

## Vorlesungsinhalt

1. Einleitung
2. Drehfelder in elektrischen Maschinen
3. Mathematische Analyse von Luftspaltfeldern
4. Spannungsinduktion in Drehstrommaschinen
- 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine**
6. Die Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine
7. Antriebstechnik mit der Asynchronmaschine
8. Die Synchronmaschine
9. Erregereinrichtungen und Kennlinien
10. Gleichstromantriebe

# 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine



Quelle: Siemens AG

## 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine

### 5.1 Funktionsweise der Schleifringläufermaschine

### 5.2 Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

### 5.3 Asynchrone Energiewandlung

### 5.4 Kreisdiagramm der Asynchronmaschine

### 5.5 Anfahren des Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen

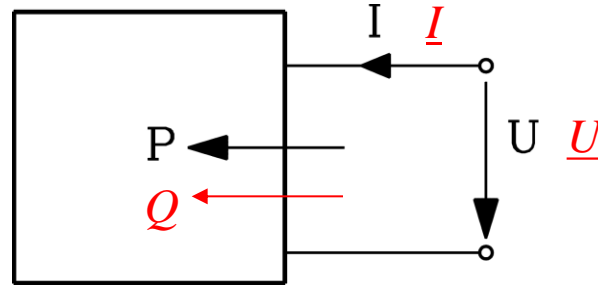
### (5.6 Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer-Asynchronmaschinen)

# Bezugspfeile: Zählpfeilsystem für Wirk- und Blindleistungen

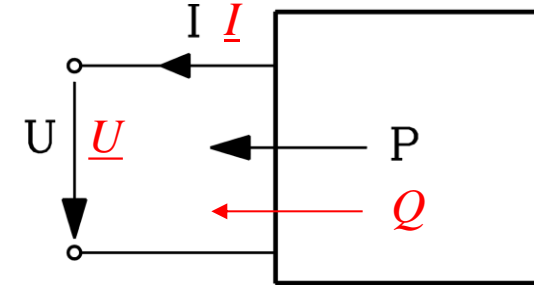
Wiederholung



$P$ : Wirkleistung  
 $Q$ : Blindleistung  
 $U$ : El. Spannung  
 $I$ : El. Strom



a)



b)

**Bezugspfeile:**  
**Zählpfeilsystem für Wirk- und Blindleistungen**

$$P_{DC} = U \cdot I$$

$$P_{AC} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q_{AC} = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

- a) **Verbraucherzählpfeilsystem:** Zugeführte el. Wirkleistung  $P$  ist positiv  
Induktive/kapazitive Blindleistung positiv/negativ
- b) **Erzeugerzählpfeilsystem:** Abgegebene el. Wirkleistung  $P$  ist positiv;  
Induktive/kapazitive Blindleistung negativ/positiv

**Beispiel:** Im **VZS** gilt:

- $P > 0$  : **Verbraucher** (z. B. Motor, Heizwiderstand, Laden v. Batterien,...)
- $P < 0$  : **Erzeuger** (z. B. Generator, Batterie, Brennstoffzelle,...)



# Wirk- und Blindleistungsfluss, $m$ -phasig, im Verbraucher-Zählpfeil-System

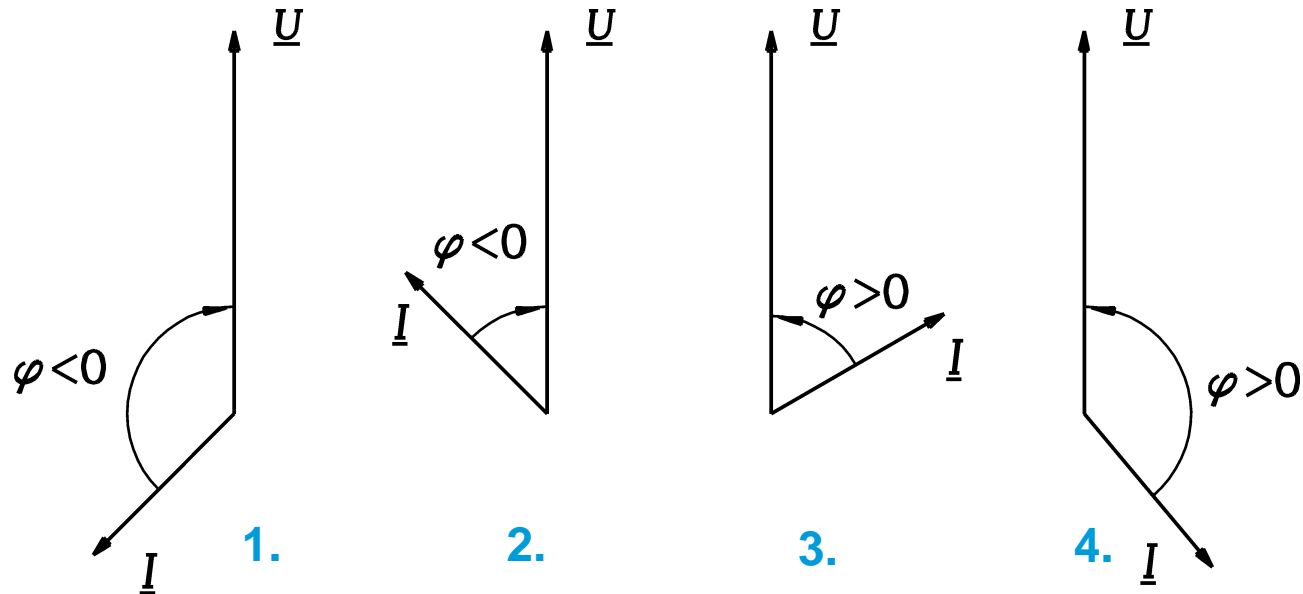
		Wirkleistung	Blindleistung
		$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$Q = m \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$
1.	$-180^\circ \leq \varphi < -90^\circ$	$P < 0$ , Generator	$Q < 0$ , kapazitiver Verbraucher
2.	$-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$	$P > 0$ , Motor	$Q < 0$ , kapazitiver Verbraucher
3.	$0 \leq \varphi < 90^\circ$	$P > 0$ , Motor	$Q > 0$ , induktiver Verbraucher
4.	$90^\circ \leq \varphi < 180^\circ$	$P < 0$ , Generator	$Q > 0$ , induktiver Verbraucher

Mathematisch

positiver

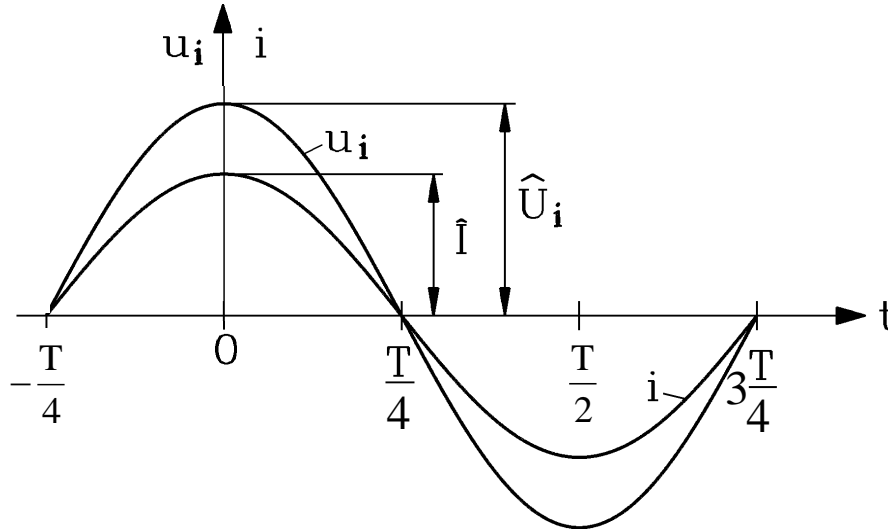
Winkelzählsinn =

Gegen-Uhrzeigersinn



# Drehmomenterzeugung bei Sinusstromspeisung

**Beispiel:** Strom und induzierte Spannung „in Phase“



- Sinusförmiger Strangstrom  $i$
- Sinusförmige induzierte Spannung je Strang  $u_i$  (auch:  $u_h$ : „Hauptfeldspannung“ genannt)
  - a) Pulsierende Leistung je Strang, aber
  - b) Konstante Leistung und Drehmoment in der Summenwirkung aller drei Stränge.
- „Innere“ Leistung („Luftspaltleistung“)  $p_\delta$  berechnet aus Strangstrom und induzierter Spannung

$$p_\delta(t) = \hat{U}_i \cos(\omega t) \cdot \hat{I} \cos(\omega t) + \hat{U}_i \cos(\omega t - 2\pi/3) \cdot \hat{I} \cos(\omega t - 2\pi/3) + \hat{U}_i \cos(\omega t - 4\pi/3) \cdot \hat{I} \cos(\omega t - 4\pi/3)$$

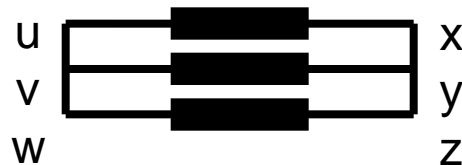
$$p_\delta(t) = \frac{\hat{U}_i \hat{I}}{2} \cdot [\cos(2\omega t) + 1] + \frac{\hat{U}_i \hat{I}}{2} \cdot \left[ \cos(2\omega t - \frac{4\pi}{3}) + 1 \right] + \frac{\hat{U}_i \hat{I}}{2} \cdot \left[ \cos(2\omega t - \frac{8\pi}{3}) + 1 \right]$$

$$p_\delta(t) = m \cdot \frac{\hat{U}_i \cdot \hat{I}}{2} = 3 \cdot \frac{\hat{U}_i \cdot \hat{I}}{2} = konst.$$

$$M_e = \frac{(3/2) \cdot \hat{U}_i \cdot \hat{I}}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

# Schleifringläufer-Asynchronmaschine

- Im Ständer und Läufer je eine Drehstromwicklung
- Die drei Läuferwicklungsstränge sind **kurz geschlossen**

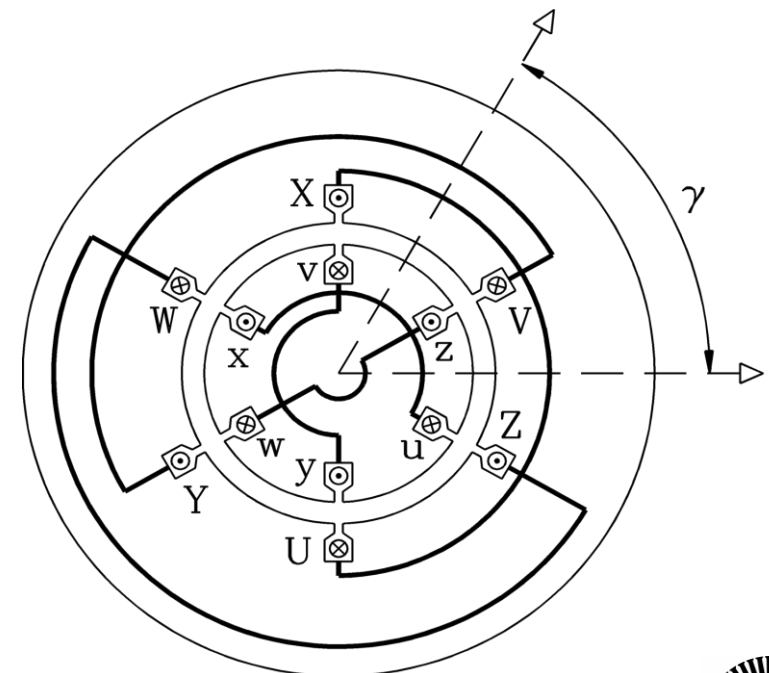
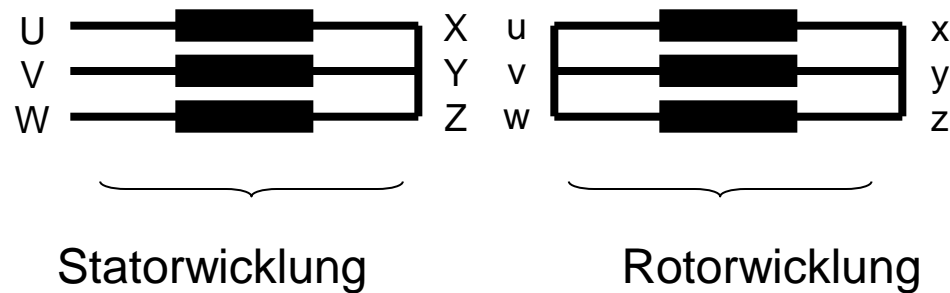


- Die drei Ständerwicklungsstränge, gespeist mit Drehstromsystem (Strom  $I_s$ , Frequenz  $f_s$ ),  
erregen Grundwellen-Luftspaltfeld  $B_{\delta,s}$ , das mit  $n_{\text{syn}}$  dreht.
- Wenn **Läufer mit  $n \neq n_{\text{syn}}$  (= ASYNCHRON)** dreht,  
induziert  $B_{\delta,s}$  in die Läuferwicklung Spannung  $U_{\text{hr}}$ ,  
die je Läuferstrang den Läuferstrom  $I_r$  treibt.
- Läuferstrom und Ständerfeld bilden über **LORENTZ-Kraft Drehmoment  $M_e$**

## Beispiel:

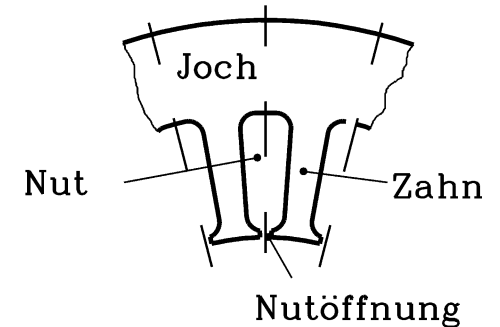
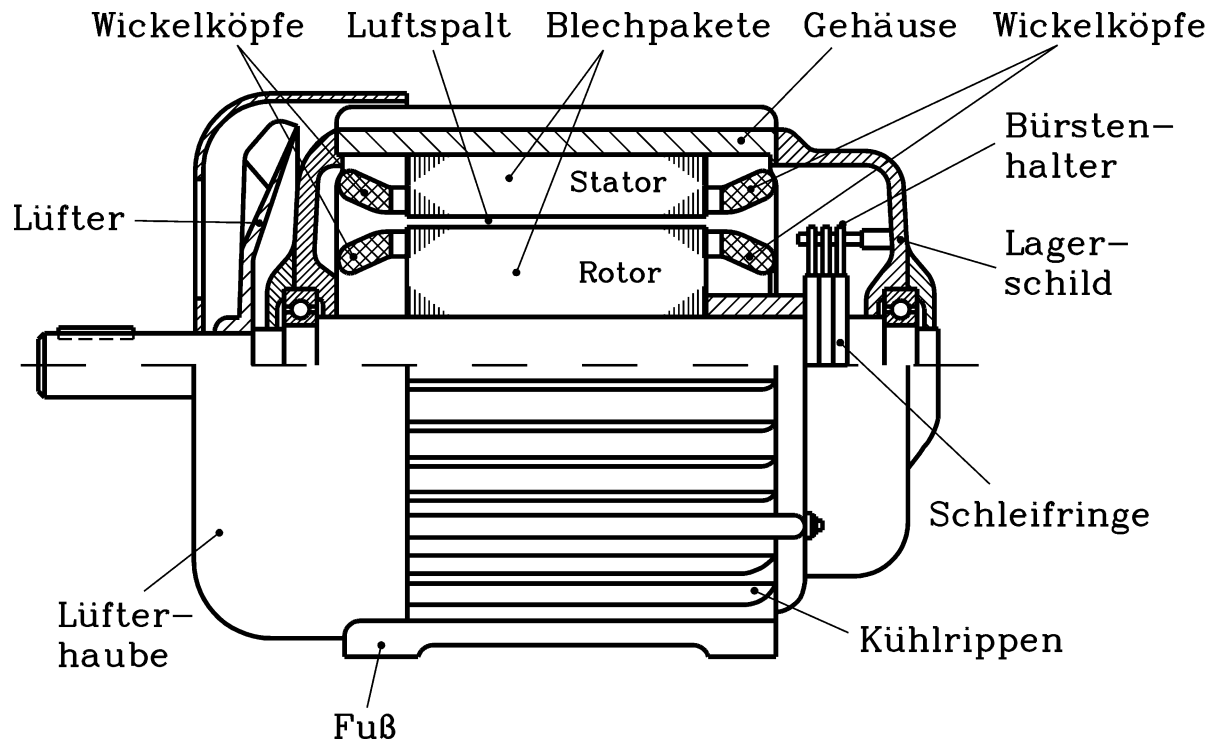
**Primär:** Sternschaltung der dreisträngigen Drehfeldwicklung

**Sekundär:** Kurzgeschlossene Sternschaltung einer dreisträngigen Drehfeldwicklung



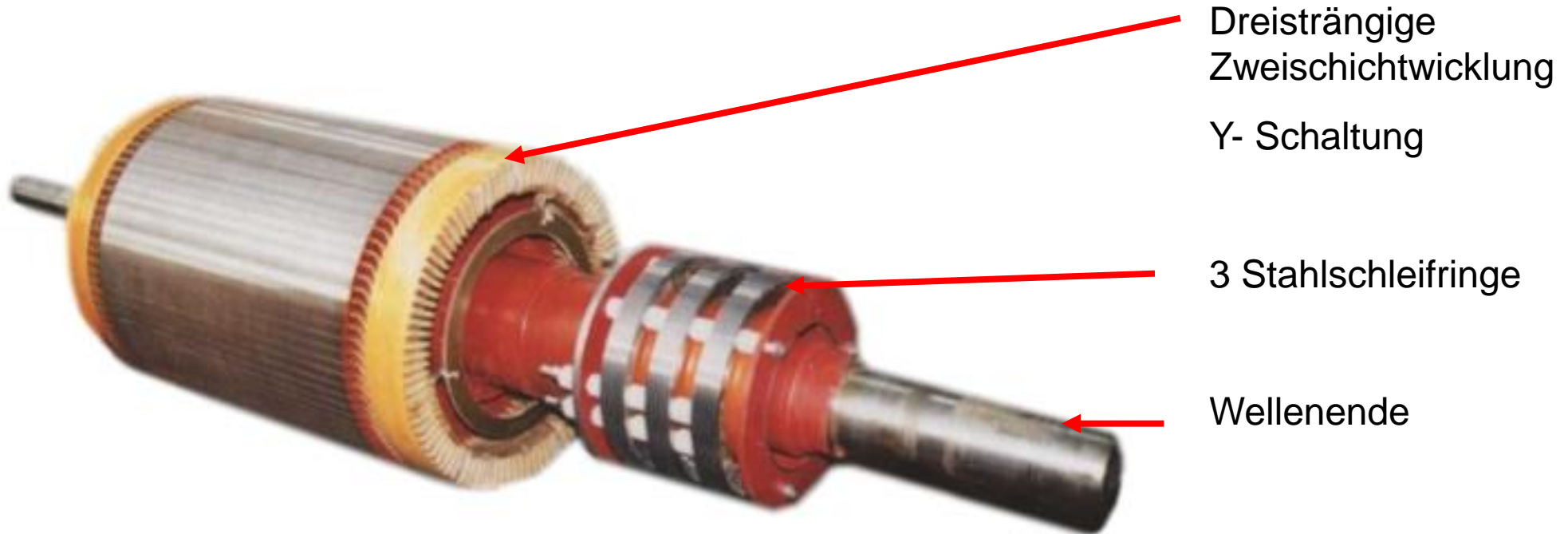


# Schleifringläufer-Asynchronmaschine: Aufbau



Quelle: H. Kleinrath,  
Studententext

# Dreiphasig bewickelter Schleifringläufer mit den drei Stahlschleifringen



Quelle:  
GE Wind, Germany

# Asynchronmaschine - Funktionsprinzip

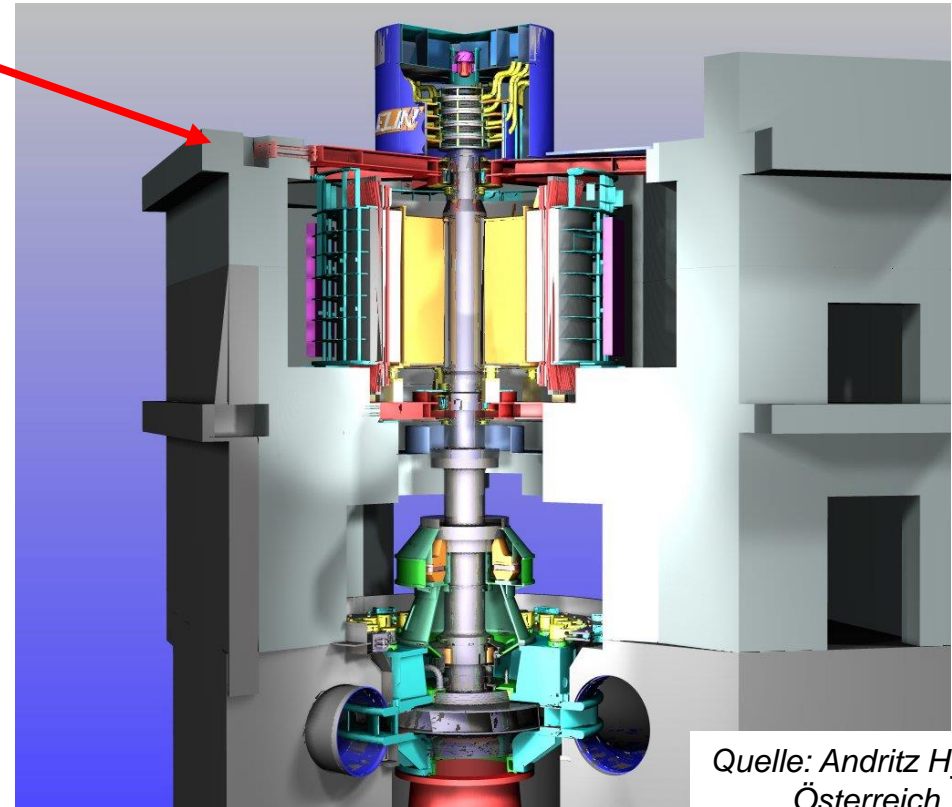
- Der **Schleifringläufer** hat eine **kurzgeschlossene** Drehfeldwicklung, z.B. **vier**polig (alternativ: “Kurzschluss-Käfig”, siehe Kap. 6).
- **Ständer**: Hat eine (dreisträngige) Drehfeldwicklung, z. B. 4-polig.
- Der Läufer rotiert **langsamer** als das Drehfeld, daher Relativbewegung zwischen Läufer und Ständerdrehfeld. Dies führt zu einer **Spannungsinduktion** in der Läuferwicklung durch das Ständerdrehfeld, sodass Läuferströme fließen.
- **LORENTZ-Kraft** vom Stator-Drehfeld auf stromdurchflossene Leiter der Läuferwicklung: Es entsteht das elektromagnetische **Drehmoment  $M_e$** , das den Läufer **ASYNCHRON** (“langsamer”) mit dem Drehfeld mitzieht.

