

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## 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. Elektrisch und permanentmagnetisch erregte Synchronmaschinen
10. Gleichstromantriebe

# 8. Die Synchronmaschine



Quelle: Siemens AG

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## 8. Die Synchronmaschine

### 8.1 Funktionsprinzip und Läuferbauweisen

### 8.2 Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine

### 8.3 Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz

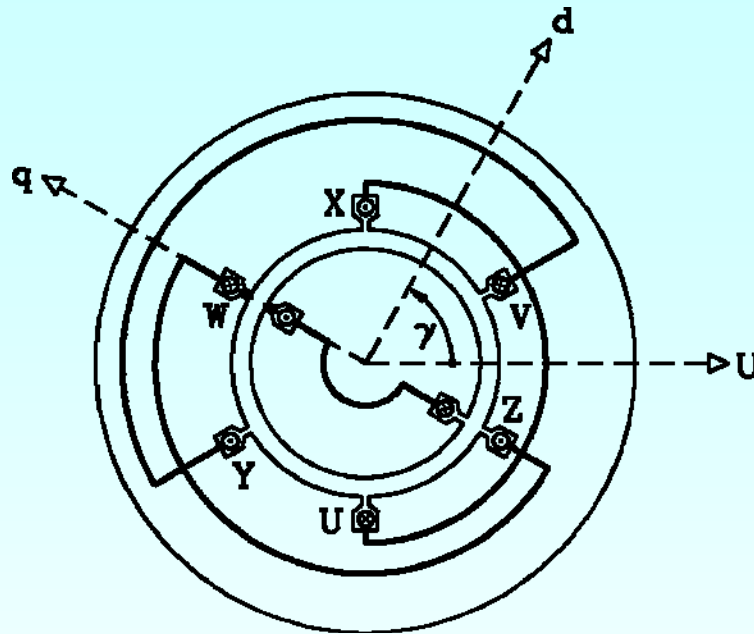
### 8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

### 8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

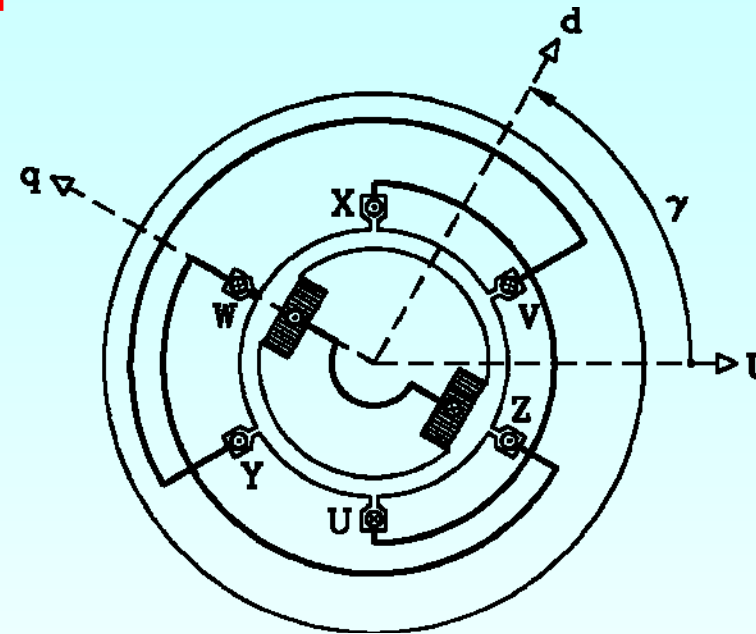
### (8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

### 8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb

# Synchronmaschine mit Vollpol- und Schenkelpol-Läufer



**VOLLPOL:** Erregerwicklung in Läuferfalten;  
Luftspalt konstant



**SCHENKELPOL:** Konzentrische Wicklung;  
Luftspalt in Polmitte am kleinsten

- **Läufer ("Polrad")** hat Gleichstrom-durchflossene Erregerwicklung (Strom  $I_f$ ), die das Läuferfeld erregt.
- Das vom Netzstrom erregte **Ständerdrehfeld** zieht auf Grund der Magnetkraft den Läufer **gleich schnell** (= "synchron") mit (**MOTOR**-Betrieb).
- Im **GENERATOR**-Betrieb wird der Läufer mechanisch angetrieben und induziert in die Ständerwicklung ein Dreh-Spannungssystem, das den Ständerstrom trieb.
- Dessen Drehfeld folgt dem Läufer **synchron**.



# Vollpol-Synchron-Rotor, 8-polig

Drei Feldspulen  
pro Pol:  $q_r = 3$

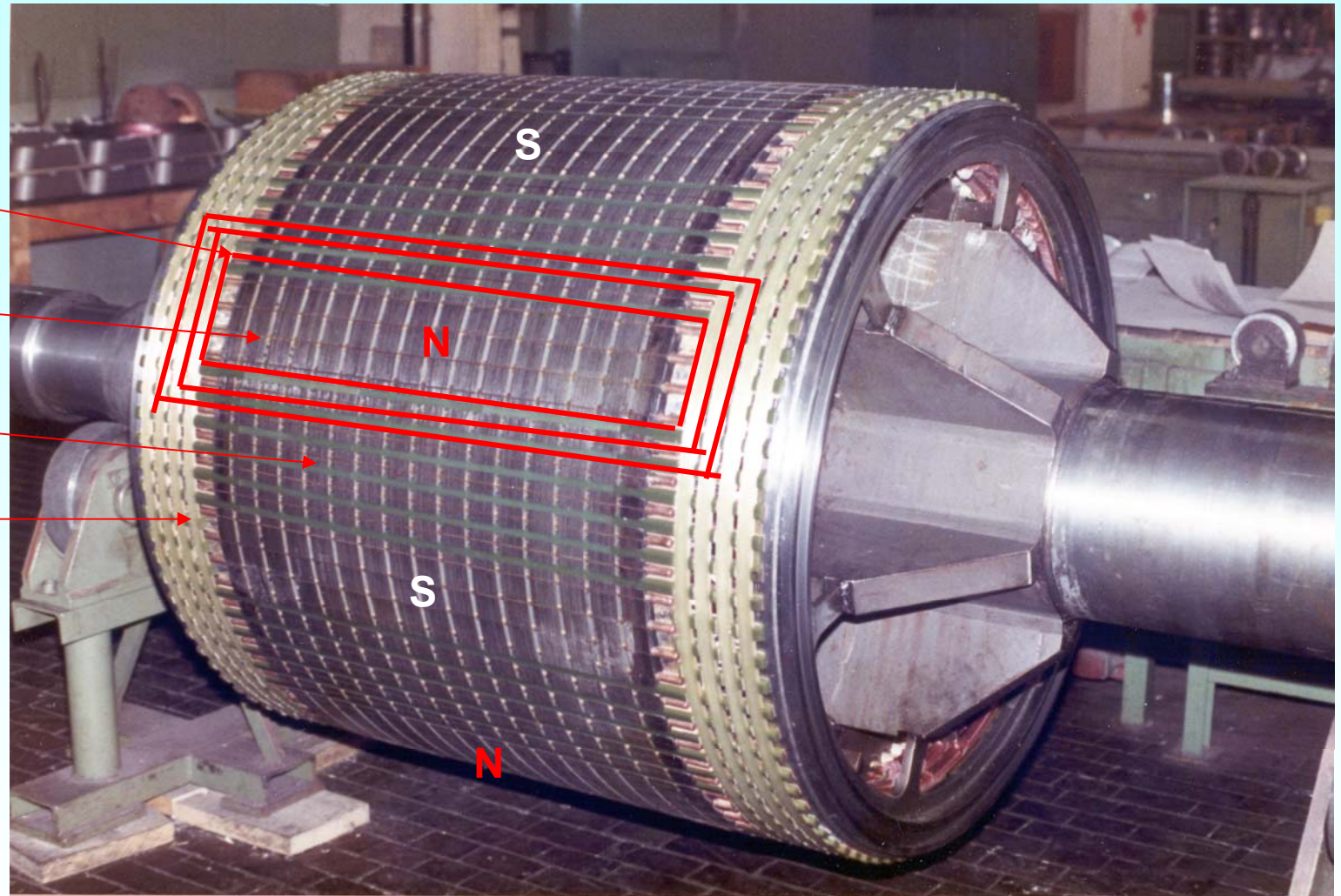
Dämpferkäfig mit  
9 Stäben pro Pol

Radiale  
Kühlschlitze

Glasfaser-  
Bandage zur  
Fixierung der  
Rotor-  
Wickelköpfe

Quelle:

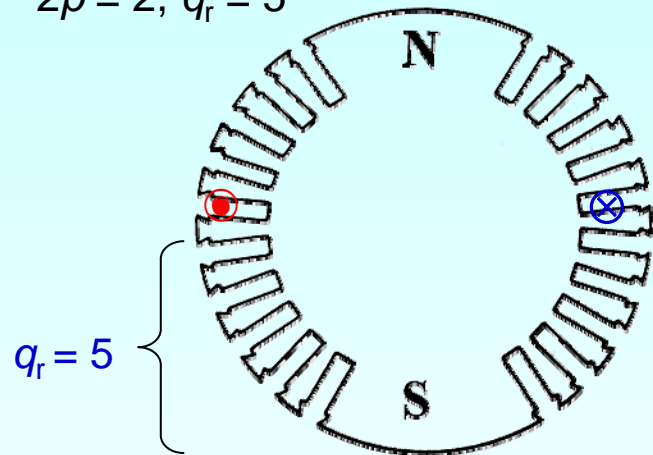
Andritz Hydro, Bhopal,  
Indien



# Vollpolmaschine $2p = 2$ : Magnetfeld bei Leerlauf

## Beispiel:

$$2p = 2, q_r = 5$$

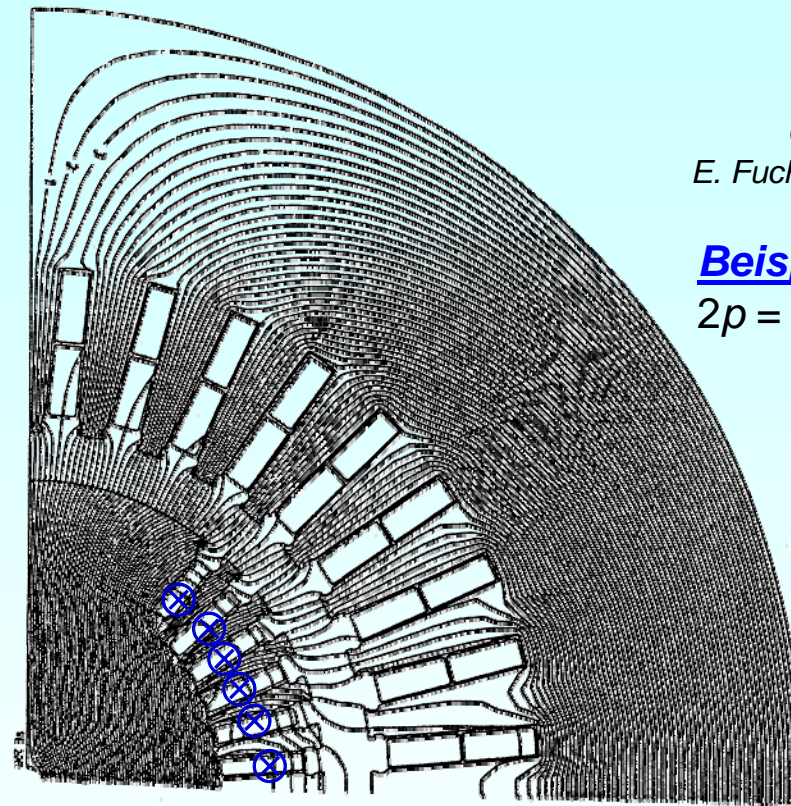


Quelle: H. Kleinrath,  
Studententext

## Läuferquerschnitt ohne Erregerwicklung:

- Lochzahl  $q_r = 5$ , zweipoliger Läufer
- Läufer kann aus massivem Eisen sein, da im Läufer nur **magnetischer Gleichfluss**

Polachse = Feldachse



Quelle:  
E. Fuchs, IEEE-PAS

## Beispiel:

$$2p = 2, q_s = 6, q_r = 6$$

## Magnetfeld bei Leerlauf ( $I_s = 0, I_f > 0$ ):

- Erregerwicklung bestromt
- Ständerwicklung stromlos (**Leerlauf**)
- Feldlinien radial = kein tangentialer Magnetzug = **elektromagnetisches Drehmoment ist Null**



# Elektrische Maschinen und Antriebe

## Zusammenfassung: Funktionsprinzip und Läuferbauweisen

- Vollpolläufer und Schenkelpolläufer
- Vollpol: eher niedrige Polzahlen, dafür hohe Drehzahlen  
Schenkelpol: eher hohe Polzahlen, niedrige Drehzahlen
- Dreisträngige Ständer-Drehfeldwicklung am Sinus-Drehspannungssystem
- Ständerwicklung erzeugt Drehfeld mit ausgeprägter Grundwelle (rotiert mit „Synchrondrehzahl“)
- Läufer („Polrad“) hat Spulen oder Permanentmagnete, die Läufer-Gleichfeld erregen (z. B. über Erreger-Gleichstrom)
- Ständer-Drehfeld bildet mit Läufer-Magnetfeld Drehmoment.
- Läufer wird gleich schnell mit Ständer-Drehwelle („synchron“) mitgezogen (Motorbetrieb)



# Elektrische Maschinen und Antriebe

## 8. Die Synchronmaschine

### 8.1 Funktionsprinzip und Läuferbauweisen

### 8.2 Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine

### 8.3 Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz

### 8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

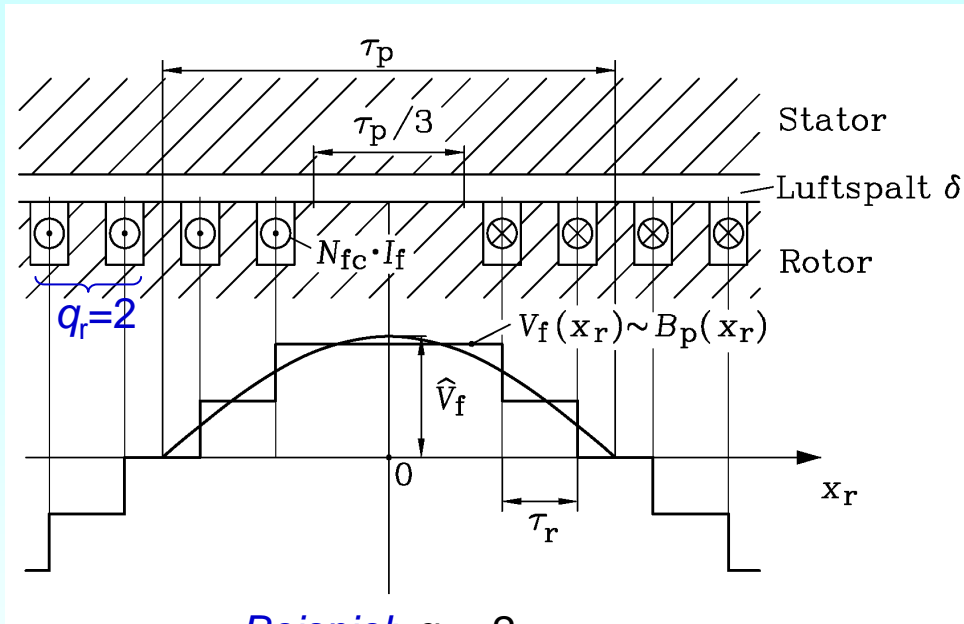
### 8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

### (8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

### 8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb



# Läuferfeld und Polradspannung der Vollpolmaschine



Beispiel:  $q_r = 2$

Läuferfluss pro Pol:  $\Phi_p = \frac{2}{\pi} l \tau_p \hat{B}_p$

- **Polradspannung  $U_p$ :** Sinusförmige Feldwelle  $B_p$  induziert in die dreiphasige Ständerwicklung bei Drehzahl  $n$  ein Drehspannungssystem ("Polradspannung")

$$U_p = \omega_s \cdot \Psi_p / \sqrt{2} = \sqrt{2} \pi f_s \cdot \Psi_p / \sqrt{2} = \omega_s \cdot N_s k_{w,s} \cdot \Phi_p / \sqrt{2}$$

mit der **Frequenz**  $f_s = n p$

- **Treppenförmige Läufer-Feldkurve**  
hat Grundwelle ( $\mu = 1$ ):

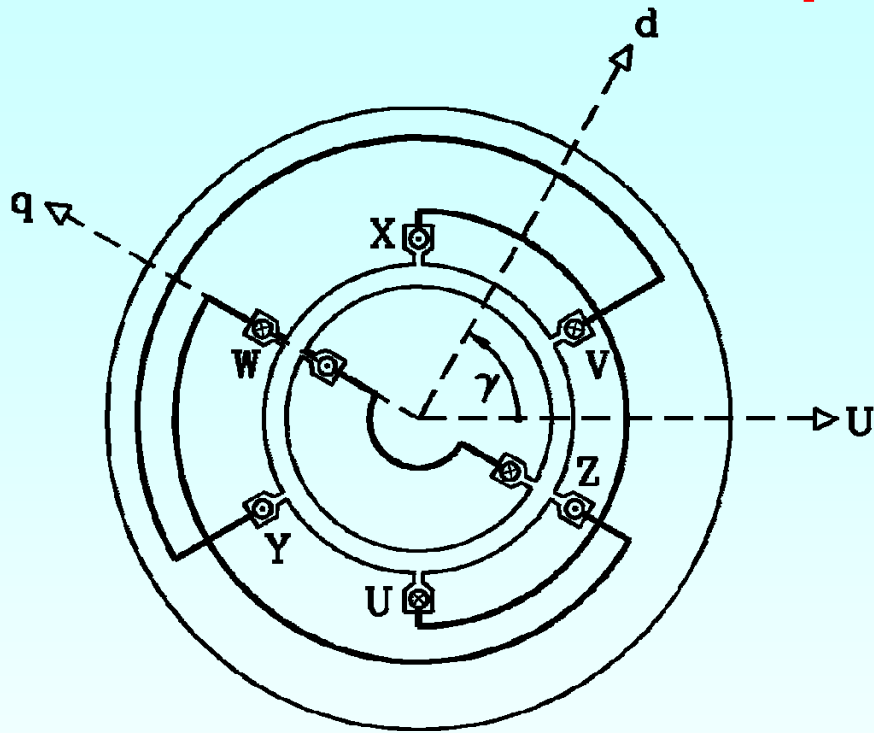
$$\hat{V}_f = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{N_f}{p} \cdot (k_{p,f} k_{d,f}) \cdot I_f \approx \frac{N_f}{2p} \cdot I_f$$

$$\hat{B}_p = \mu_0 \frac{\hat{V}_f}{\delta}, \quad N_f = 2p \cdot q_r \cdot N_{fc}$$

$$k_{p,f} = \sin\left(\frac{W}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\pi/3) = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$k_{d,f} = \frac{\sin(\pi/6)}{q_r \sin(\pi/(6q_r))}, \quad k_{wf} = k_{pf} k_{df}$$

# Induzierte Ständerspannung („Polradspannung“)



Beispiel:  $q_s = 1 \Rightarrow k_{ws} = 1$

Verkettung des Läuferflusses mit Spule U

$$\Phi_p(t) = \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)$$

$$\Psi_{p,U}(t) = N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)$$

Verkettung des Läuferflusses mit Spule V und W:

$$\Psi_{p,V}(t) = N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi f_s \cdot t - 2\pi/3)$$

$$\Psi_{p,W}(t) = N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi f_s \cdot t - 4\pi/3)$$

Induzierte Spannung je Strang bei Leerlauf = Polradspannung:

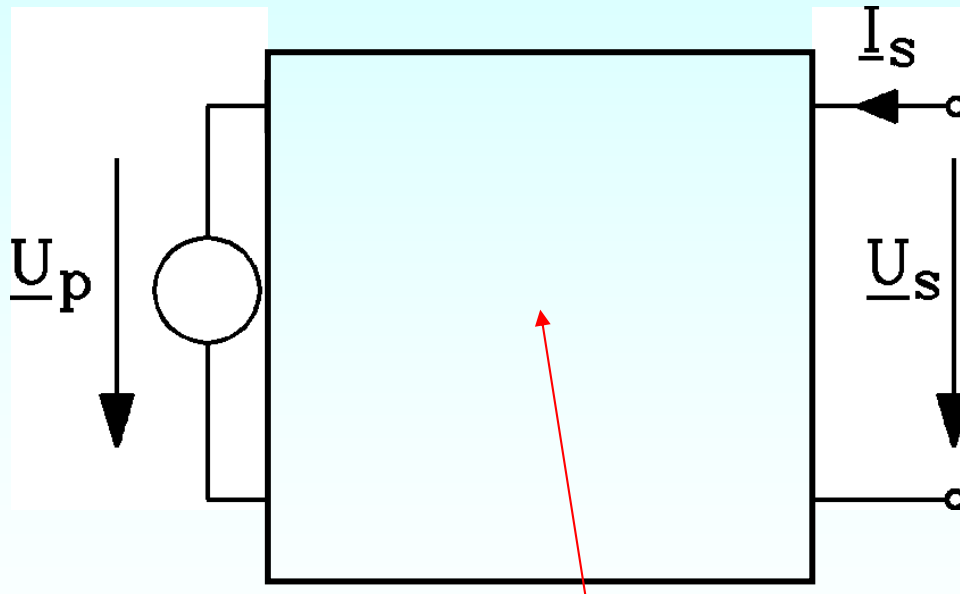
$$u_{i,U}(t) = -d\Psi_{p,U}(t)/dt = -\omega_s \cdot N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \cos(\omega_s \cdot t) = -\sqrt{2} \cdot U_p \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$$

$$U_{i0} = U_p = \sqrt{2} \pi f_s \cdot N_s k_{ws} \Phi_p$$

# Synchronmaschine bei Belastung: $I_s \neq 0$

- Die Ständerwicklung ist an das Drehspannungssystem  $U_s$  des Netzes angeschlossen.  
Die Differenz  $\underline{U}_s - \underline{U}_p$  treibt in der Ständerwicklung **Drehstrom**  $\underline{I}_s$ .

Spannungen je Strang in der Ständerwicklung:



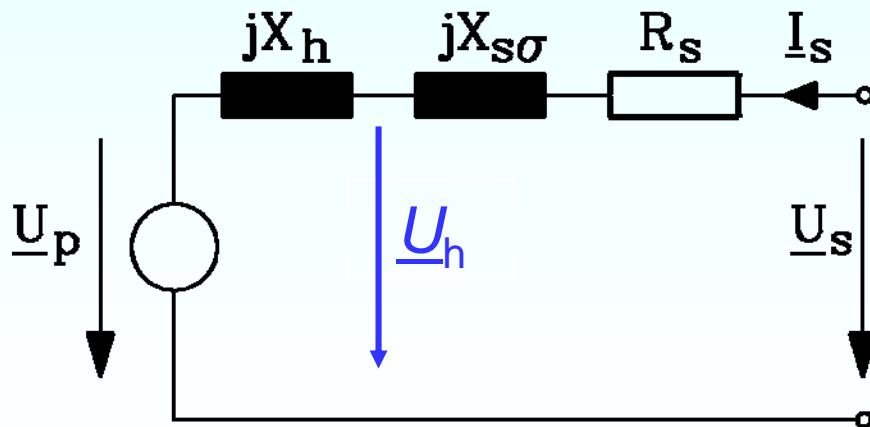
- *Ohm'scher* Spannungsfall durch  $I_s$  & Selbstinduktionsspannung durch das Ständerfeld, das von  $I_s$  erregt wird.

