

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

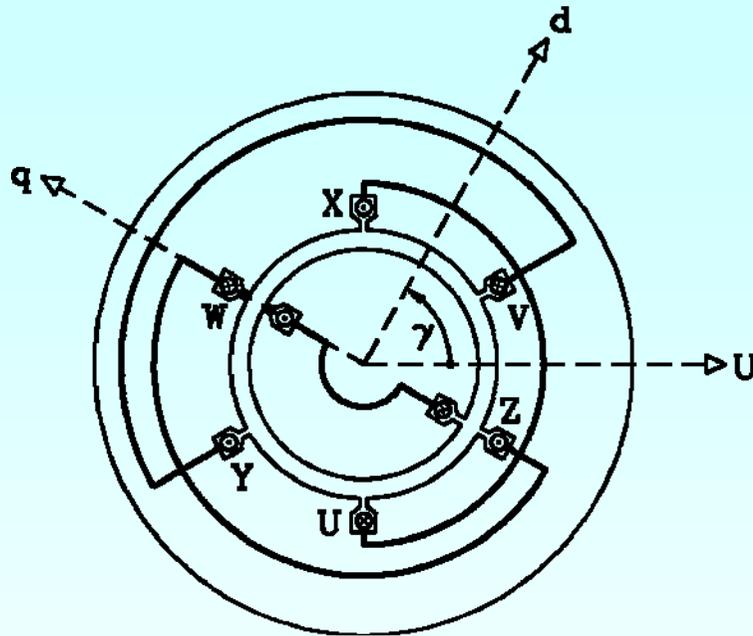
8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

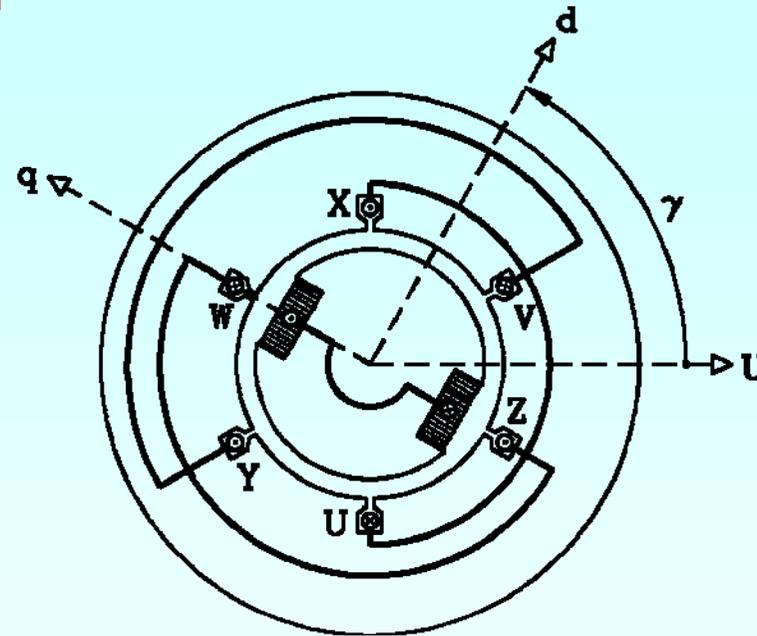
(8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

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**.