# Einsatzgebiet: Z.B. Asynchrongeneratoren (ASG)

Quelle: Siemens AG,  
Deutschland



**ASG**



Quelle: Andritz Hydro,  
Österreich

**Windgeneratoren** mit Getriebe und doppelgespeisten Asynchrongeneratoren, ca. 1 ... 8 MW

**Motorgenerator** für das Pumpspeicherwerk *Goldisthal/Thüringen*, vertikale Welle (unten: Pump-Turbine), 340 MVA

# Läuferfrequenz $f_r$ und Schlupf $s$

- Im **Drehtrafo** ( $n = 0$ ) ist die Läufer Spannung  $U_{hr}$  ( $f_r = f_s$ ) abhängig von der Läuferstellung  $\gamma$  **phasenverschoben**:

$$\underline{U}_{hr} \cdot e^{j \cdot \omega_s \cdot t} = U_{hr} \cdot e^{-j \cdot \gamma} \cdot e^{j \cdot \omega_s \cdot t} \quad \gamma = \gamma_0$$

- **Dreht der Läufer** ( $n = \text{konst.} > 0$ :  $f_r \neq f_s$ ), nimmt der Läuferdrehwinkel zu:  $\gamma = p \cdot 2\pi \cdot n \cdot t + \gamma_0$

- $\Rightarrow \underline{U}_{hr} \cdot e^{j \cdot \omega_r \cdot t} = U_{hr} \cdot e^{j \cdot (-2\pi \cdot n \cdot p + \omega_s) \cdot t} \cdot e^{-j \cdot \gamma_0}$

**Läufer-Kreisfrequenz**  $\omega_r = \omega_s - 2\pi \cdot n \cdot p$

**Läuferfrequenz**  $f_r = f_s - n \cdot p$

- **Schlupf  $s$**  (Definition):

$$s = f_r / f_s$$

$$f_r = s \cdot f_s$$

$$s = \frac{f_s - n \cdot p}{f_s} = \frac{f_s / p - n}{f_s / p}$$

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}$$

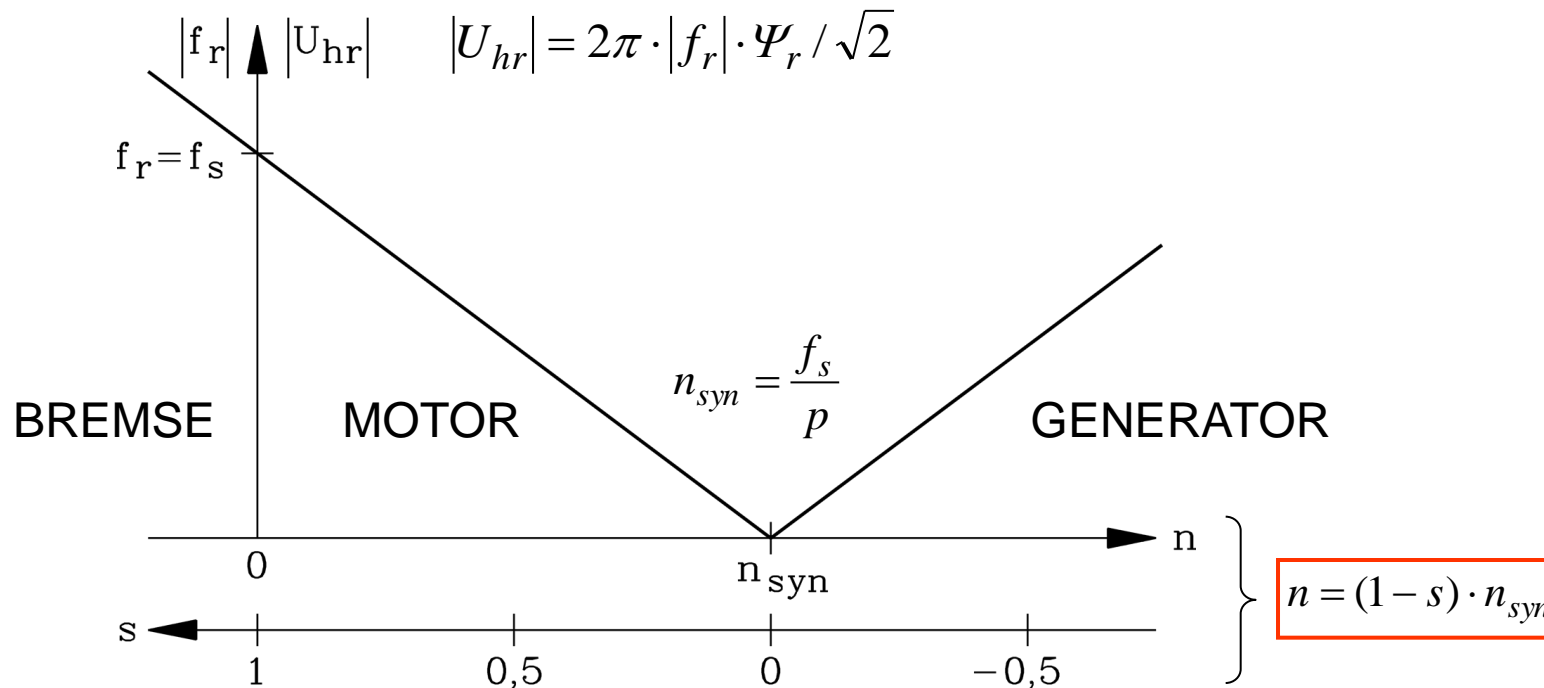
# Läuferfrequenz und Schlupf

Läuferfrequenz

$$f_r = f_s - n \cdot p$$

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}$$

$$s \cdot n_{syn} = n_{syn} - n \Rightarrow n = n_{syn} \cdot (1 - s)$$



## Zusammenfassung: Funktionsweise der Schleifringläufermaschine

- Ständer-Grundfeld-Drehwelle  $B_{\delta,s}$  dreht synchron  $n_{\text{syn}}$
- Läufer dreht asynchron  $n$ ; hat Schlupf  $s$  gegenüber Ständerfeld
- Ständer-Grundfeld-Drehwelle induziert Läuferwicklung
- Läuferdrehfeldwicklung kurzgeschlossen – Läuferstromsystem  $I_r$  fließt
- Läuferströme  $I_r$  bilden mit Ständerdrehfeld  $B_{\delta,s}$  ele.-magn. Drehmoment  $M_e$
- Motorbetrieb:  
Läufer dreht langsamer als Ständer-Drehwelle  $n < n_{\text{syn}}$
- Generatorbetrieb:  
Läufer dreht schneller als Ständer-Drehwelle  $n > n_{\text{syn}}$

- 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine
  - 5.1 Funktionsweise der Schleifringläufermaschine
  - 5.2 Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine**
  - 5.3 Asynchrone Energiewandlung
  - 5.4 Kreisdiagramm der Asynchronmaschine
  - 5.5 Anfahren des Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen
  - (5.6 Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer-Asynchronmaschinen)



# Läuferspannungsgleichung 1

- **KONSTANTE** Drehzahl = **KONSTANTE** Frequenzen = **STATIONÄRES** Betriebsverhalten = nur zeitlich sinusförmig veränderliche Größen = **komplexe Wechselstromrechnung**

$$i_s(t) = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot \cos(\omega_s t) = \operatorname{Re}\left(\sqrt{2} \cdot \underline{I}_s \cdot e^{j \cdot \omega_s \cdot t}\right) \Rightarrow i_s(t) \leftrightarrow \underline{I}_s$$

- **Läuferstrang kurzgeschlossen:  $u_r = 0$ :** ( $R_r$ : Widerstand eines Läuferwicklungsstrangs)

$$R_r \cdot i_r = u_r + u_{i,r} = u_r - d\Psi_r / dt \Rightarrow R_r \cdot i_r + d\Psi_r / dt = u_r = 0$$

- **$\Psi_r$  : gesamte Flussverkettung mit einem Läuferstrang:**

- a) **Gegeninduktion** vom **Ständerdrehfeld  $B_s$**  in die Läuferwicklungsstränge:

$$j \cdot \omega_r \cdot M_{rs} \cdot \underline{I}_s$$

- b) **Selbstinduktion** durch **Läufer-Luftspaltfeld  $B_r$** : Läuferwechselströme je Strang  $I_r$  (Läuferfrequenz  $f_r$ ) erregen in Läuferdrehstromwicklung ein Läufer-Luftspalt-Drehfeld

$$B_{\delta,r}(x_r, t) = \hat{B}_{\delta,r} \cdot \cos(x_r \cdot \pi / \tau_p - \omega_r \cdot t) = \hat{B}_{\delta,r} \cdot \cos(\gamma_r - \omega_r \cdot t)$$

$$\hat{B}_{\delta,r} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{m_r}{p} \cdot k_{wr} N_r \cdot I_r$$

- $B_r$  induziert in die Läuferwicklungsstränge die Selbstinduktionsspannung  $j \cdot \omega_r \cdot L_{rh} \cdot \underline{I}_r$

# Läuferspannungsgleichung 2

c) **Selbstinduktion** durch Streufelder des Läufers:

$$\left. \begin{array}{l} - \text{Läufer-Oberfelder: } j \cdot \omega_r \cdot \sigma_{r,o} \cdot L_{rh} \cdot \underline{I}_r \\ - \text{Läufernutstrefelfeld: } j \cdot \omega_r \cdot L_{r,\sigma Q} \cdot \underline{I}_r \\ - \text{Läuferstirnstrefelfeld: } j \cdot \omega_r \cdot L_{r,\sigma b} \cdot \underline{I}_r \end{array} \right\} L_{r\sigma} = L_{r,\sigma Q} + L_{r,\sigma b} + \sigma_{r,o} \cdot L_{rh}$$

d) **Rotorstrangwiderstand**  $R_r$

• **Läuferspannungsgleichung:**

$$j \cdot \omega_r \cdot M_{rs} \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_r \cdot L_{rh} \cdot \underline{I}_r + j \cdot \omega_r \cdot (\sigma_{r,o} \cdot L_{rh} + L_{r,\sigma Q} + L_{r,\sigma b}) \cdot \underline{I}_r + R_r \cdot \underline{I}_r = 0$$

a)

b)

c)

d)

$$j \cdot \omega_r \cdot M_{rs} \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_r \cdot L_{rh} \cdot \underline{I}_r + j \cdot \omega_r \cdot L_{r\sigma} \cdot \underline{I}_r + R_r \cdot \underline{I}_r = 0$$

# Ständerspannungsgleichung 1

a) **Gegeninduktion:** Das Läuferfeld  $B_{\delta,r}$  rotiert relativ zum Ständer mit synchroner Drehzahl:

$$\begin{aligned} \text{denn: } v &= v_m + v_{r,syn} = 2 \cdot p \cdot n \cdot \tau_p + 2 \cdot f_r \cdot \tau_p = 2p \cdot n_{syn} \cdot (1-s) \cdot \tau_p + 2 \cdot s \cdot f_s \cdot \tau_p \\ v &= 2p \cdot \frac{f_s}{p} \cdot (1-s) \cdot \tau_p + 2 \cdot s \cdot f_s \cdot \tau_p = 2 \cdot f_s \cdot \tau_p = v_{syn} \end{aligned}$$

und induziert daher die Ständerwicklung mit Ständerfrequenz  $f_s$ :  $j \cdot \omega_s \cdot M_{sr} \cdot \underline{I}_r$

b) **Selbstinduktion:** Ständer-Luftspaltfeld  $B_{\delta,s} \Rightarrow$  Selbstinduktionsspannung:

$$j \cdot \omega_s \cdot L_{sh} \cdot \underline{I}_s$$

c) **Selbstinduktion** durch Streufelder des Ständers:

- <b>Ständer-Oberfelder:</b>	$j \cdot \omega_s \cdot \sigma_{s,o} \cdot L_{sh} \cdot \underline{I}_s$	}	$L_{s\sigma} = L_{s,\sigma Q} + L_{s,\sigma b} + \sigma_{s,o} \cdot L_{sh}$
- <b>Ständernutstrefeld:</b>	$j \cdot \omega_s \cdot L_{s,\sigma Q} \cdot \underline{I}_s$		
- <b>Ständerstirnstrefeld:</b>	$j \cdot \omega_s \cdot L_{s,\sigma b} \cdot \underline{I}_s$		

d) **OHM'scher Spannungsfall** am **Ständerstrangwiderstand**  $R_s$

# Ständerspannungsgleichung 2

- Summe aller Ständer-Spannungskomponenten muss der an den Klemmen anliegenden, durch das Netz vorgegebenen Strangspannung  $\underline{U}_s$  gleich sein (*Kirchhoff'sche Maschenregel*)
- **Ständerspannungsgleichung:**

$$\underline{U}_s = j \cdot \omega_s \cdot M_{sr} \cdot \underline{I}_r + j \cdot \omega_s \cdot L_{sh} \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_s \cdot (\sigma_{s,o} \cdot L_{sh} + L_{s,\sigma Q} + L_{s,\sigma b}) \cdot \underline{I}_s + R_s \cdot \underline{I}_s$$

a)

b)

c)

d)

$$\underline{U}_s = j \cdot \omega_s \cdot M_{sr} \cdot \underline{I}_r + j \cdot \omega_s \cdot L_{sh} \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_s \cdot L_{s\sigma} \cdot \underline{I}_s + R_s \cdot \underline{I}_s$$

# Ständer- und Läuferspannungsgleichung

- **Ständerspannungsgleichung:**

$$\underline{U}_S = j \cdot \omega_S \cdot M_{sr} \cdot \underline{I}_r + j \cdot \omega_S \cdot L_{sh} \cdot \underline{I}_S + j \cdot \omega_S \cdot L_{s\sigma} \cdot \underline{I}_S + R_S \cdot \underline{I}_S$$

- **Läuferspannungsgleichung:**

$$0 = j \cdot \omega_r \cdot M_{rs} \cdot \underline{I}_S + j \cdot \omega_r \cdot L_{rh} \cdot \underline{I}_r + j \cdot \omega_r \cdot L_{r\sigma} \cdot \underline{I}_r + R_r \cdot \underline{I}_r$$

# Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ (1)

- **Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$**  zwischen Stator- und Rotorwicklung:

$$\ddot{u} = \frac{k_{w,s} \cdot N_s}{k_{w,r} \cdot N_r}$$

- Mit  $m_r = m_s = m$  ( $= 3$ ) folgt:

$$\ddot{u}^2 \cdot L_{rh} = \left( \frac{k_{w,s} \cdot N_s}{k_{w,r} \cdot N_r} \right)^2 \cdot \mu_0 \cdot N_r^2 \cdot k_{w,r}^2 \cdot \frac{2m}{\pi^2} \cdot \frac{l \cdot \tau_p}{p \cdot \delta} = \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot k_{w,s}^2 \cdot \frac{2m}{\pi^2} \cdot \frac{l \cdot \tau_p}{p \cdot \delta} = L_{sh}$$

$$\ddot{u} \cdot M_{rs} = \frac{k_{w,s} \cdot N_s}{k_{w,r} \cdot N_r} \cdot \mu_0 \cdot N_s \cdot k_{w,s} \cdot N_r \cdot k_{w,r} \cdot \frac{2m}{\pi^2} \cdot \frac{l \cdot \tau_p}{p \cdot \delta} = \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot k_{w,s}^2 \cdot \frac{2m}{\pi^2} \cdot \frac{l \cdot \tau_p}{p \cdot \delta} = L_{sh}$$

- **Hauptinduktivität  $L_h$**

$$L_{sh} = \ddot{u} \cdot M_{rs} = \ddot{u}^2 \cdot L_{rh} = \underline{\underline{L_h}}$$

$$L_h = \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot k_{w,s}^2 \cdot \frac{2m}{\pi^2} \cdot \frac{l \cdot \tau_p}{p \cdot \delta}$$

# Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ (2)

- **Läuferspannungsgleichung:** Multiplikation mit  $\ddot{u}$

$$j \cdot \omega_r \cdot \ddot{u} \cdot M_{rs} \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_r \cdot \ddot{u}^2 \cdot L_{r,h} \cdot (\underline{I}_r / \ddot{u}) + j \cdot \omega_r \cdot \ddot{u}^2 \cdot L_{r\sigma} \cdot (\underline{I}_r / \ddot{u}) + \ddot{u}^2 \cdot R_r \cdot (\underline{I}_r / \ddot{u}) = 0$$

$$\ddot{u} \cdot U_r = U'_r$$

$$I_r / \ddot{u} = I'_r$$

$$L'_{r\sigma} = \ddot{u}^2 \cdot L_{r\sigma}$$

$$R'_r = \ddot{u}^2 \cdot R_r$$

- **Läuferspannungsgleichung mit  $\ddot{u}$  und  $\omega_r = s \cdot \omega_s$ :**

$$j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}_s + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot I'_r + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L'_{r\sigma} \cdot I'_r + R'_r \cdot I'_r = 0$$

- Erweiterung der **Ständerspannungsgleichung** mit  $\ddot{u}$ : ( $m_r = m_s : M_{rs} = M_{sr}$ )

$$\underline{U}_s = j \cdot \omega_s \cdot \ddot{u} \cdot M_{sr} \cdot (\underline{I}_r / \ddot{u}) + j \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_s \cdot L_{s\sigma} \cdot \underline{I}_s + R_s \cdot \underline{I}_s$$

$$\underline{U}_s = j \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot I'_r + j \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_s \cdot L_{s\sigma} \cdot \underline{I}_s + R_s \cdot \underline{I}_s$$

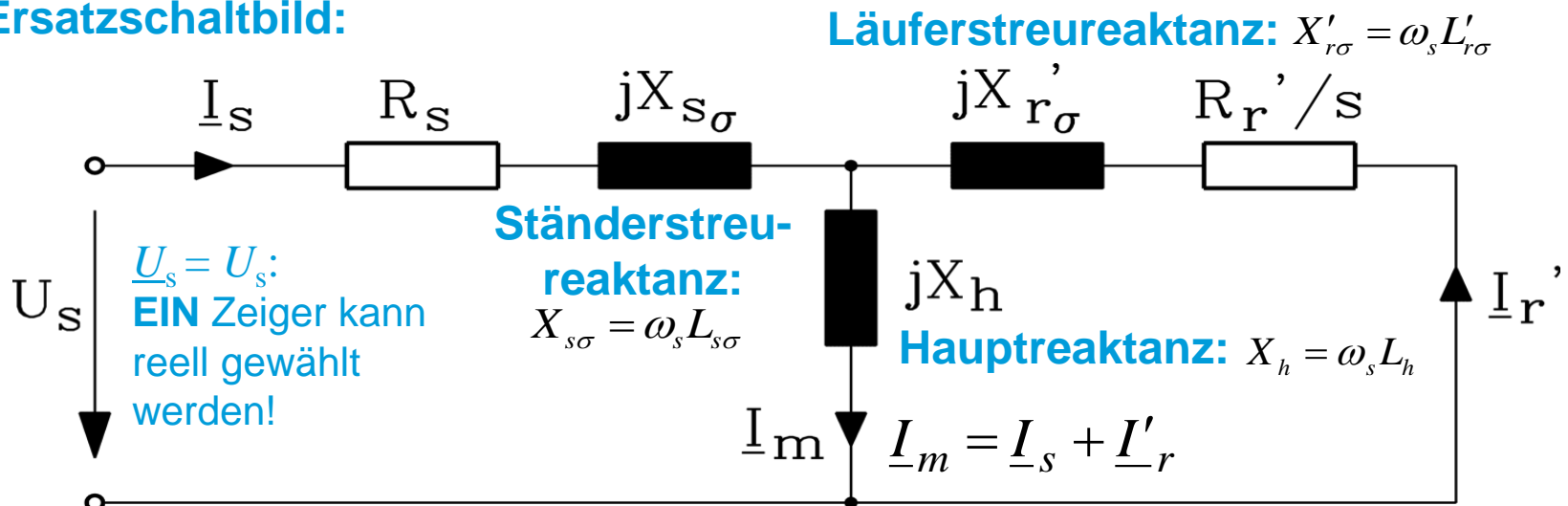
# T-Ersatzschaltbild je Strang

- $\underline{U}_s = j \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}'_r + j \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega_s \cdot L_{s\sigma} \cdot \underline{I}_s + R_s \cdot \underline{I}_s$
- $0 = j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}_s + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}'_r + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L'_{r\sigma} \cdot \underline{I}'_r + R'_r \cdot \underline{I}'_r$

- **Mit Reaktanzen  $X = \omega_s \cdot L$ :**

$$\underline{U}_s = R_s \cdot \underline{I}_s + j \cdot X_{s\sigma} \cdot \underline{I}_s + j \cdot X_h \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad 0 = \frac{R'_r}{s} \cdot \underline{I}'_r + j \cdot X'_{r\sigma} \cdot \underline{I}'_r + j \cdot X_h \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

- **T-Ersatzschaltbild:**





# Zeigerdiagramm (Stranggrößen)

- „Magnetisierungsstrom“  $\underline{I}_m$   
stellt Summenwirkung von Ständer- und Läuferfeld (= resultierendes Hauptfeld) dar.