# Vollpolmaschine: Ersatzschaltbild

- **Ständerwicklung:** Drehfeldwicklung wie bei Asynchronmaschine,
- $I_s$ : *Selbstinduktionsspannung* über das ständererregte Luftspaltfeld (Reaktanz  $X_h$ ) und das Ständerstrefelfeld (Reaktanz  $X_{s\sigma}$ ).
- Spannungsfall am Ständerwicklungswiderstand  $R_s$
- Spannungsgleichung je Strang:  $\underline{U}_s = \underline{U}_p + jX_h \underline{I}_s + jX_{s\sigma} \underline{I}_s + R_s \underline{I}_s$

$$\underline{U}_s = \underline{U}_p + jX_d \underline{I}_s + R_s \underline{I}_s$$

- **"synchrone Reaktanz":**  $X_d = X_{s\sigma} + X_h$  Gesamte Wirkung des Ständer-Magnetfelds!
- **Ersatzschaltbild Ständerwicklung:** für Ständerspannungsgleichung (Wechselstrom).



- **Läuferkreis:  $U_f$ :**  
**Erregerspannung:** (Feldspannung):  
 Sie prägt über Schleifringe Gleichstrom  
**(Erregerstrom  $I_f$ )** in Erregerwicklung  
 (Feldwicklung mit Widerstand  $R_f$ ) ein.

$$U_f = R_f \cdot I_f$$



# Übersetzungsverhältnis für Erregerstrom

- **Selbstinduktionsspannung:**  $\underline{U}_{s,s} = jX_h \underline{I}_s$  vom Ständer-Luftspaltfeld
- **Polradspannung  $\underline{U}_p$ :** Luftspaltfeld des Läufers, kann über Erregerstrom  $I_f$  willkürlich WÄHREND DES BETRIEBS verändert werden = "**gesteuerte Spannungsquelle**".

a) **Amplitude über  $I_f$  verändert.**

b) Je nach relativer Lage des Läufer-Nordpols zum Nordpol des Ständerdrehfelds ändert sich die **Phasenlage** von  $\underline{U}_p$  in Bezug zu  $jX_h \underline{I}_s$  : Polradlage  $\Rightarrow$  **Polradwinkel  $\vartheta$** .

- **Darstellung von Amplitude und Phasenlage von  $\underline{U}_p$ :** kann mit **fiktivem Wechselstrom  $\underline{I}'_f$**  rechnerisch im Ersatzschaltbild dargestellt werden:  $\underline{U}_p = jX_h \underline{I}'_f$

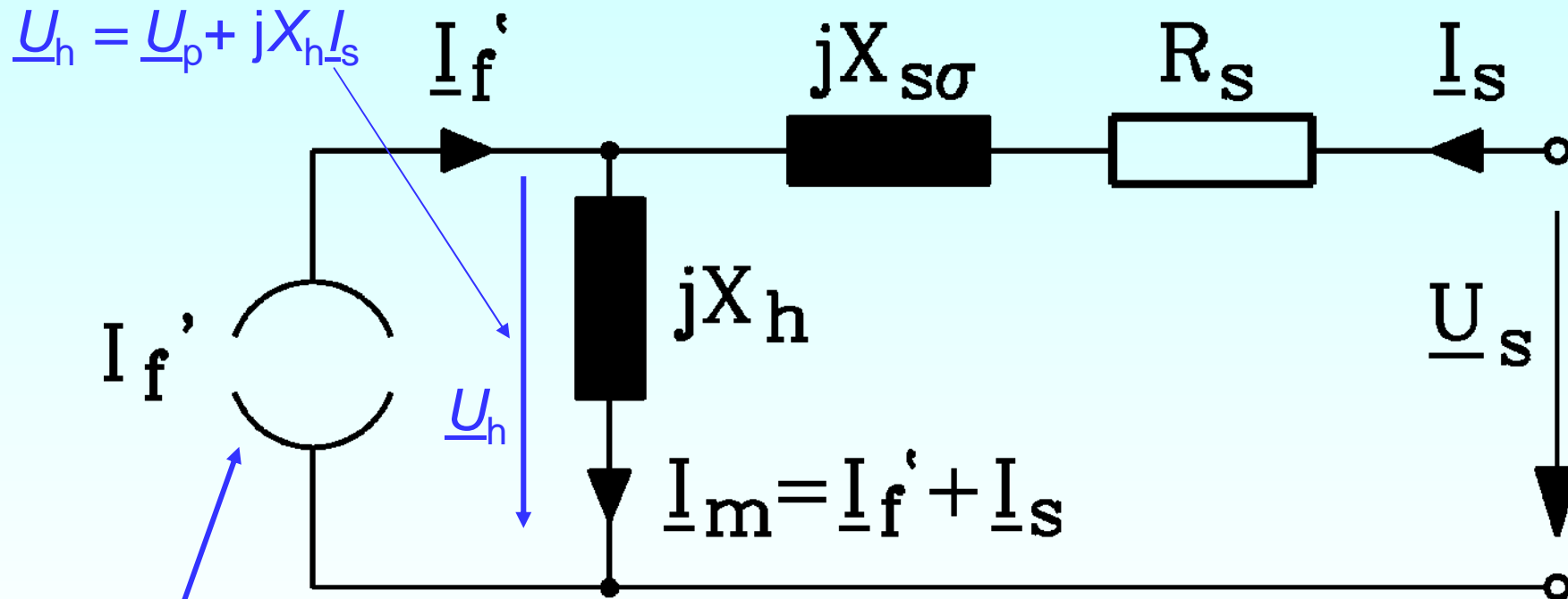
- **Übersetzungsverhältnis für Erregerstrom  $\underline{u}'_f$ :**  $I'_f = \frac{1}{\underline{u}'_f} I_f$

$$I'_f = \frac{U_p}{U_{s,s}} I_s = \frac{\hat{B}_p}{\hat{B}_{s,\delta}} I_s = \hat{V}_f \cdot \frac{I_s}{\hat{V}_s} : \text{ soll sein } \frac{1}{\underline{u}'_f} I_f$$

Mit  $\hat{V}_f = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{N_f}{p} \cdot k_{wf} \cdot I_f$ ,  $\hat{V}_s = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{m_s N_s}{p} \cdot k_{ws} \cdot I_s$  folgt:  $\underline{u}'_f = \frac{m_s N_s k_{ws}}{\sqrt{2} N_f k_{wf}}$

## Alternatives Ersatzschaltbild: Eingeprägter Ersatzfeldstrom $\underline{I}'_f$

$$\underline{U}_h = \underline{U}_p + jX_h \underline{I}_s = jX_h \cdot (\underline{I}'_f + \underline{I}_s) = jX_h \underline{I}_m$$



Fiktive Wechselstromquelle  $\underline{I}'_f$  erzeugt die Polradspannung an der Hauptfeldreaktanz

$$\underline{U}_p = jX_h \underline{I}'_f$$

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## **Zusammenfassung: Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine**

- Polradspannung ist Wechselspannungsquelle
- Synchronreaktanzen bildet Selbstinduktionsspannung des Ständerdrehfelds in der Ständerwicklung ab
- Polradspannung kann über Läufer-Erregerstrom verändert werden = gesteuerte Spannungsquelle
- Winkel zwischen Polradspannung und Ständerstrangspannung = „Polradwinkel“
- Winkel zwischen Ständerstrangspannung und Strangstrom = „Phasenwinkel“

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## 8. Die Synchronmaschine

8.1 Funktionsprinzip und Läuferbauweisen

8.2 Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine

**8.3 Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz**

8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

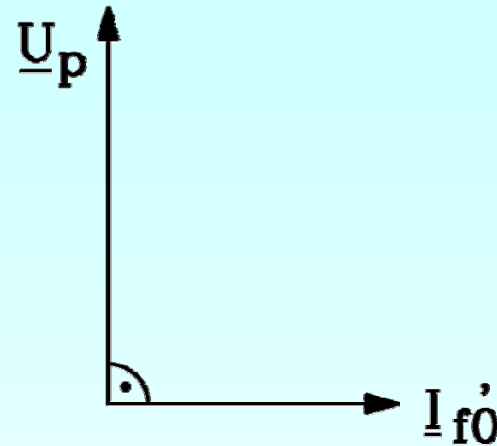
8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

(8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb



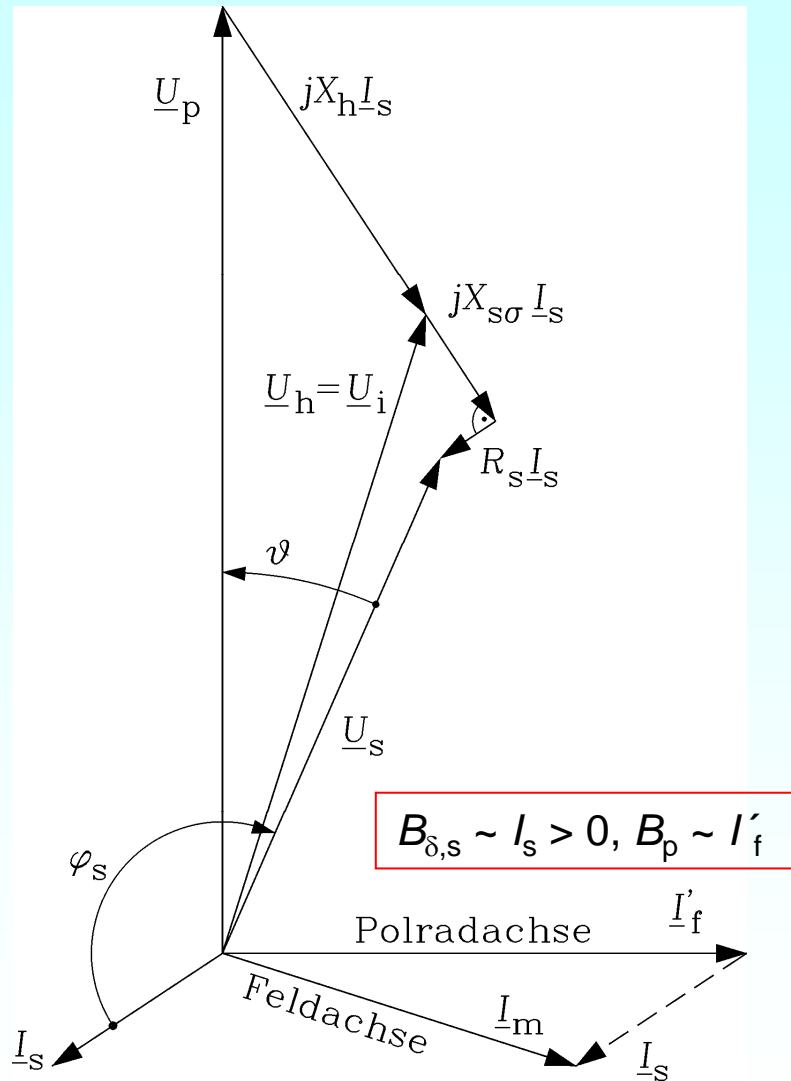
## Generator Leerlauf: $I_s = 0$ , $n = n_{\text{syn}}$



Maschine angetrieben, Läufer mit  $I_{f0}$  erregt, Ständer stromlos:  $I_s = 0$  (Klemmen offen): Es tritt nur  $U_p$  auf.

$$\underline{U}_p = jX_h \underline{I}'_{f0}$$

# Polradwinkel $\vartheta$ , Hauptfeldspannung $\underline{U}_h$ , Magnetisierungsstrom $\underline{I}_m$



$$\underline{U}_s = \underline{U}_p + j(X_h + X_{s\sigma})\underline{I}_s + R_s \underline{I}_s$$

- **Polradwinkel  $\vartheta$ :** zwischen Ständer-Spannungszeiger  $\underline{U}_s$  und Polradspannungs-Zeiger  $\underline{U}_p$ . Im mathem. Zählsinn (Gegenuhrzeiger !) positiv gezählt.

- **Hauptfeldspannung  $\underline{U}_h$ :** Resultierende Induktionswirkung von Läufer- und Ständer-Luftspaltfeld:

$$\underline{U}_h = \underline{U}_p + jX_h \underline{I}_s \quad \underline{U}_h = jX_h \underline{I}_m$$

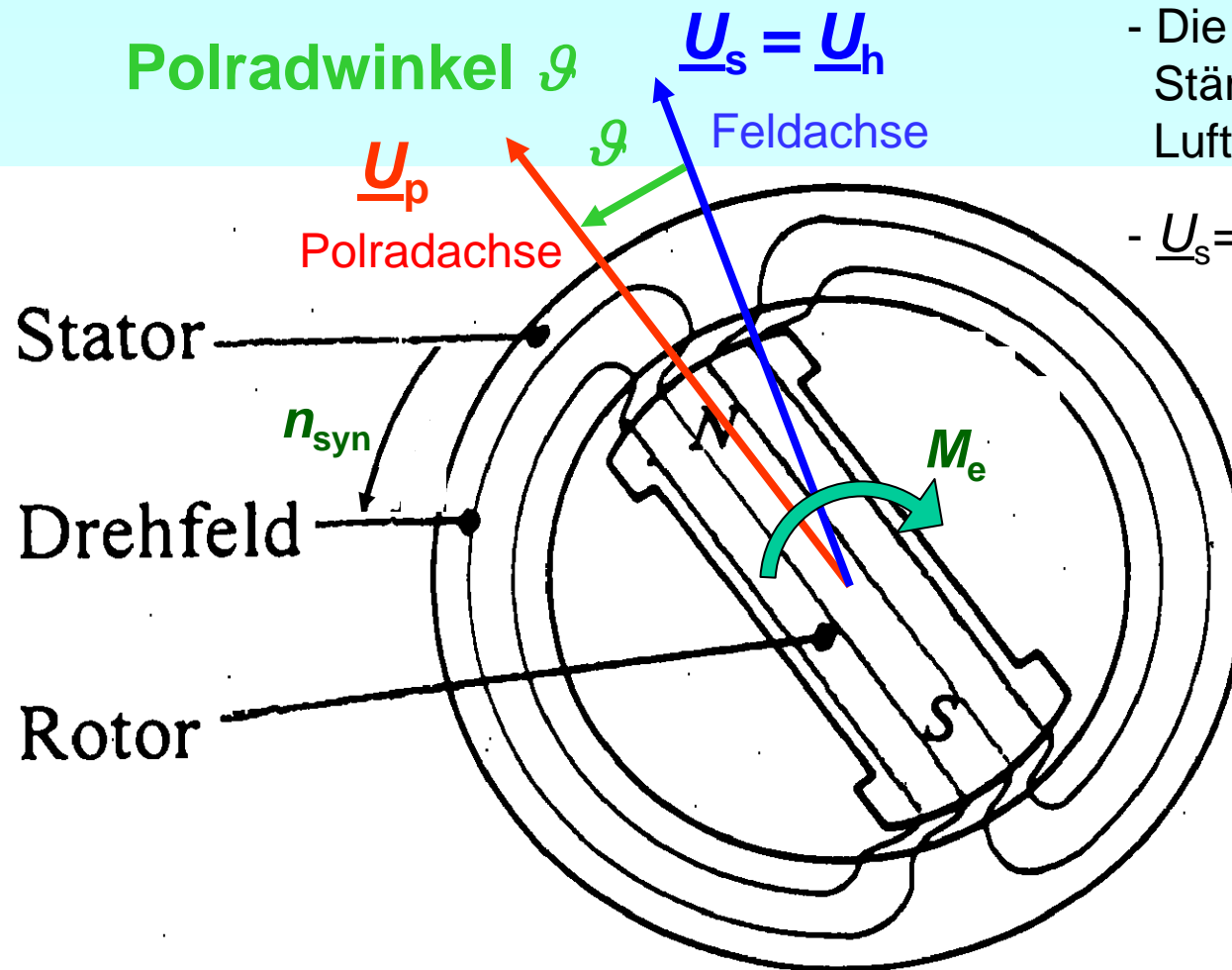
- **Magnetisierungsstrom  $\underline{I}_m$ :** Resultierender Erregerbedarf für Läufer- und Ständer-Luftspaltfeld:

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

Spannungsdreieck  $\underline{U}_p, jX_h \underline{I}_s, \underline{U}_h$  und Stromdreieck  $\underline{I}'_f, \underline{I}_s, \underline{I}_m$  sind

- a) kongruent und
- b) im rechten Winkel zueinander.

# Polradwinkel $\vartheta$ - Hauptfeldspannung $\underline{U}_h$



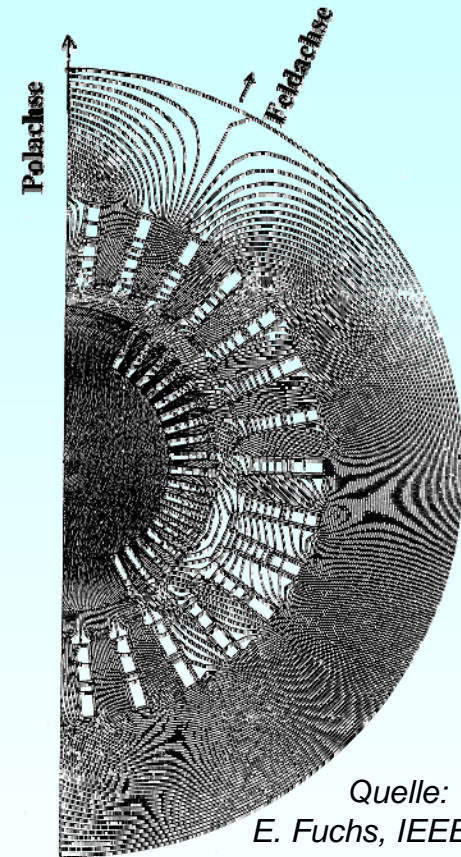
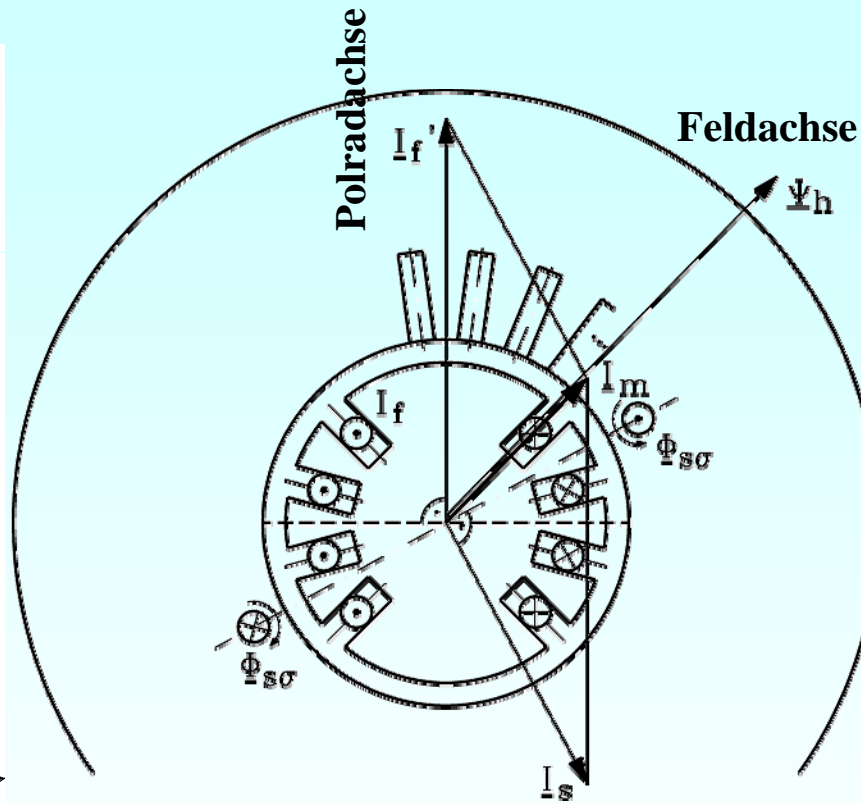
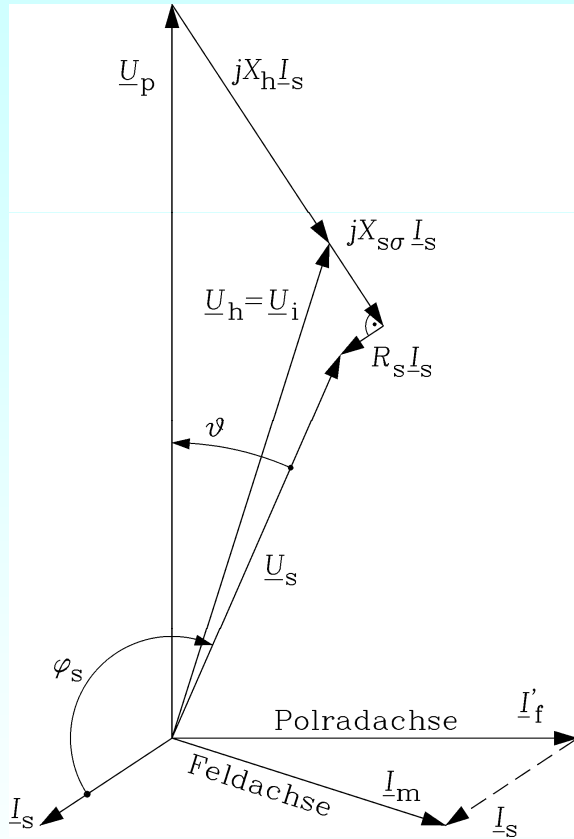
- Die Hauptfeldspannung wird vom Ständer-Hauptfeld (= resultierendes Luftspaltfeld) induziert.

-  $\underline{U}_s = \underline{U}_h$  gilt bei  $R_s, X_{s\sigma} = 0$

## Beispiel: GENERATOR

- Angetriebener Läufer dreht nach links = mathem. positiv
- Luftspaltfeld folgt, bremst mit  $M_e$  den Läufer
- Polradwinkel POSITIV

# Vollpolmaschine: Magnetfeld bei Last



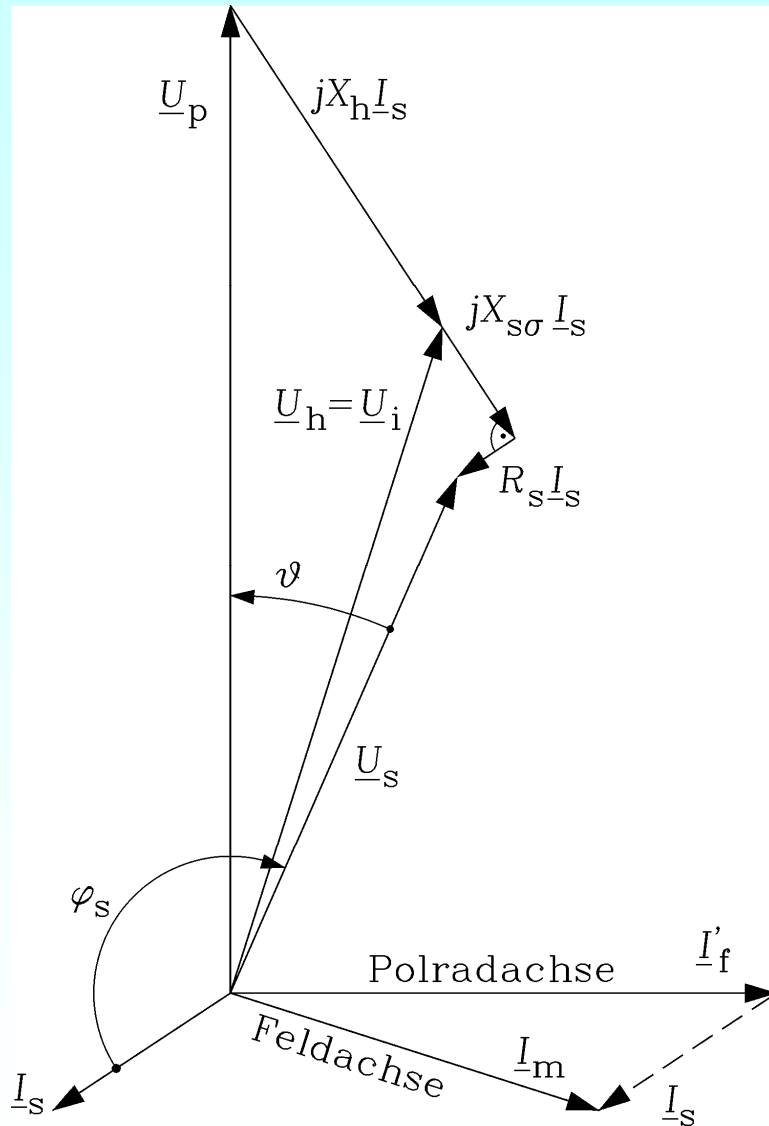
Quelle:  
E. Fuchs, IEEE-PAS

$$B_{\delta,s} \sim I_s > 0, B_p \sim I'_f$$

- Magnetfeld bei Belastung ( $I_s > 0, I_f > 0$ ): Polachse = Richtung  $\underline{U}_p$ , Feldachse = Richtung  $\underline{U}_h$



# Zeigerdiagramm der Vollpol-Synchronmaschine



**Beispiel: Generator, übererregt:**

**a) elektrische Wirkleistung:**  $P_e = m_s U_s I_s \cos \varphi_s$

Winkel  $\varphi_s$  zwischen  $-90^\circ$  und  $-180^\circ$ :

Daher  $\cos \varphi_s$  negativ:

$P_e$  ist negativ = ans Netz gelieferte Leistung  
(GENERATOR).

