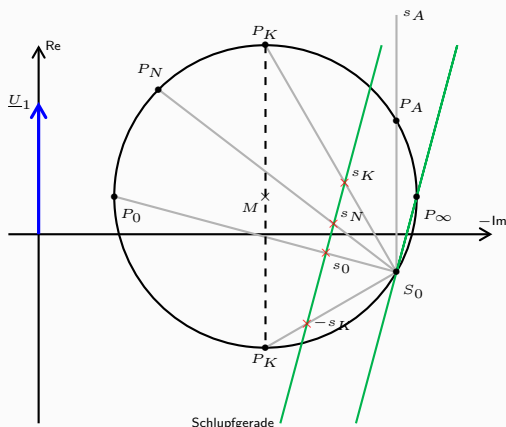
1.  $\underline{U}_1$  auf reelle Achse legen  $\Rightarrow \varphi_{1U} = 0$
2.  $R_1 = 0 \Rightarrow \underline{I}_{10}$  und  $\underline{I}_{1Ki}$  haben keinen Realteil
3. Kreismittelpunkt auf Im-Achse zwischen  $\underline{I}_{1Ki}$  und  $\underline{I}_{10}$
4.  $\mu$  zwischen  $P_0$  und  $P_A$



## 6.7.1. Schlupfgerade

**Schlupfgerade**  $R_1 = 0 \wedge R_{Fe} \neq 0$

1. (Bei  $R_{Fe} = 0$ ) Mittelpunkt  $M$  auf -Im Achse
2. Schlupfgerade an beliebiger Stelle einzeichnen
3. gesuchtes  $s$  aus Längenverhältnis zu bekanntem Schlupf bestimmen



## 6.7.2. Maßstab

Strommaßstab	$m_I$	$\left[ \frac{A}{cm} \right]$
Leistungsmaßstab	$m_P = m_1 \cdot U_1 \cdot m_I$	$\left[ \frac{W}{cm} \right]$
Drehmomentmaßstab	$m_M = \frac{m_P}{2\pi \cdot n_{syn}}$	$\left[ \frac{Nm}{cm} \right]$

## 6.7.3. Ablesbare Werte

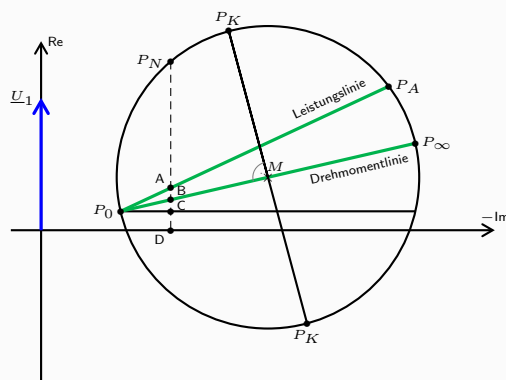
$R_1 \neq 0 \wedge R_{Fe} \neq 0$

Aufgenommene elektrische Leistung	$P_1 = \overline{PD} \cdot m_P$
Eisenverluste Stator	$P_{Fe} = \overline{CD} \cdot m_P$
Kupferverluste Stator	$P_{Cu1} = \overline{BC} \cdot m_P$
Kupferverluste Rotor	$P_{Cu2} = \overline{AB} \cdot m_P$
Abgegebene mechanische Leistung	$P_m = \overline{PA} \cdot m_P$
Inneres Drehmoment	$M_i = \overline{PB} \cdot m_M$

Definition Punkt D: Orthogonale Projektion von  $P$  auf Im-Achse

$R_1 = 0$   $B = C$  und  $M$  auf Höhe von  $P_0$

$R_{Fe} = 0$   $C = D$  und  $P_0$  auf -Im Achse



## 6.8. Drehmoment

$M_K \sim \left( \frac{U_1}{f_1} \right)^2$   $M_N \sim \Phi_\delta \frac{U_1}{f_1}$

$M_i = M_R + M_L + J \frac{\partial \omega}{\partial t}$

## 6.8.1. Drehmomentgleichung

$M_i = 3p(1-\sigma) \frac{U_1^2}{\omega_1^2 L_\sigma} \frac{s \cdot s_K}{\Delta \rho_1 s_K^2 + 2 \frac{\rho_1}{\sigma} (1-\sigma) s_K s + \Delta \rho_1 s^2}$

Kippmoment:

$M_K = M_i(s_K) = \frac{3}{2} p \cdot (1-\sigma) \frac{U_1^2}{\omega_1^2 L_\sigma} \left( \frac{1}{\Delta \rho_1 + \frac{\rho_1}{\sigma} (1-\sigma)} \right)$

$(R_1 = 0) : M_K = \frac{m_1 U_1 \frac{I_{1Ki} - I_{10}}{2}}{2\pi \cdot n_s}$

Kippschlupf:  $s_K = \frac{\rho_2}{\sigma} \sqrt{\frac{1+\rho_1^2}{1+(\frac{\rho_1}{\sigma})^2}}$

$s_K > 0$  Motor  $s_K < 0$  Generator

## 6.8.2. Klossche Gleichung (Annahme $R_1 = 0$ )

$\frac{M_i}{M_K} = \frac{2 \cdot s_K \cdot s}{s_K^2 + s^2}$

$s_{1,2} = s_K \frac{M_K}{M_i} \pm \sqrt{\left( s_K \frac{M_K}{M_i} \right)^2 - s_K^2}$

Nur echte Lösung wenn gilt:  $s < s_K$

## 6.9. Symmetrische Komponenten

$s_m + s_g = 2$   $s_m = s = \frac{n_s - n}{n_s}$   $s_g = \frac{n_s + n}{n_s}$

## 6.9.1. Spannungen Mit- und Gegensystem

Mitsystem  $\underline{U}_m = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_u + a \cdot \underline{U}_v + a^2 \cdot \underline{U}_w)$

Gegensystem  $\underline{U}_m = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_u + a^2 \cdot \underline{U}_v + a \cdot \underline{U}_w)$

Nullsystem  $\underline{U}_m = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_u + \underline{U}_v + \underline{U}_w)$

Nullsystem verschwindet bei Dreiecksschaltung oder Sternschaltung ohne herausgeführten Sternpunkt

## 6.9.2. Drehmoment mit Kompensation (Kippschlupf ändert sich)

$M_{ges} = M_m - M_g$

$M = 3p \cdot (1-\sigma) \cdot \frac{U_1^2}{\omega^2 L_1} \cdot \frac{\rho_2 \cdot s}{(\rho_1 \cdot \rho_2 - \sigma \cdot s)^2 + (\rho_2 + s \cdot \rho_1)^2}$