$$\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_r$$

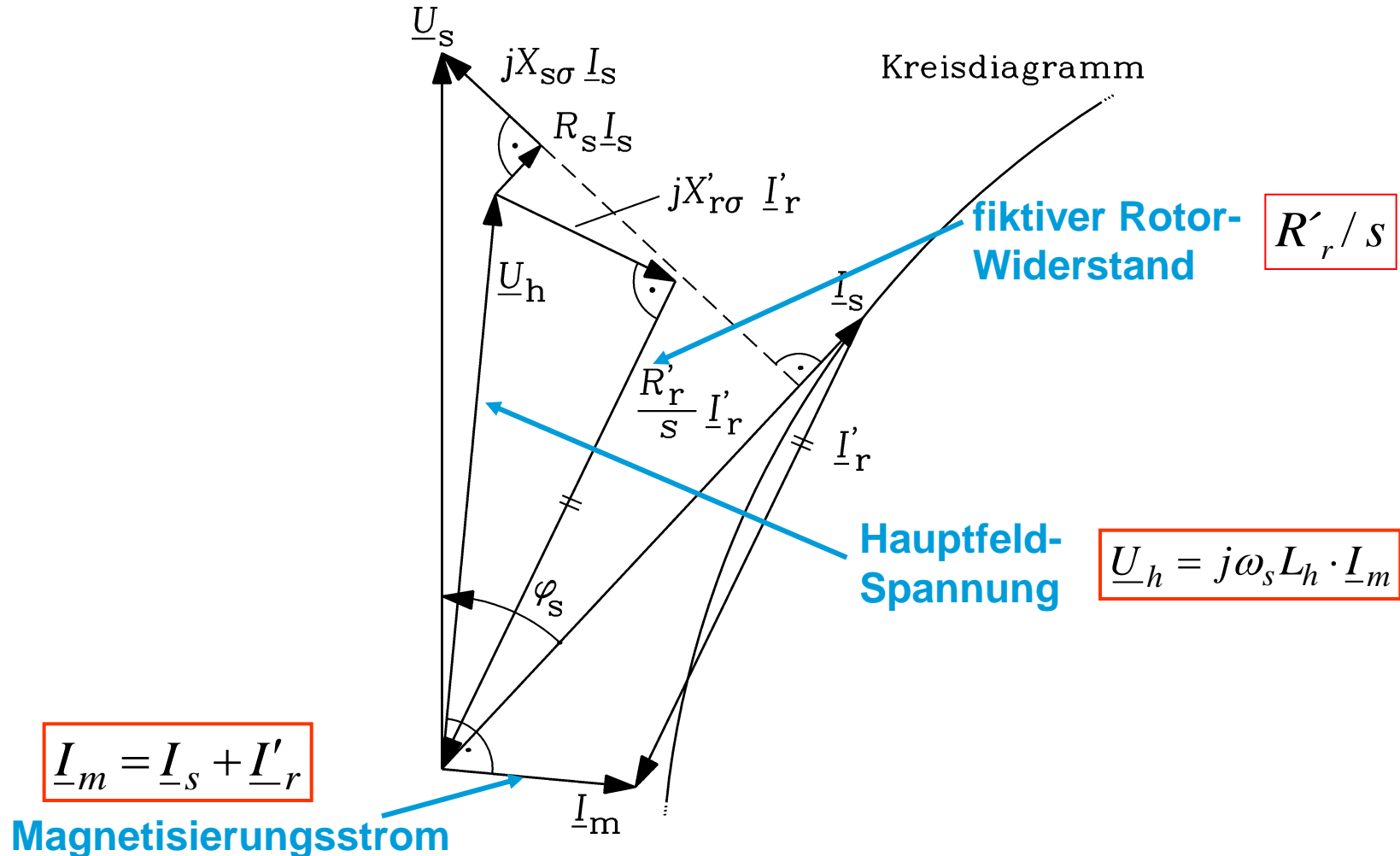
- **Hauptfeldspannung**  $\underline{U}_h$ :  
Gemeinsame Wirkung der durch das Hauptfeld induzierten Selbst- und Gegeninduktionsspannungen in Ständer- und Läuferwicklung

$$\underline{U}_h = j \cdot \omega_s \cdot L_h \cdot \underline{I}_m \quad \left\{ \begin{array}{l} U_h = U_{i,s} \\ U_h = U_{hr} / s, \quad U_{hr} = \ddot{u} \cdot U_{i,r} \end{array} \right.$$

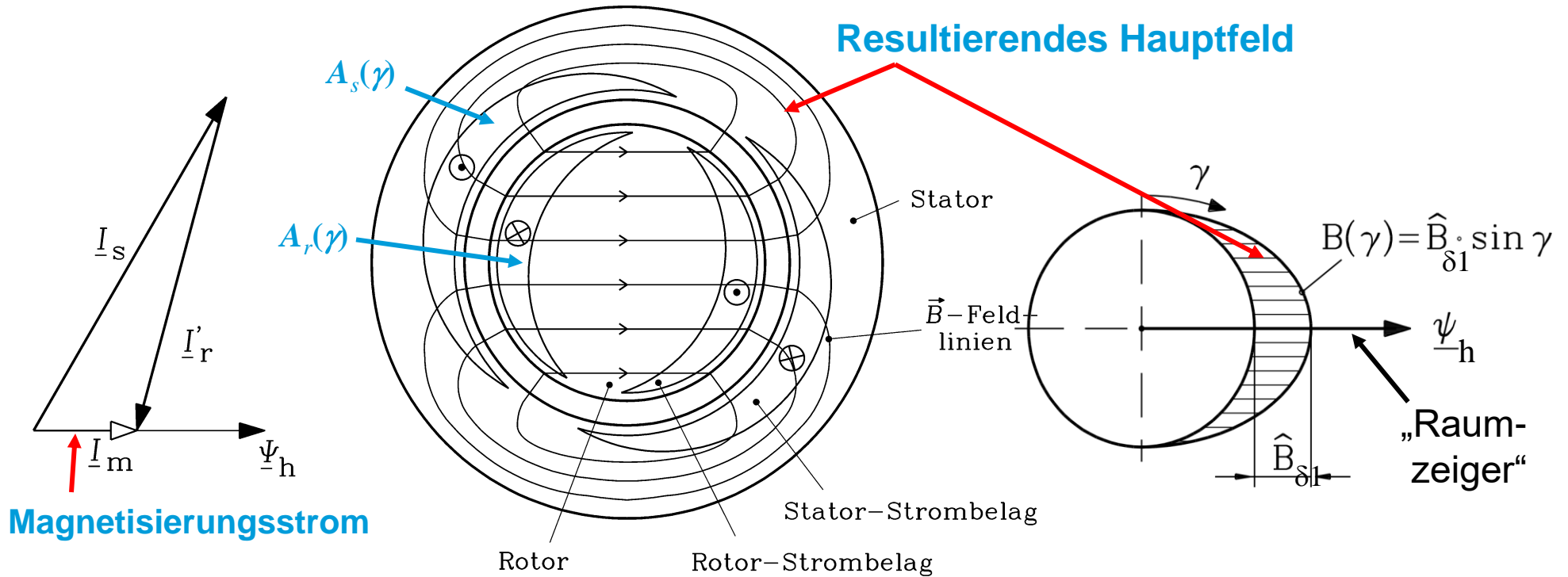
- Im Rotor ist tatsächlich die Rotorfrequenz  $f_r$  wirksam, wird aber durch Division mit  $s$  als  $\underline{U}_{hr} / s = j \cdot s \cdot \omega_s L_h \cdot \underline{I}_m / s = \underline{U}_h$  dargestellt.

- **Dafür tritt fiktiver Widerstand**  $\underline{R}'_r / s$  **auf.**

# Zeigerdiagramm (Stranggrößen)



# Resultierendes Hauptfeld entspricht Magnetisierungsstrom



$$U_h = \omega_s \cdot \Psi_h / \sqrt{2} = \omega_s \cdot N_s k_{w,s} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \tau_p \cdot l \cdot \hat{B}_{\delta 1} / \sqrt{2} = \omega_s L_h \cdot I_m$$



- Ständer (Stator)- und Läufer- (Rotor)-Feldgrundwelle werden von **sinusförmig verteilten Strombelägen**  $A_s(\gamma)$ ,  $A_r(\gamma)$  (Durchflutungen  $\Theta_s$ ,  $\Theta_r$ ) erregt.

$$\Theta = \frac{\tau_p}{\pi} \cdot \int_{\pi} A(\gamma) \cdot d\gamma$$

- Stator- und Rotorfeldwelle überlagern sich zum **resultierenden Hauptfeld**
- Eine sinusförmig verteilte Feldwelle kann durch einen **Raumzeiger in der Maschinenquerschnittsebene** ersatzweise dargestellt werden:  
Zeigerlänge = Feldamplitude,  
Zeigerrichtung = Lage des Nordpols.  
Dafür: **Alternative Zeiger**  $\underline{B}_{\delta 1}$  oder  $\underline{\Psi}_h$  oder  $\underline{I}_m$  mit derselben Lage!
- **ZEITZEIGER** ( $\underline{I}$  in komplexer Ebene)  
und  
**RAUMZEIGER** ( $\underline{I}$  in Querschnittsebene)  
im Stationärbetrieb **kongruent**.



# BLONDEL'sche Streuziffer $\sigma$

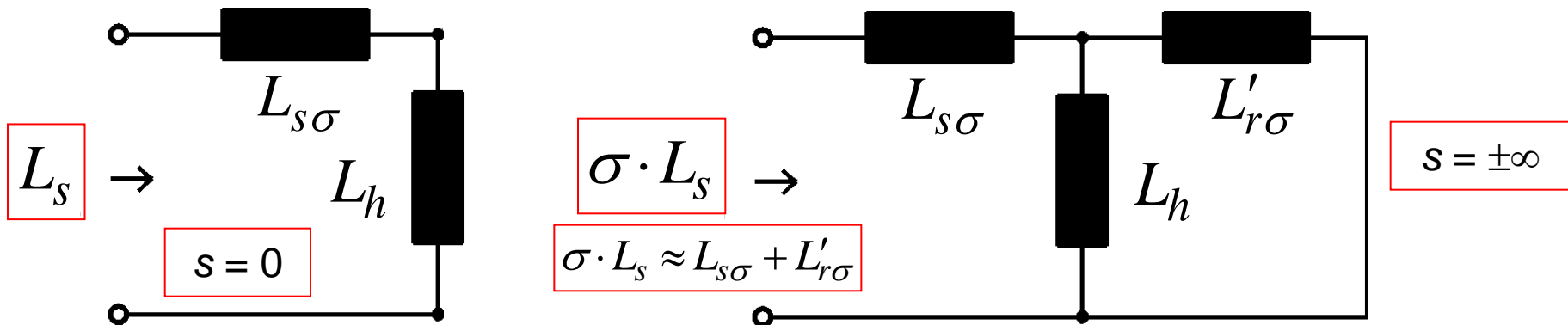
$$0 \leq \sigma \leq 1$$

- **Stranginduktivität/-reaktanz:**  $L_s = L_h + L_{s\sigma}$ ,  $X_s = X_h + X_{s\sigma}$   
 $L'_r = L_h + L'_{r\sigma}$ ,  $X'_r = X_h + X'_{r\sigma}$

Keine ... nur Streuung

- Quantifizierung der Streuflüsse nach BLONDEL: **Streuziffer:**

$$\sigma = 1 - \frac{L_h^2}{L_s L'_r} = 1 - \frac{X_h^2}{X_s X'_r}$$



$$L_{s\sigma} + \frac{L_h \cdot L'_{r\sigma}}{L_h + L'_{r\sigma}} = L_s - L_h + \frac{L_h \cdot L'_{r\sigma}}{L'_r} = L_s \cdot \left( 1 - \frac{L_h \cdot L'_r}{L_s \cdot L'_r} + \frac{L_h \cdot L'_{r\sigma}}{L_s \cdot L'_r} \right) = L_s \cdot \left( 1 - \frac{L_h^2}{L_s \cdot L'_r} \right) = \sigma \cdot L_s$$

- **Streuinduktivitäten:**  $L_{s\sigma} + \frac{L_h \cdot L'_{r\sigma}}{L_h + L'_{r\sigma}} \cong L_{s\sigma} + \frac{L_h \cdot L'_{r\sigma}}{L_h} = L_{s\sigma} + L'_{r\sigma}$

# Ersatzschaltbildparameter je Strang

## Beispiel: Nenndaten und per-unit-Größen:

Nennspannung  $U_N = 400 \text{ V}$  (stets verketteter Wert), Nennstrom  $I_N = 100 \text{ A}$ , **Sternschaltung**

Nennstrangspannung  $U_{s,N} = U_N / \sqrt{3} = \underline{\underline{231 \text{ V}}}$  , Nennstrangstrom  $I_{s,N} = I_N = \underline{\underline{100 \text{ A}}}$

Nenn-Scheinleistung :  $S_N = 3 \cdot U_{s,N} \cdot I_{s,N} = 3 \cdot 231 \cdot 100 = 69.3 \text{ kVA}$

Bezugsimpedanz (**Nennimpedanz**):  $Z_N = U_{s,N} / I_{s,N} = 231 / 100 = 2.31 \Omega$

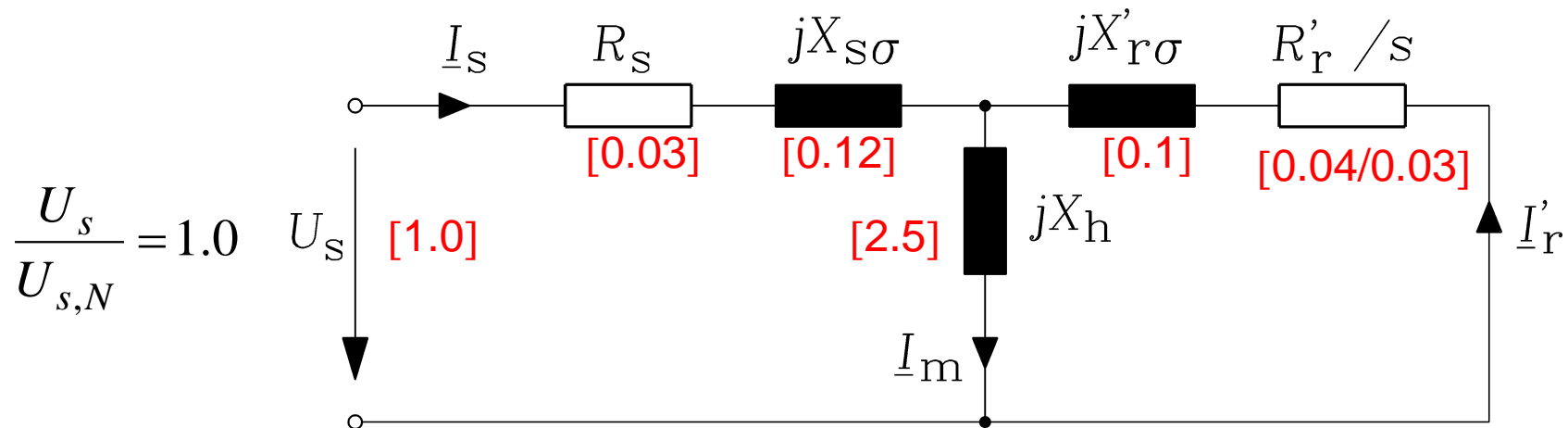
- **Streuziffer  $\sigma$** : *soll klein sein*: typisch 0.08 bis 0.1
- **Strangwiderstände**: *sollen klein sein*:  $r_s = R_s / Z_N$ ,  $r_r' = R_r' / Z_N$ : wenige Prozent 3 ... 6%
- **Hauptinduktivität**: *soll groß sein* (= Kopplung zwischen Ständer und Läufer !):  
prop.  $1/\delta \Rightarrow$  KLEINER Luftspalt: mechan. Untergrenze ca. 0.28 mm bei kleinen Motoren:  
 $X_h / Z_N = 2.5 \dots 3.0 = 250\% \dots 300\%$
- **Streuinduktivitäten**:  $X_{s\sigma} + X_{r\sigma}' \approx \sigma \cdot X_s \approx \sigma \cdot X_h$   
 $\sigma \cdot X_h / Z_N \approx (0.08 \dots 0.1) \cdot (2.5 \dots 3) = 0.2 \dots 0.3$

# T-Ersatzschaltbild-Parameter (p.u.) je Strang

Zahlenbeispiel:

in p.u.

Schlupf  $s = 0.03$



**Strangwerte (Phasenwerte) !**

Ersatzschaltbild OHNE  
Ummagnetisierungsverluste!

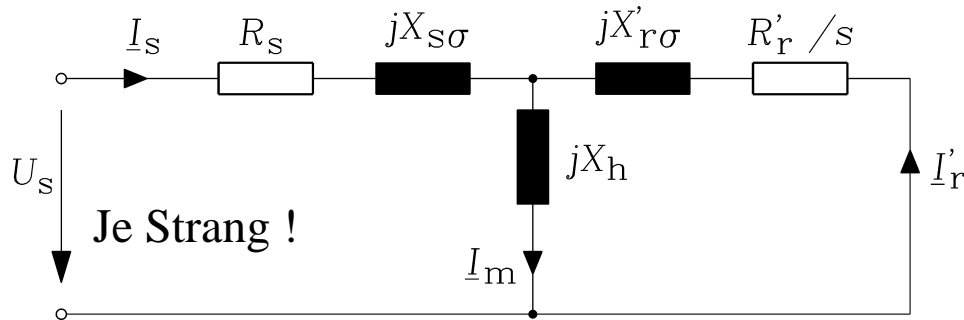
## Zusammenfassung: Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

- T-Ersatzschaltbild je Strang: Schlupf  $s$  als veränderbarer Parameter
- Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  bzw.  $1/\ddot{u}$  für Läufer Spannung bzw. –strom  $U_r, I_r$
- Große Hauptinduktivität  $L_h$  als magnetische Stator-Rotor-Kopplung:  
 $x_h = 2.5 \dots 3.0$
- Kleine Stator- und Rotorstreuinduktivität:  
 $x_{s\sigma}, x'_{r\sigma} \approx (0.2 \dots 0.3)/2 = 0.1 \dots 0.15$
- Sehr kleiner Stator- und Rotor-Strangwicklungswiderstand  
 $r_s, r'_r \approx 0.03 \dots 0.06$
- Magnetisierungsstrom  $I_m$  erregt resultierendes Luftspalt-Magnetfeld



- 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine
  - 5.1 Funktionsweise der Schleifringläufermaschine
  - 5.2 Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine
  - 5.3 Asynchrone Energiewandlung
  - 5.4 Kreisdiagramm der Asynchronmaschine
  - 5.5 Anfahren des Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen
  - (5.6 Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer-Asynchronmaschinen)

# Asynchrone Energiewandlung

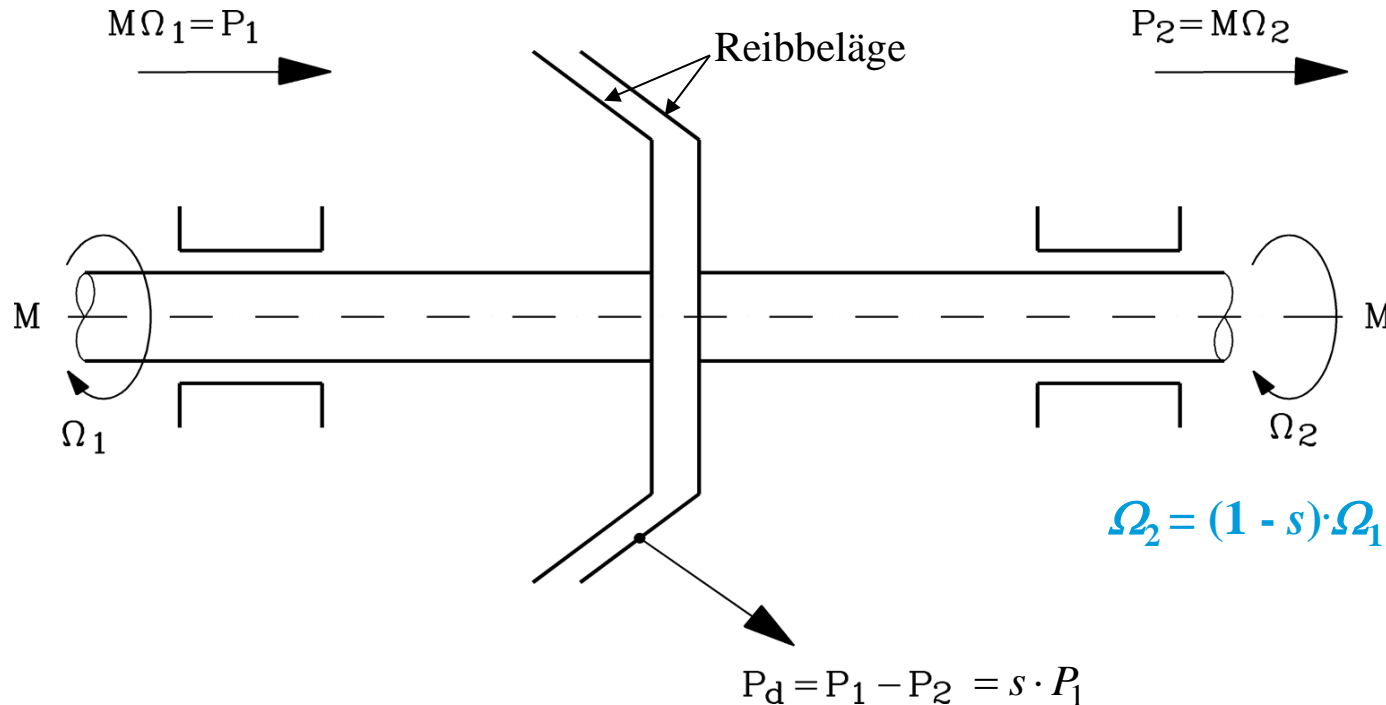


- Ersatzschaltbild OHNE Ummagnetisierungsverluste!
- $\Omega_m = 2\pi \cdot n = (1 - s) \cdot 2\pi \cdot n_{syn} = (1 - s) \cdot \Omega_{syn}$

- Zugeführte **elektrische Leistung**  $P_{e,in} = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi$
  - **Stromwärmeverluste** in der **Ständerwicklung**  $P_{Cu,s} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$
  - **Luftspaltleistung**  $P_\delta = P_{e,in} - P_{Cu,s} = 3 \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot I_r^2$
  - **Stromwärmeverluste** in der **Läuferwicklung**:  $P_{Cu,r} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 = 3 \cdot R'_r \cdot I_r'^2 = s \cdot P_\delta$
  - Abgegebene **mechanische Leistung**  $P_{m,out} = P_\delta - P_{Cu,r} = (1 - s) \cdot P_\delta$
  - **Drehmoment**:  $P_{m,out} = M_e \cdot \Omega_m = (1 - s) \cdot P_\delta \rightarrow M_e = \frac{1 - s}{1 - s} \cdot \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}}$
- $M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}}$