$P_e < 0$ : **Generator**,

$P_e > 0$ : **Motor**.

**b) elektrische Blindleistung:**  $Q = m_s U_s I_s \sin \varphi_s$

Winkel  $\varphi_s$  negativ = Strom eilt Spannung VOR:

$\sin \varphi_s$  negativ:

$Q$  ist negativ = kapazitive Blindleistung:

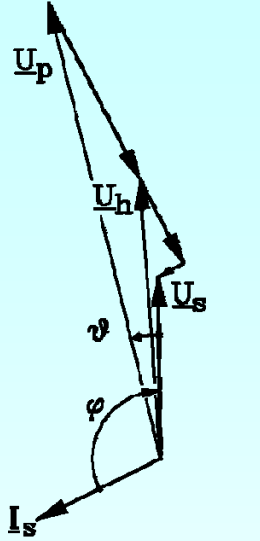
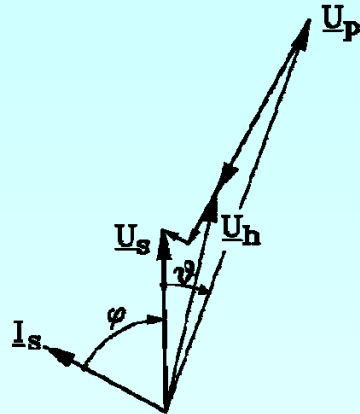
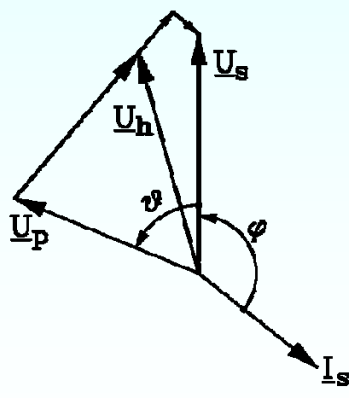
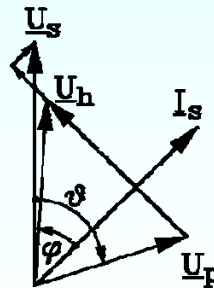
Maschine wirkt als **kapazitiver Verbraucher**.

$Q < 0$ : **übererregt**, Verbraucher kapazitiv.

$Q > 0$ : **untererregt**, Verbraucher induktiv.

# Über-/Untererregt

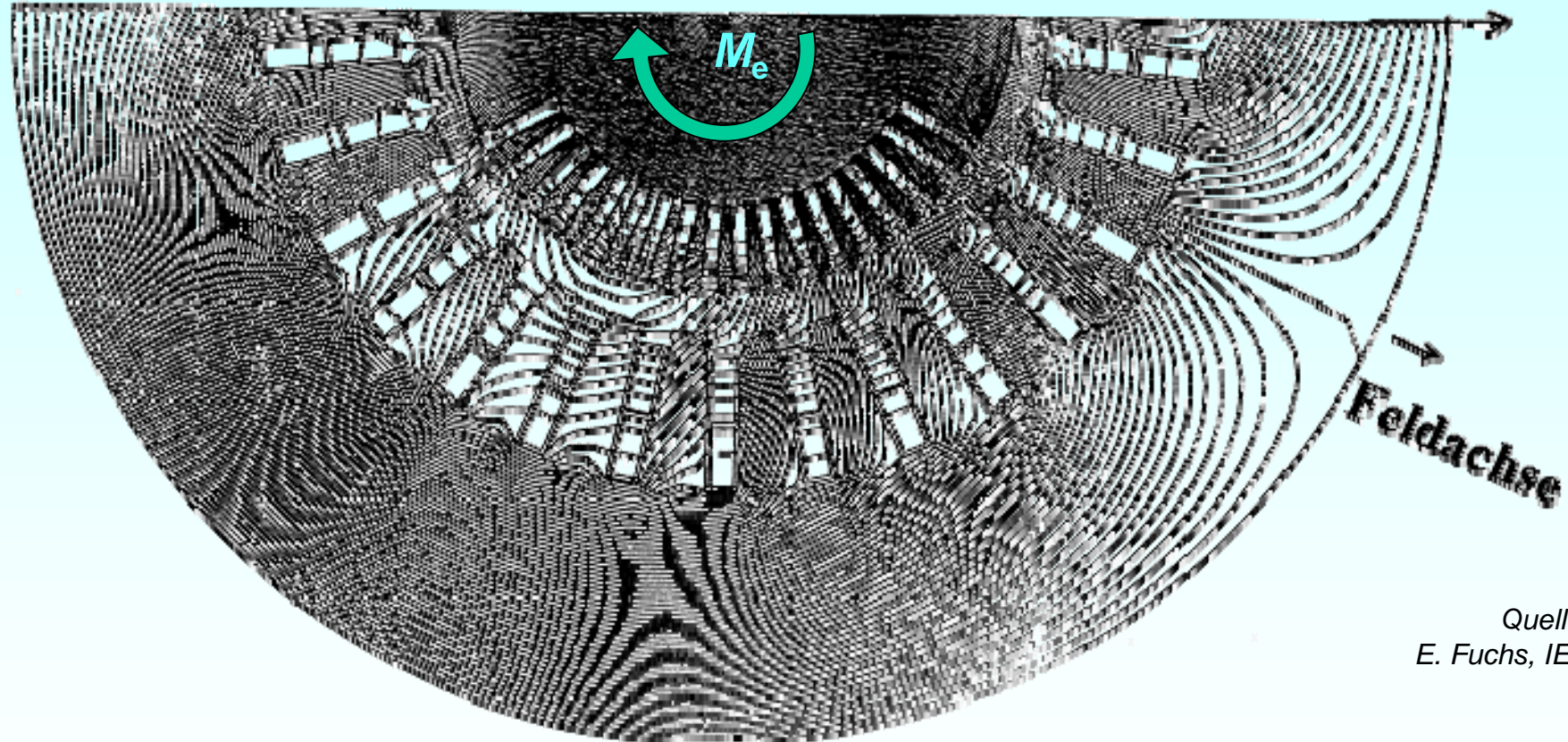
## Generator/Motor-Betrieb

GENERATOR: Polrad eilt Drehfeld vor	MOTOR: Polrad läuft Drehfeld nach	
 <p><math>\vartheta &gt; 0</math>      <math>\varphi &lt; 0</math></p>	 <p><math>\vartheta &lt; 0</math>      <math>\varphi &lt; 0</math></p>	ÜBERERREGT Induktive Verbraucher können versorgt werden
 <p><math>\vartheta &gt; 0</math>      <math>\varphi &gt; 0</math></p>	 <p><math>\vartheta &lt; 0</math>      <math>\varphi &gt; 0</math></p>	UNTERERREGT Kapazitive Verbraucher können versorgt werden

- **Generatorbetrieb:  $\vartheta > 0$ :** Polrad läuft VOR dem resultierenden Luftspaltfeld = Zeiger  $\underline{U}_p$  liegt VOR  $\underline{U}_h$ .
- **Motorbetrieb:  $\vartheta < 0$ :** Polrad läuft NACH dem resultierenden Luftspaltfeld = Zeiger  $\underline{U}_p$  liegt NACH  $\underline{U}_h$ .
- **Übererregt: Syn.maschine ist kapazitiv:** Zeiger  $\underline{U}_p$  i. A. deutlich länger als  $\underline{U}_h$ : hoher Erregerstrom  $I_f$ .
- **Untererregt: Syn.maschine ist induktiv:** Zeiger  $\underline{U}_p$  i. A. deutlich kürzer als  $\underline{U}_h$ : niedriger Erregerstrom  $I_f$ .
- **Fazit:** Stets drehen Ständer-Drehfeld und Läufer gleich schnell. Über Generator-/Motorbetrieb entscheidet nur die relative Winkellage  $\vartheta$  des Läufers zum resultierenden Luftspaltfeld.

# Drehmoment $M_e$ auf den Läufer aus dem Maxwell'schen Zug der Feldlinien bei Last

**Polachse**



Quelle:  
E. Fuchs, IEEE-PAS

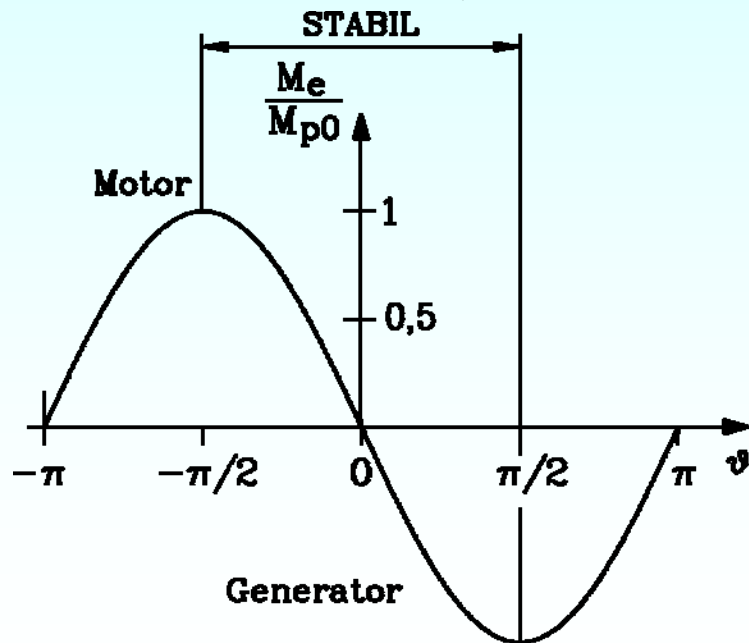
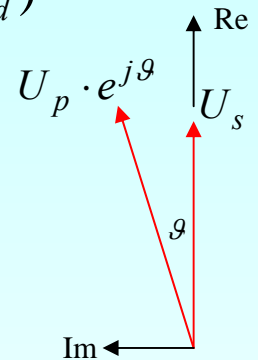
- Feldlinien im Luftspalt haben tangentielle Richtung = tangentialer Magnetzug = elektromagnetisches Drehmoment  $M_e$

# Drehmoment der Vollpolmaschine bei $U_s = \text{konst.}$ und $R_s = 0$

- VORGABE durch "starres" Netz:**  $\underline{U}_s = \text{konstant} = U_s$  (= in reelle Achse gelegt):  
 $\underline{U}_p = U_p (\cos \vartheta + j \cdot \sin \vartheta)$  und  $\underline{I}_s = (U_s - \underline{U}_p) / (jX_d) \Rightarrow \underline{I}_s^* = (U_s - \underline{U}_p^*) / (-jX_d)$

- Wirkleistung  $P_e$ :**  $P_e = m_s U_s I_s \cos \varphi_s = m_s \cdot \text{Re} \left\{ \underline{U}_s \underline{I}_s^* \right\}$  (\*: konjugiert komplex)

$$P_e = m_s \cdot \text{Re} \left\{ U_s \cdot \frac{U_s - U_p (\cos \vartheta - j \cdot \sin \vartheta)}{-jX_d} \right\} = -m_s \frac{U_s U_p}{X_d} \sin \vartheta$$



- Elektromagnetisches Drehmoment:**

$$M_e = \frac{P_m}{\Omega_{syn}} = \frac{P_e}{\Omega_{syn}} = -\frac{m_s}{\Omega_{syn}} \cdot \frac{U_s U_p}{X_d} \sin \vartheta = -M_{p0} \sin \vartheta$$

- Synchrones Kippmoment:**  $M_{p0} = \frac{m_s p}{\omega_s} \cdot \frac{U_s U_p}{X_d}$

**Anmerkung:**

Alle Verluste vernachlässigt (Wirkungsgrad "Eins").

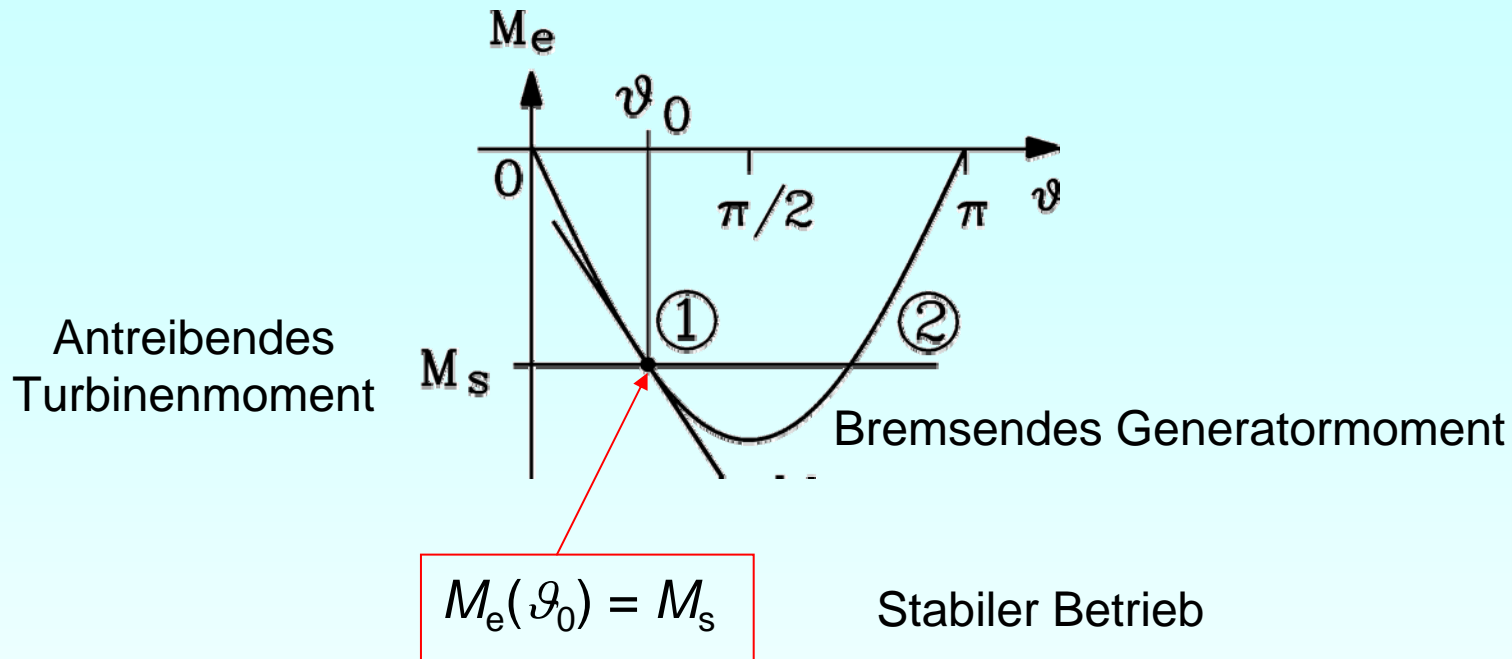
*Negatives Moment:* Generator:  $M_e$  bremst

*Positives Moment:* Motor:  $M_e$  treibt an

**Drehzahl ist stets Synchrondrehzahl !**



# Stationärer Arbeitspunkt: Beispiel: Generatorbetrieb



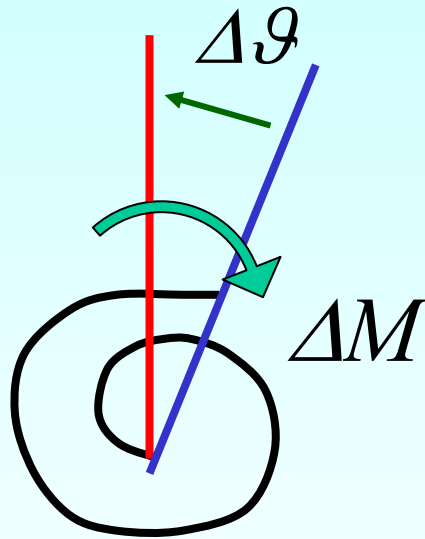
- **Kennlinie**  $M_e(\vartheta)$  im Arbeitspunkt  $\vartheta_0$  durch **Tangente** angenähert:  $M_e(\vartheta_0) = M_s$

$$M_e(\vartheta) \cong M_e(\vartheta_0) + \frac{\partial M_e}{\partial \vartheta} \cdot \Delta \vartheta \quad \text{mit} \quad \Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_0$$

$$c_g(\vartheta_0) = \left. \frac{\partial M_e}{\partial \vartheta} \right|_{\vartheta_0} \quad \text{Ersatz-Drehfederkonstante} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta M_e = c_g \cdot \Delta \vartheta$$

# Mechanisches Analogon: Drehfeder

Mechanische Drehfeder:



$$\Delta M = c_{\vartheta} \cdot \Delta \vartheta$$

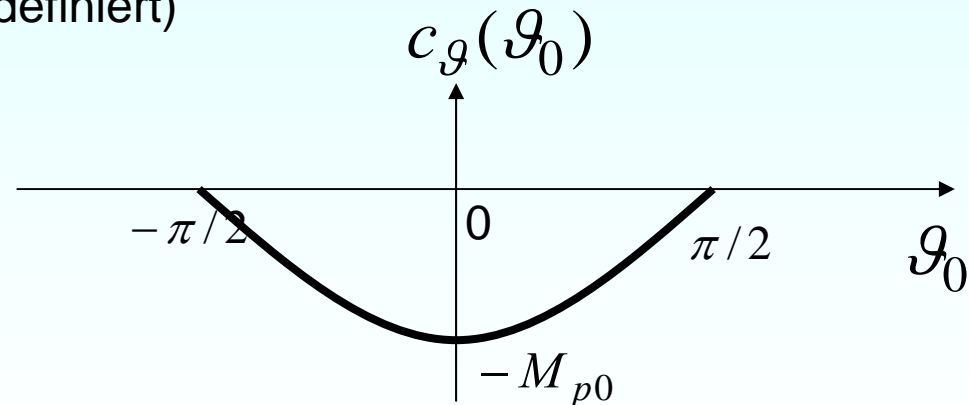
Synchronmaschine:

$$\Delta M_e = c_{\vartheta}(\vartheta_0) \cdot \Delta \vartheta$$

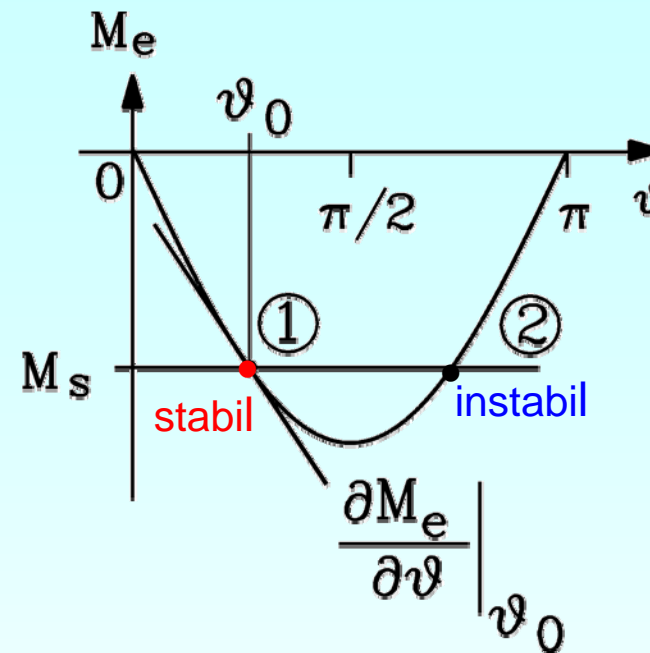
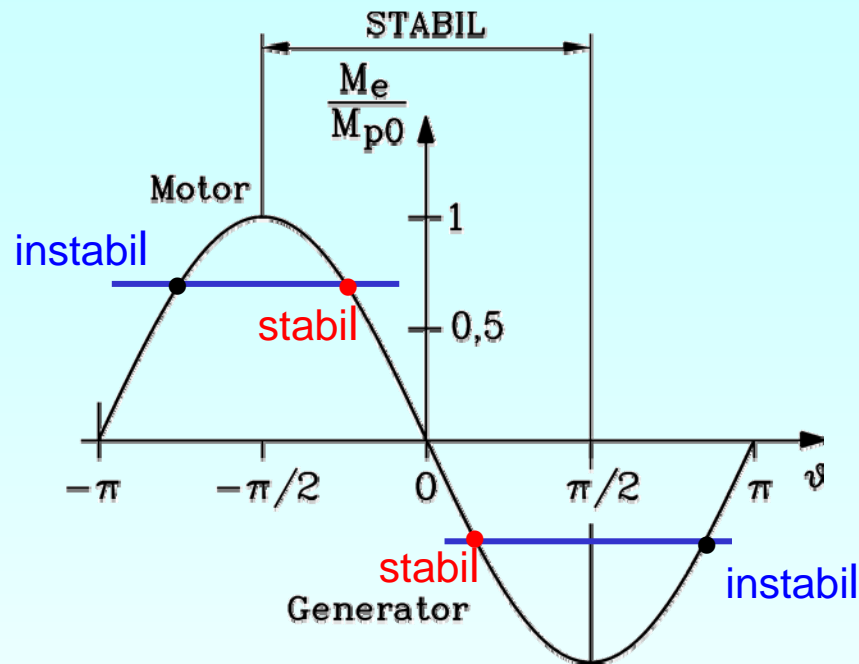
$$c_{\vartheta}(\vartheta_0) = \left. \frac{\partial M_e}{\partial \vartheta} \right|_{\vartheta_0} = -M_{p0} \cos \vartheta_0$$

Nichtlineare negative Federkonstante:

(negativ, weil  $\vartheta$  für Generatorbetrieb positiv definiert)



# Stabile und instabile Arbeitspunkte



- **Beispiel:** Drehmoment-Polradwinkel-Kurve  $M(\vartheta)$  im Generatorbetrieb: mech. Antriebsmoment  $M_s$
- Arbeitspunkt 1 ist **stabil**, Arbeitspunkt 2 ist **instabil**. Die **Stabilitätsgrenze** liegt bei dem Polradwinkel  $\pm\pi/2$ .

**Fazit:** Synchrones motorisches / generatorisches **Kippmoment**  $\pm M_{p0}$  bei **Kippwinkel**  $\pm\pi/2$ . "**Kippen**" bei Überschreiten des Kippmoments: Das Polrad läuft nicht mehr synchron mit dem vom Netz eingprägten Ständerdrehfeld, sondern schlüpft durch. Es kann keine Wirkleistung mehr übertragen werden.