**Elektromagnetische Drehmoment  $M_e$  ist zur Luftspaltleistung  $P_\delta$  direkt proportional.**

# Schlupfkupplung – mechanisches Analogon zur Asynchronmaschine (1)



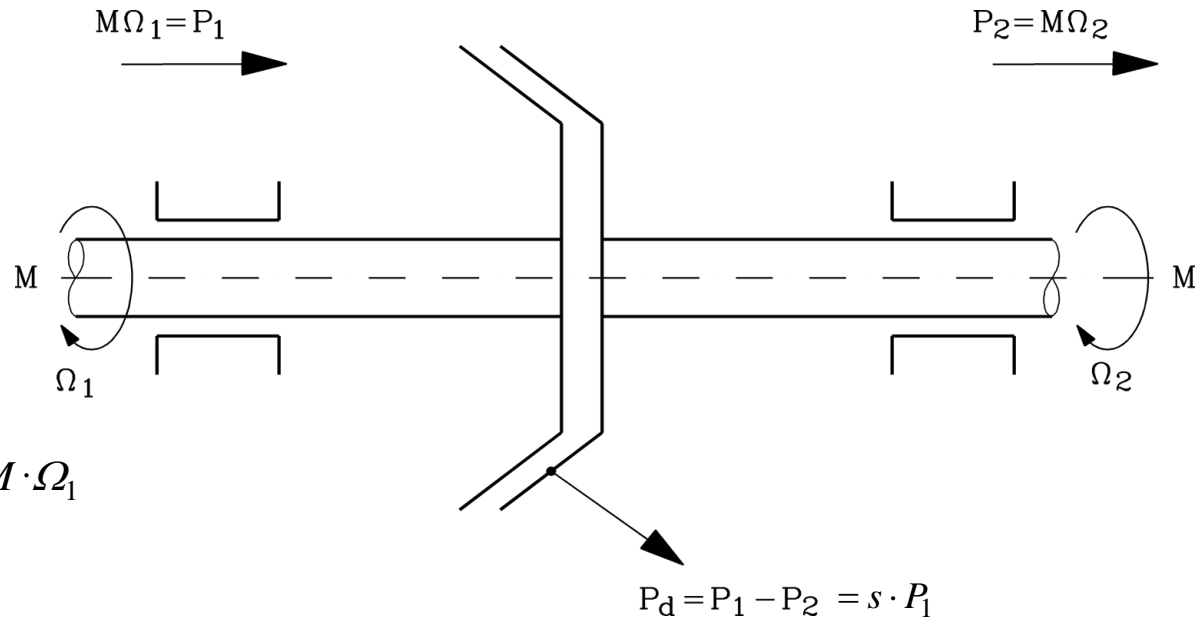
- Antreibendes Drehmoment  $M$  an Welle 1 = Drehmoment an abtreibender Welle 2
- Drehmomentübertragung nur möglich, wenn **Reibscheibe 2** gegenüber der Reibscheibe 1 schlüpft.
- Daher:  
Abtriebsdrehzahl  $\Omega_2$  um **Schlupf  $s$**  kleiner als Drehzahl der antreibenden Welle  $\Omega_1$

# Schlupfkupplung – mechanisches Analogon zur Asynchronmaschine (2)

$$\Omega_2 = (1 - s) \cdot \Omega_1$$

- Abgegebene Leistung  $P_2 = M \cdot \Omega_2$  :  
Ist um **Schlupfverluste**  $P_d = s \cdot \Omega_1 \cdot M$   
kleiner als zugeführte Leistung  $P_1 = M \cdot \Omega_1$

$$\begin{aligned} P_d &= P_1 - P_2 = M \cdot (\Omega_1 - \Omega_2) = \\ &= M \cdot (\Omega_1 - (1 - s) \cdot \Omega_1) = s \cdot M \cdot \Omega_1 = s \cdot P_1 \end{aligned}$$



Asynchronmaschine	Schlupfkupplung
$\Omega_{syn} , \Omega_m$	$\Omega_1 , \Omega_2$
$P_\delta , P_{Cu,r} , P_m$	$P_1 , P_d , P_2$
$M_e$	$M$

# Ständerstrom $\underline{I}_s$ bei $R_s > 0$

**Herleitung**



$$\left. \begin{aligned} (R_s + jX_s) \cdot \underline{I}_s + jX_h \underline{I}'_r &= \underline{U}_s \\ jX_h \underline{I}_s + \left( \frac{R'_r}{s} + jX'_r \right) \cdot \underline{I}'_r &= 0 \end{aligned} \right\} \underline{I}_s = \frac{1}{\text{Det}} \cdot \begin{vmatrix} \underline{U}_s & jX_h \\ 0 & \frac{R'_r}{s} + jX'_r \end{vmatrix} = \underline{U}_s \cdot \frac{\frac{R'_r}{s} + jX'_r}{\text{Det}}$$

CRAMER'sche Regel löst lin. Gleichungssystem 2. Ordnung

$$\text{Det} = \begin{vmatrix} R_s + jX_s & jX_h \\ jX_h & \frac{R'_r}{s} + jX'_r \end{vmatrix} = (R_s + jX_s) \cdot \left( \frac{R'_r}{s} + jX'_r \right) - (jX_h)^2$$

Regel von SARRUS berechnet Determinanten 2. Grads

$$\underline{I}_s = \underline{U}_s \cdot \frac{\frac{R'_r}{s} + jX'_r}{(R_s + jX_s) \cdot \left( \frac{R'_r}{s} + jX'_r \right) + X_h^2} = \underline{U}_s \cdot \frac{R'_r + jsX'_r}{(R_s + jX_s) \cdot (R'_r + jsX'_r) + sX_h^2}$$

$$\underline{I}_s = \underline{U}_s \cdot \frac{R'_r + jsX'_r}{R_s R'_r + jsR_s X'_r + jR'_r X_s - sX_s X'_r + sX_h^2} = \underline{U}_s \cdot \frac{R'_r + jsX'_r}{R_s R'_r - s\sigma X_s X'_r + j \cdot (sR_s X'_r + R'_r X_s)}$$

$$\underline{I}_s = \underline{U}_s \cdot \frac{R'_r + jsX'_r}{(R_s R'_r - s \cdot \sigma \cdot X_s X'_r) + j \cdot (s \cdot R_s X'_r + X_s R'_r)}$$

$$\sigma = 1 - \frac{X_h^2}{X_s X'_r} \Rightarrow X_s X'_r - X_h^2 = \sigma X_s X'_r$$



# Ständer- und Läuferstrom $\underline{I}_s, \underline{I}'_r$

Lösung des linearen Gleichungssystems 2. Ordnung (Unbekannte  $\underline{I}_s, \underline{I}'_r$ ):

$$\underline{U}_s = R_s \cdot \underline{I}_s + j \cdot X_s \cdot \underline{I}_s + j \cdot X_h \cdot \underline{I}'_r \quad 0 = \frac{R'_r}{s} \cdot \underline{I}'_r + j \cdot X'_r \cdot \underline{I}'_r + j \cdot X_h \cdot \underline{I}_s$$

$$\underline{I}_s = \underline{U}_s \cdot \frac{R'_r + jsX'_r}{(R_s R'_r - s \cdot \sigma \cdot X_s X'_r) + j \cdot (s \cdot R_s X'_r + X_s R'_r)} \quad \begin{cases} s = 0: \underline{I}_s = \underline{U}_s / (R_s + j \cdot X_s) \\ s \pm \infty: \underline{I}_s = \underline{U}_s / (R_s + j \cdot \sigma \cdot X_s) \end{cases}$$

$$\underline{I}'_r = -\underline{I}_s \cdot \frac{j \cdot X_h}{\frac{R'_r}{s} + j \cdot X'_r} \Rightarrow \underline{I}'_r = -\underline{I}_s \cdot \frac{j \cdot s \cdot X_h}{R'_r + j \cdot s \cdot X'_r}$$

$$\underline{I}'_r = -\underline{U}_s \cdot \frac{j \cdot s \cdot X_h}{(R_s R'_r - s \cdot \sigma \cdot X_s X'_r) + j \cdot (s \cdot R_s X'_r + X_s R'_r)} \quad \begin{cases} s = 0: \underline{I}'_r = 0 \\ s = \pm \infty: \underline{I}'_r = -\frac{X_h}{X'_r} \cdot \underline{I}_s (s = \pm \infty) \end{cases}$$

# Ständer- und Läuferstrom $\underline{I}_s, \underline{I}'_r$ bei $R_s = 0$

- **Sonderfall  $R_s = 0$ :**

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_s}{jX_s} \cdot \frac{R'_r + js \cdot X'_r}{R'_r + js \cdot \sigma X'_r} \quad \underline{I}'_r = -\frac{\underline{U}_s}{X_s} \cdot \frac{s \cdot X_h}{R'_r + js \cdot \sigma X'_r}$$

$$\begin{cases} s = 0: \underline{I}_s = -j \cdot \underline{U}_s / X_s \\ s \pm \infty: \underline{I}_s = -j \cdot \underline{U}_s / (\sigma \cdot X_s) \\ s = 0: \underline{I}'_r = 0 \\ s = \pm \infty: \underline{I}'_r = -\frac{X_h}{X'_r} \cdot \underline{I}_s (s = \pm \infty) \end{cases}$$

- Daraus folgt das elektromagnetische **Drehmoment  $M_e$  (bei  $R_s = 0$ ):**

$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{m_s \cdot R'_r \cdot I'^2_r}{s \cdot \Omega_{syn}} = m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{X_h^2}{X_s^2} \cdot \frac{s \cdot R'_r}{R_r'^2 + (s \cdot \sigma \cdot X'_r)^2}$$

$$1 - \sigma = \frac{X_h^2}{X_s \cdot X'_r} \Rightarrow \frac{X_h^2}{X_s^2} = \frac{X'_r \cdot (1 - \sigma)}{X_s}$$

$$M_e = m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1 - \sigma}{X_s} \cdot \frac{s \cdot R'_r \cdot X'_r}{R_r'^2 + (s \cdot \sigma \cdot X'_r)^2} \begin{cases} s = 0: M_e = 0 \\ s \pm \infty: M_e = 0 \end{cases}$$

# Kippmoment $M_b = M_{\max}$ bei $R_s = 0$

## Herleitung



$$M_e = m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1-\sigma}{X_s} \cdot \frac{s \cdot R'_r \cdot X'_r}{R_r'^2 + (s \cdot \sigma \cdot X'_r)^2}$$

$$dM_e / ds = 0: \quad \frac{R'_r \cdot X'_r}{R_r'^2 + (s \cdot \sigma \cdot X'_r)^2} - \frac{s \cdot R'_r \cdot X'_r}{(R_r'^2 + (s \cdot \sigma \cdot X'_r)^2)^2} \cdot 2s \cdot (\sigma \cdot X'_r)^2 = 0$$

$$\frac{R_r'^2 + (s \sigma X'_r)^2}{(R_r'^2 + (s \sigma X'_r)^2)^2} - \frac{2s^2 \cdot (\sigma X'_r)^2}{(R_r'^2 + (s \sigma X'_r)^2)^2} = 0$$

$$R_r'^2 + (s \sigma X'_r)^2 - 2s^2 \cdot (\sigma X'_r)^2 = 0 \Rightarrow R_r'^2 - (s \sigma X'_r)^2 = 0 \Rightarrow s = \pm \frac{R'_r}{\sigma \cdot X'_r} = \pm s_b$$

$$s_{b,mot} = \frac{R'_r}{\sigma \cdot X'_r} = s_b \quad s_{b,gen} = -\frac{R'_r}{\sigma \cdot X'_r}$$

$$M_e(\pm s_b) = \pm M_b = \pm m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1-\sigma}{X_s} \cdot \frac{s_b \cdot R'_r X'_r}{R_r'^2 + (s_b \cdot \sigma X'_r)^2} = \pm m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1-\sigma}{X_s} \cdot \frac{R_r'^2 / \sigma}{R_r'^2 + R_r'^2}$$

$$M_b = m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1-\sigma}{2 \cdot \sigma \cdot X_s}$$

$$M_{b,mot} = M_b \quad M_{b,gen} = -M_b$$





# KLOSS'sche Drehmomentformel (gilt bei $R_s = 0$ )

$$M_e = m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1-\sigma}{X_s} \cdot \frac{s \cdot R'_r \cdot X'_r}{R_r'^2 + (s \cdot \sigma \cdot X'_r)^2}$$

$$\frac{M_e}{M_b} = \frac{m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1-\sigma}{X_s}}{m_s \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1-\sigma}{2 \cdot \sigma \cdot X_s}} \cdot \frac{s \cdot R'_r \cdot X'_r}{R_r'^2 + (s \cdot \sigma \cdot X'_r)^2} = 2\sigma \cdot \frac{\frac{s \cdot R'_r \cdot X'_r}{(\sigma \cdot X'_r)^2}}{\frac{R_r'^2}{(\sigma \cdot X'_r)^2} + s^2} = 2 \cdot \frac{s \cdot \frac{R'_r}{\sigma \cdot X'_r}}{\left(\frac{R'_r}{\sigma \cdot X'_r}\right)^2 + s^2}$$

$$s_b = \frac{R'_r}{\sigma \cdot X'_r} \quad \frac{M_e}{M_b} = 2 \cdot \frac{s \cdot s_b}{s_b^2 + s^2} = \frac{2}{\frac{s_b}{s} + \frac{s}{s_b}}$$

**KLOSS'sche Formel:**  $R_s = 0$ :

$$\frac{M_e}{M_b} = \frac{2}{\frac{s_b}{s} + \frac{s}{s_b}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} |s| \ll 1: \frac{M_e}{M_b} \cong 2 \cdot \frac{s}{s_b} \\ |s| > 0.5: \frac{M_e}{M_b} \cong 2 \cdot \frac{s_b}{s} \end{array} \right.$$

# KLOSS'sche Funktion $M_e(s)$ für das Drehmoment ( $R_s = 0$ )

- **Kippschlupf  $s_b$ :**

$$R_s = 0: \quad s_b = \frac{R'_r}{\sigma X'_r}$$

- **Kippmomente:**

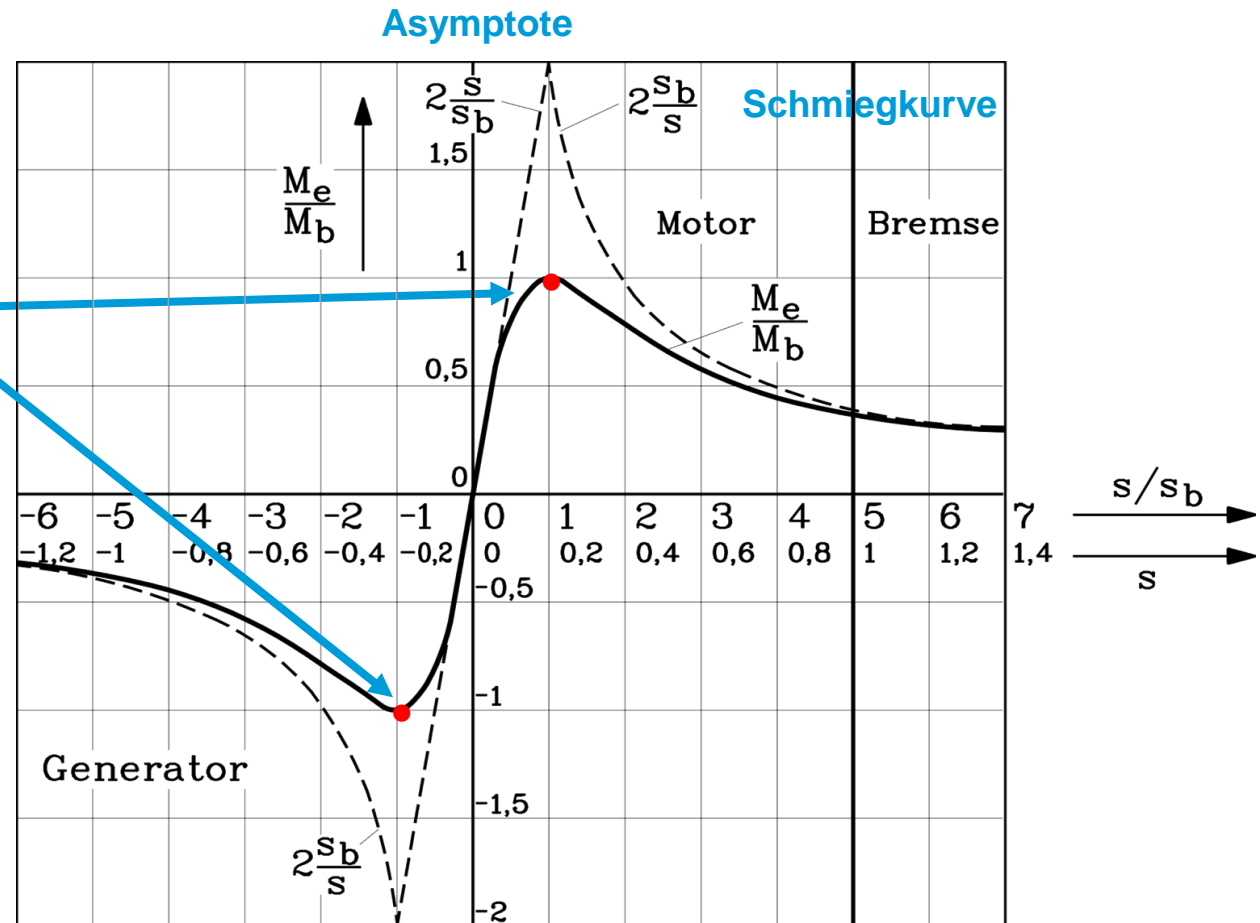
$$M_b = \frac{m_s}{2} \cdot \frac{p}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1 - \sigma}{\sigma \cdot X_s}$$

- **KLOSS'sche Formel:**

$$R_s = 0: \quad \frac{M_e}{M_b} = \frac{2}{\frac{s_b + s}{s} \cdot \frac{s}{s_b}}$$

## Beispiel:

Kippschlupf  $s_b = 0.2$



# Drehmoment bei $R_s > 0$

- Drehfeldleistung  $P_\delta \rightarrow$  elektromagnetisches Drehmoment  $M_e$ :

$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{m_s \cdot R'_r \cdot I_r^2}{s \cdot \Omega_{syn}} \quad M_e = m_s \cdot \frac{P}{\omega_s} \cdot U_s^2 \cdot \frac{s \cdot (1 - \sigma) \cdot X_s \cdot X'_r \cdot R'_r}{(R_s \cdot R'_r - s \cdot \sigma \cdot X_s \cdot X'_r)^2 + (s \cdot R_s \cdot X'_r + X_s \cdot R'_r)^2}$$

- **Kippschlüpf:**  $dM_e / ds = 0$

**Kippschlupf**  $s_b$  im motorischen ( $s_{b,mot} = s_b > 0$ ) Betrieb

und generatorischen Bereich ( $s_{b,gen} = -s_b < 0$ ) **gleich groß:**

$$s_b = \frac{R'_r}{X'_r} \cdot \sqrt{\frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s^2 + \sigma^2 \cdot X_s^2}} \approx \frac{R'_r}{\sigma \cdot X'_r} \Big|_{R_s \approx 0}$$

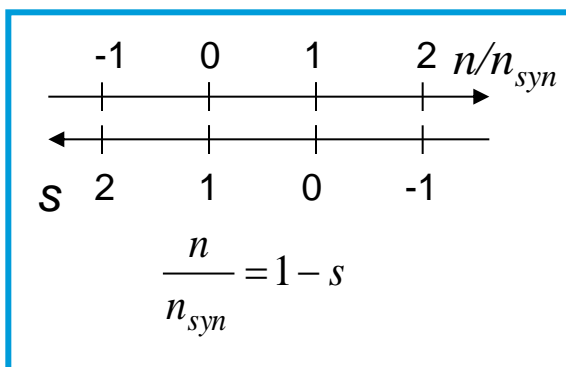
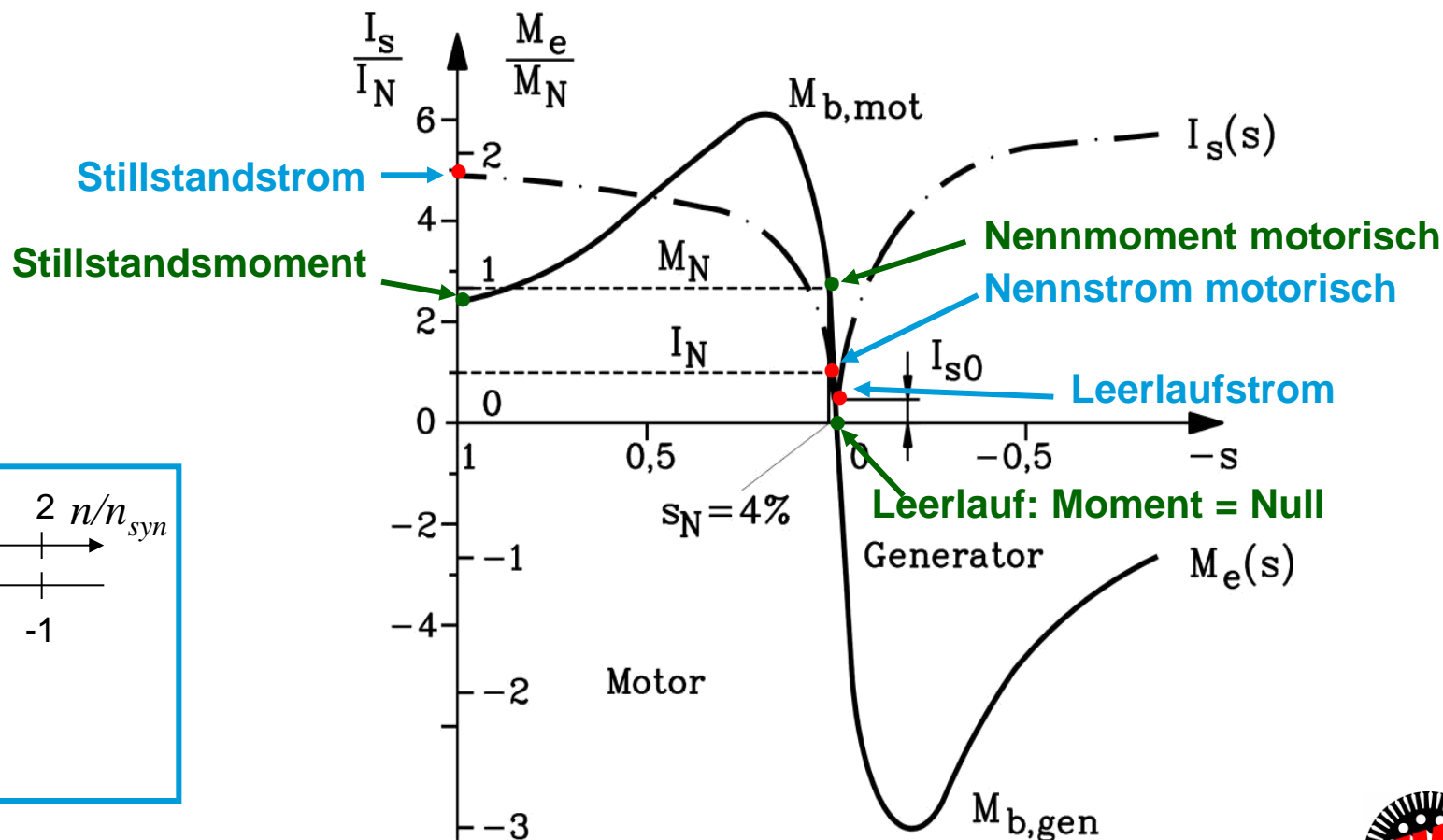
- **Kippmomente:**  $M_{b,mot/gen} = \pm \frac{m_s}{2} \cdot \frac{P}{\omega_s^2} \cdot U_s^2 \cdot \frac{1}{\pm \frac{R_s}{\omega_s} + \frac{1}{(1 - \sigma) \cdot \omega_s X_s} \cdot \sqrt{(R_s^2 + X_s^2) \cdot (R_s^2 + \sigma^2 X_s^2)}}$

**Plus**zeichen für das motorische, das **Minus**zeichen für das generatorische Kippmoment.

- Im Generatorbetrieb müssen auch die Statorverluste aus der Luftspaltleistung gedeckt werden  $\Rightarrow$  **Generatorisches Kippmoment  $M_{b,gen}$  ist um diesen Betrag größer als motorisches Kippmoment  $M_{b,mot}$**

# Drehzahl-Drehmoment- und Drehzahl-Strom-Kennlinie

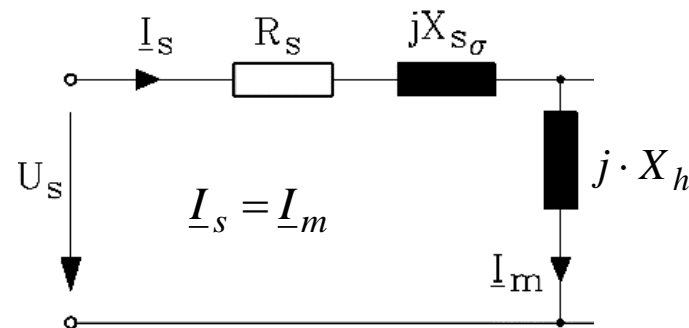
- Da  $n = (1-s) \cdot f_s / p$ , ist  $M_e$  und  $I_s$  in Abhängigkeit sowohl von  $s$  als auch von  $n$  darstellbar.
- **Beispiel:**  $R_s / X_s = 1/100$ ,  $R_r / X_r = 1.3/100$ ,  $\sigma = 0.067$ ,  $X_s = X'_r = 3Z_N$ ,  $Z_N = U_{s,N} / I_{s,N}$



# Stromaufnahme der Asynchronmaschine (1)

- **Leerlauf:** Leerlaufdrehzahl ist die Synchrondrehzahl: Schlupf ist NULL.

$$\underline{I}_{s0} = \underline{I}_s(s=0) = \frac{\underline{U}_s}{R_s + j \cdot X_s} \approx -j \cdot \frac{\underline{U}_s}{X_s} \quad \frac{\underline{I}_s}{I_{s,N}}(s=0) \approx -j \cdot \frac{\underline{U}_s / U_{s,N}}{X_s / Z_N} = -j \cdot \frac{1}{x_s}$$



$$R_s \approx 0: \frac{I_{s0}}{I_{s,N}} \approx \frac{1}{x_s}$$

- **Beispiel:**

$$x_s = x_h + x_{s\sigma} \cong 3.0 + 0.15 = 3.15: I_s / I_{s,N} \cong 1 / x_s \cong 1/3$$

**Leerlaufstrom:**

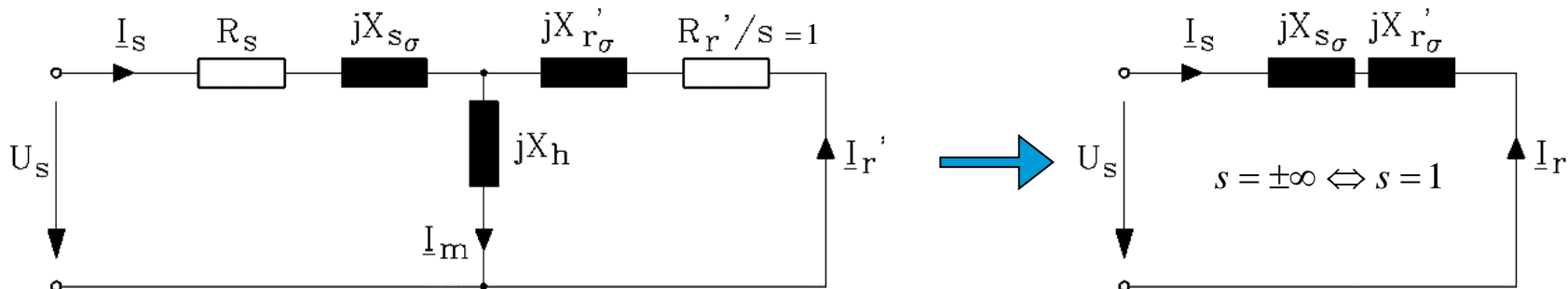
ca. 1/3 des Nennstroms. Bei 100 A Nennstrom: Leerlaufstrom ca. 33 A.

# Stromaufnahme der Asynchronmaschine (2)

- **Kurzschluss (Stillstand):** Schlupf ist 1; ("Kurzschlussstrom, Anlaufstrom"):

$$\underline{I}_s(s=1)\Big|_{R_s=0} = \frac{\underline{U}_s}{jX_s} \cdot \frac{R_r' + jX_r'}{R_r' + j \cdot \sigma \cdot X_r'} \quad \underline{I}_s(s \rightarrow \pm\infty)\Big|_{R_s=0} = \frac{\underline{U}_s}{j \cdot \sigma \cdot X_s} \approx \underline{I}_s(s=1)$$

$$\frac{\underline{I}_s}{I_{s,N}}(s=1) \approx -j \cdot \frac{\underline{U}_s / U_{s,N}}{\sigma \cdot X_s / Z_N} = -j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot x_s}$$



- **Beispiel:**

$$\sigma = 0.066, x_s = 3.15: I_s(s=1)/I_{s,N} = 1/(3.15 \cdot 0.066) = 4.8$$

**Kurzschlussstrom** ist 4.8-facher Nennstrom (bei  $I_N = 100$  A: ca. 480 A!).

$$R_s, R_r \approx 0: \frac{I_{s1}}{I_{s,N}} \approx \frac{1}{\sigma \cdot x_s}$$

Große Motoren  $\Rightarrow$  kleineres  $\sigma \Rightarrow$  5 ... 7-facher Nennstrom üblich.

# Stromaufnahme der Asynchronmaschine (3)

- **Nennpunkt:** Nennschlupf  $s_N$ : **Thermischer Dauerstrom = Nennstrom**  $I_N \Rightarrow$  Nennmoment  $M_N$  wird erzeugt.

- **Beispiel:**

Vierpolige Maschine, 50 Hz: Leerlaufdrehzahl  $n_{syn} = 1500/\text{min}$ ,  
Nenn Drehzahl  $n_N = 1450/\text{min}$ , Nennschlupf  $s_N = 0.033 = 3.3\%$ . }  $s_N = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.033$

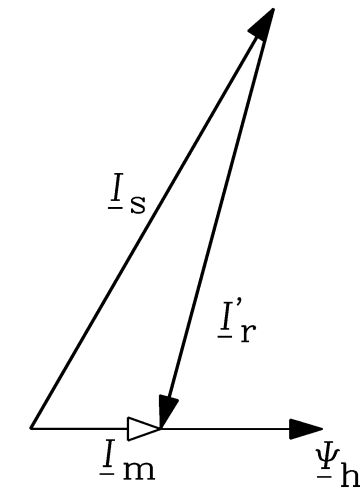
- **Durchflutungsausgleich:**

Läuferstrom nahezu **gleich groß** wie Ständerstrom,  
**etwa gegenphasig.**

- **Beispiel:**

$$x_h = 3.0, x'_r = 3.1, r'_r = 0.03, s_N = 0.03$$

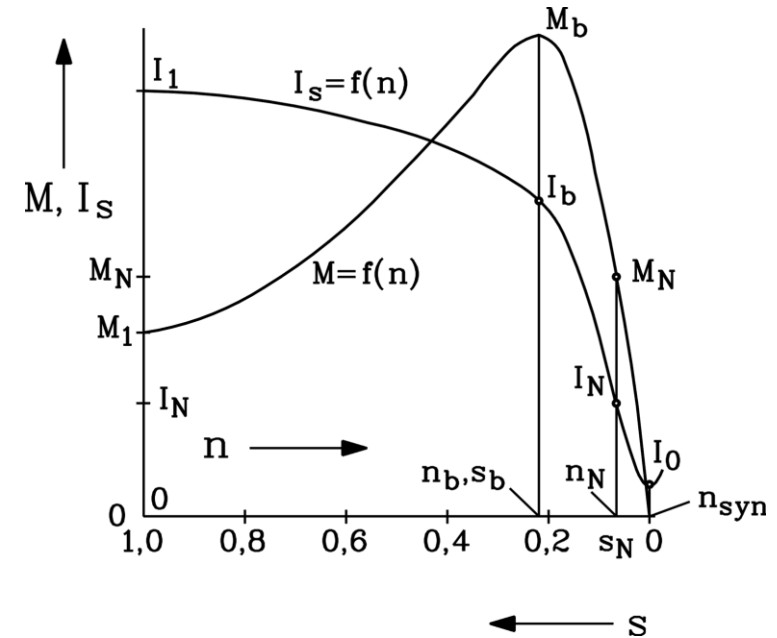
$$\underline{I}'_{rN} = -\underline{I}_{sN} \cdot \frac{j \cdot x_h}{\frac{r'_r}{s_N} + j \cdot x'_r} = -\underline{I}_{sN} \cdot \frac{j \cdot 3.0}{\frac{0.03}{0.03} + j \cdot 3.1} = -\underline{I}_{sN} \cdot \frac{j \cdot 3.0}{1 + j \cdot 3.1} \approx -\underline{I}_{sN}$$



$$I'_{rN} = 0.92 \cdot I_{sN}$$

# Strom- und Drehmomentkennlinie $I_s(n), M(n)$

- **Leerlaufstrom**  $I_0$  erregt Magnetfeld, daher: möglichst kleiner Luftspalt  $\delta$  zwischen Stator und Rotor für kleinen Strom  $I_0$  bzw.  $I_m$
- Kleiner Nennschlupf  $s_N$  typisch  $< 10\%$ . Je größer die Maschine, desto kleiner der Schlupf  $s_N$ .
- $n = 0$ : Sehr hoher **Anfahrstrom**  $I_1$ , aber nur relativ niedriges Anfahrmoment  $M_1$
- Motor maximal bis zum **Kippmoment**  $M_b$  belastbar



**Beispiel:**

$$s_N = 7\%, s_b = 23\%$$

	Schlupf	Ständerstrom	Drehmoment
<b>Leerlauf</b>	$s = 0$	$I_0 = \text{ca. } 0.3 I_N$	$M = 0$
<b>Nennpunkt</b>	$s = s_N$	$I_N$	$M_N$
<b>Kippen</b>	$s = s_b$	$I_b = \text{ca. } 2.5 I_N$	$M_b = \text{ca. } 2 M_N$
<b>Anfahren</b>	$s = 1$	$I_1 = \text{ca. } 4 I_N$	$M_1 = \text{ca. } 0.8 M_N$

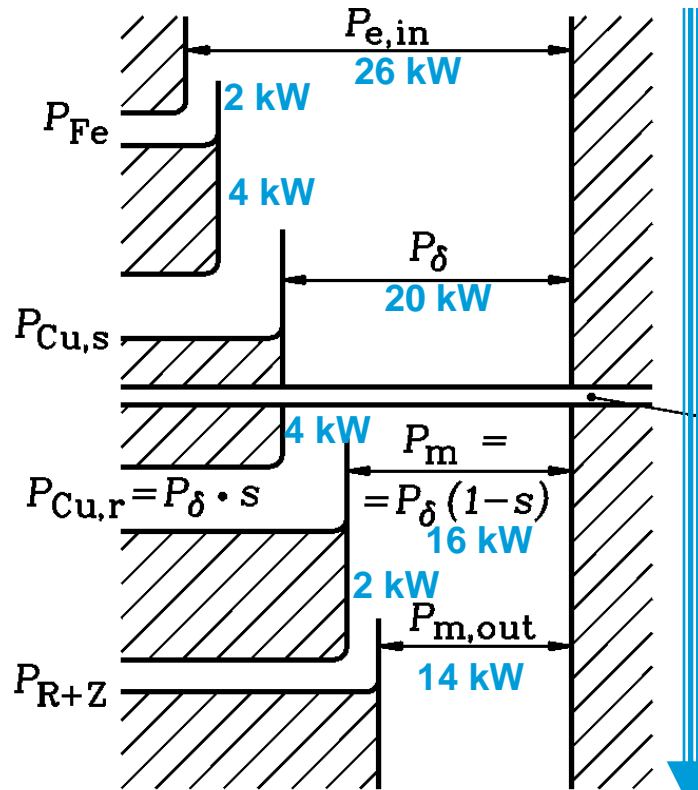


# Leistungsfluss im Motorbetrieb (SANKEY-Diagramm)

Beispiel:

Schlupf  
 $s = 0.2$

Motorbetrieb



Luftspalt

Motor :

$$P_m > 0$$

$$M_e > 0$$

$$P_{\delta} > 0$$

$$s = 0.2 > 0$$

$$P_{Cu,r} = s \cdot P_{\delta} = 0.2 \cdot P_{\delta} > 0$$

$$P_{Cu,r} = 0.2 \cdot 20 = 4 \text{ kW} > 0$$

Leistungflussrichtung VZS

$$\eta = 14 / 26 = 53.8\%$$

Wirkungsgrad der Asynchronmaschine: Motor:

$$\eta = \frac{P_{m,out}}{P_{e,in}}$$

# Leistungsfluss im Generatorbetrieb

## Beispiel:

Schlupf  
 $s = -0.25$

## Generatorbetrieb

Generator :

$$P_m < 0$$

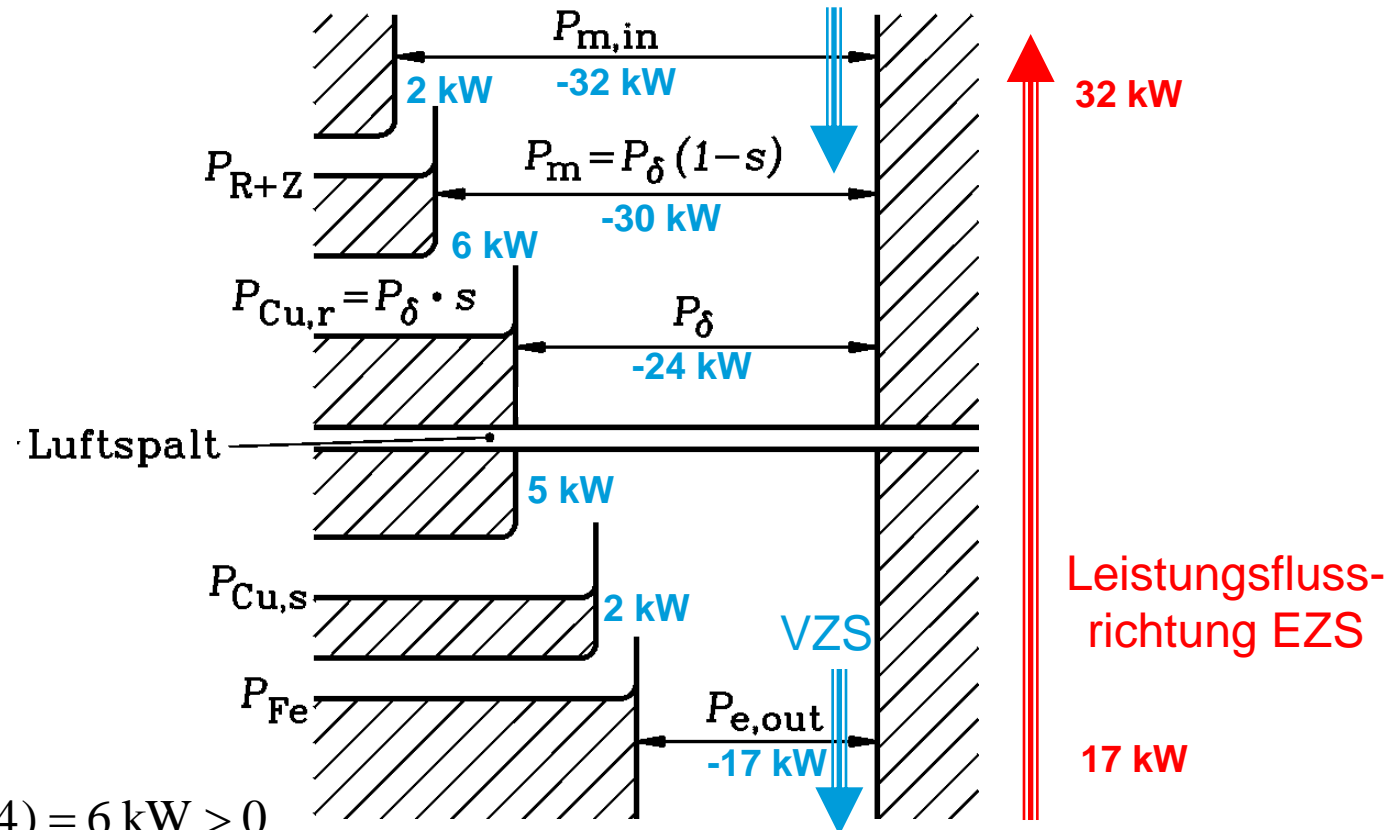
$$M_e < 0$$

$$P_\delta < 0$$

$$s = -0.25 < 0$$

$$P_{Cu,r} = s \cdot P_\delta > 0$$

$$P_{Cu,r} = (-0.25) \cdot (-24) = 6 \text{ kW} > 0$$



$$\eta = (-17)/(-32) = 53.1\%$$

Wirkungsgrad der Asynchronmaschine: Generator:  $\eta = \frac{P_{e,out}}{P_{m,in}}$

## Zusammenfassung: Asynchrone Energiewandlung

- Läuferverluste  $P_{\text{Cu,r}} \sim I_r^2$  für Drehmomentbildung  $M_e \sim P_{\text{Cu,r}}/s$  unerlässlich
- Leerlaufstrom  $I_0$  bei Schlupf Null = Magnetisierungsstrom  $I_m =$   
= ca. 30 ... 50% des Nennstroms
- Drehmomentkurve  $M_e(s)$  bei  $R_s = 0$ : *KLOSS*'sche Funktion
- Asynchrones Kippmoment  $M_b =$  Maximalmoment:  
im Motorbetrieb kleiner als bei Generatorbetrieb
- Betrieb zwischen motorischem und generatorischen Kippschlupf
- Betriebsschlupf klein, daher Drehzahl nahe Synchrondrehzahl
- Anlaufstrom  $I_1$  mit ca. 5-fachem Nennstrom sehr hoch
- Kippmoment  $M_b$  etwa 2 ... 3-faches Nennmoment

- 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine
  - 5.1 Funktionsweise der Schleifringläufermaschine
  - 5.2 Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine
  - 5.3 Asynchrone Energiewandlung
  - 5.4 Kreisdiagramm der Asynchronmaschine**
  - 5.5 Anfahren des Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen
  - (5.6 Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer-Asynchronmaschinen)

# Entstehung des HEYLAND-Kreises ( $R_s = 0$ )

## Herleitung

### Schritt 1: Abhängigkeit von $s$

$$\underline{I}_s = U_s \cdot \frac{1}{j \cdot X_s} \cdot \frac{R'_r + j \cdot s \cdot X'_r}{R'_r + j \cdot s \cdot \sigma \cdot X'_r} = U_s \cdot \frac{1}{X_s} \cdot \frac{R'_r + j \cdot s \cdot X'_r}{-s \cdot \sigma \cdot X'_r + j \cdot R'_r} = \frac{U_s}{X_s} \cdot \left( \frac{(1-1/\sigma) \cdot R'_r}{-s \cdot \sigma \cdot X'_r + j \cdot R'_r} - j \cdot \frac{1}{\sigma} \right)$$

- **Stromortskurve:** ( $\underline{U}_s = U_s$  gewählt)

- $\underline{G}(s) = -s\sigma X'_r + jR'_r$ : Gerade in der komplexen Ebene parallel zur Re-Achse

- **Kehrwert (Inversion)** von  $\underline{G}(s)$  ist **Kreis**  $\underline{K}(s)$ :  $\underline{K}(s) = \frac{1}{\underline{G}(s)} = \frac{1}{Z(s) \cdot e^{j\varphi(s)}} = \frac{e^{-j\varphi(s)}}{Z(s)}$

- Punkte P der Geraden gehen in Punkte P' des Kreises über: Strecke  $\overline{0P} = Z(s)$   
 $\Rightarrow \overline{0P'} = 1/Z(s)$ .

- Kreismittelpunkt M liegt auf  $-\text{Im}$ -Achse.



**Schritt 2:** 
$$\underline{I}_s = \frac{U_s}{X_s} \cdot \left( \frac{(1-1/\sigma) \cdot R'_r}{-s \cdot \sigma \cdot X'_r + j \cdot R'_r} - j \cdot \frac{1}{\sigma} \right)$$

- **Multiplikation** mit negativer reeller Zahl  $(1-1/\sigma) \cdot R'_r$  :  
Kreis an -Im-Achse punktgespiegelt und „aufgebläht“

Beispiel:  $\sigma = 0.1: 1-1/\sigma = -9; \quad -j/\sigma = -j \cdot 10$  
$$\underline{I}_s \sim \frac{1-1/\sigma}{-s \cdot \sigma \cdot (X'_r/R'_r) + j} - j \cdot \frac{1}{\sigma}$$

- **Addition** mit  $-j/\sigma$ : Kreis nach rechts entlang -Im-Achse verschoben.
- **Multiplikation** mit  $U_s / X_s$  ändert Kreislage nicht, sondern nur seine Größe.