# Stabilitätsuntersuchung der Arbeitspunkte (1)

- **Stabilität des** Arbeitspunkts  $\vartheta_0$ :  $M_e(\vartheta_0) = M_s$   $M_e(\vartheta) \cong M_e(\vartheta_0) + \partial M_e / \partial \vartheta \cdot \Delta \vartheta$

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = M_e(\vartheta) - M_s = M_e(\vartheta_0) + c_g \Delta \vartheta - M_s = c_g \cdot \Delta \vartheta \quad \Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_0$$

$$\Omega_m(t) = \Omega_{syn} + \Delta \Omega_m(t) \quad \Rightarrow \quad J \frac{d\Omega_m}{dt} = J \frac{d\Delta \Omega_m}{dt}$$

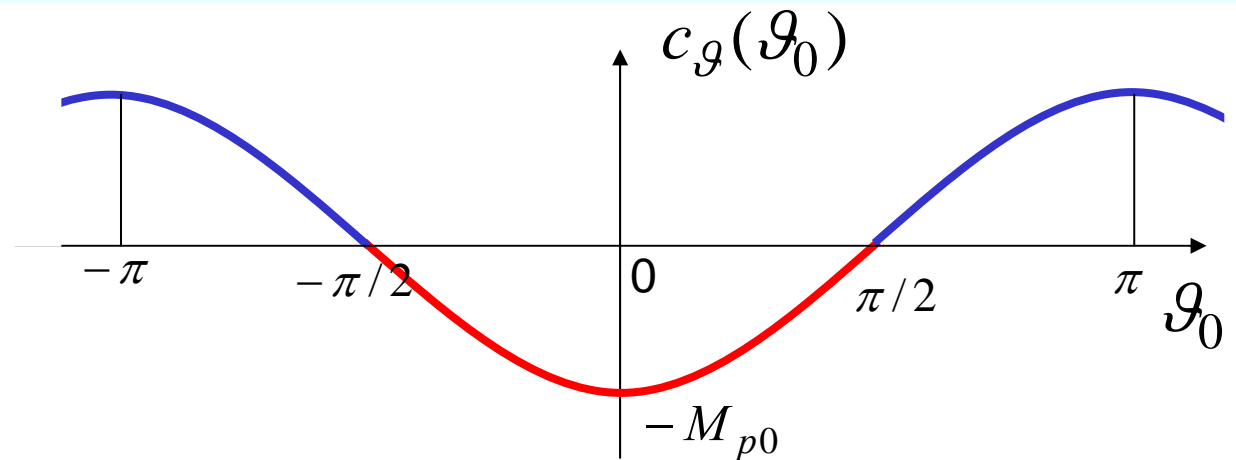
- **Zeitliche Änderung** des Polradwinkels bewirkt **Drehzahländerung**  $d\Delta \vartheta / dt = p \cdot \Delta \Omega_m$

- **Bewegungsgleichung:**

$$J \frac{d^2 \Delta \vartheta}{dt^2} - p \cdot c_g \cdot \Delta \vartheta = 0$$

a)  $|\vartheta| < \pi/2 : c_g < 0$

b)  $|\vartheta| > \pi/2 : c_g > 0$



# Stabilitätsuntersuchung der Arbeitspunkte (2)

$$J \frac{d^2 \Delta \mathcal{G}}{dt^2} - p \cdot c_g \cdot \Delta \mathcal{G} = 0$$

a)  $|\mathcal{G}| < \pi/2 : c_g = -|c_g| < 0$ , b)  $|\mathcal{G}| > \pi/2 : c_g = |c_g| > 0$

a)  $|\mathcal{G}| < \pi/2 \quad \Delta \ddot{\mathcal{G}} + (p \cdot |c_g| / J) \cdot \Delta \mathcal{G} = 0 \quad \Delta \ddot{\mathcal{G}} + \omega_e^2 \Delta \mathcal{G} = 0 \quad \omega_e^2 = p \cdot |c_g| / J$

Anfangsstörung:  $\Delta \mathcal{G}(t=0) = \Delta \mathcal{G}_0 \Rightarrow \Delta \mathcal{G}(t) = \Delta \mathcal{G}_0 \cdot \cos(\omega_e t)$

**Die Abweichung des Polradwinkels vom Arbeitspunkt schwingt zwar („Drehfeder mit Masse“), aber die Schwingungsamplitude bleibt beschränkt: STABIL**

b)  $|\mathcal{G}| > \pi/2 \quad \Delta \ddot{\mathcal{G}} - (p \cdot |c_g| / J) \cdot \Delta \mathcal{G} = 0 \quad \Delta \ddot{\mathcal{G}} - \omega_e^2 \Delta \mathcal{G} = 0$

Anfangsstörung:  $\Delta \mathcal{G}(t=0) = \Delta \mathcal{G}_0 \Rightarrow \Delta \mathcal{G}(t) = \Delta \mathcal{G}_0 \cdot \cosh(\omega_e t) = \Delta \mathcal{G}_0 \cdot (e^{\omega_e t} + e^{-\omega_e t}) / 2$

**Die Abweichung des Polradwinkels nimmt zu: INSTABIL**



# Drehschwingungen der Synchronmaschine

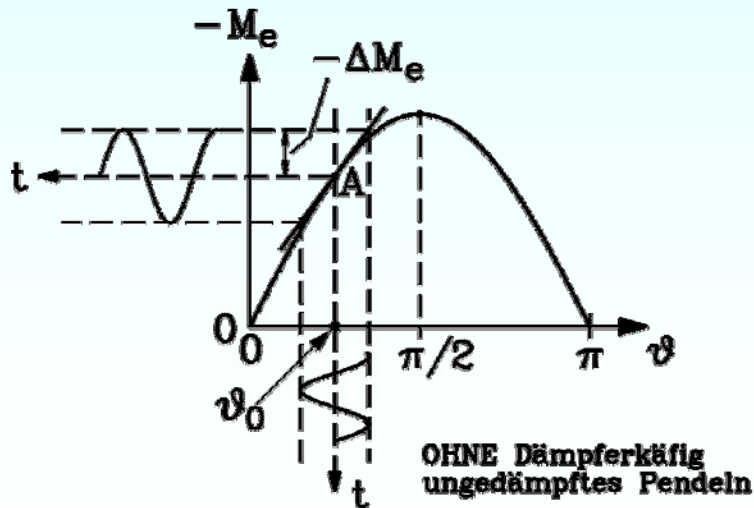
- Abweichungen des Polradwinkels vom stationären Arbeitspunkt im stabilen Bereich:

$$|\vartheta| < \pi/2: \quad \Delta \ddot{\vartheta} + \omega_e^2 \Delta \vartheta = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta \vartheta(t) = \Delta \vartheta_0 \cos(\omega_e t) + \Delta \dot{\vartheta}_0 \sin(\omega_e t)$$

Dies ist eine **Schwingungsgleichung**. Das Polrad schwingt um den Arbeitspunkt  $\vartheta_0$  gegen das vom Netz "starr" vorgegebene Ständerdrehfeld, wenn es durch eine Störung z. B. im Antriebsmoment kurzfristig aus dem Arbeitspunkt ausgelenkt wird, mit der **Eigenfrequenz**:

$$f_e = \frac{\omega_e}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p|c_g|}{J}}$$

**Fazit:** Die Synchronmaschine wirkt wie eine schwingende Drehfeder mit einer Masse daran.



## Polrad-Schwingungen

- Zum Abdämpfen der Polrad-Schwingungen ist ein **Dämpferkäfig** erforderlich!

# Beispiel: Drehschwingungen der Synchronmaschine

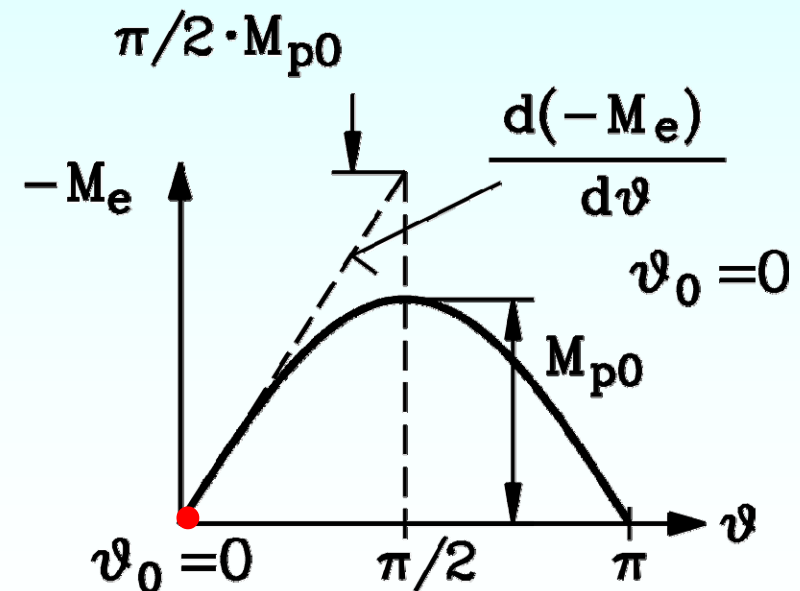
Beispiel: Leerlauf-Arbeitspunkt ( $M_e = 0, \vartheta_0 = 0$ ):  $|c_g| = |-M_{p0} \cdot \cos(0)| = M_{p0}$

Mit  $p\Omega_{syn} = \omega_N$  und der Nenn-Anlaufdauer  $T_J = \frac{J \cdot \Omega_{syn}}{M_N}$  gilt:  $f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega_N}{T_J} \cdot \frac{M_{p0}}{M_N}}$

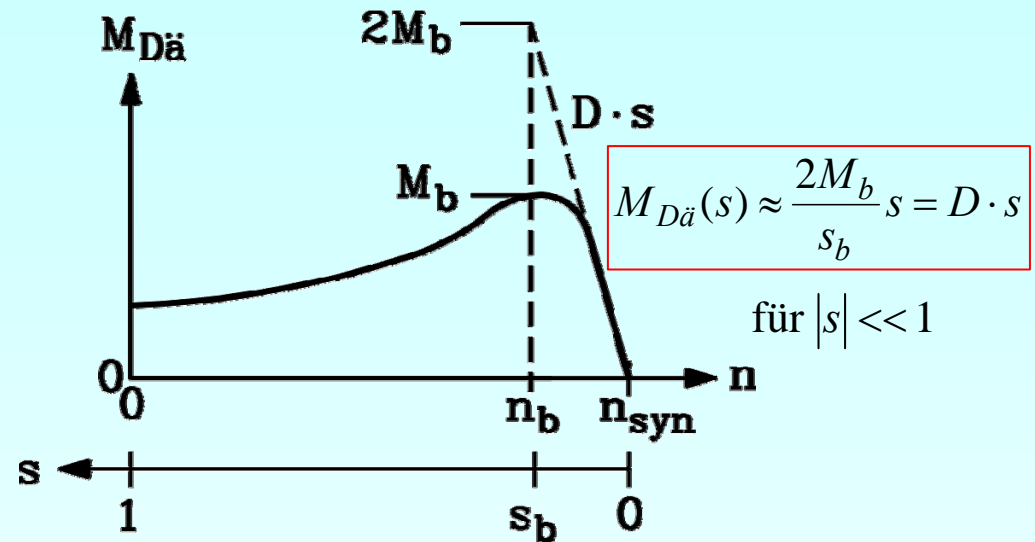
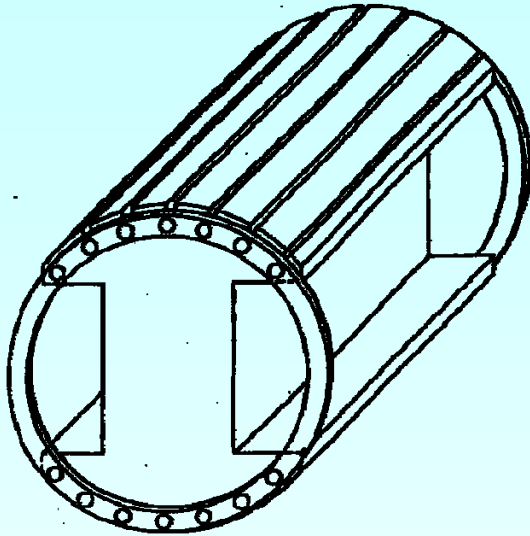
Beispiel: Synchronmotor (Windkanal-Antrieb):

$P_N = 50 \text{ MW}, f_N = 50 \text{ Hz}, T_J = 10 \text{ s}, M_{p0}/M_N = 1.5$

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50}{10} \cdot 1.5} = \underline{\underline{1.09 \text{ Hz}}}$$



# Elektrisch erregte Synchronmaschinen mit Dämpferwicklung

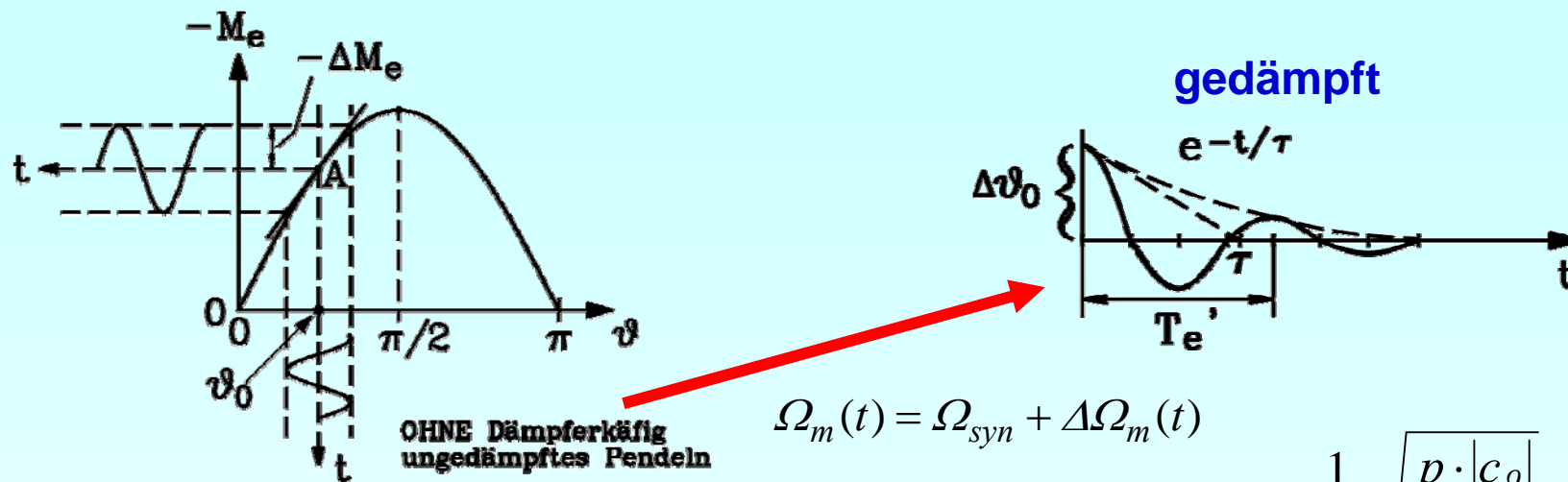


*Dämpferkäfig einer zweipoligen Schenkmaschine*

*Asynchrones Moment des Dämpferkäfigs*

- Synchronmaschinen schwingen am “starren” Netz bei jeder Belastungsänderung.
- Der **Dämpferkäfig** (= zusätzlicher **Kurzschlusskäfig** im Polrad) dämpft diese Schwingungen rasch ab.
- Beim Schwingen weicht die Drehzahl von der Synchrondrehzahl periodisch ab. Es tritt ein **Schlupf**  $s$  auf.  $\Rightarrow$  Im Dämpferkäfig fließt Strom. Er bildet mit dem Ständerdrehfeld ein **asynchrones Drehmoment**  $M_{Dä}$ , welches der Ursache (Polrad-Schwingbewegung) entgegen wirkt und diese dämpft. Die kinetische Schwingenergie des Läufers wird in Stromwärme im Dämpferkäfig umgesetzt (“vernichtet”) = **Schwingungsdämpfung**.

# Gedämpfte Polrad-Schwingungen (1)



$$\Omega_m(t) = \Omega_{syn} + \Delta\Omega_m(t)$$

- Ungedämpfte Schwingungen: Arbeitspunkt A  $(-M_e, \vartheta_0)$ :  $f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p \cdot |c_g|}{J}}$
- Dämpfendes Moment (KLOSS):  $M_{D\ddot{a}}(s) \approx \frac{2M_b}{s_b} s = D \cdot s$ , Schlupf  $s = -\frac{\Delta\Omega_m}{\Omega_{syn}}$
- linearisiert:  $J \cdot d\Omega_m / dt = c_g(\vartheta - \vartheta_0) + D \cdot s$ , mit  $\vartheta(t) - \vartheta_0 = \Delta\vartheta(t)$

$$\frac{d\Delta\vartheta}{dt} = p \cdot \Delta\Omega_m = -p \cdot s \cdot \Omega_{syn}, \quad \frac{d^2\Delta\vartheta}{dt^2} = p \frac{d\Omega_m}{dt} = p \frac{d\Delta\Omega_m}{dt}$$

$$\frac{J}{p} \Delta\ddot{\vartheta} + \frac{D}{p\Omega_{syn}} \Delta\dot{\vartheta} + |c_g| \Delta\vartheta = 0$$

**Lineare Schwingungsgleichung mit Dämpfung**

## Gedämpfte Polrad-Schwingungen (2)

- Lösung der Schwingungsgleichung (mit der Anfangsbedingung  $\Delta\vartheta(0) = \Delta\vartheta_0$ ):

$$\frac{J}{p} \Delta\ddot{\vartheta} + \frac{D}{p\Omega_{syn}} \Delta\dot{\vartheta} + |c_g| \Delta\vartheta = 0$$

$$\Delta\ddot{\vartheta} + \frac{D}{J \cdot \Omega_{syn}} \Delta\dot{\vartheta} + \frac{p \cdot |c_g|}{J} \Delta\vartheta = 0$$

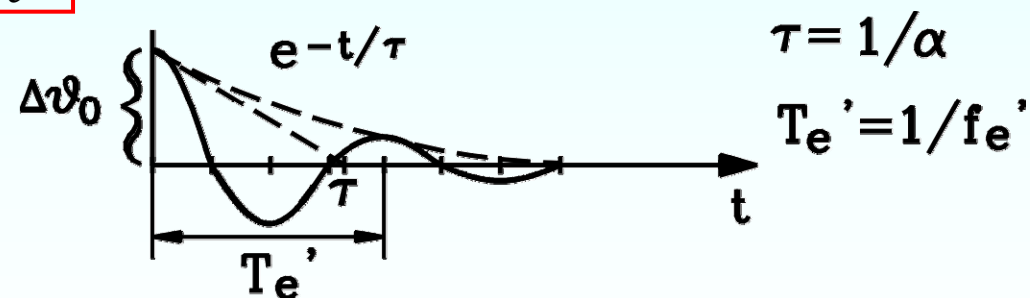
$$\Delta\ddot{\vartheta} + 2\alpha \cdot \Delta\dot{\vartheta} + \omega_e^2 \cdot \Delta\vartheta = 0$$

Anfangsbedingung:  
 $\Delta\vartheta(t = 0) = \Delta\vartheta_0$

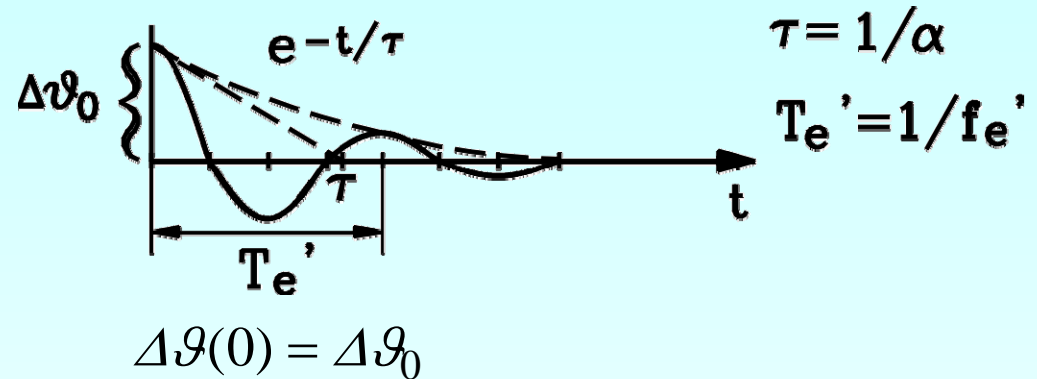
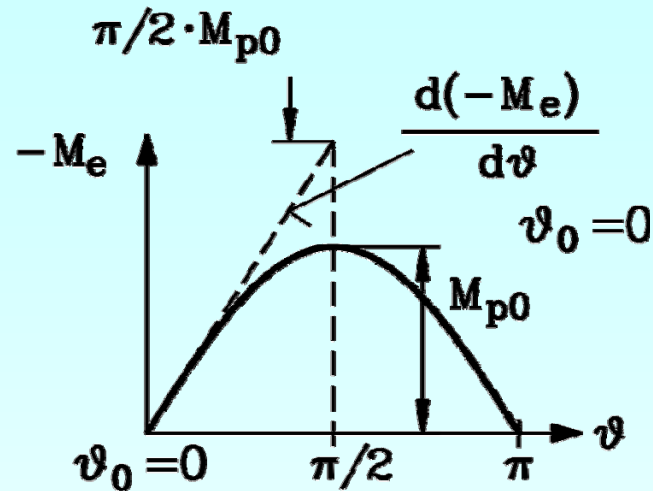
$$\Delta\vartheta(t) = \vartheta(t) - \vartheta_0 = \Delta\vartheta_0 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos(2\pi f_e' t)$$

Dämpfungsmaß:  $\alpha = \frac{D}{2J\Omega_{syn}} = \frac{M_b}{J\Omega_{syn}S_b}$

Eigenfrequenz:  $f_e' = \frac{\sqrt{(2\pi f_e)^2 - \alpha^2}}{2\pi}$



# Beispiel: Gedämpfte Polrad-Schwingungen



**Beispiel:** Synchronmaschine: Eigenfrequenz OHNE Dämpfer:  $f_e = 1.093 \text{ Hz}$

$$T_J = 10 \text{ s}, \text{ Nenn-Anlaufdauer: } T_J = \frac{J \cdot \Omega_{syn}}{M_N}$$

Dämpferkäfig: asynchrones Kippmoment  $M_b/M_N = 1.4$ , Kippschlupf:  $s_b = 20 \%$

**Lösung:** 
$$\alpha = \frac{M_b}{J\Omega_{syn}s_b} = \frac{M_b/M_N}{s_b} \cdot \frac{M_N}{J\Omega_{syn}} = \frac{M_b/M_N}{s_b} \cdot \frac{1}{T_J} = \frac{1.4}{0.2} \cdot \frac{1}{10} = 0.7 / \text{s}$$

Die Schwingung klingt mit der Zeitkonstante  $\tau = 1/\alpha = 1/0.7 = \underline{1.43 \text{ s}}$  ab.

Die Schwingung hat die Eigenfrequenz  $f_e' = \sqrt{(2\pi \cdot 1.093)^2 - 0.7^2} / (2\pi) = \underline{1.087 \text{ Hz}}$



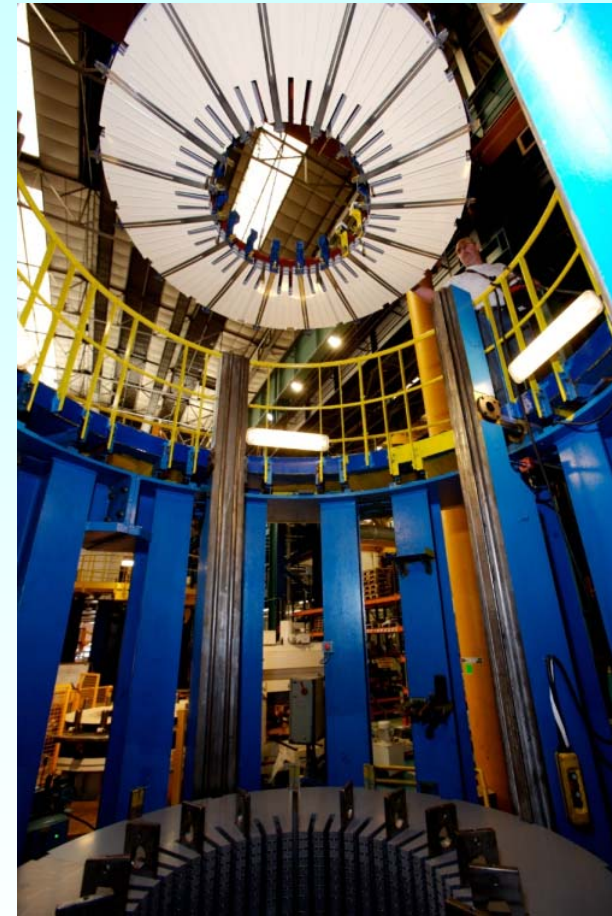
# Vollpol-Synchronmaschine – Fertigung des Statorblechpakets

## Turbo-Generator

„Einblechen“  
des Stator-  
Blechpakets  
im  
Schichtturm



(C) 2007 Bryon Paul McCartney / all rights reserved.



(C) 2007 Bryon Paul McCartney / all rights reserved.

Quelle:

**ALSTOM**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/36

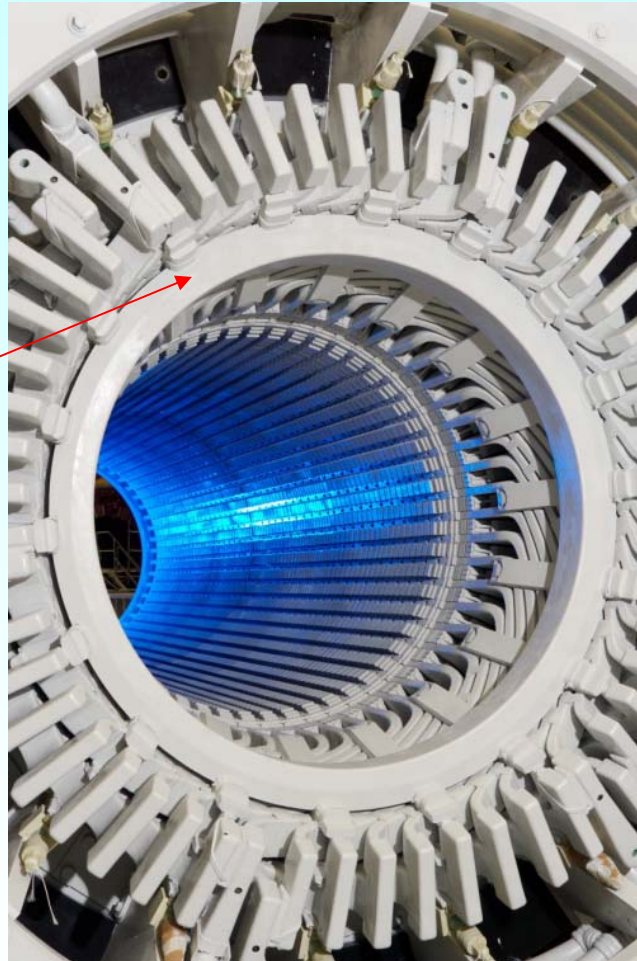
Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18



# Vollpol-Synchronmaschine – bewickelter isolierter Stator

Zweipoliger  
Turbogenerator  
ca. 800 MW für  
ein  
Dampfkraftwerk

Stützringe für die  
Wickelkopf-  
versteifung  
Wasserstoff-  
Gaskühlung



(C) 2007 Bryon Paul McCartney / all rights reserved.

4-poliger Turbogenerator  
für ca. 1.6 GW  
Direkte Leiterkühlung mit  
deionisiertem Wasser  
Einsatz in Kernkraftwerken



Quelle:

**ALSTOM**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/37

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18





# Vollpol-Synchronmaschine – Fertigung des zylindrischen Rotors („Induktor“)

Zweipoliger Turbo-Generator 3000/min  
für ca. 800 MW

Fertigung der Rotor-  
Erregerwicklung

$$q_r = 9, 2p = 2$$

Es fehlen noch die  
Wicklungskappen!

Wasserstoff-Gaskühlung

Leitfähige Keile der  
Erregernuten bilden  
Dämpferkäfig

Quelle:

**ALSTOM**



(C) 2007 Bryon Paul McCartney / all rights reserved.



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/38

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18



# Vollpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Zusammenführen von Stator und Rotor zum kompletten Generator

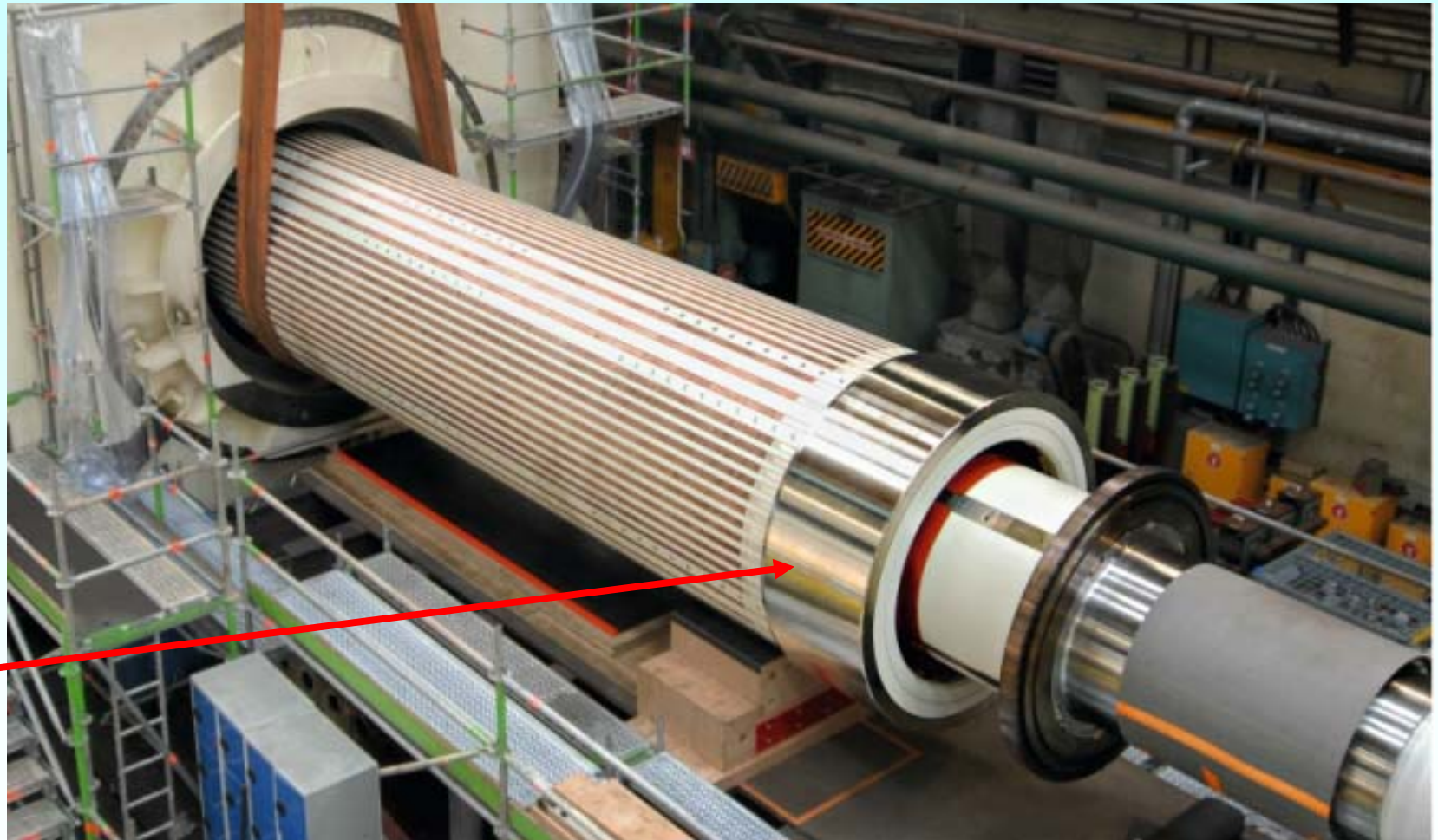
Vierpoliger  
Turbo-  
Generator

1500/min

$$q_r = 6, 2p = 4$$

Einführen des  
Rotors mit  
dem Kran

Wicklungs-  
kappen



Quelle:

**ALSTOM**

*4-poliger Turbogenerator für ca. 1.6 GW - Einsatz in Kernkraftwerken*



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/39

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18





# Elektrische Maschinen und Antriebe

## Zusammenfassung:

### Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz (1)

- Winkel zwischen Polradspannung und Ständerstrangspannung = „Polradwinkel“
- Bei  $R_s = 0$  gilt exakt: Polradwinkel Null: Kein Drehmoment = Leerlauf
- Polradwinkel positiv: Läufer-N-Pol läuft VOR Ständer-N-Pol = Läufer muss angetrieben werden = ele. Drehmoment bremst = Generatorbetrieb
- Generator: Wirkleistung negativ = Wirkleistungsfluss ins Netz
- Phasenwinkel zwischen Ständerstrangspannung und Strangstrom größer als  $90^\circ$
- Polradwinkel negativ: Läufer-N-Pol läuft NACH Ständer-N-Pol = Läufer wird gezogen = ele. Drehmoment treibt = Motorbetrieb

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## Zusammenfassung:

### Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz (2)

- Läufer- und Ständerfeld bilden zeitlich konstantes Drehmoment
- Synchronmaschine hat Maximalmoment = „synchrones Kippmoment“ (im Generator- und Motorbetrieb)
- Polradwinkel kennzeichnet Lastzustand: Stabiler Betrieb bei Polradwinkel  $< 90^\circ$
- Synchronmaschine kann kapazitiv oder induktiv betrieben werden
- kapazitiv = übererregt = hoher Erregerstrom
- induktiv = untererregt = niedriger Erregerstrom
- Dämpferkäfig gegen Polradschwingungen, fallweise auch als „kräftiger“ Anlaufkäfig



# Elektrische Maschinen und Antriebe

## 8. Die Synchronmaschine

8.1 Funktionsprinzip und Läuferbauweisen

8.2 Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine

8.3 Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz

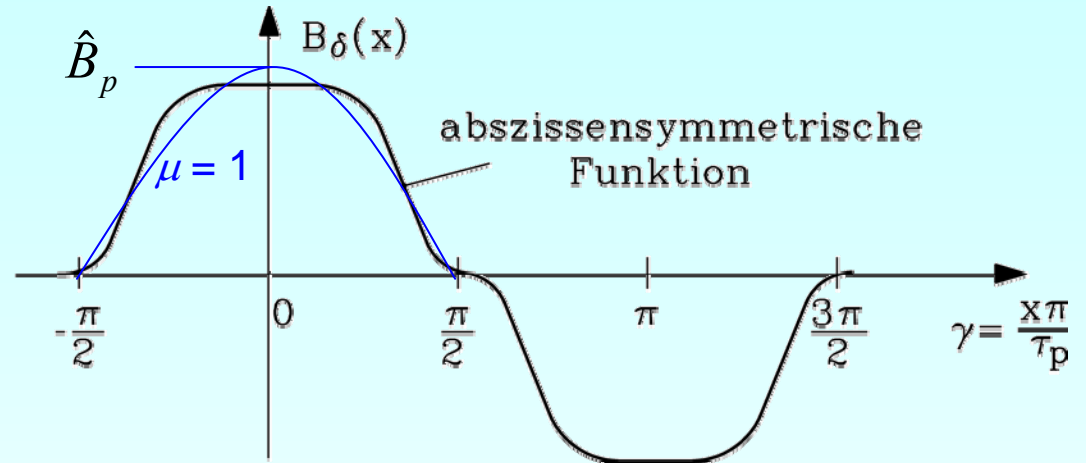
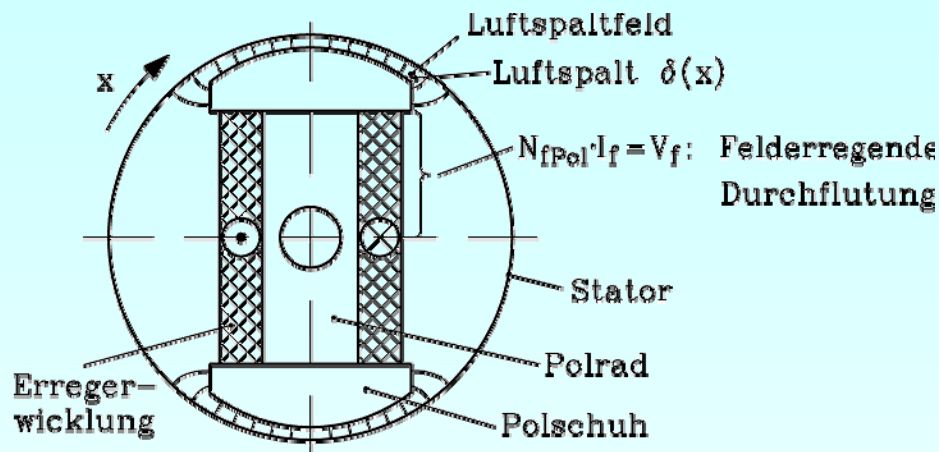
**8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine**

8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

(8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb

# Läuferfeld und Polradspannung der Schenkelpolmaschine



- **Glockenförmige Läufer-Feldkurve  $B_\delta(x)$ :** Konstante magnetische Spannung  $V_f$  erzeugt mit variablem Luftspalt  $\delta(x)$  glockenförmige Feldkurve. Diese hat Grundwelle ( $\mu = 1$ ):

$$B_\delta(x) = \mu_0 \frac{V_f}{\delta(x)} \rightarrow \text{FOURIER-Grundwelle: Amplitude } \hat{B}_p \text{ proportional } I_f$$

- **Polradspannung  $U_p$ :** Sinusförmige Feld-Grundwelle  $B_p$  induziert **in die dreiphasige Ständerwicklung** bei Drehzahl  $n$  ein Drehspannungssystem ("**Polradspannung**")

$$U_p = \omega_s \cdot \Psi_p / \sqrt{2} = \omega_s \cdot N_s k_{w,s} \cdot \Phi_p / \sqrt{2} = \sqrt{2} \pi f_s \cdot N_s k_{w,s} \cdot \frac{2}{\pi} l \tau_p \hat{B}_p$$

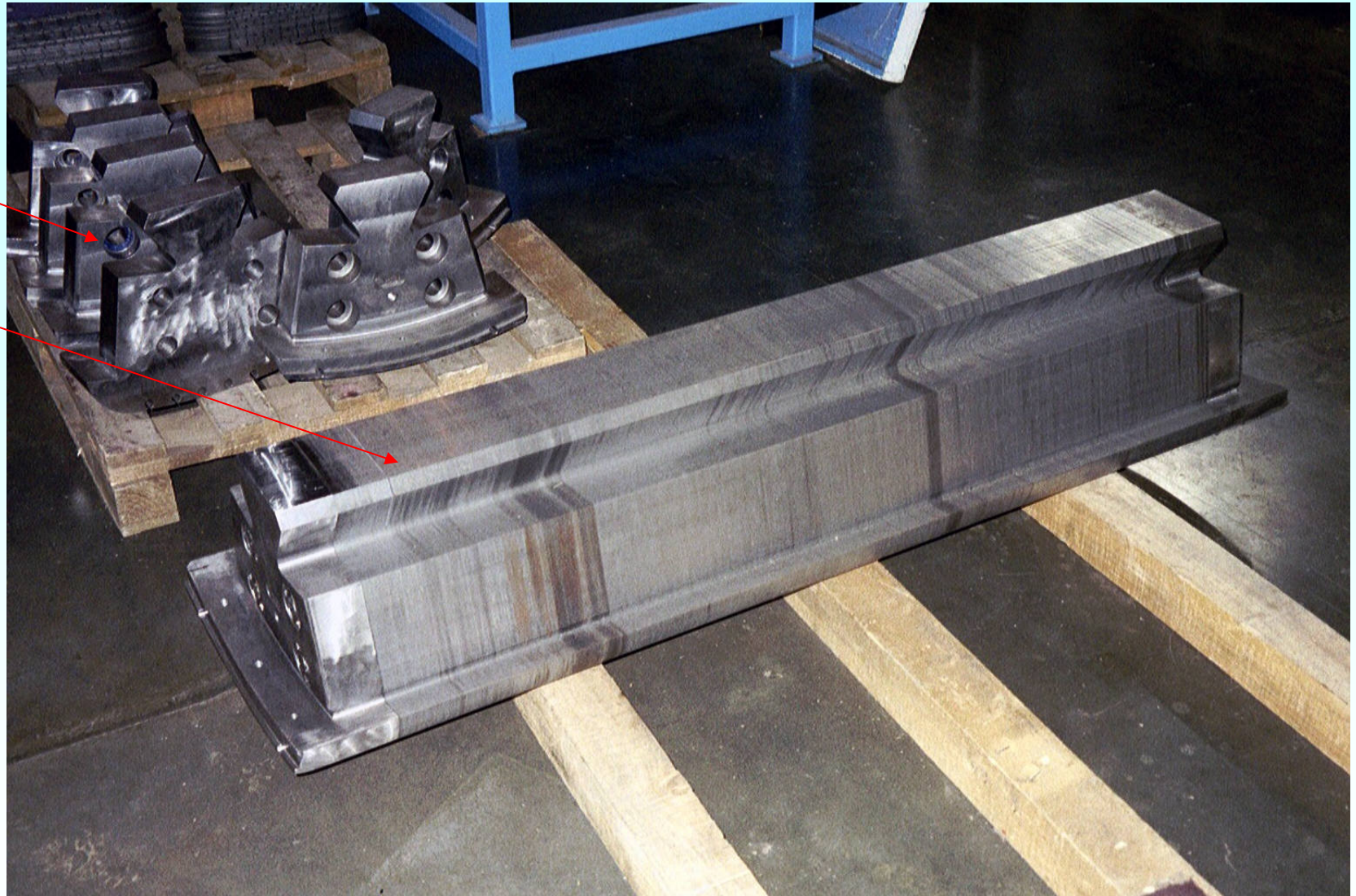
mit der **Frequenz**  $f_s = n \cdot p$

# Rotor-Schenkelpole während der Fertigung (unbewickelt)

Massive  
Polpress-  
platten

Schwalben-  
schwanzbe-  
festigung im  
Rotorjoch

Rotorbleche  
werden  
durch  
Pressplatten  
fixiert



Quelle:

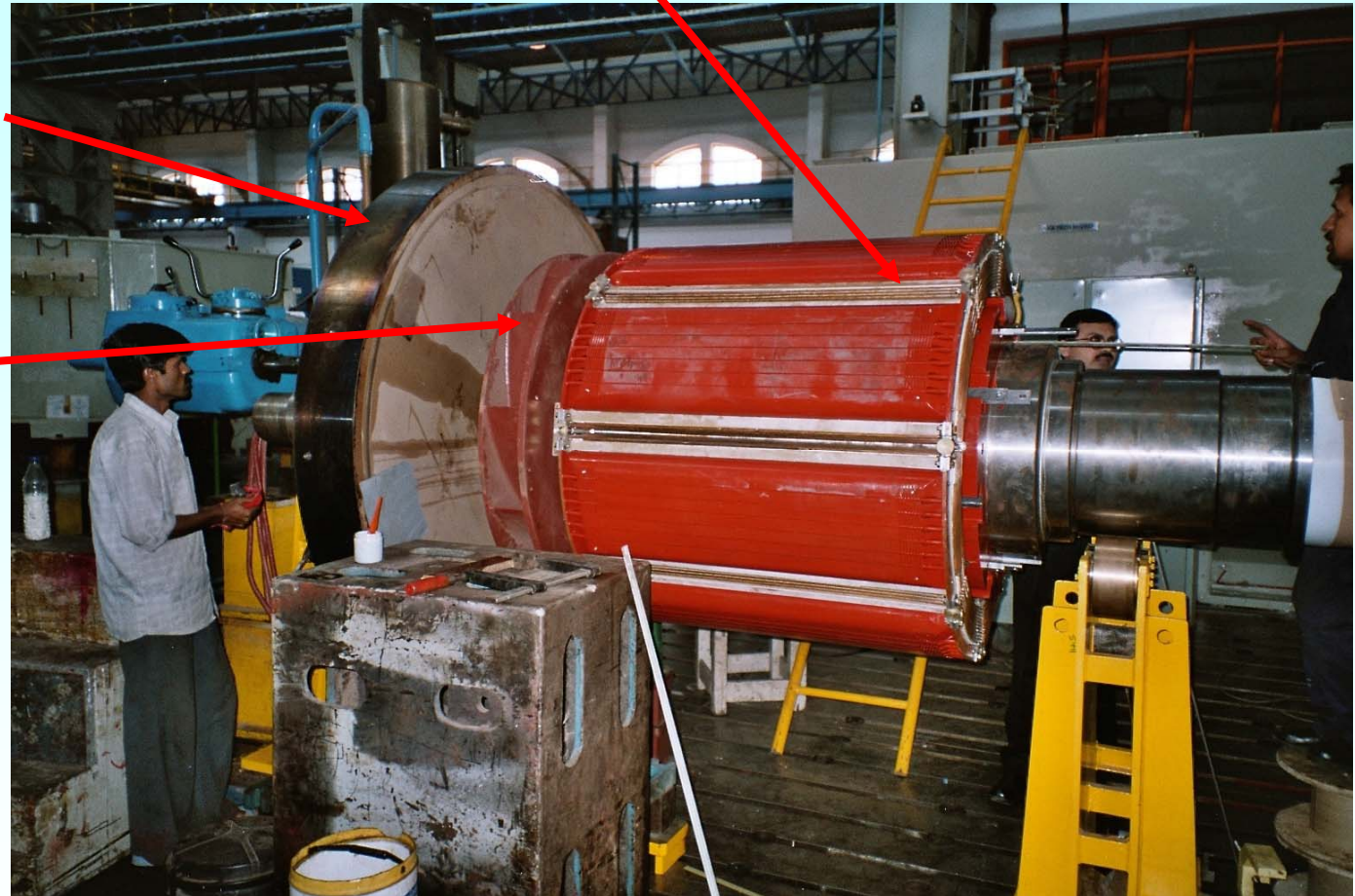
Andritz Hydro,  
Bhopal, Indien



# Komplettiertes Polrad mit Schenkelpolen, Lüfter und Schwungrad, 8-polig

**Schwungrad** erhöht Rotorträgheitsmoment, um bei Lastabwurf die Drehzahlzunahme zu begrenzen

**Radiallüfter** mit rückwärts gekrümmten Schaufeln, auf der Welle fixiert, für eine Drehrichtung bei fester Drehzahl



Quelle:

Andritz Hydro, Bhopal,  
Indien

**Wasserkraftwerk Kauli**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/45

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18



# Vierpoliger Schenkelpollläufer mit Massivpolen für Motorbetrieb mit asynchronem Netzanlauf

## Massiveiserne Polschuhe als „Anlauf“- und „Dämpferkäfig“:

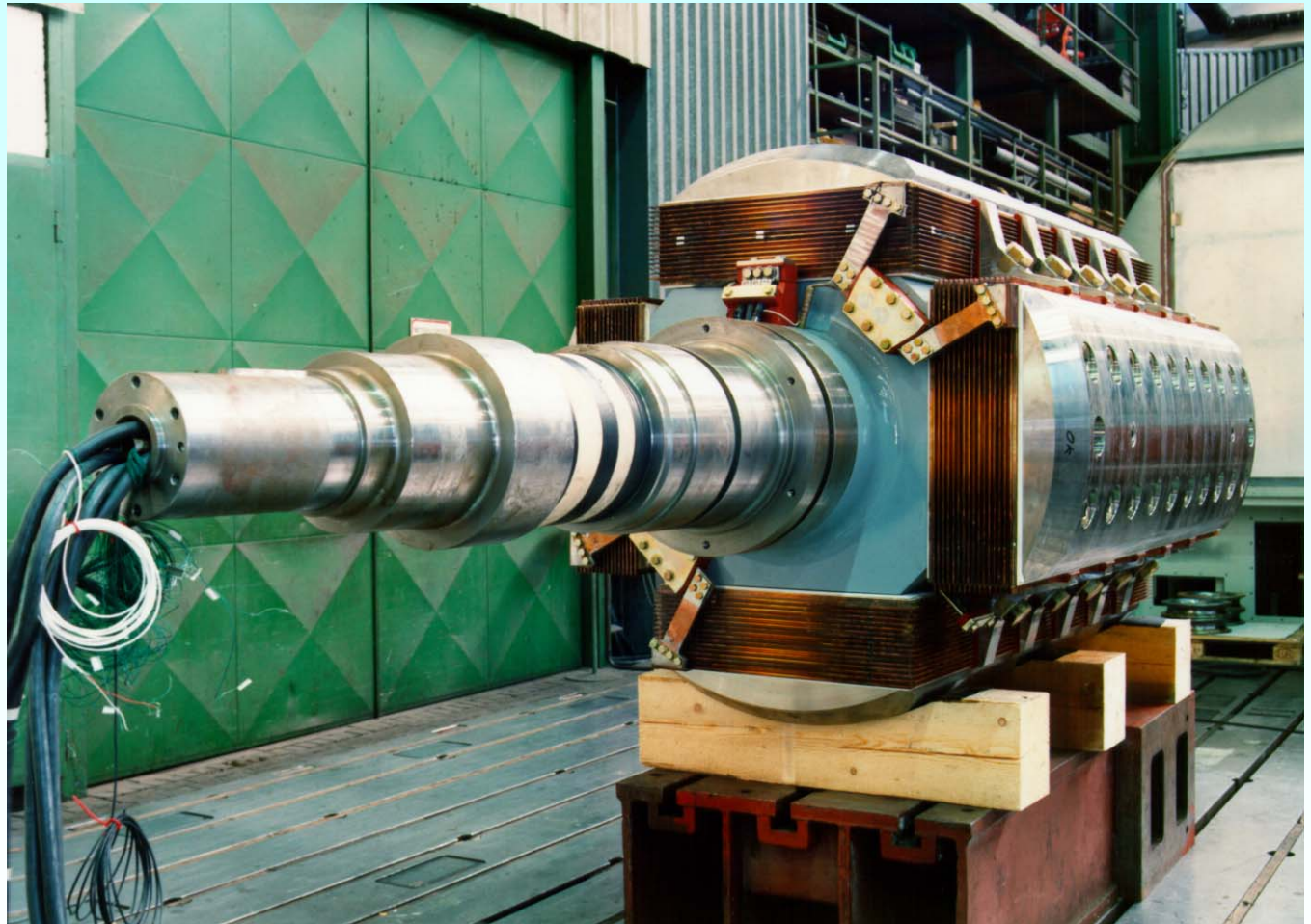
-Bei asynchronem Netzanlauf induziert das Ständerfeld in die massiven Läuferpolschuhe Wirbelströme.