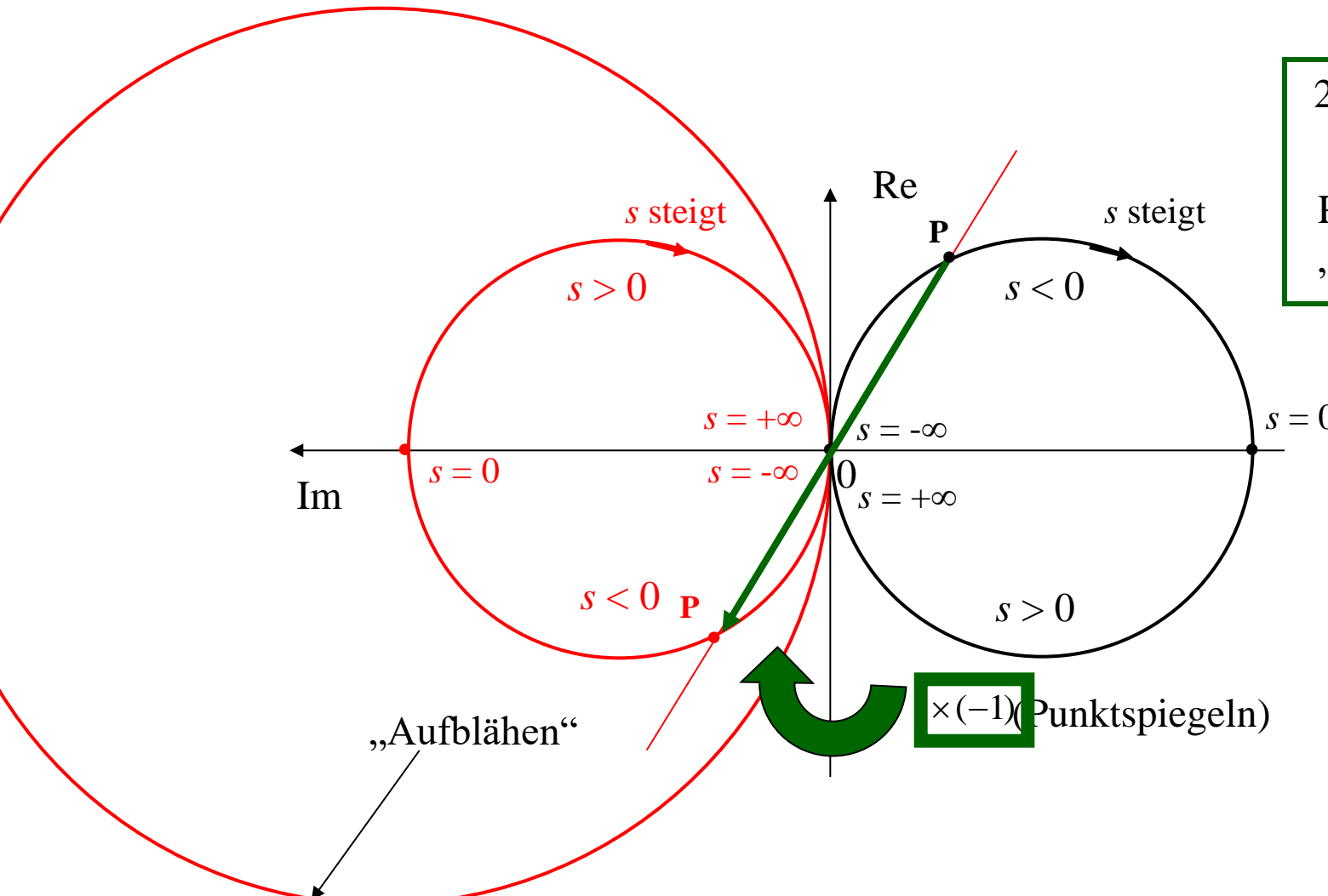
- Kreispunkt  $P_0 =$  **Leerlaufstrom**

$$\underline{I}_s(s=0) = -jU_s / X_s$$

$P_\infty$ : **"ideeller" Kurzschlussstrom** 
$$\underline{I}_s(s=\infty) = -jU_s / (\sigma X_s)$$

# HEYLAND-Kreis ( $R_s = 0$ ): Punktspiegelung

Herleitung



2. Schritt:  
 $\times (1 - 1/\sigma)$   
 Punktspiegeln und  
 „Aufblähen“



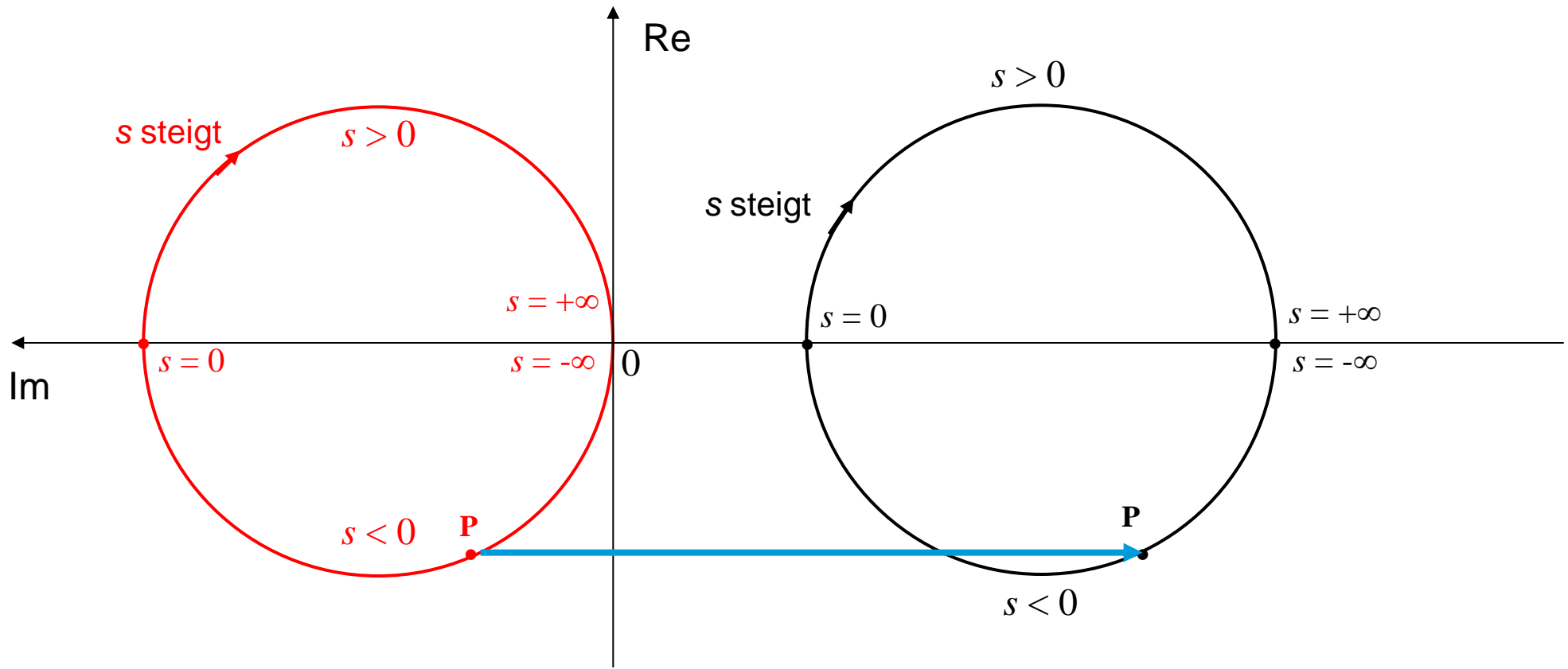


# HEYLAND-Kreis ( $R_s = 0$ ): Parallelverschiebung

Herleitung



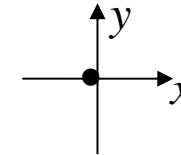
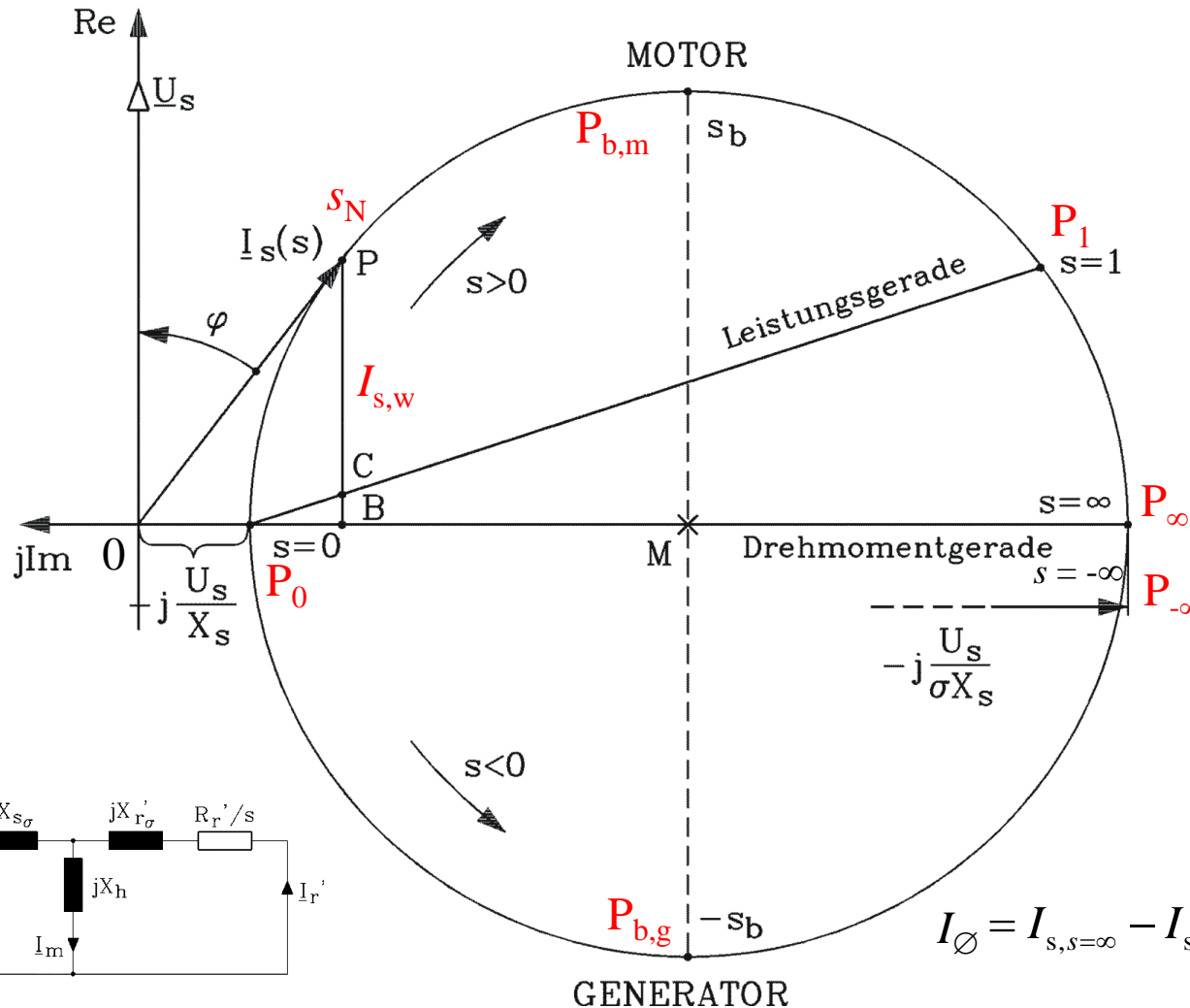
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



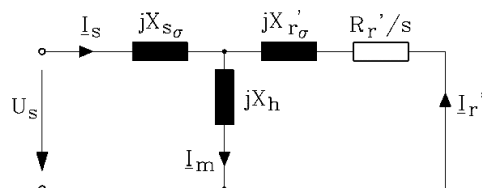
Addition mit  $-j/\sigma$  = Parallelverschieben



# Kreisdiagramm-Stromortskurve – HEYLAND-Kreis ( $R_s = 0$ )



- Kreismittelpunkt M liegt auf „x-Achse“
- Schlupfpunkte 0 und  $\infty$  liegen auf „x-Achse“
- Generator- und Motorbetrieb sind in der Stromaufnahme „symmetrisch“
- Die Distanz zwischen Schlupfpunkten 0 und  $\infty$  ist der Durchmesser  $I_\emptyset$



$$I_\emptyset = I_{s,s=\infty} - I_{s,s=0} = \frac{U_s}{X_s} \cdot \left( \frac{1}{\sigma} - 1 \right) \approx \frac{U_s}{\sigma X_s}$$

# Drehmomentgerade $M_e$

- **Wirkkomponente des Ständerstroms (Betriebspunkt  $P$ , Schlupf  $s$ ) :**

$$I_{s,w} = I_s \cdot \cos \varphi = \overline{PB} = \overline{PC} + \overline{CB}$$

- Elektrische Wirkleistung  $P_{e,in} = m_s \cdot U_s \cdot I_{s,w}$

- **Leistungsbilanz:**  $P_{e,in} = P_m + P_{Cu,r} = m_s \cdot U_s \cdot (\overline{PC} + \overline{CB})$

- Elektromagn. Drehmoment:  $P_{e,in} = P_\delta = M_e \cdot \Omega_{syn} = m_s \cdot U_s \cdot \overline{PB}$

- Bei den Punkten  $P_0$  und  $P_\infty$  ist Drehmoment  $M_e$  Null.  
Daher: Verbindungsstrecke  $\overline{P_0P_\infty}$  : "**Drehmomentgerade**".

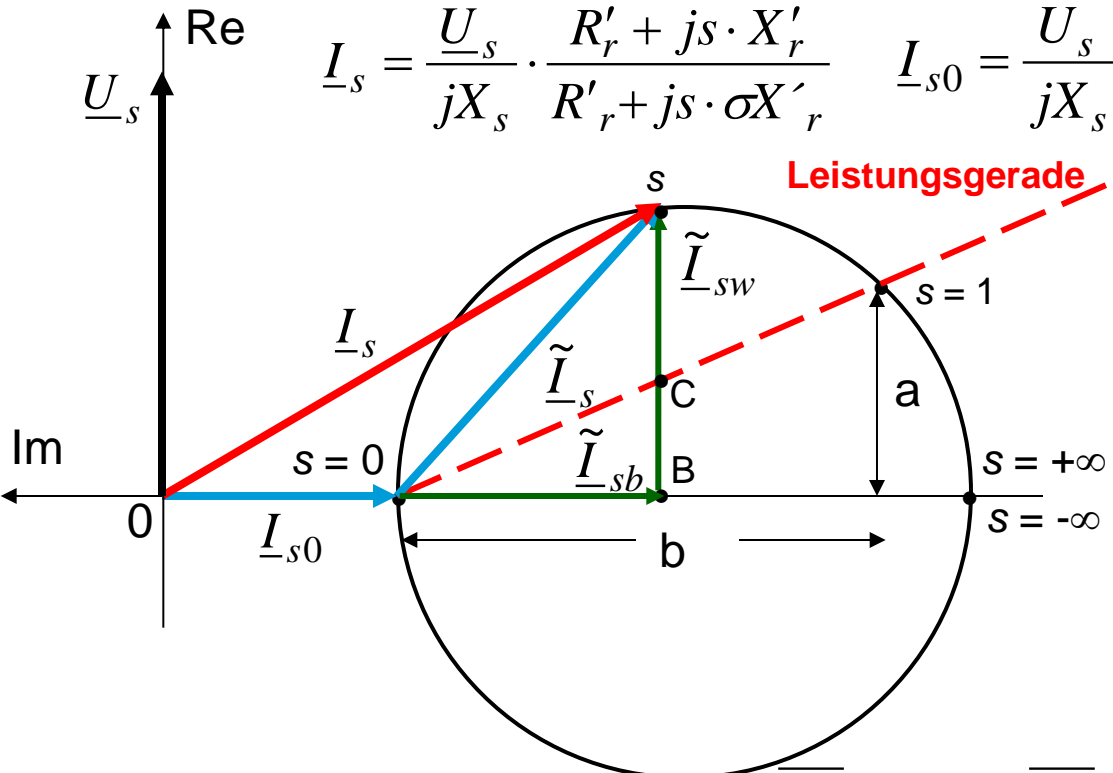
Abschnitt  $\overline{PB}$  ist proportional zum Drehmoment !

Strecken im  
Strommaßstab!  
(A)

- Bei  $s = 1$  ist  $n = 0$ : Daher ist  $P_m$  im Punkt  $P_1$  Null.
  - Bei  $s = 0$  ist  $M_e = 0$ : Daher ist  $P_m$  im Punkt  $P_0$  Null.
- $$P_m = 2\pi \cdot n \cdot M_e = 0$$
- Verbindungsstrecke  $\overline{P_0P_1}$  : "**Leistungsgerade**":  
Teilt Wirkstrom in  $\overline{PC}$  und  $\overline{CB}$
  - Abschnitt  $\overline{PC}$  ~ mechanische Leistung  $P_m$ ,  $\overline{CB}$  ~ Rotor-Stromwärmeverluste  $P_{Cu,r}$
  - Betriebspunkte auf **oberer Kreishälfte**: **motorisch**, Wirkleistung positiv ( $\cos\varphi > 0$ ).  
Betriebspunkte auf **unterer Kreishälfte**: **generatorisch**, Wirkleistung negativ ( $\cos\varphi < 0$ ).
  - **Kipp-Punkte**  $P_{b,m}$ ,  $P_{b,g}$  (maximales Drehmoment)  $s_{b,mot}$  und  $s_{b,gen}$ :  $\overline{PB}$  maximal.
  - Strom  $\underline{I}_s$  **eilt stets der Spannung  $\underline{U}_s$  nach**  $\Rightarrow$  Asynchronmaschine ist – unabhängig vom generatorischen oder motorischen Betrieb – **stets induktiver Verbraucher**

# HEYLAND-Kreis ( $R_s = 0$ ): Leistungsgerade

**Herleitung**



$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_s}{jX_s} \cdot \frac{R'_r + js \cdot X'_r}{R'_r + js \cdot \sigma X'_r} \quad \underline{I}_{s0} = \frac{U_s}{jX_s}$$

$$\tilde{I}_s = \underline{I}_s - \underline{I}_{s0} = \frac{U_s}{X_s} \cdot \frac{X'_r \cdot (1 - \sigma) \cdot s}{R'_r + js \sigma X'_r}$$

$$\tilde{I}_s = \tilde{I}_{sw} - j\tilde{I}_{sb} \quad \tilde{I}_{sw} = \underline{I}_{sw}$$

$$\tilde{I}_s = \frac{U_s}{X_s} \cdot \frac{X'_r \cdot (1 - \sigma) \cdot s}{R_r'^2 + (s \sigma X'_r)^2} \cdot (R'_r - js \sigma X'_r)$$

$$\underline{I}_{sw} = \tilde{I}_{sw} = \frac{R'_r}{s \sigma X'_r}$$

$$\left. \begin{matrix} \tilde{I}_{sw} \\ \tilde{I}_{sb} \end{matrix} \right|_{s=1} = \frac{R'_r}{\sigma X'_r} = \frac{a}{b} \quad \overline{CB} = \frac{a}{b} \cdot \tilde{I}_{sb}$$

$$\frac{m_s U_s \overline{CB}}{P_\delta} = \frac{m_s U_s \overline{CB}}{m_s U_s I_{sw}} = \frac{\overline{CB}}{I_{sw}} = \frac{\overline{CB}}{\tilde{I}_{sw}} = \frac{a}{b} \cdot \frac{\tilde{I}_{sb}}{\tilde{I}_{sw}} = \frac{R'_r}{\sigma X'_r} \cdot \frac{s \sigma X'_r}{R'_r} = s$$

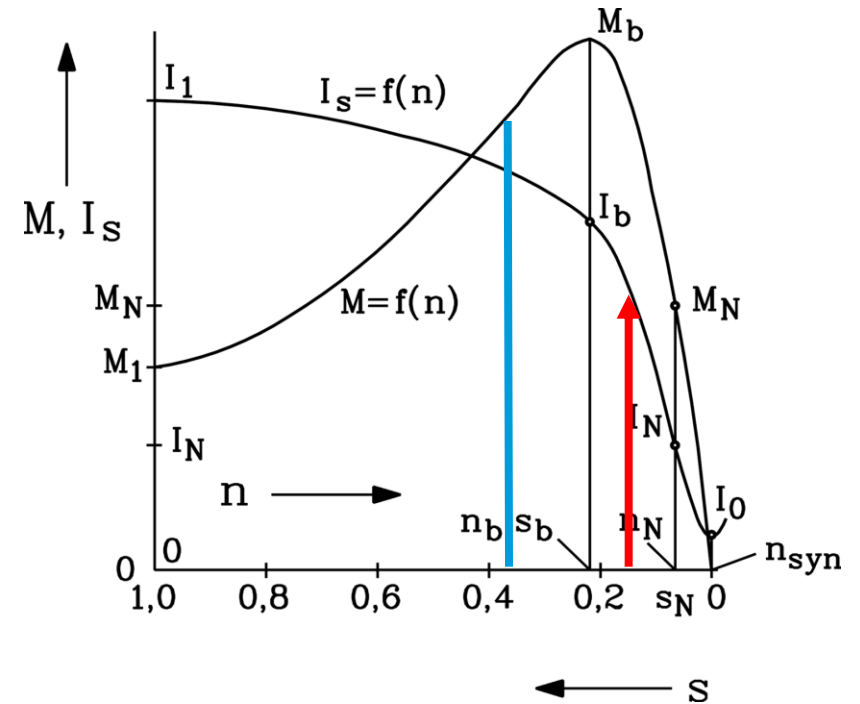
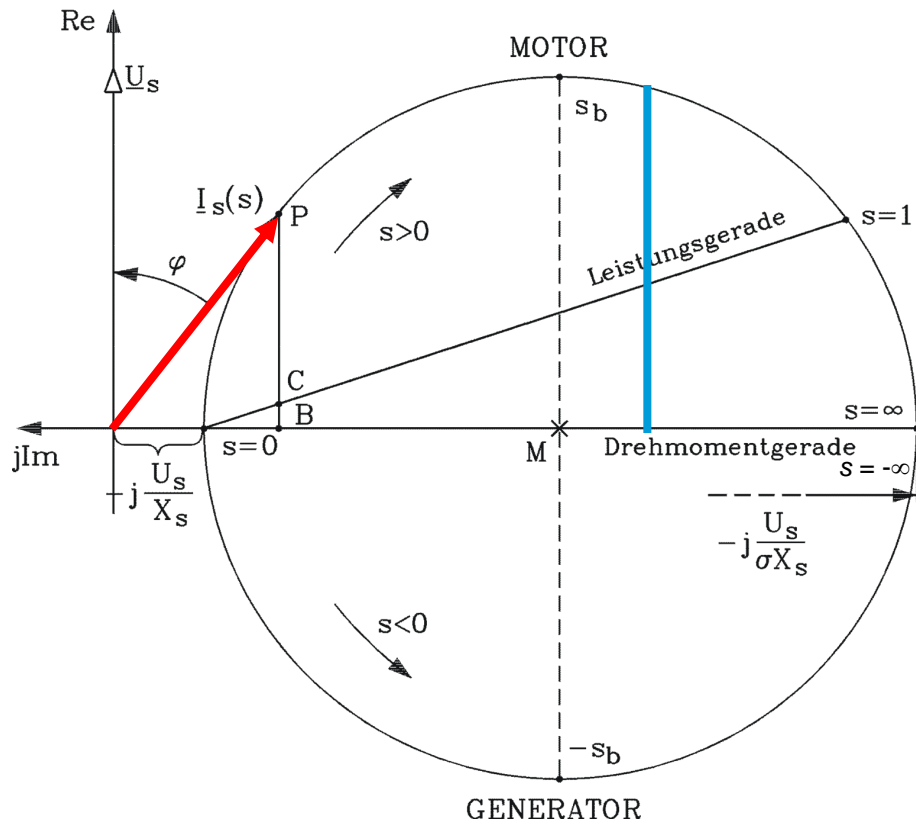
**Fazit:**

$\overline{CB}$  ist proportional zu den Läufer-Stromwärmeverlusten!