- Diese Wirbelströme erzeugen mit dem Ständerfeld das Anlaufmoment.

50 Hz,  $2p = 4$ ,  $n = 1500/\text{min}$

Quelle:

Andritz Hydro,  
Österreich



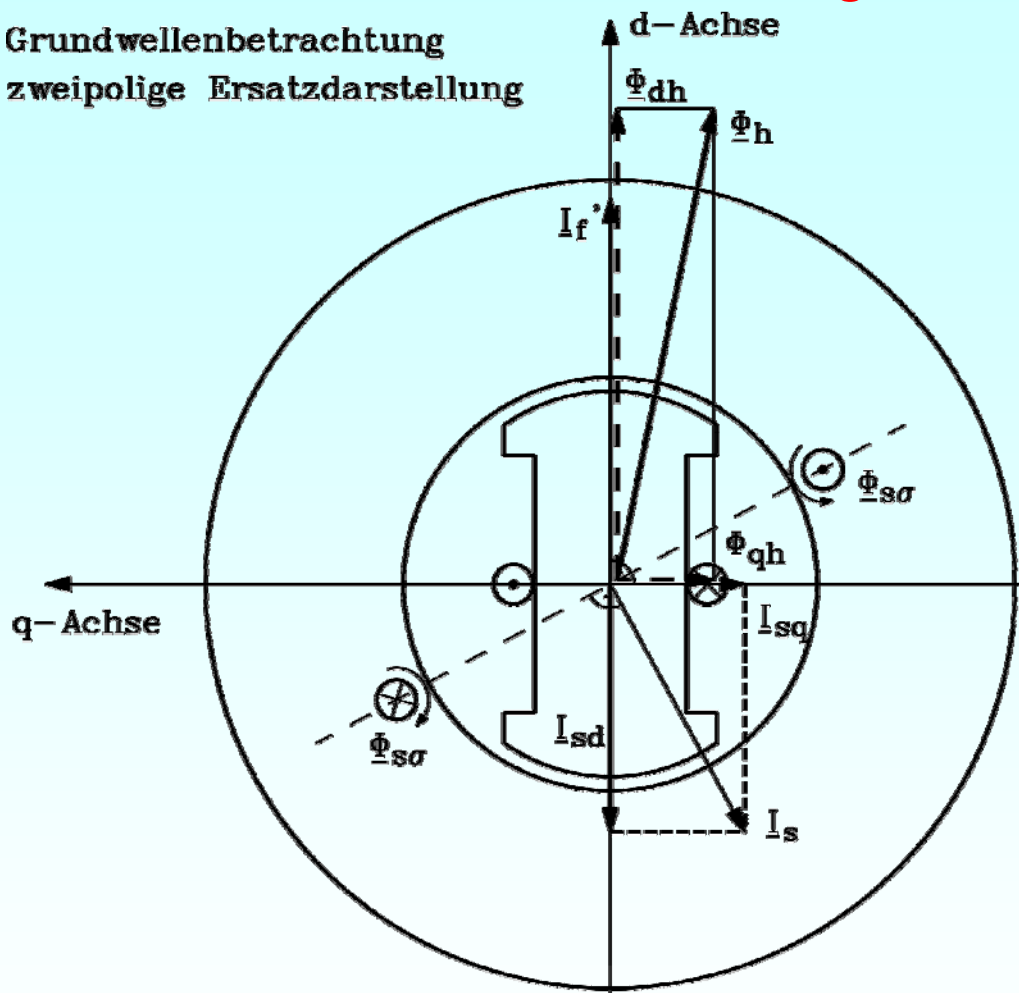






# Ständerstrom $I_s$ : $d$ - und $q$ -Komponente

Grundwellenbetrachtung  
zweipolige Ersatzdarstellung



- Ständerstrom-Zeiger  $\underline{I}_s$  in  $d$ - und  $q$ -Komponente gedanklich zerlegt:

$$\underline{I}_s = \underline{I}_{sd} + \underline{I}_{sq}$$

$\underline{I}_{sd}$  ist in Phase/Gegenphase mit fikti-  
vem Strom  $\underline{I}'_f$  und erregt daher ein  
Ständer-Luftspaltfeld in  $d$ -Achse (Pol-  
achse). Gemeinsam mit dem Läuferfeld  
bildet es den Luftspaltfluss  $\Phi_{dh}$ .

$\underline{I}_{sq}$  ist  $90^\circ$  zu  $\underline{I}_{sd}$  phasenverschoben  
und erregt daher ein Ständer-Luftspalt-  
feld in  $q$ -Achse (Pol-Lücke). Der zuge-  
hörige Luftspaltfluss ist  $\Phi_{qh}$ .

- Selbstinduktionsspannung: Zwei um  
 $90^\circ$  phasenverschobene Komponenten:

$$j\omega_s L_{dh} \underline{I}_{sd} \quad , \quad j\omega_s L_{qh} \underline{I}_{sq}$$

Hinzu kommt Selbstinduktion durch  
Ständerstreulfluss  $\Phi_{s\sigma}$ :  $j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s$

$$\Psi_{dh} / \sqrt{2} = L_{dh} \cdot (I'_f + I_{sd}) \rightarrow \Phi_{dh} = \Psi_{dh} / (k_{ws} N_s)$$

$$\Psi_{qh} / \sqrt{2} = L_{qh} \cdot I_{sq} \rightarrow \Phi_{qh} = \Psi_{qh} / (k_{ws} N_s)$$

# Ständer-Spannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

- Mit Berücksichtigung der Ständerstreuinduktivität  $L_{s\sigma}$  und des Strangwiderstands  $R_s$  folgt die **Ständerspannungsgleichung je Strang**:

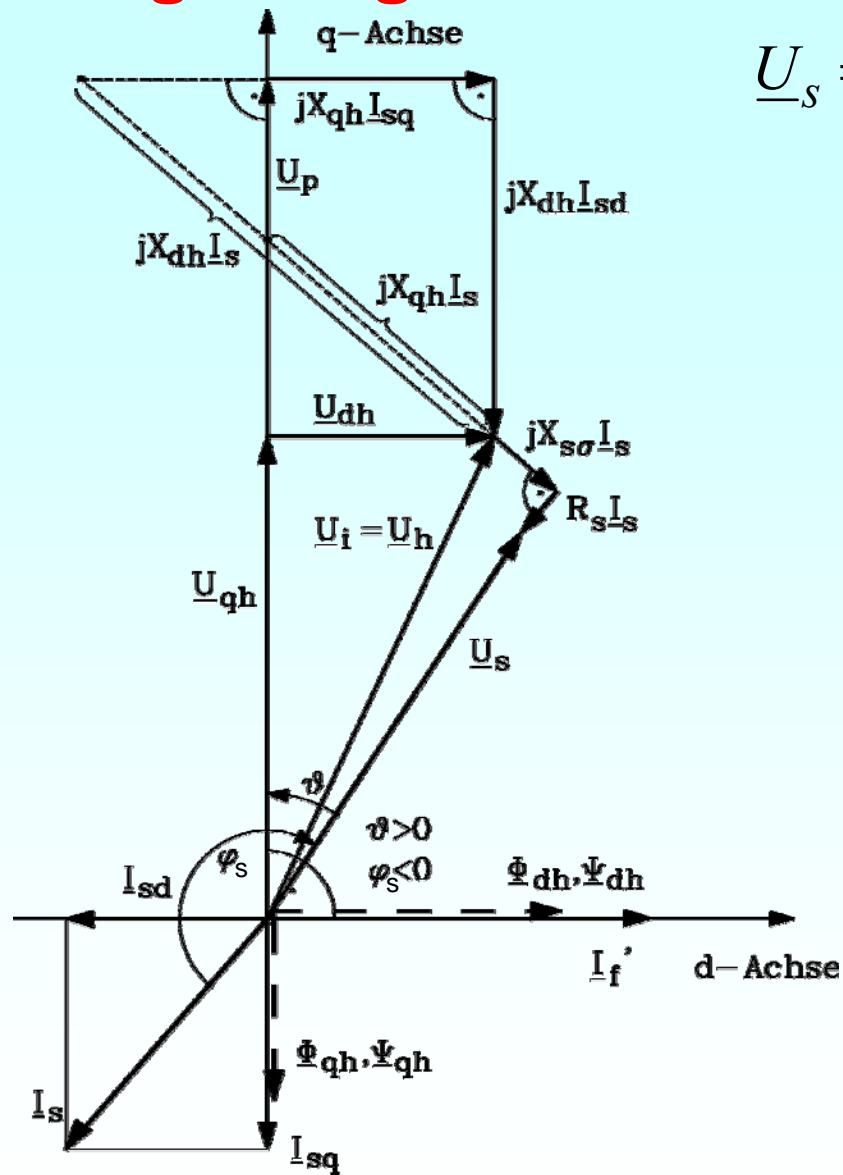
$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_{qh} \underline{I}_{sq} + j\omega_s L_{dh} \underline{I}_{sd} + \underline{U}_p \quad \underline{U}_p = j\omega_s L_{dh} \underline{I}'_f$$

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} (\underline{I}_{sd} + \underline{I}_{sq}) + j\omega_s (L_{qh} \underline{I}_{sq} + L_{dh} \underline{I}_{sd}) + \underline{U}_p$$

- $X_d$ : **"synchrone Reaktanz der Längsachse"**:  $X_d = X_{s\sigma} + X_{dh} = \omega_s L_{s\sigma} + \omega_s L_{dh}$
- $X_q$ : **"synchrone Reaktanz der Querachse"**:  $X_q = X_{s\sigma} + X_{qh} = \omega_s L_{s\sigma} + \omega_s L_{qh}$

- **Größenordnung**: Es ist  $X_d > X_q$  (typisch:  $X_q = (0.5 \dots 0.6) \cdot X_d$ )  
z. B. Schenkelpol-Wasserkraftgeneratoren, große Synchronmotoren, ...
- Die **Vollpolmaschine** ein **"Sonderfall"** der Schenkelpolmaschine für  $X_d = X_q$   
**Anmerkung**: Die Nuten der Erregerwicklung des Vollpol-Läufers stellen ebenfalls kleine "Lücken" dar, daher ist in Wirklichkeit ebenfalls  $X_d > X_q$  (typisch:  $X_q = (0.8 \dots 0.9) \cdot X_d$ )

# Zeigerdiagramm der Schenkelpol-Synchronmaschine



$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{s\sigma} \underline{I}_s + jX_{qh} \underline{I}_{sq} + jX_{dh} \underline{I}_{sd} + \underline{U}_p$$

- **Beispiel: Generator, übererregt:**
  - $\underline{I}'_f$  und  $\underline{I}_{sd}$  liegen in der  $d$ -Achse,  $\underline{I}_{sq}$  in der  $q$ -Achse
  - $\underline{U}_p \sim j\underline{I}'_f$  und  $jX_{dh} \underline{I}_{sd}$  liegen in der  $q$ -Achse,  $jX_{qh} \underline{I}_{sq}$  in der  $d$ -Achse (!)

- **Induzierte Hauptfeldspannung  $\underline{U}_h$ :**

$$\underline{U}_h = j\omega_s \underline{\Psi}_h = \underline{U}_{qh} + \underline{U}_{dh}$$

hat die Komponenten

$$\underline{U}_{qh} = j\omega_s L_{dh} \underline{I}_{sd} + \underline{U}_p$$

$$\underline{U}_{dh} = j\omega_s L_{qh} \underline{I}_{sq}$$

- **Ständerspannung und Ständerstrom:**

- Polradwinkel  $\vartheta$ ,

- Phasenwinkel  $\varphi_s$

wie bei Vollpolmaschine definiert !

# Wirkleistung der Schenkelpolmaschine ( $U_s = \text{konst.}$ , $R_s = 0$ )

- **VORGABE durch "starres" Netz:**  $\underline{U}_s = \text{konstant}$   
**Gewählt:**  $d$ -Achse = Re-Achse,  $q$ -Achse = Im-Achse:

$$\underline{U}_s = U_{sd} + jU_{sq} \quad \underline{I}_s = I_{sd} + jI_{sq} \quad \underline{U}_p = jU_p$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_s = \mathbf{0}: \quad \underline{U}_s &= jX_d I_{sd} + jX_q I_{sq} + \underline{U}_p \\ \Rightarrow \quad \underline{U}_s &= jX_d I_{sd} - X_q I_{sq} + jU_p \end{aligned}$$

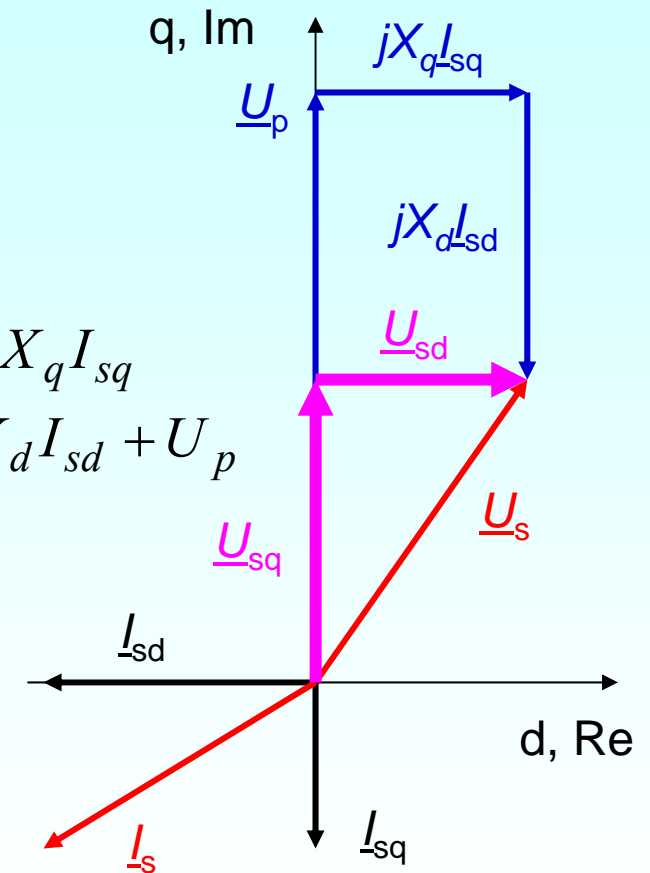
$$U_{sd} = -X_q I_{sq}$$

$$U_{sq} = X_d I_{sd} + U_p$$

- **Wirkleistung  $P_e$ :**

$$P_e = m_s U_s I_s \cos \varphi = m_s \cdot \text{Re} \left\{ \underline{U}_s \underline{I}_s^* \right\} = m_s (U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq})$$

$$P_e = m_s (-X_q I_{sq} I_{sd} + X_d I_{sd} I_{sq} + U_p I_{sq})$$



# Elektrische Maschinen und Antriebe

## Zusammenfassung:

### Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

- Unterschiedliche Ständerinduktivität für Längs- und Querachse
- Pollücke in Querachse verringert Querinduktivität der Ständerwicklung
- Vollpolmaschine ist Sonderfall der Schenkelpolmaschine für  $L_d = L_q$

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## 8. Die Synchronmaschine

8.1 Funktionsprinzip und Läuferbauweisen

8.2 Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine

8.3 Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz

8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

**8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz**

(8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb



# Drehmoment der Schenkelpolmaschine ( $U_s = \text{konst.}, R_s = 0$ )

- **Wirkleistung  $P_e$ :**  $P_e = m_s (-X_q I_{sq} I_{sd} + X_d I_{sd} I_{sq} + U_p I_{sq})$

- **Elektromagnetische Drehmoment:**

$$M_e = \frac{P_m}{\Omega_{syn}} = \frac{P_e}{\Omega_{syn}} = \frac{m_s}{\Omega_{syn}} \cdot (U_p \cdot I_{sq} + (X_d - X_q) \cdot I_{sd} \cdot I_{sq})$$

- **Zwei Drehmomentanteile:**

a) prop.  $U_p$  wie bei Vollpolmaschine

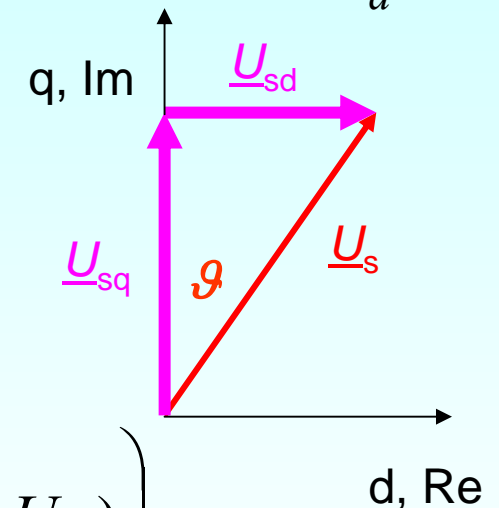
b) "**Reluktanz**"moment wegen  $X_d \neq X_q$ .

Dafür ist KEINE Läufererregung erforderlich ( $U_p = 0$ ) = robuster Läuferaufbau OHNE Wicklung ist möglich (**Reluktanz-Synchronmaschine**)

# Drehmoment als Funktion des Polradwinkels $\vartheta$

$$\underline{U}_s = jX_d I_{sd} - X_q I_{sq} + jU_p \Rightarrow \begin{cases} U_{sd} = -X_q I_{sq} & \Rightarrow I_{sq} = -\frac{U_{sd}}{X_q} \\ jU_{sq} = jX_d I_{sd} + jU_p & \Rightarrow I_{sd} = \frac{U_{sq} - U_p}{X_d} \end{cases}$$

$$\underline{U}_s = U_{sd} + jU_{sq} \begin{cases} U_{sd} = U_s \sin \vartheta \\ U_{sq} = U_s \cos \vartheta \end{cases}$$



$$M_e = \frac{m_s}{\Omega_{syn}} \cdot (U_p \cdot I_{sq} + (X_d - X_q) \cdot I_{sd} \cdot I_{sq}) =$$

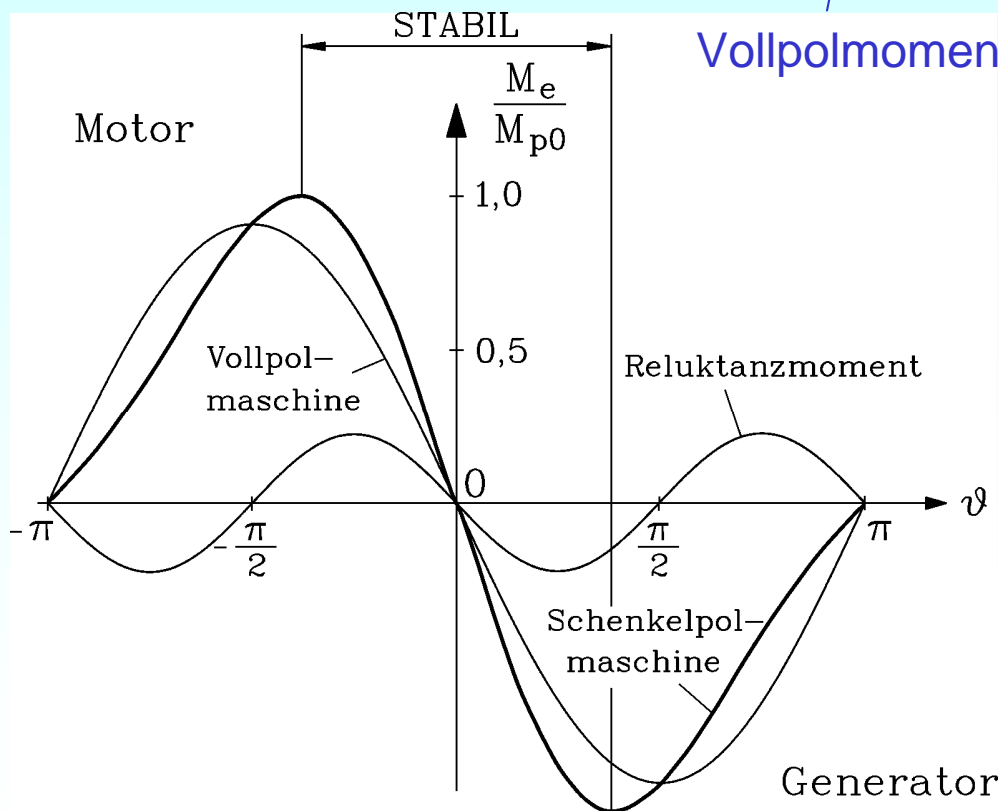
$$= \frac{m_s}{\Omega_{syn}} \cdot \left( -\frac{U_p U_s \sin \vartheta}{X_q} - \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cdot U_s \sin \vartheta \cdot (U_s \cos \vartheta - U_p) \right)$$

$$M_e = -\frac{p \cdot m_s}{\omega_s} \left( \frac{U_s U_p}{X_d} \sin \vartheta + \frac{U_s^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta \right)$$

# Drehmoment-Polradwinkel-Kurve $M_e(\vartheta)$

- Darstellung des Drehmoments wie bei Vollpolmaschine:  $I_{sd}, I_{sq}$  durch  $U_s, \vartheta$  ausgedrückt:

$$M_e = -\frac{p \cdot m_s}{\omega_s} \left( \frac{U_s U_p}{X_d} \sin \vartheta + \frac{U_s^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta \right)$$



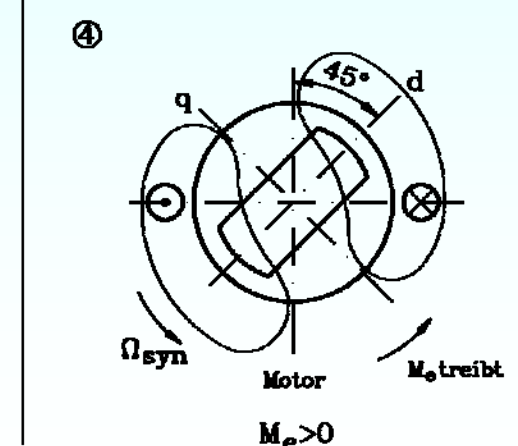
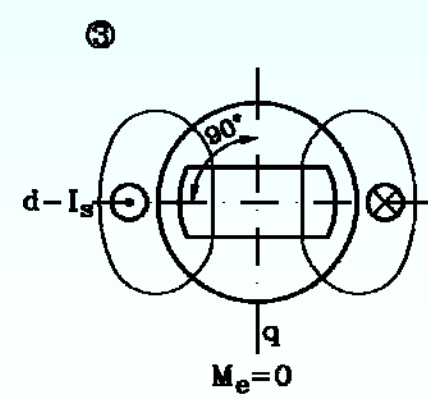
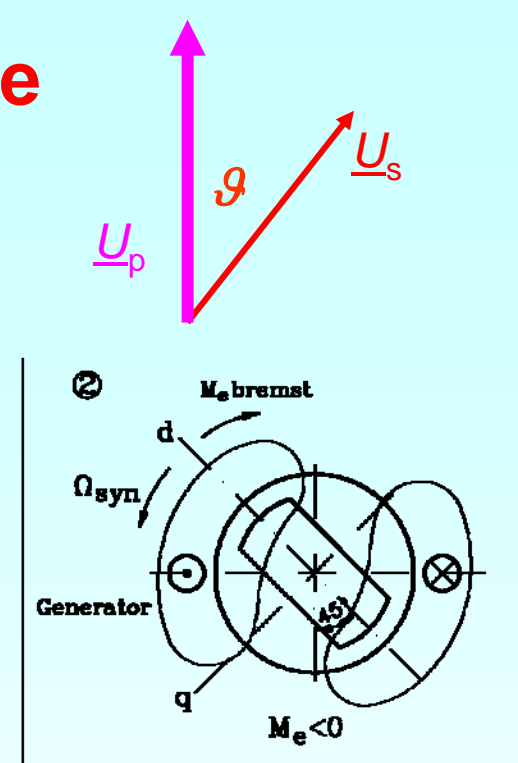
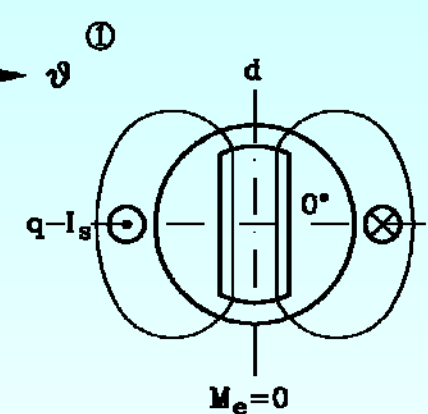
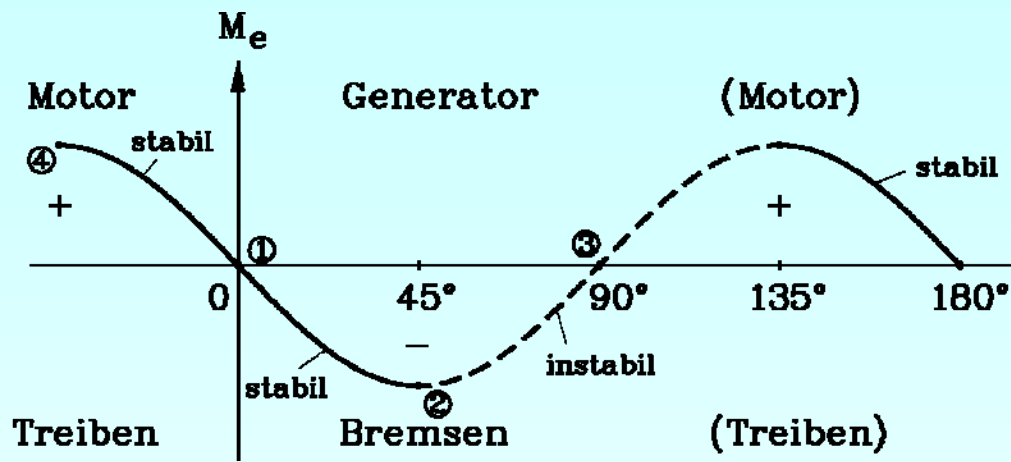
Vollpolmoment Reluktanzmoment

**Betrag des Kippwinkel  $< 90^\circ$ ,**  
da Kippmoment des Reluktanzmoments  
bei  $\pm 45^\circ$ .

**Betrag des Kippmoments** durch  
Reluktanzmoment erhöht.

**Ersatz-Drehfederkonstante  $c_g$**   
größer als bei Vollpolmaschine,  
da Reluktanzmoment  
mitwirkt (steilere  $M_e(\vartheta)$ -Kennlinie).

# Synchron-Reluktanzmaschine



- Läufer **ohne Wicklung**, aber mit **großen Pollücken**:  $X_d > X_q$ .
- Läufer will sich STETS in die Ständerfeld-Achse drehen, damit Feldlinien möglichst KURZEN Weg über den Luftspalt zurück legen müssen = **Reluktanzmoment**.

# Schenkelpol-Synchronmaschine - Statorfertigung

Wasserkraft-  
generator

ca. 400 MW

Bewickeltes  
Statorblechpaket

Verkeilung der  
Nutenkeile



Quelle:

**ALSTOM**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/58

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18

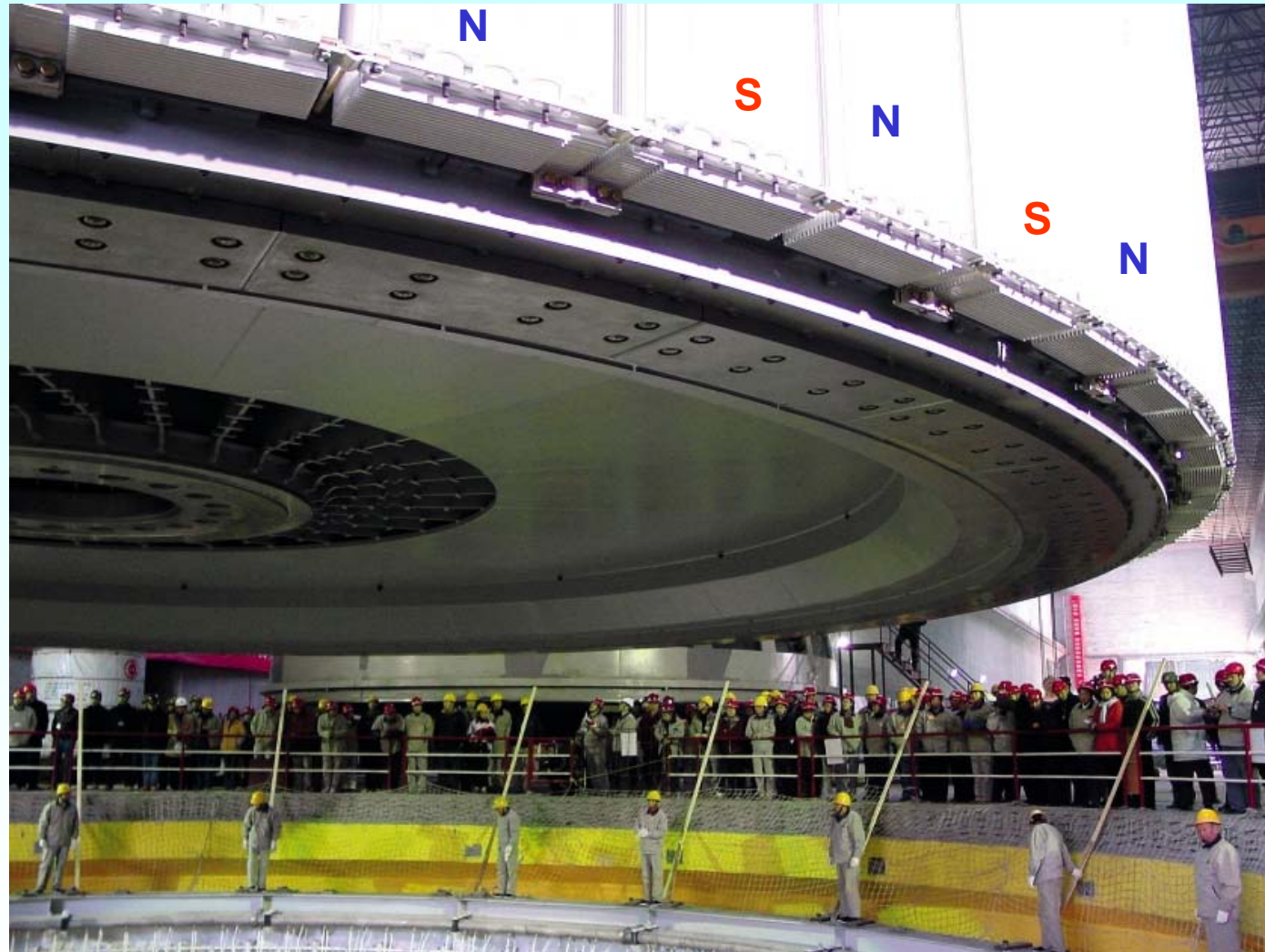




# Schenkelpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Der Rotor wird auf der Anlage in die Statorbohrung eingefahren (1)

Wasserkraft-  
generator

Drei Schluchten  
(Three Gorges)  
(China)  
840 MVA  
80-polig



Quelle:

**ALSTOM**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/59

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18



# Schenkelpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Der Rotor wird auf der Anlage in die Statorbohrung eingefahren (2)

## Wasserkraftgenerator

Drei Schluchten  
(Three Gorges)  
(China)  
840 MVA  
80-polig

$$n = f/p = 50/40 = 1.25/s \\ = 75/min$$

Quelle:

**ALSTOM**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/60

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18





# Schenkelpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Der Rotor wird auf der Anlage in die Statorbohrung eingefahren (3)

Wasserkraft-  
generator

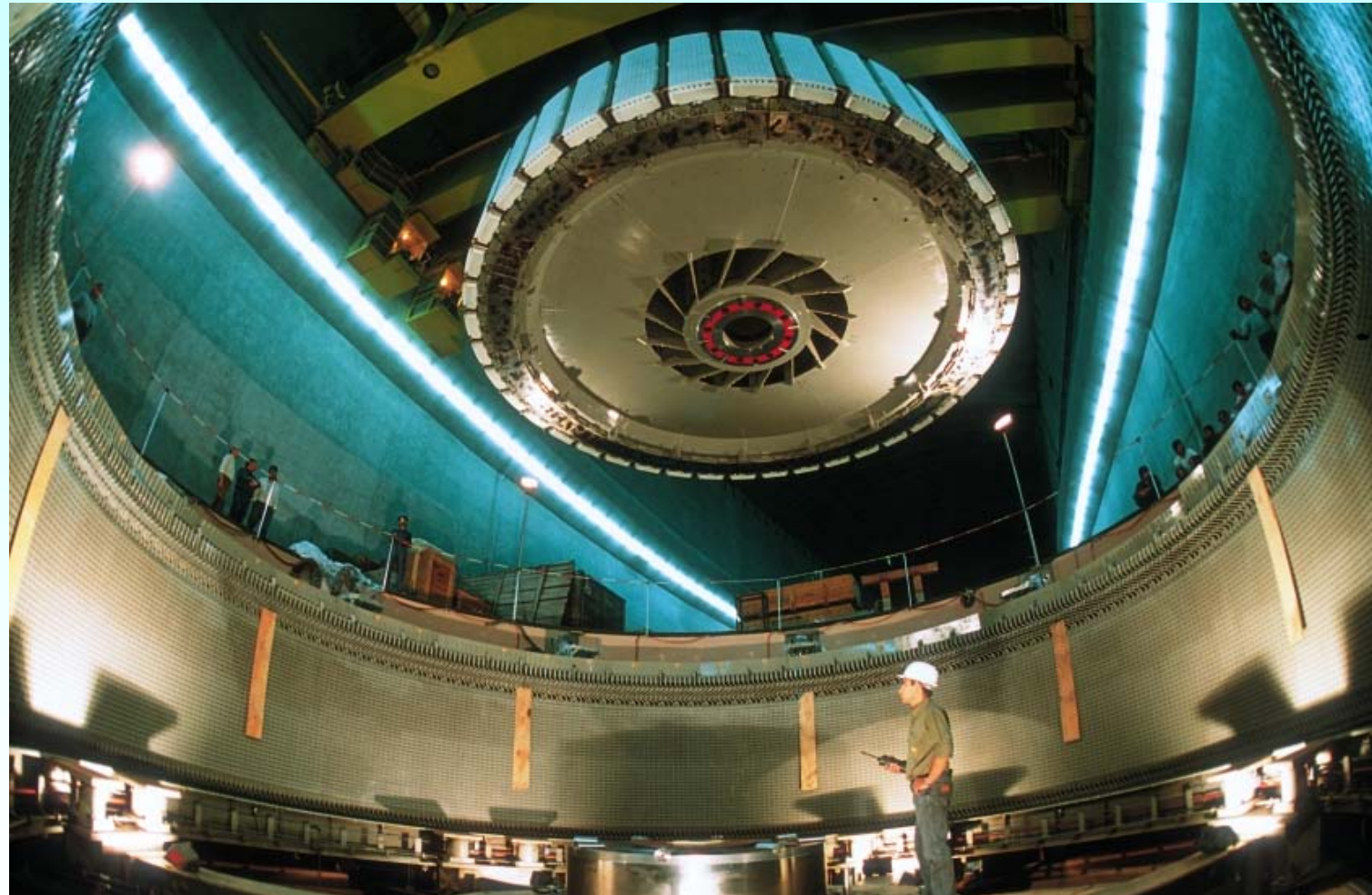
*Karakaya  
(Türkei)*

315 MVA  
40 polig

$$n = f/p = 50/20 = 2.5/s = 150/min$$

Quelle:

**ALSTOM**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

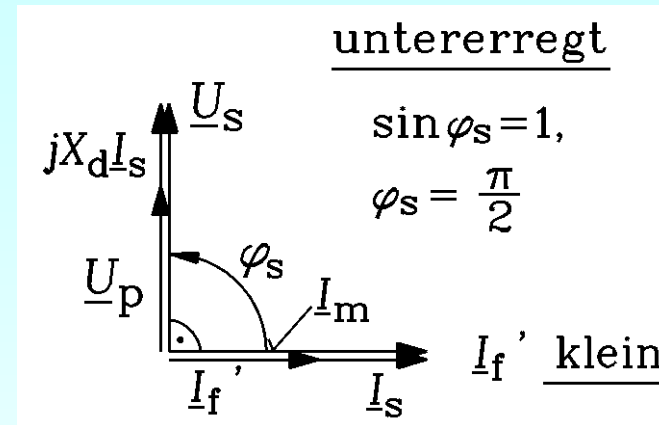
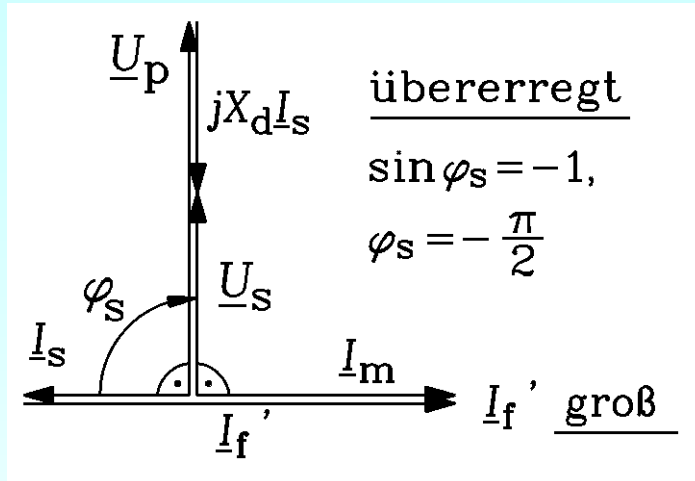
Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe  
8/61

Institut für Elektrische  
Energiewandlung • FB 18



# Synchronmaschine als "Phasenschieber,, ( $\cos \varphi_s = 0$ )

hier:  $R_s = 0$  angenommen



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

hoher  $I_f$  (**übererregt**): Maschine ist kapazitiver Verbraucher

kleiner  $I_f$  (**untererregt**): Maschine ist induktiver Verbraucher

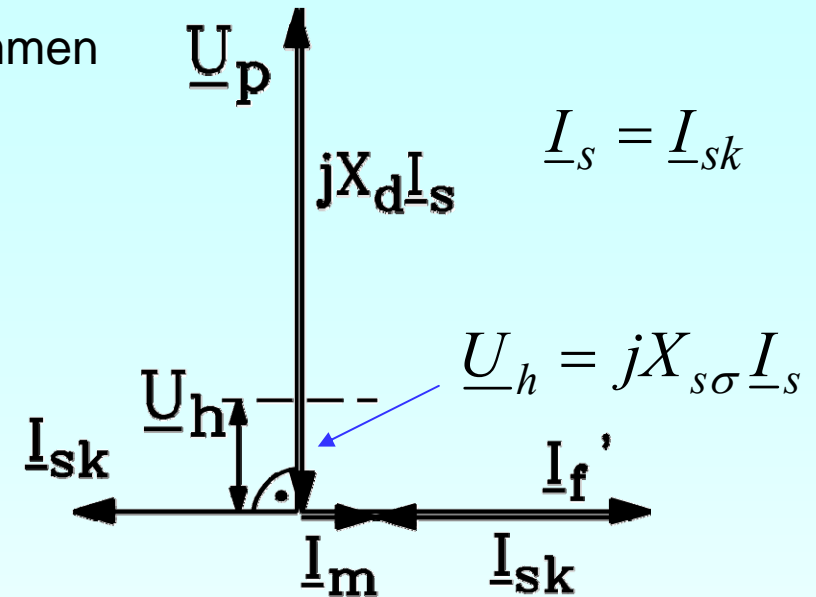
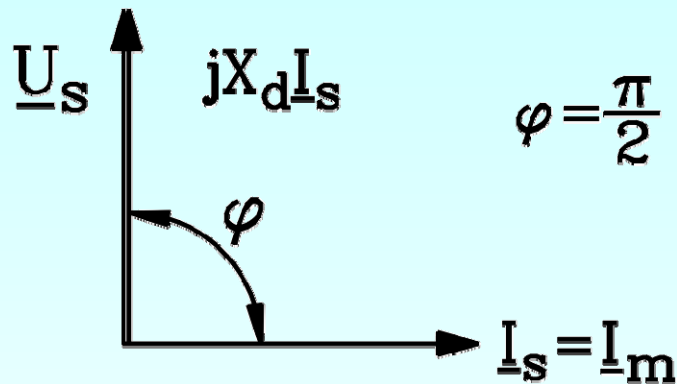
$$R_s = 0: \quad \underline{U}_s = \underline{U}_p + jX_d \underline{I}_s \quad \underline{I}_{sq} = 0, \underline{I}_s = \underline{I}_{sd}$$

Maschine am Netz, **keine Wirkleistungsumsetzung** ( $\cos \varphi_s = 0$ ), aber Phasenwinkel **entweder induktiv oder kapazitiv = Phasenschieber !**

# Besondere Betriebspunkte bei Synchronmaschinen

hier:  $R_s = 0$  angenommen

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



**unerregt am Netz:**  $I_f = 0$ .

Ständerwicklung "zieht", Strom  $I_s$  als Magnetisierungsstrom

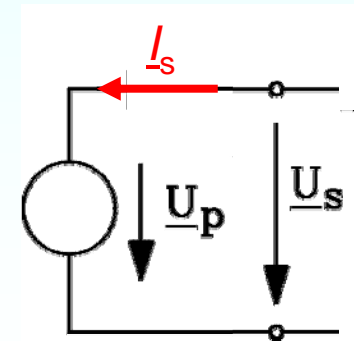
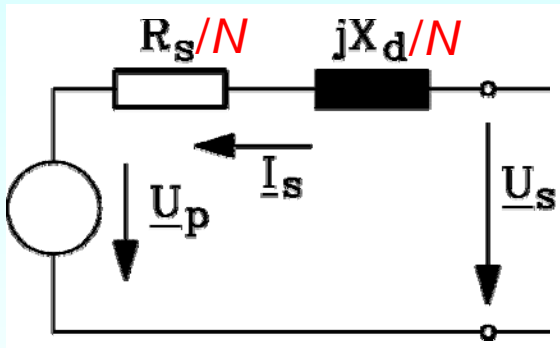
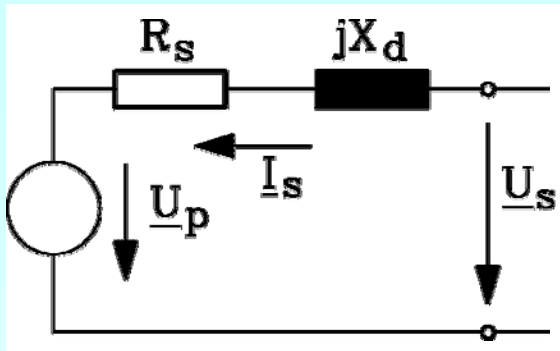
$$R_s = 0: \quad \underline{U}_s = jX_d \underline{I}_s$$

**Dauerkurzschluss:**

Klemmenkurzschluss:  $U_s = 0$ , Maschine angetrieben,  $U_p$  treibt **Kurzschlussstrom**  $I_{sk}$  in Ständerwicklung (hauptsächlich durch  $X_d$  begrenzt) :  $I_{sk} \approx U_p / X_d$

$$R_s = 0: \quad 0 = \underline{U}_p + jX_d \underline{I}_s$$

# Synchrongenerator als Netzspannungsquelle



- Viele Synchrongeneratoren parallel = „Netz“
- **Beispiel:**  $N$  parallele Generatoren gleicher Leistung:

Resultierende Polradspannung:  $\underline{U}_p$

Resultierende Impedanz:  $\underline{Z}_d = (R_s + jX_d)/N$

- **Unendlich** viele Synchrongeneratoren parallel = „**starres Netz**“

$N \rightarrow \infty$ : Resultierende Polradspannung:  $\underline{U}_p = \underline{U}_s$

Resultierende Impedanz: **Null!**  $\underline{Z}_d = 0$

**Unendlich hoher Kurzschlussstrom:**  $\underline{I}_{sk} = \underline{U}_s / \underline{Z}_d \rightarrow \infty$

**Starres Netz:** Unabhängig vom Belastungsstrom sind Amplitude und Frequenz von  $u_s(t)$  KONSTANT = eingeprägte Spannung!