$$m_s U_s \overline{CB} = s \cdot P_\delta = P_{Cu,r}$$



# Kreisdiagramm: Strom- und Drehmomentverlauf ( $R_s = 0$ )



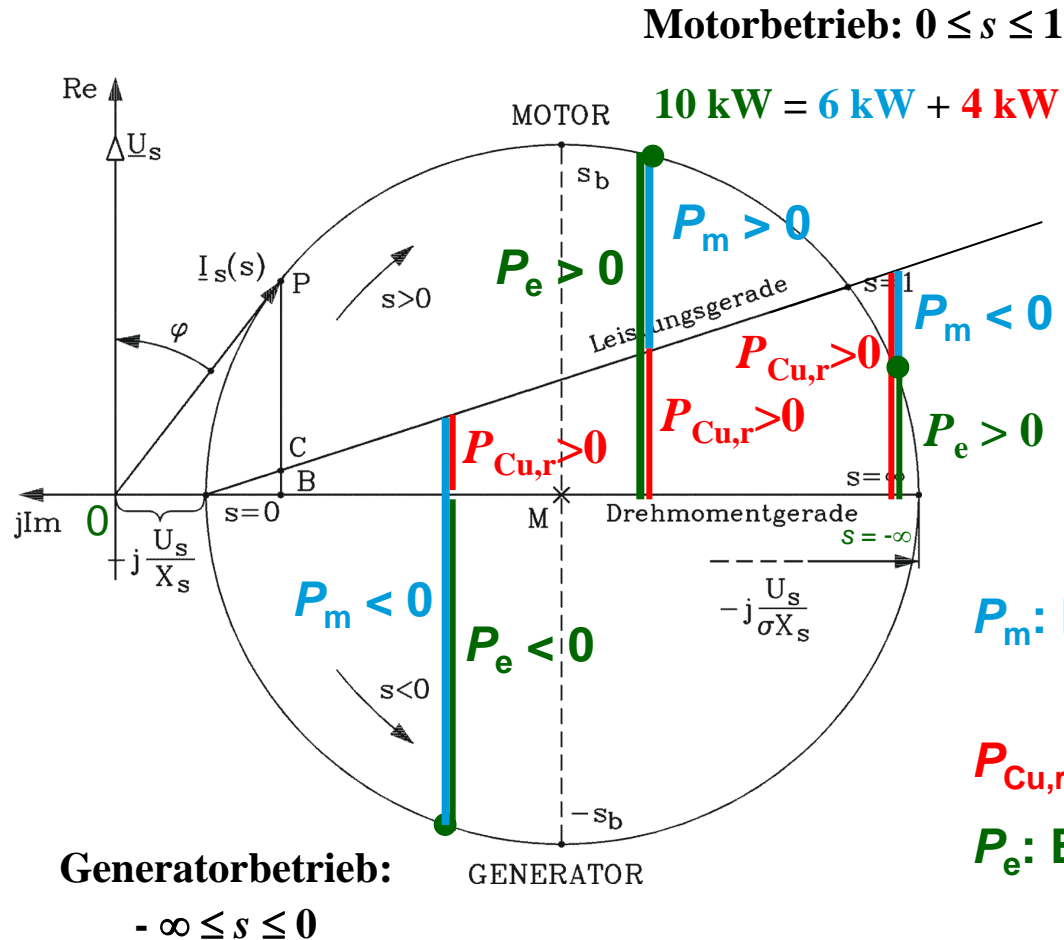


# Kreisdiagramm: Generatorbetrieb, Motorbetrieb, Gegenstrombremsen (2)

$(R_s = 0)$

$P_e = P_m + P_{Cu,r}$

Verbraucher-  
Zählfeilsystem



Motorbetrieb:  $0 \leq s \leq 1$

$10 \text{ kW} = 6 \text{ kW} + 4 \text{ kW}$

**Gegenstrom-Bremsen:**

$1 \leq s \leq \infty$

$3.5 \text{ kW} = -2.5 \text{ kW} + 6 \text{ kW}$

$P_m$ : Mechanische Leistung  
(an der Rotorwelle)

$P_{Cu,r}$ : Rotorverlustleistung

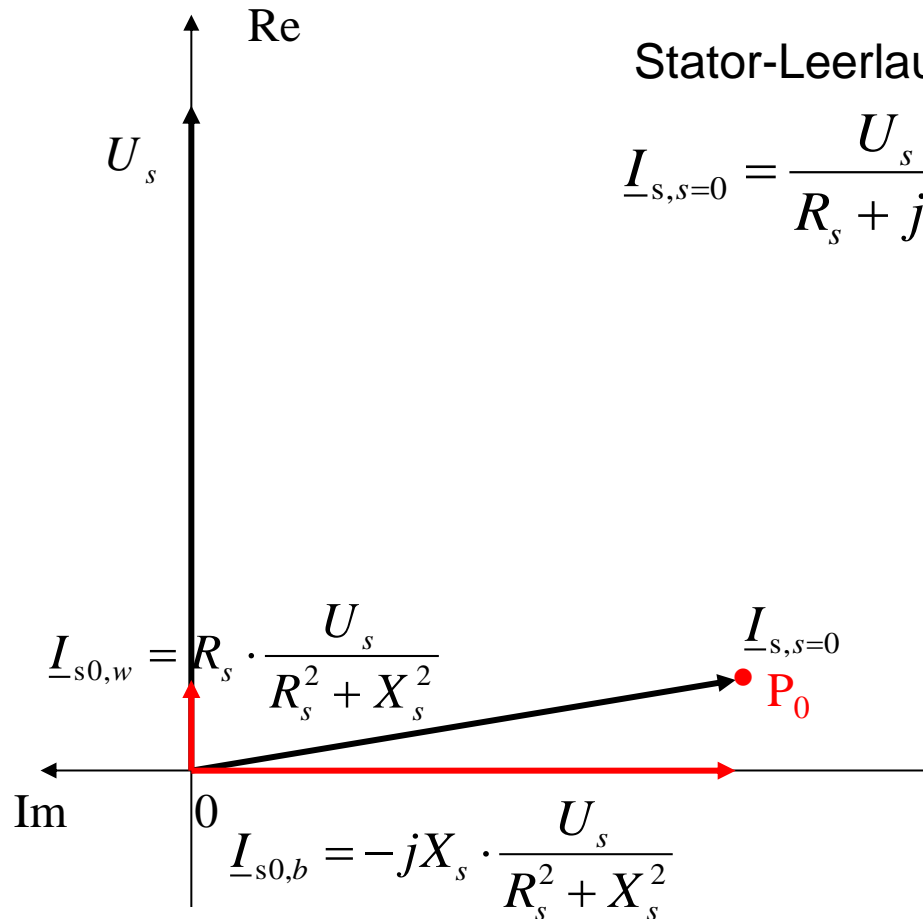
$P_e$ : Elektrische Leistung  
(an den Statorklemmen)

$-10 \text{ kW} = -12 \text{ kW} + 2 \text{ kW}$



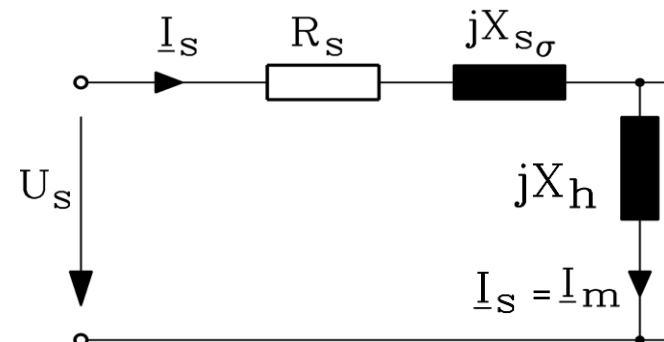


# Leerlaufpunkt $P_0$ bei $R_s > 0$



Stator-Leerlaufstrom:

$$\underline{I}_{s,s=0} = \frac{U_s}{R_s + jX_s} = \frac{U_s}{R_s^2 + X_s^2} \cdot (R_s - jX_s)$$





# Kreisdiagramm-Stromortskurve: OSSANNA-Kreis ( $R_s > 0$ )

- **Kreisdiagramm für  $R_s > 0$ :**

- Der Kreis-Mittelpunkt M liegt etwas **oberhalb** der negativen Im-Achse.
- Die Strecke  $\overline{P_0 P_\infty}$  ist **nicht** Durchmesser des Kreises.
- Punkt  $P_\infty$  rückt **über** die  $-Im$ -Achse.
- **Drehmomentgerade** liegt **oberhalb** der Im-Achse.
- Kreisdurchmesser geht durch Punkte  $s = 0$ , M und "**Durchmesser-Punkt**"  $P_\emptyset$
- **Elektrische Wirkleistung** ist zum Motorwirkstrom (Strecke  $\overline{PA}$ ) proportional:

$$P_e = m_s \cdot U_s \cdot \overline{PA} = m_s \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi$$

# Verlustbilanz im OSSANNA-Kreis ( $R_s > 0$ )

- Verlustbilanz im **Betriebspunkt P**:

Lot aus P auf Kreisdurchmesser ergibt **Fußpunkt D**.

Schnittpunkte mit Leistungs- und Drehmomentgeraden: Punkte C und B.

$$P_\delta = m_s \cdot U_s \cdot \overline{PB} \Rightarrow M_e = \frac{m_s \cdot U_s \cdot \overline{PB}}{\Omega_{syn}}$$

$$P_m = m_s \cdot U_s \cdot \overline{PC}$$

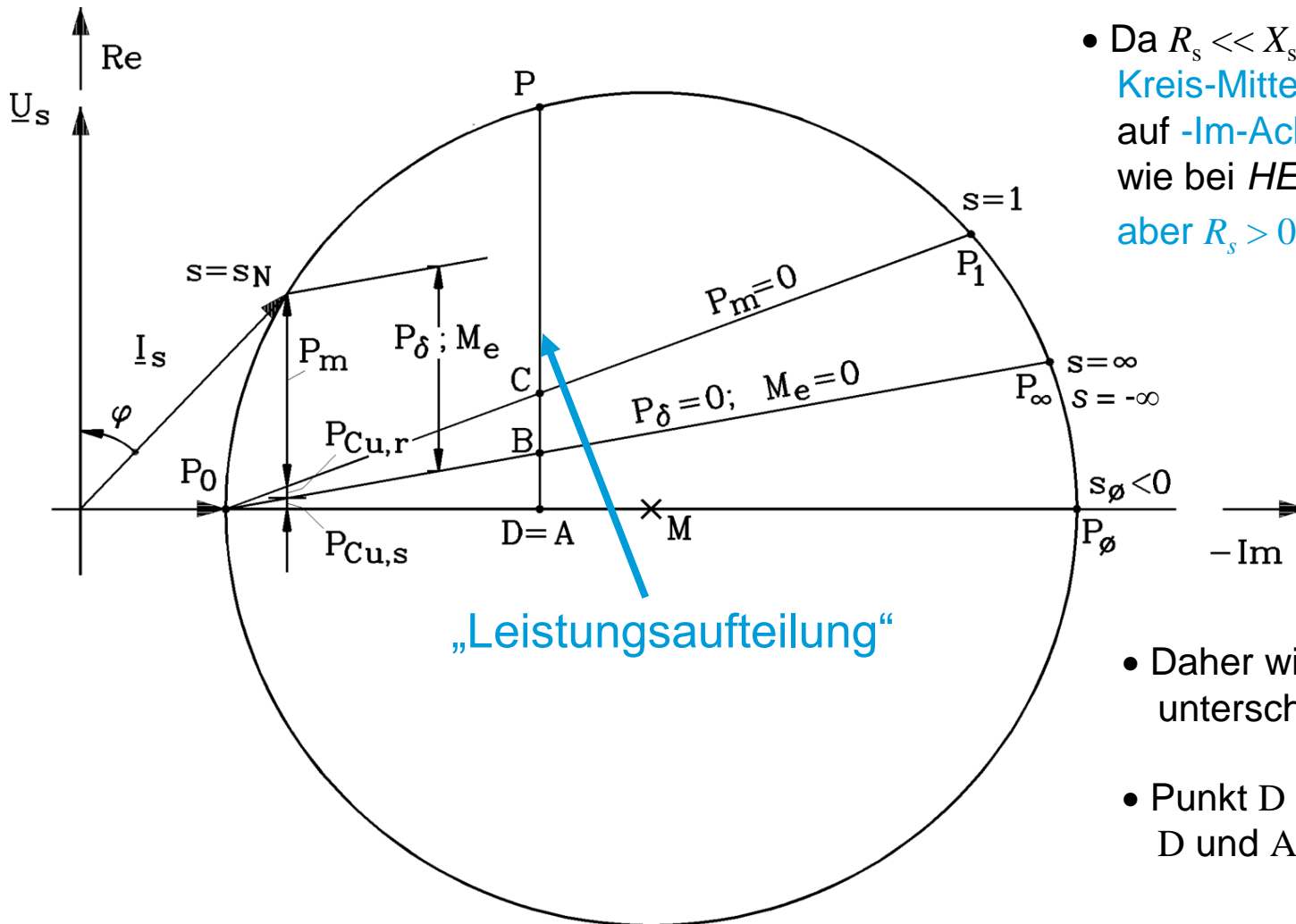
$$P_{Cu,r} = m_s \cdot U_s \cdot \overline{BC} = P_\delta - P_m$$

- **Stromwärmeverluste der Ständerwicklung  $P_{Cu,s}$** : Nicht direkt als Strecke sichtbar.

Sie ergeben sich aus der Differenz von  $\overline{PA}$  und  $\overline{PB}$  :

$$P_{Cu,s} = P_e - P_\delta = m_s \cdot U_s \cdot (\overline{PA} - \overline{PB})$$

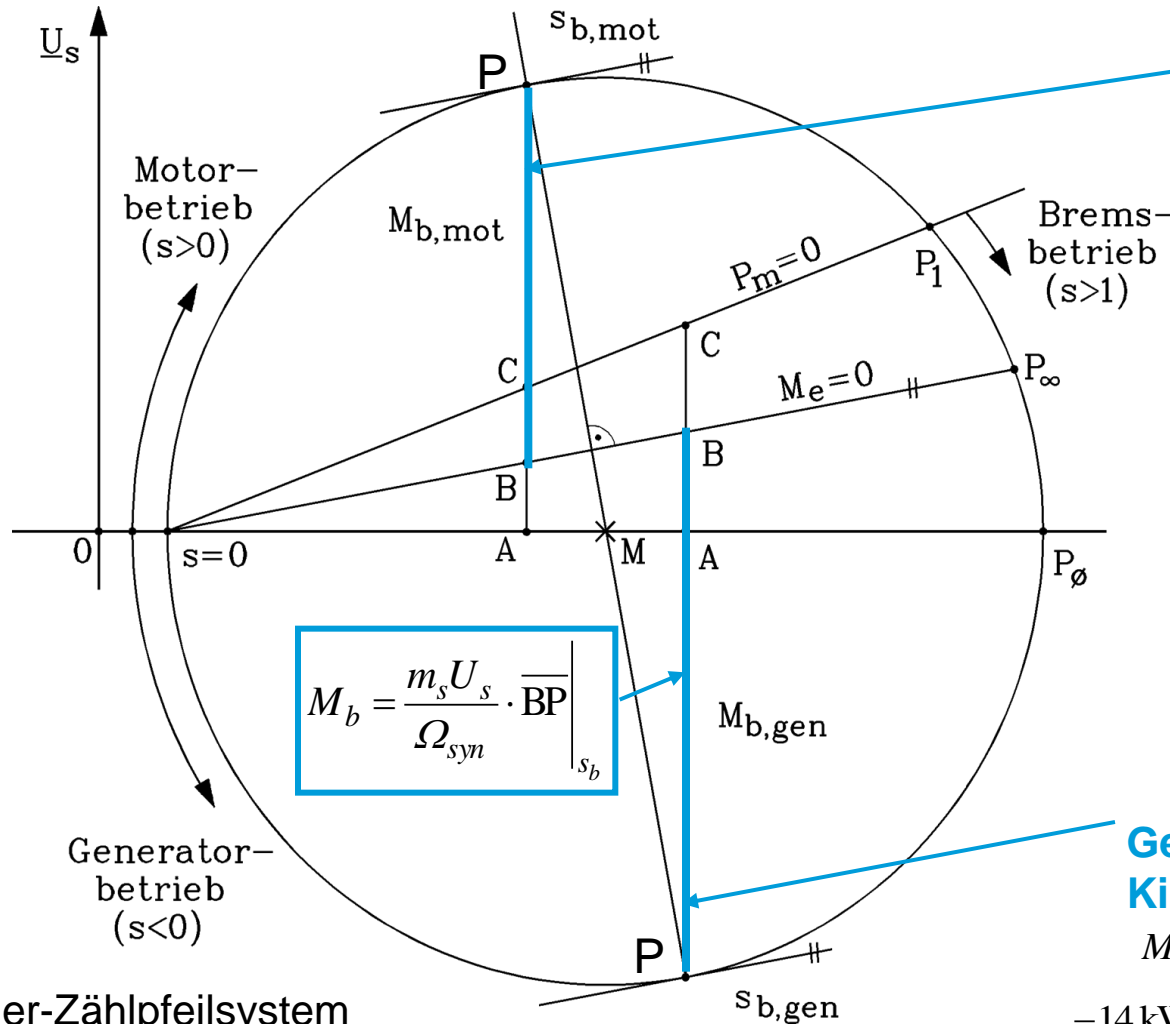
# Vereinfachter OSSANNA-Kreis: Mittelpunkt M auf -Im-Achse



- Da  $R_s \ll X_s$ :  
Kreis-Mittelpunkt  $M$  näherungsweise auf  $-Im$ -Achse gelegt wie bei HEYLAND-Kreis, aber  $R_s > 0$  wird beibehalten.

- Daher wird zwischen  $P_\phi$  und  $P_\infty$  unterschieden.
- Punkt  $D \rightarrow A$ :  
D und A identisch!