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## Zusammenfassung:

### Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

- Zusätzlich zum Synchronmoment tritt Reluktanzmoment
- Polrad-Kippwinkel kleiner als  $90^\circ$
- Reluktanzmaschine als Sonderfall der unerregten Schenkelpolmaschine
- Besondere Betriebsfälle von Vollpol- u. Schenkelpolmaschine:  
Leerlauf, Kurzschluss, Phasenschieber



# Elektrische Maschinen und Antriebe

## 8. Die Synchronmaschine

8.1 Funktionsprinzip und Läuferbauweisen

8.2 Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine

8.3 Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz

8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

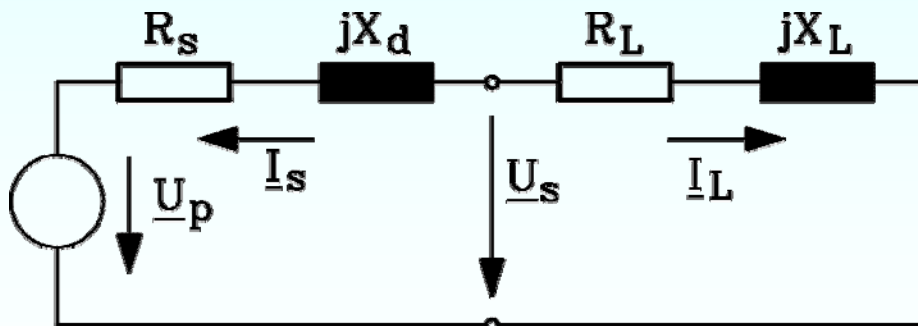
8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

(8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

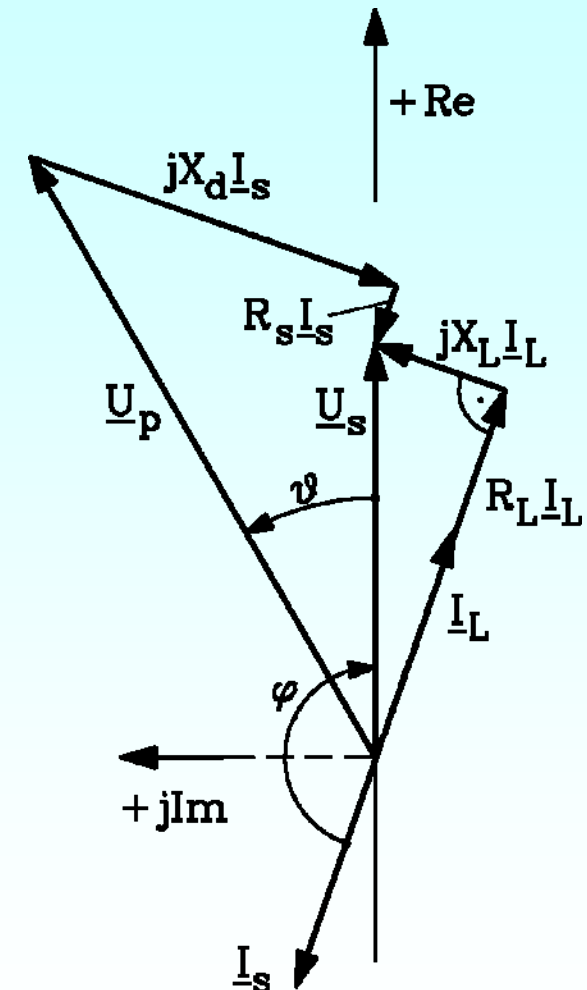
**8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb**

# Synchrongenerator im Inselbetrieb

- **Beispiele:** Lichtmaschine (Kfz), Bordnetzgenerator (Flugzeug, Schiff), Generatorstation mit "Insel"-Netz (Insel, Notstrombetrieb, ...).
- **Keine "starre" Spannung  $U_s$  vorhanden:** Maschine angetrieben, erregt ( $I_f$ ), Polradspannung  $U_p$  als "eingeprengte" Quellenspannung,  $U_s$  belastungsabhängig. Daher: z.B.: Vollpolmaschine:  
Keine  $M_e \sim \sin \vartheta$  - Abhängigkeit,  
kein Kippen bei  $\vartheta = \pm 90^\circ$
- **Beispiel:** OHM'sch-induktive Last  $\underline{Z}_L$  (Laststrom  $\underline{I}_L = -\underline{I}_s$ )

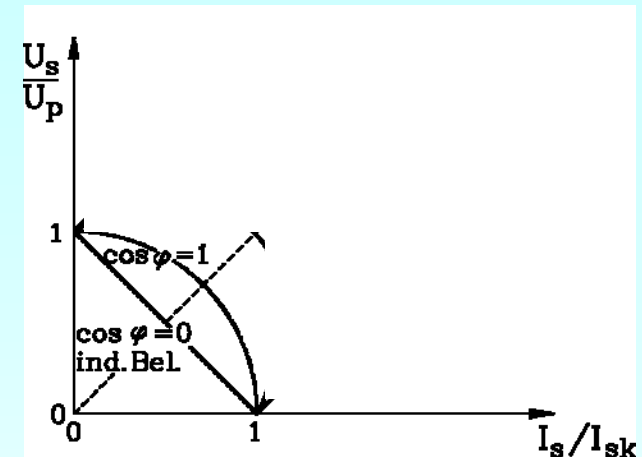


Lastimpedanz: allgemein  $\underline{Z}_L$  (hier:  $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ )



# Inselbetrieb: Strom-Spannungs-Kennlinie $U_s(I_s)$ bei $R_s = 0$

- Leerlauf:  $I_s = 0 \Rightarrow U_s = U_p = U_{s0}$  ;
- Kurzschluss:  $Z_L = 0: U_s = 0 \Rightarrow I_s = U_p/X_d = I_{sk}$



- Induktive Last:

Zeigerdiagramm: Spannungsfälle auf einer Geraden:

Die Spannung  $U_s$  SINKT linear mit zunehmendem Laststrom  $I_s$  !

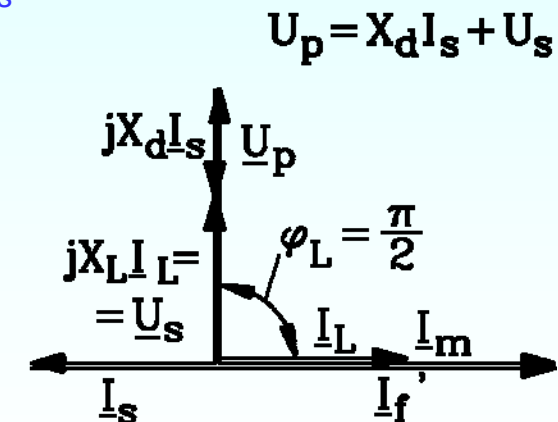
$$\underline{Z}_L = j\omega L_L = jX_L$$

$$U_p = U_s + X_d I_s$$

$$\underline{U}_p + jX_d \underline{I}_s = \underline{U}_s = -jX_L \underline{I}_s$$

$$U_s / U_p = 1 - I_s / (U_p / X_d)$$

$$u = 1 - i$$



# Inselbetrieb: Strom-Spannungs-Kennlinie $U_s(I_s)$ bei $R_s = 0$ OHM'sche last

- Ohm'sche Last:

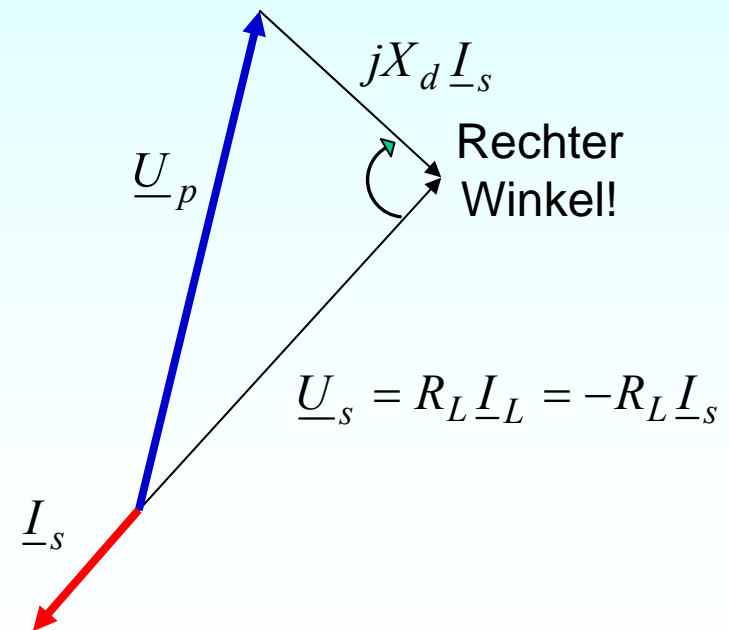
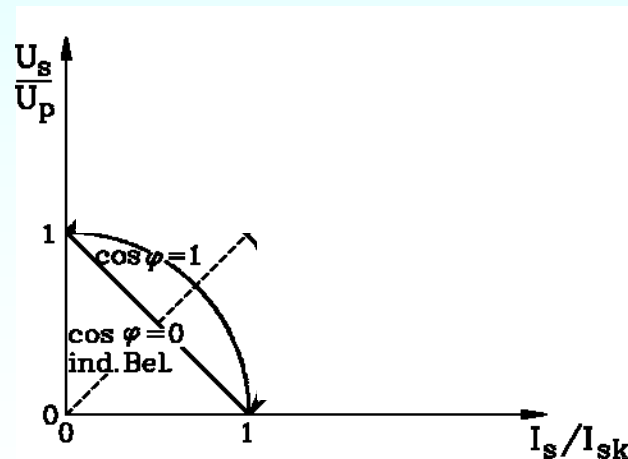
Das Zeigerdiagramm zeigt, dass die Spannungsfälle ein rechtwinkliges Dreieck ergeben:

Pythagoras:

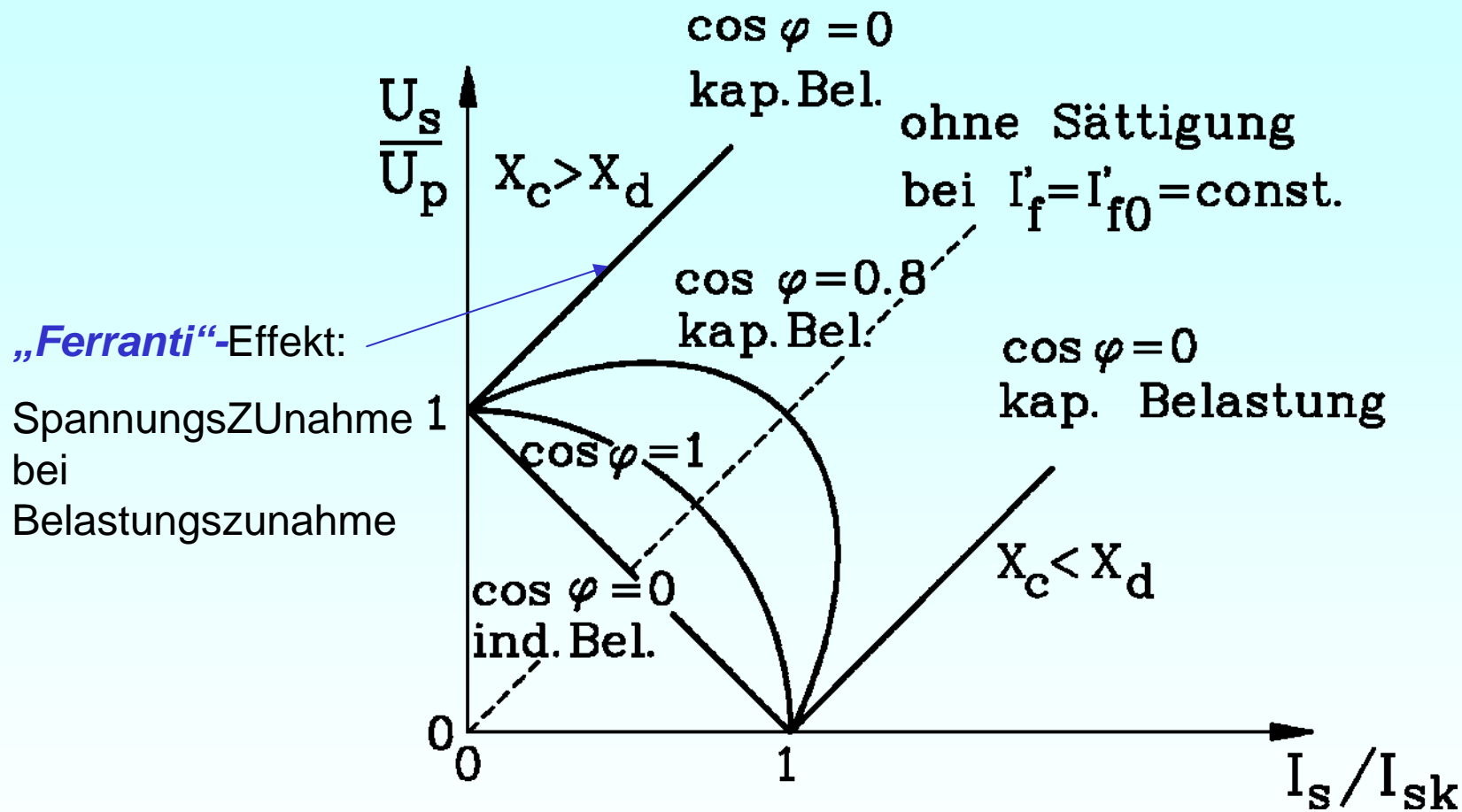
$$U_p^2 = U_s^2 + (X_d I_s)^2$$

$$(U_s / U_p)^2 = 1 - I_s^2 / (U_p / X_d)^2 \quad u^2 = 1 - i^2$$

Die Strom-Spannungs-Kurve (in per-unit der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstroms) ist ein Kreissegment !



# Inselbetrieb: Strom-Spannungs-Kennlinie $U_s(I_s)$ bei $R_s = 0$



Bei **gemischt ohm'sch-induktiver** und **ohm'sch-kapazitiver Last** sind die Kennlinien  $u(i)$  Ellipsenabschnitte.



# Inselbetrieb: Kapazitive Last: $U_s(I_s)$ -Kurve für $R_s = 0$

$$\underline{U}_p + jX_d \underline{I}_s = \underline{U}_s = jX_C \underline{I}_s$$

- **Kapazitive Last:**  $\underline{Z}_L = 1/(j\omega C_L) = -jX_C$  :
  - Zeigerdiagramm: Spannungsfälle liegen auf einer Geraden !
  - Zwei Fälle:

a)  $\underline{U}_p$  in Gegenphase zu  $\underline{U}_s$ :  $X_C < X_d$  GEGENERREGUNG

$$-U_p = U_s - X_d I_s$$

$$U_s / U_p = I_s / (U_p / X_d) - 1 \quad u = -1 + i$$

b)  $\underline{U}_p$  in Phase mit  $\underline{U}_s$ :  $X_C > X_d$

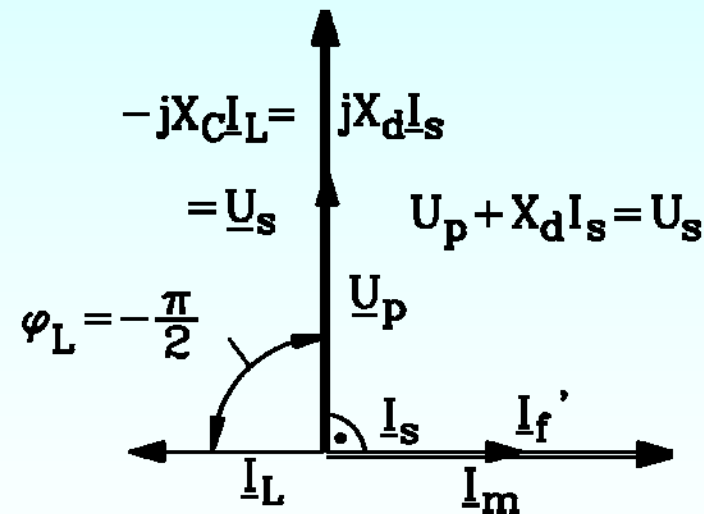
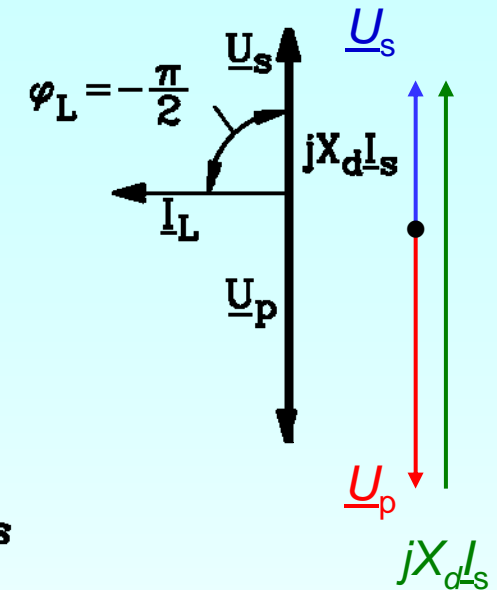
$$U_p = U_s - X_d I_s$$

$$U_s / U_p = 1 + I_s / (U_p / X_d) \quad u = 1 + i$$

**MEIST Fall b), da C klein ist!**

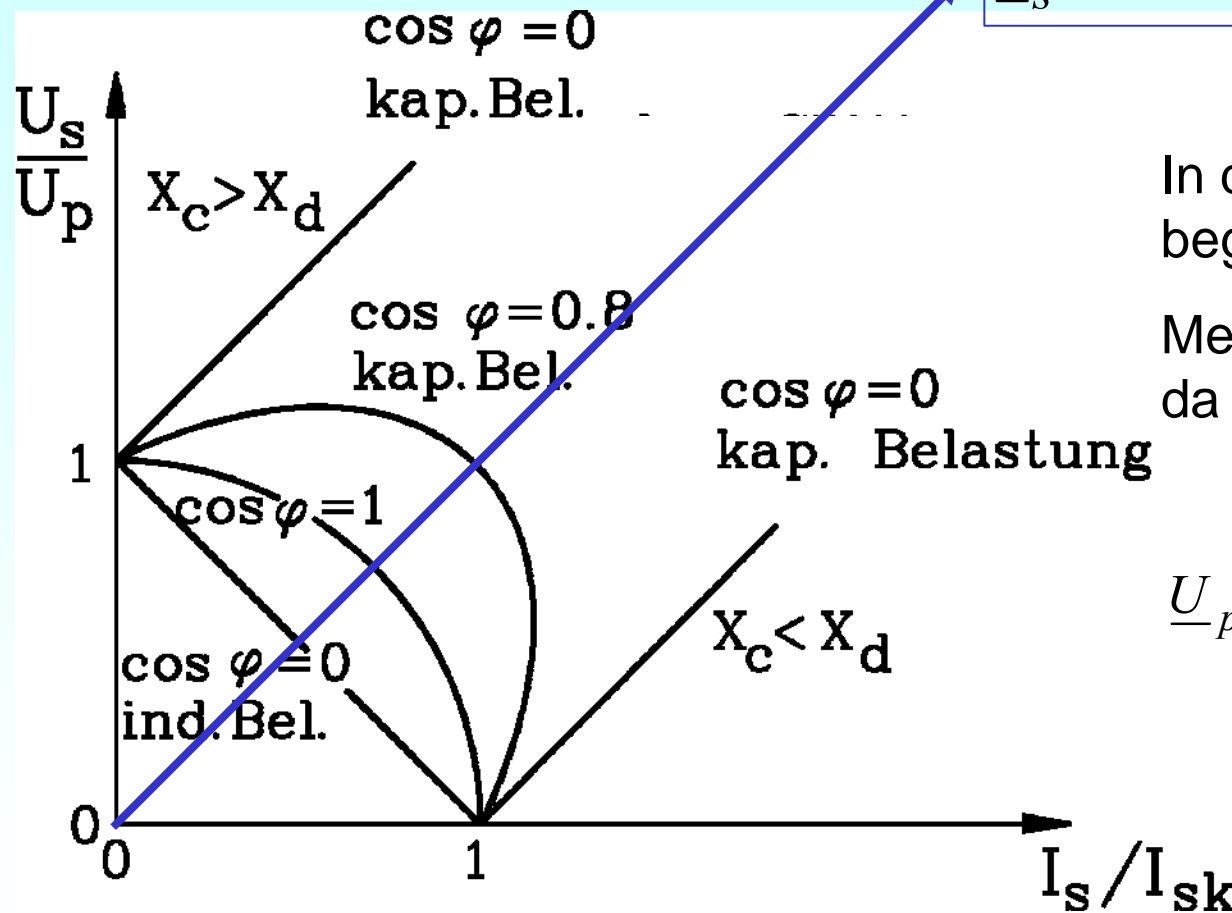
Fall b) auch bei unerregtem Generator, wo die Eisenremanenz des Polrads eine (kleine) Polradspannung induziert ("Selbsterregung der Synchronmaschine").

Die Spannung NIMMT bei Belastung mit Strom  $I_s$  ZU ! = FERRANTI-Effekt !



# Resonanz: $X_C = X_d$

$$\underline{I}_s \rightarrow \infty \quad X_C = X_d \quad R_s = 0$$



In der Realität durch Widerstände begrenzt!

Meist  $X_C$  deutlich größer als  $X_d$ , da  $C$  sehr klein!

$$\underline{U}_p + jX_d \underline{I}_s = \underline{U}_s = jX_C \underline{I}_s$$

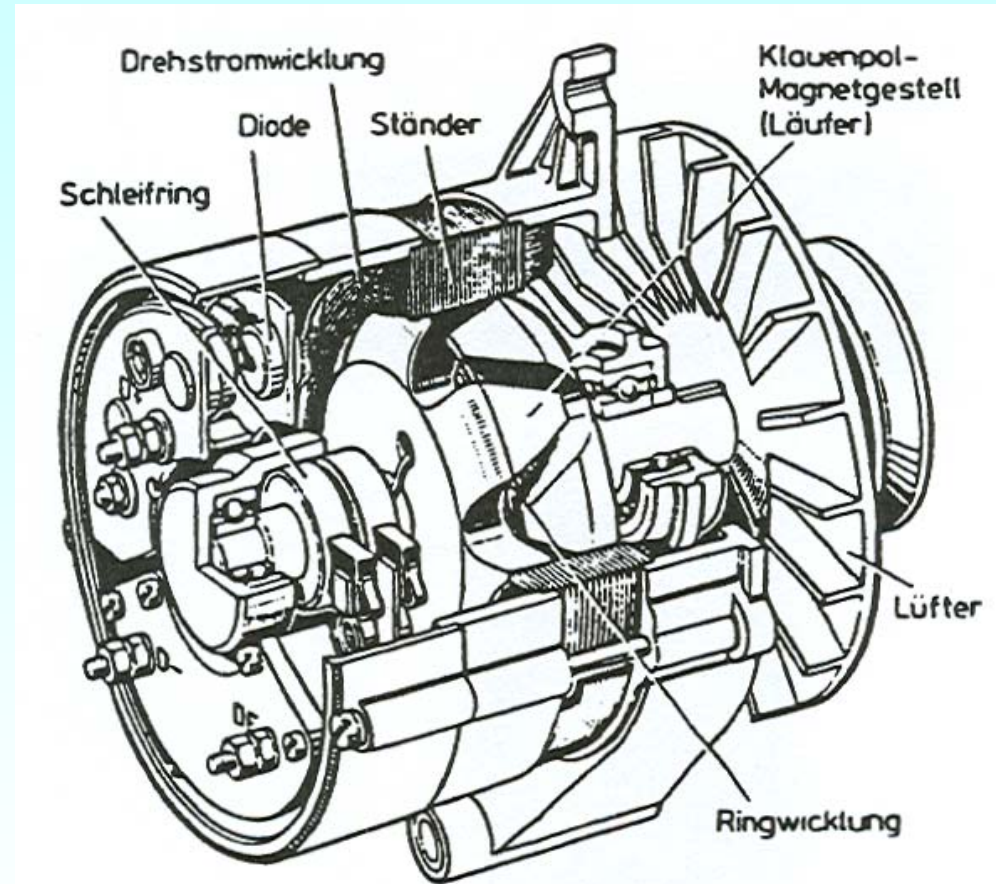
$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_p}{j(X_C - X_d)}$$

# Beispiel - Inselbetrieb: Synchrongenerator als Kfz-Lichtmaschine

- **Synchron-Lichtmaschine:**

dreiphasig,  $q = 1$ , Einschicht-Wellenwicklung, 12-polig

- Klauenpolläufer elektrisch erregt
  - Angetrieben über Keilriemen von Verbrennungskraftmotor drehzahlvariabel
  - Diodengleichrichter der Ständerleistung für 12 V oder 24 V Gleichspannung
  - Diodengleichrichter für Rotorerregung
  - Transistorspannungsregler hält unabhängig von Drehzahl  $n$  und Ständerstrom  $I_s$  über variablen Feldstrom  $I_f$  die Ständerspannung konstant
- 
- **Daten:** z. B.: 12...14 V, 90 A, 1 kW, 3000 ... 6500/min



Quelle:

Bosch, Deutschland

# Elektrische Maschinen und Antriebe

## Zusammenfassung: Synchrongeneratoren im Inselbetrieb

- Kein Kippen möglich, da kein starres Netz vorhanden
- Strom-Spannungs-Kennlinien bei konstanter Drehzahl und veränderlicher ele. Belastung
- Überwiegend ohmsch-induktive Last: Spannung sinkt bei steigendem Strom
- Bei kapazitiver Last: Spannungszunahme bei steigendem Strom (FERRANTI-Effekt)
- Bei kapazitiver Last: „Selbsterregung“ über Polradeisenremanenz möglich
- Selbsterregung unerwünscht wegen unkontrolliertem Spannungsanstieg