# Vereinfachter OSSANNA-Kreis



$$M_b = \frac{m_s U_s}{\Omega_{syn}} \cdot \overline{BP} \Big|_{s_b}$$

## Motorisches Kippmoment

$$M_e > 0, |M_e| = \max.$$

$$7\text{kW} + 1.5\text{kW} + 1.5\text{kW} = 10\text{kW}$$

$$P_m = m_s \cdot U_s \cdot \overline{CP}$$

$$P_{Cu,r} = m_s \cdot U_s \cdot \overline{BC}$$

$$P_{Cu,s} = m_s \cdot U_s \cdot \overline{AB}$$

$$P_e = m_s \cdot U_s \cdot \overline{AP}$$

$$\overline{CP} + \overline{BC} + \overline{AB} = \overline{AP}$$

## Generatorisches Kippmoment

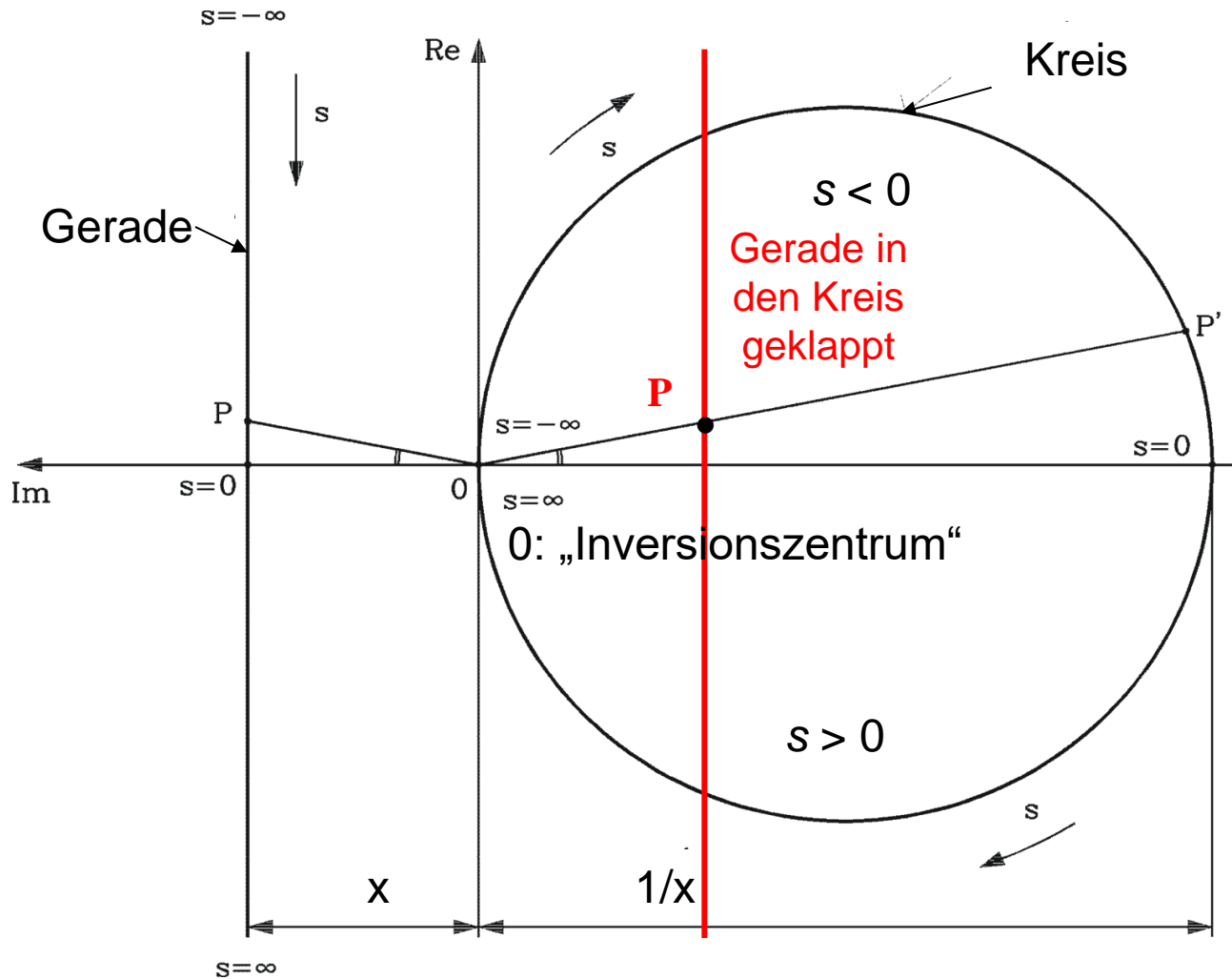
$$M_e < 0, |M_e| = \max.$$

$$-14\text{kW} + 2\text{kW} + 2\text{kW} = -10\text{kW}$$

Verbraucher-Zählpeilsystem

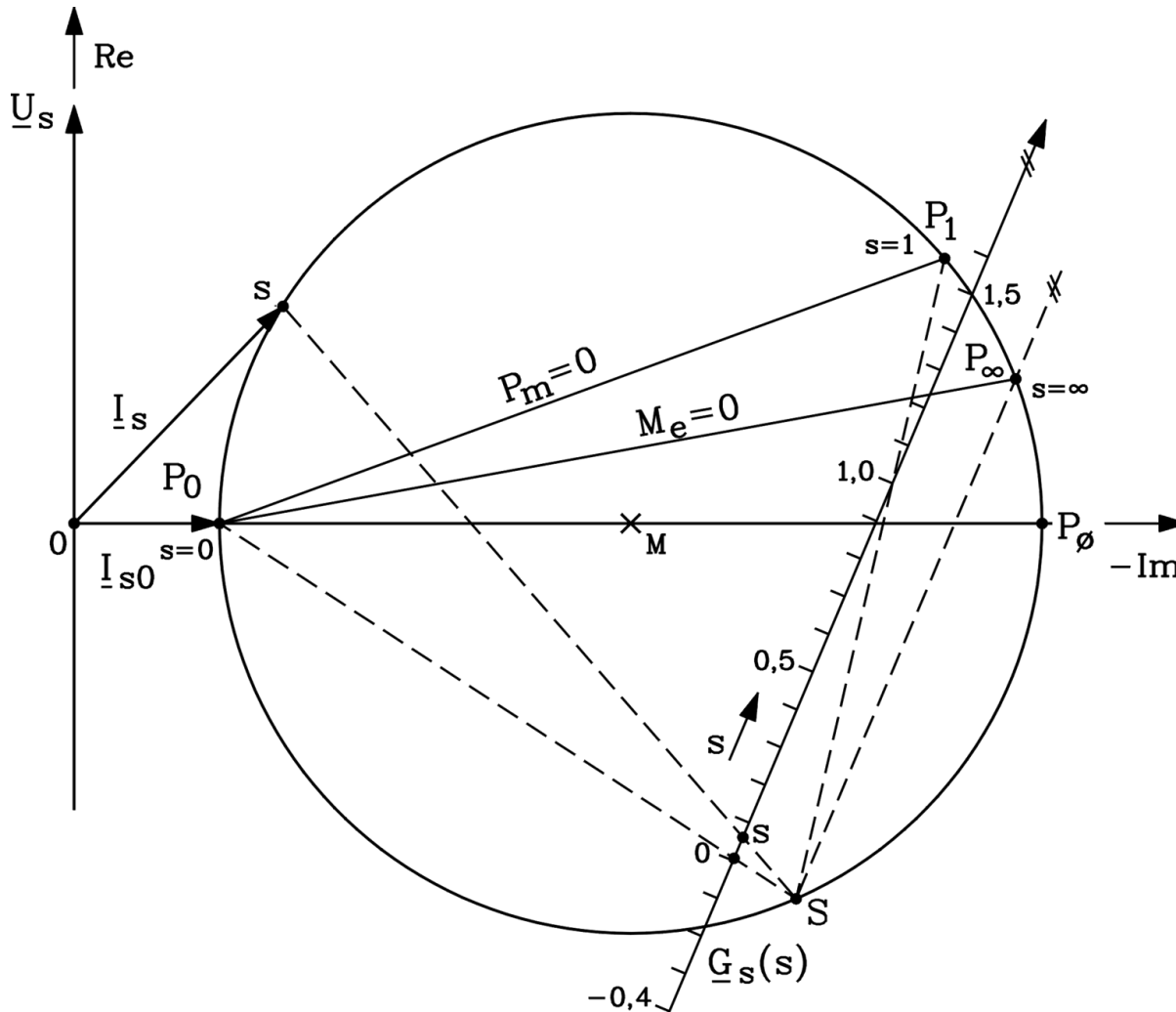


# Geradeninversion liefert Kreis



- Gerade linear in  $s$  beziffert
- Kreis nichtlinear in  $s$  beziffert
- Inversionszentrum  $0$  liegt auf dem Kreis
- Gerade wird zur Schlupfbezifferung des Kreises verwendet

# Kreisbeziehung nach Schlupfwerten: Die „Schlupfgerade“, $\underline{G}_s(s)$



**Schlupfgerade  $\underline{G}_s(s)$**  wird aus **drei** bekannten Betriebspunkten (hier:  $P_0$ ,  $P_1$  und  $P_\infty$ ) und einem **willkürlich** auf dem Kreis gewählten **Inversionszentrum  $S$**  konstruiert und **linear in  $s$**  beziffert.

**Schnittpunkte** der Verbindungsstrahlen von  $S$  und den  $s$ -Werten der Schlupfgeraden mit dem Kreisdiagramm **liefern die Orte** der Spitze des Ständerstromzeigers zum jeweiligen Schlupf  $s$ .



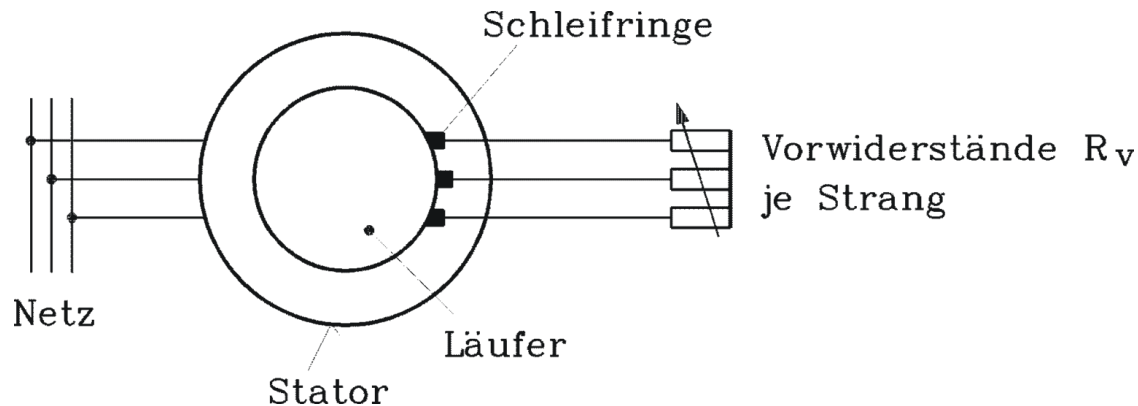
## Zusammenfassung: Kreisdiagramm der Asynchronmaschine

- Statorstromortskurve  $\underline{I}_s(s)$  bei veränderlichem Schlupf  $s$  ist Kreis
- Bei  $R_s = 0$ : HEYLAND-Kreisdiagramm
- Bei  $R_s > 0$ : OSSANNA-Kreisdiagramm etwas „nach oben“ verschoben
- Drehmomentgerade: zwischen  $P_0$  und  $P_\infty$  :  
Drehmoment  $M_e$  aus Kreisdiagramm ablesen
- Leistungsgerade: zwischen  $P_0$  und  $P_1$  :  
Mechanische Leistung  $P_m$  aus Kreisdiagramm ablesen
- Vereinfachter OSSANNA-Kreis:  
Mittelpunkt M auf Abszisse (-Im-Achse), aber Punkt  $P_\infty$  oberhalb
- Schlupfgerade erlaubt nichtlineare Schupfbezifferung des Kreisdiagramms

- 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine
  - 5.1 Funktionsweise der Schleifringläufermaschine
  - 5.2 Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine
  - 5.3 Asynchrone Energiewandlung
  - 5.4 Kreisdiagramm der Asynchronmaschine
  - 5.5 Anfahren des Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen**
  - (5.6 Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer-Asynchronmaschinen)

# Einfügen eines externen Rotorwiderstands $R_v$ je Strang

- Drei externe veränderbare **OHM'sche Widerstände („Vorwiderstände“)**  $R_v$  (i. A. in Y-Schaltung) werden über die drei Schleifringe in die Läuferstränge eingeschaltet.

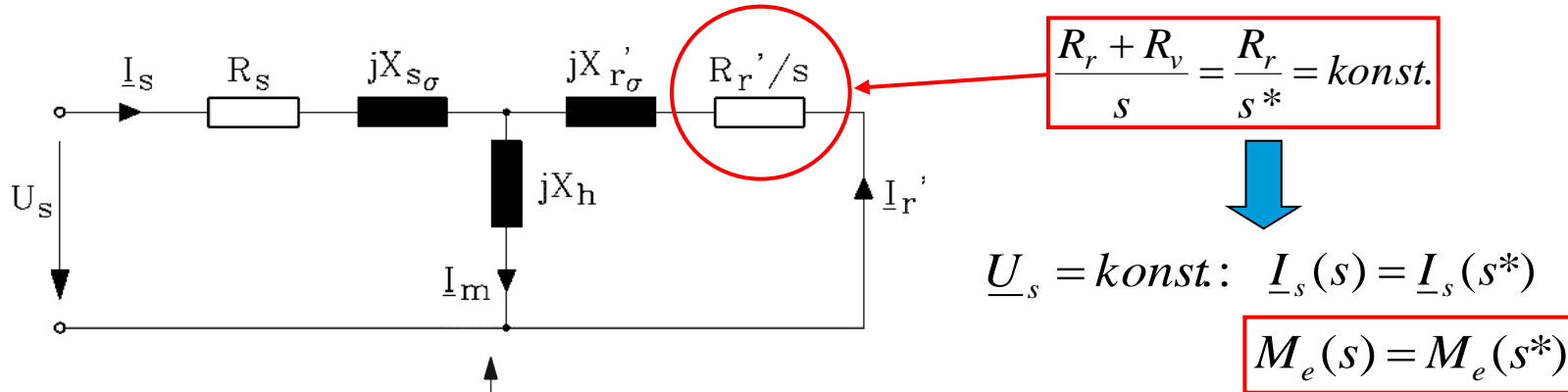


⇒ Veränderung der Drehmoment- und Stromkennlinie  $M_e(n), I_s(n)$

- Eine Veränderung des Läuferwiderstands  $R_r \Rightarrow R_r + R_v$ : Ändert Form des Kreisdiagramms **nicht**, wohl aber seine Schlupfbezifferung (außer  $s = 0, s = \pm\infty$ )

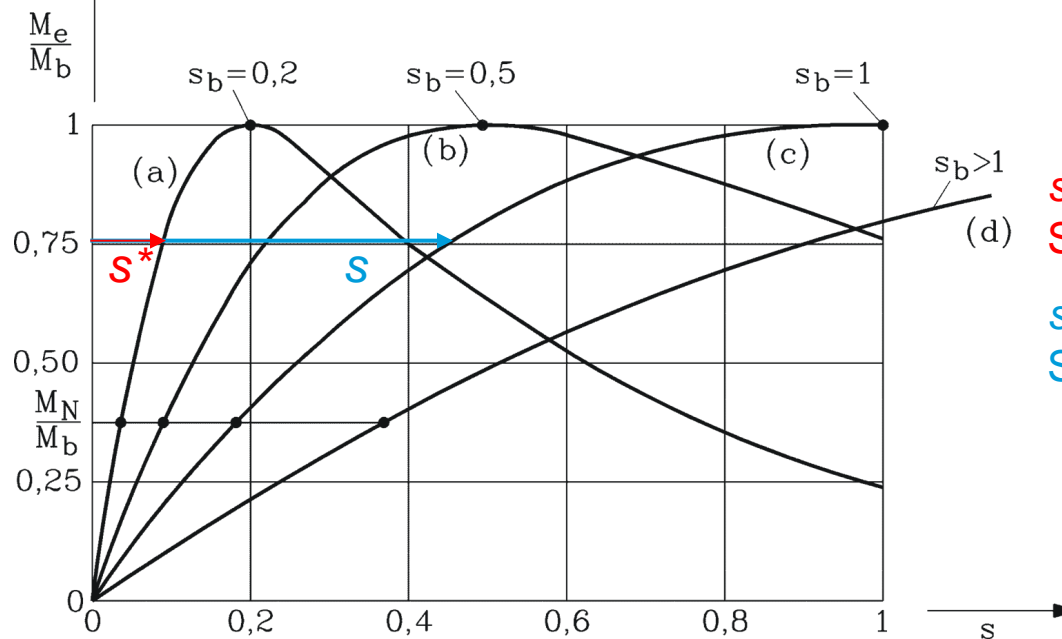
$$R_r' / s = konst. \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{R_r + R_v}{s} = \frac{R_r}{s^*} = konst.} \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_s(s) = \underline{I}_s(s^*)$$

# Einfügen eines externen Rotorwiderstands $R_v$ je Strang



$M_e(s) = M_e(s^*)$

Streckung der  $M_e$ -Kurve im Verhältnis  $s/s^*$  von (a) nach (c)

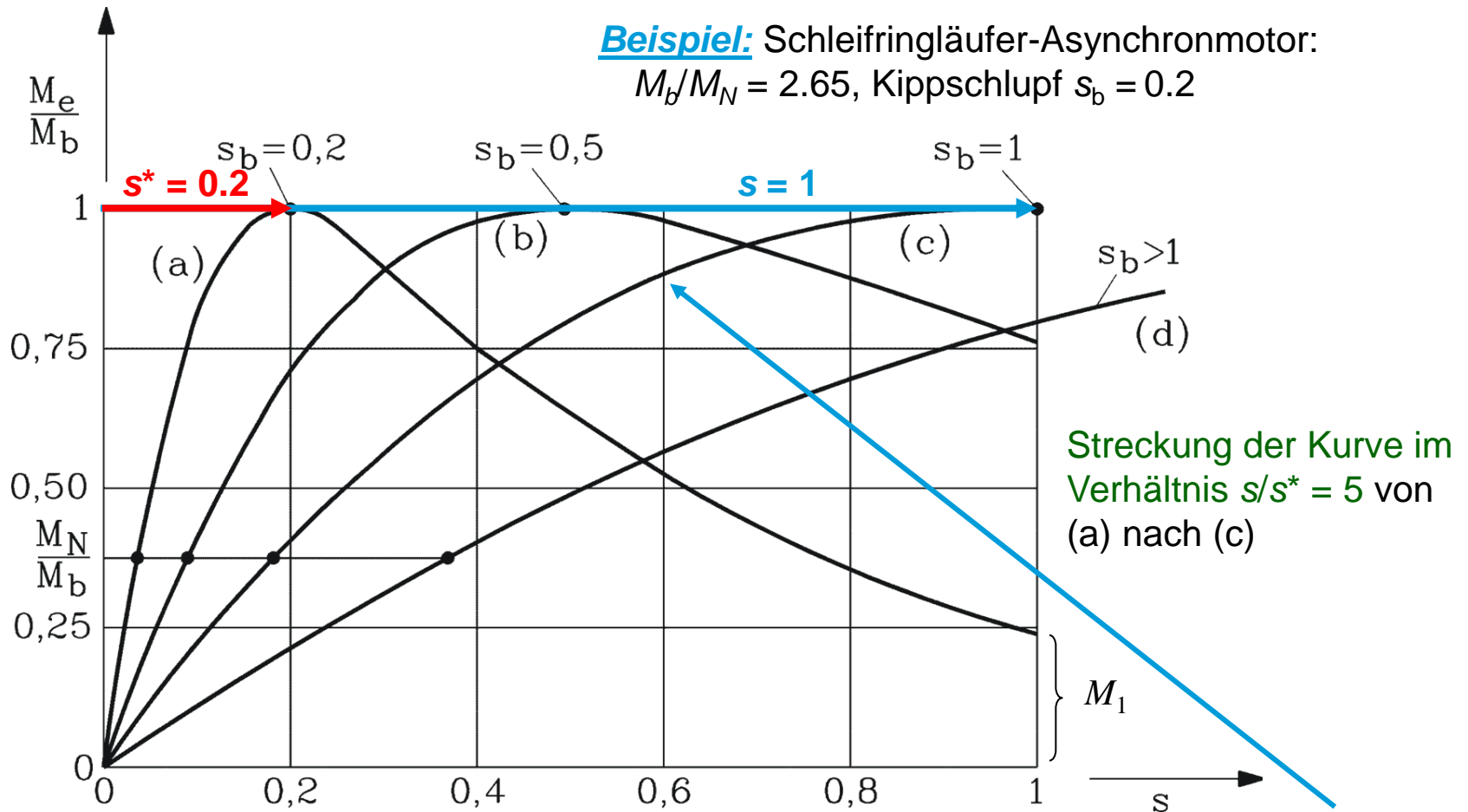


$s^*$ : Schlupf OHNE  $R_v$

$s$ : Schlupf MIT  $R_v$



# Drehmomentverlauf eines Schleifringläufer-Asynchronmotors ( $M_b/M_N = 2.65$ ) mit zusätzlichen Läuferwiderständen $R_v$



Mit einem Vorwiderstand/Strang  $R_v = 4R_r$  ist das "Anfahrmoment = Kippmoment" (Kurve c).

# Dimensionierung der Vorwiderstände als Anlass-Widerstände

- Beim Anfahren ( $s = 1$ ) soll motorisches Kippmoment auftreten:  $s^* = s_b$

$$\boxed{\frac{R_r + R_v}{s} = \frac{R_r}{s^*} = \text{konst.}} \quad \frac{R_r + R_v}{1} = \frac{R_r}{s_b} \quad \Rightarrow \quad R_v = R_r \cdot \left(\frac{1}{s_b} - 1\right)$$

- **Beispiel:**

Schleifringläufer-Asynchronmotor:  $M_b/M_N = 2.65$ , Kippschlupf  $s_b = 0.2$

- Ohne Vorwiderstände beträgt das Anfahrmoment  $M_1 = 0.65M_N$  bzw.  $0.24M_b$  (Kurve a).

$$R_v = R_r \cdot \left(\frac{1}{0.2} - 1\right) = 4 \cdot R_r$$

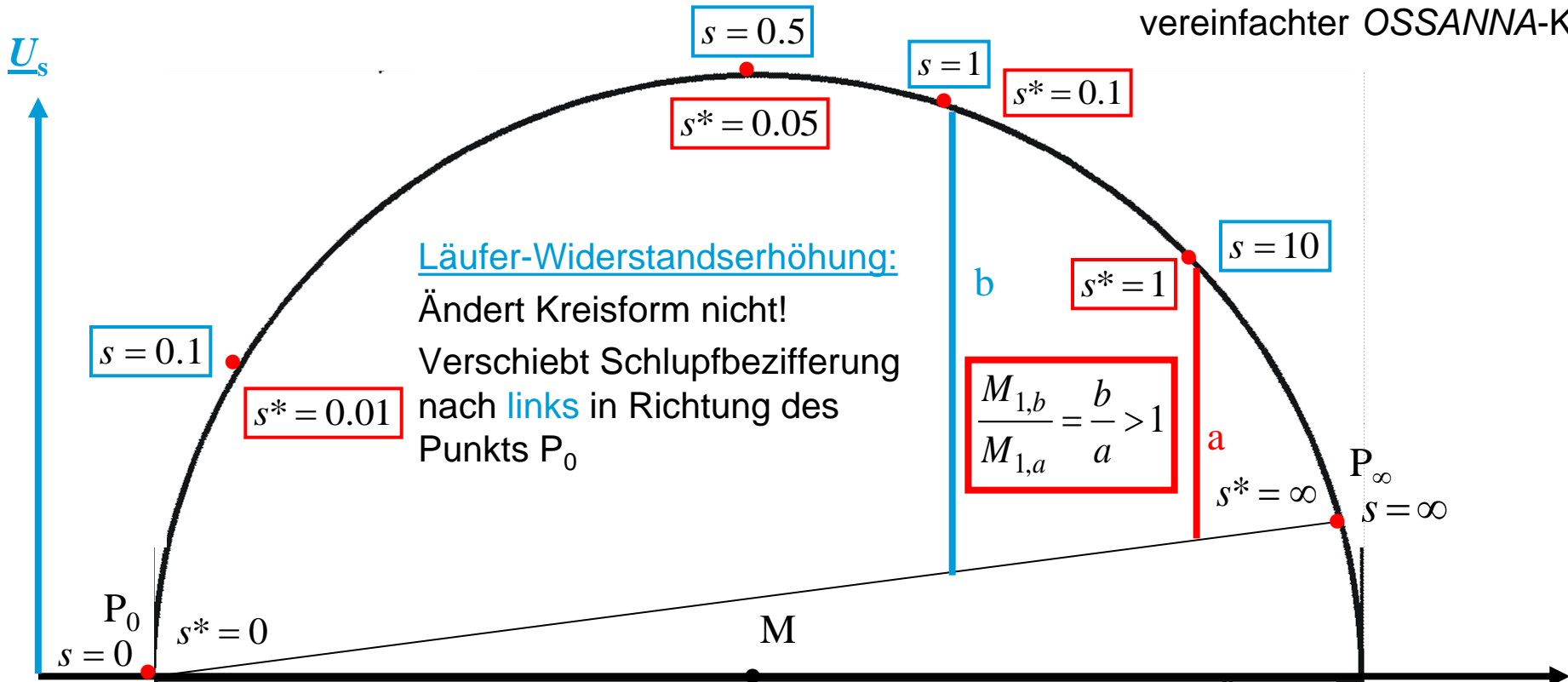
- Bei  $R_v/R_r = 4$  ist Anfahren mit Kippmoment möglich (Kurve c).

# Einfluss des erhöhten Läuferwiderstands auf Schlupfbezifferung des Kreisdiagramms

**Beispiel:**  $R_r + R_v = 10 \cdot R_r$

$$\frac{R_r + R_v}{s} = \frac{R_r}{s^*} \Rightarrow s = 10 \cdot s^*$$

Alte Schlupfbezifferung:  $s^*$   
 Neue Schlupfbezifferung:  $s$   
 Hier: z. B.  
 vereinfachter OSSANNA-Kreis



# Anfahren eines Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen

- Über externe **Anfahrwiderstände**  $R_v$  ("**Anlasser**"), die über die drei Schleifringe in die Läuferstränge eingeschaltet werden, kann
  - das Anfahrmoment  $M_1$  bis zum Maximalwert (Kippmoment  $M_b$ ) angehoben
  - und die Stromaufnahme dabei auf den Kippstrom  $I_b$  abgesenkt werden.
- "**Scherung**" (lineare Streckung) der  $M(n)$ - bzw. der  $M(s)$ -Kurve durch  $R_v$ :  
Das zum gewählten Schlupfwert  $s^*$  auftretende Drehmoment  $M_e$  tritt bei einem neuen Schlupfwert  $s$  auf.
- Das verbesserte Anlaufverhalten ( $M_1 \uparrow, I_1 \downarrow$ ) wird durch **zusätzliche Stromwärmeverluste** in den Anlasswiderständen  $R_v$  erkauft, die aber außerhalb der Maschine auftreten, so dass diese vor Überhitzung geschützt ist.



## Zusammenfassung:

### Anfahren des Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen

- Läuferwiderstände  $R_v$  über Schleifringe in Läuferstränge geschaltet
- Scherung der Drehmomentkennlinie  $M_e(s)$  vom Synchronpunkt  $n_{syn}$  aus
- Anfahren mit Kippmoment  $M_1 = M_b$  möglich („Schweranlauf“)
- Absenken des Anlaufstroms  $I_1$   
z. B. auf den Kippstrom  $I_1 = I_b$  (ca. 50%) möglich
- Anlauf-Stromwärmeverluste:  
außerhalb der Maschine in den Vorwiderständen  $R_v =$  gut kühlbar