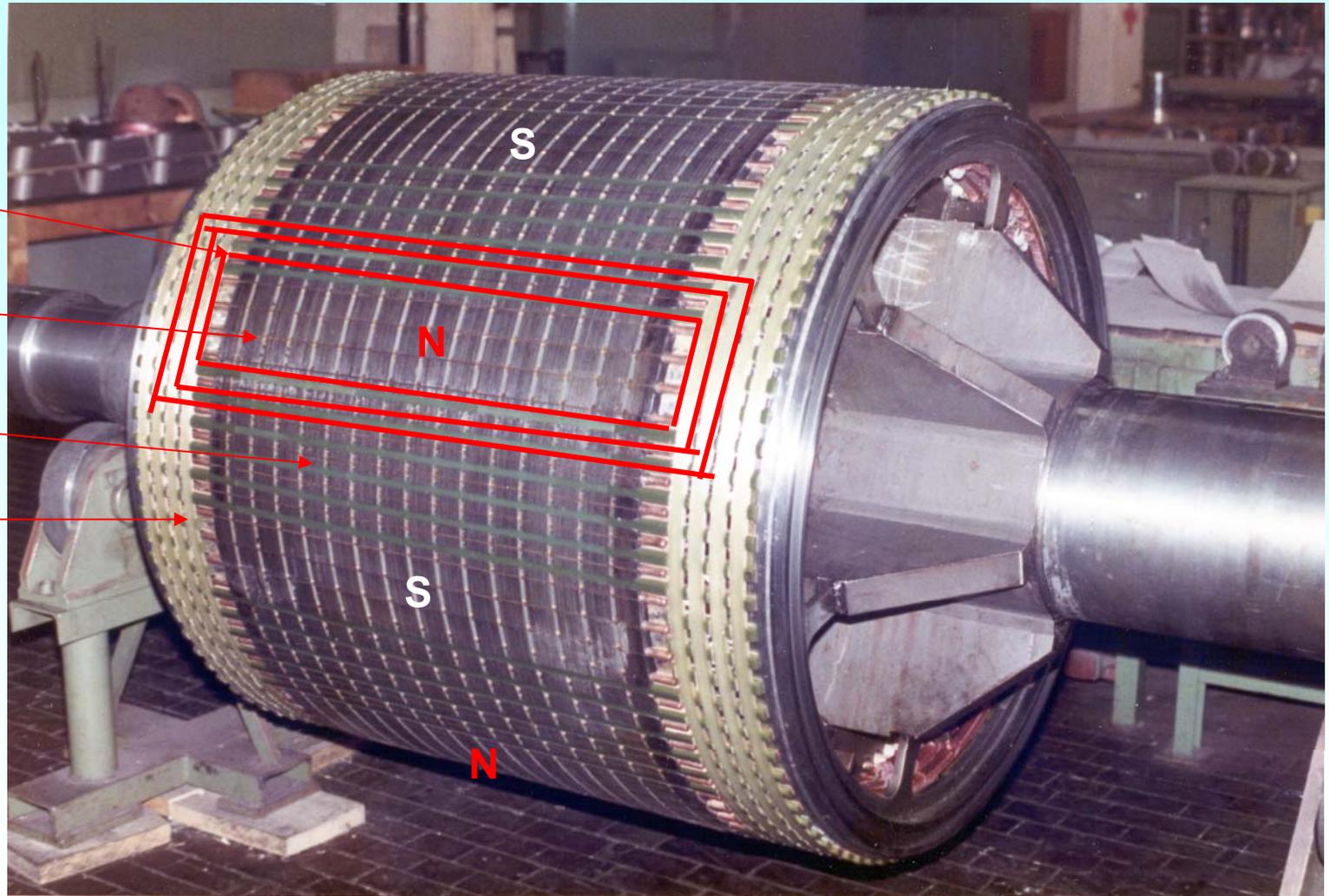
Vollpol-Synchron-Rotor, 8-polig

Drei Feldspulen
pro Pol: $q_r = 3$

Dämpferkäfig mit
9 Stäben pro Pol

Radiale
Kühlschlitze

Glasfaser-
Bandage zur
Fixierung der
Rotor-
Wickelköpfe



Quelle:

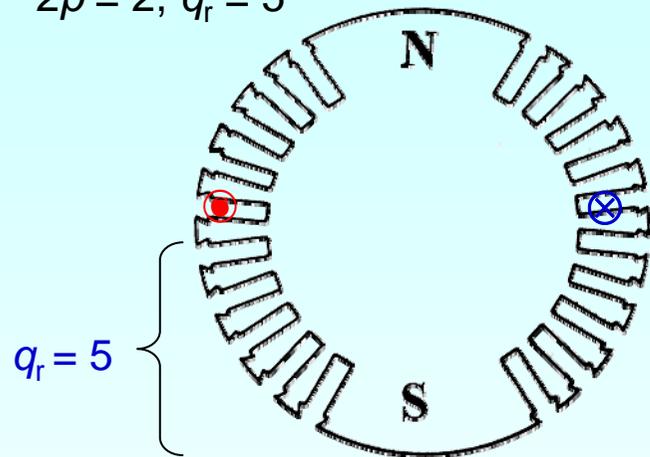
Andritz Hydro, Bhopal,
Indien



Vollpolmaschine $2p = 2$: Magnetfeld bei Leerlauf

Beispiel:

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

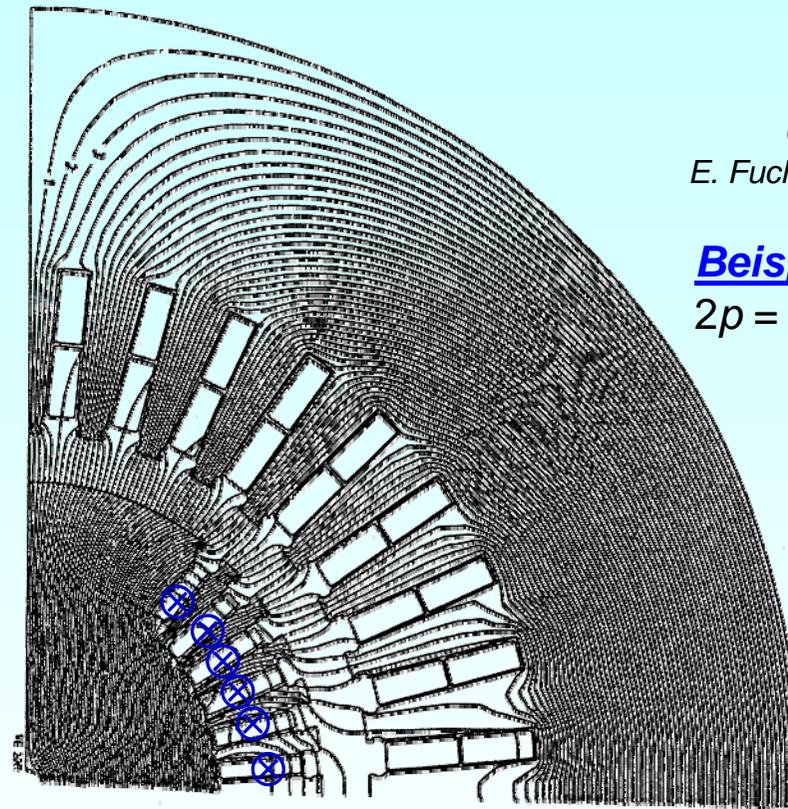


Quelle: H. Kleinrath,
Studententext

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

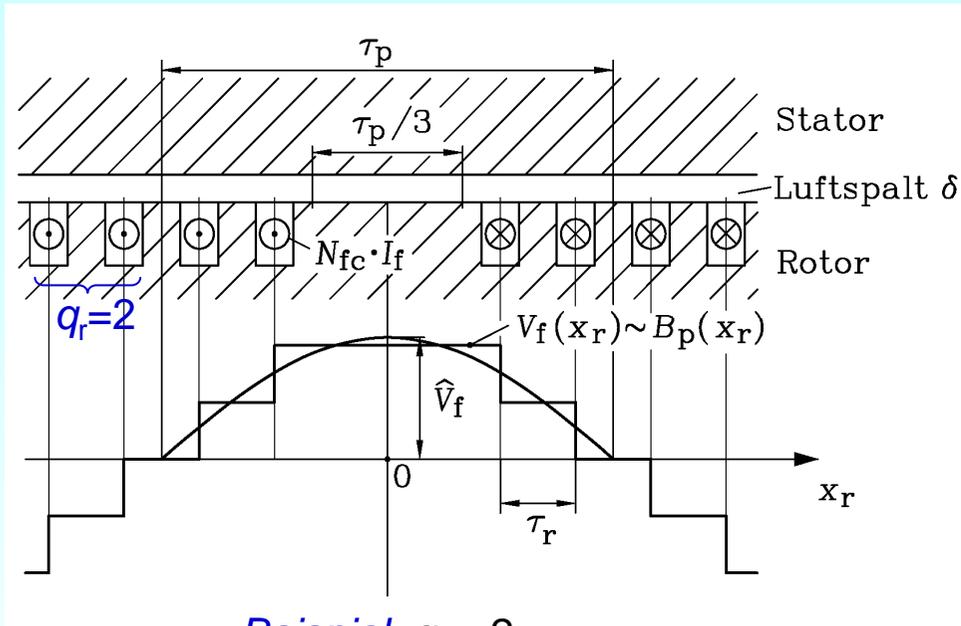
8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

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 ($\mu = 1$):

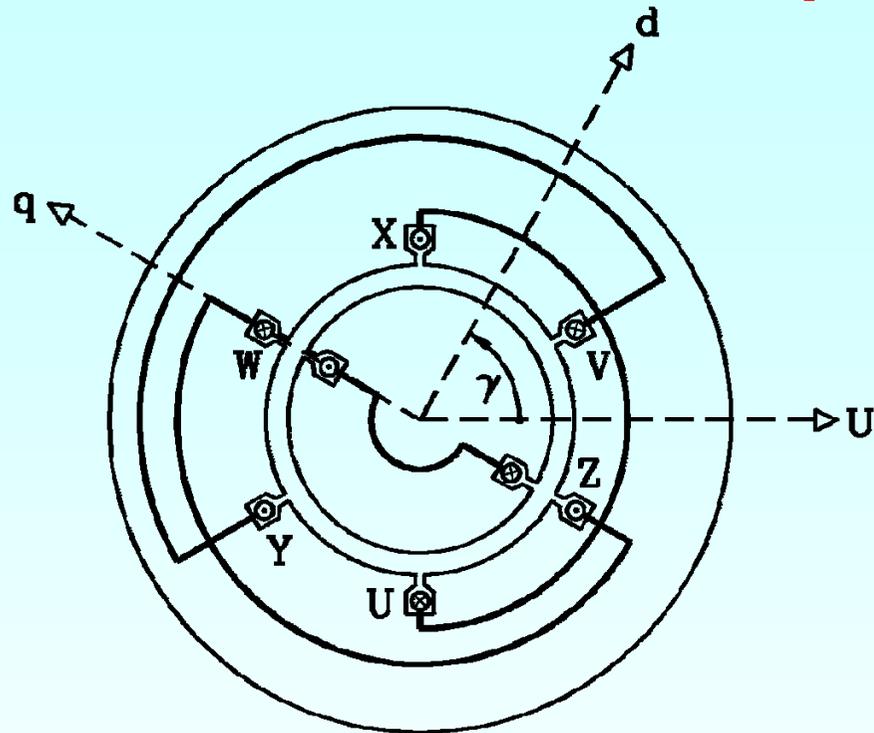
$$\hat{V}_f = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{N_f}{p} \cdot (k_{p,f} k_{d,f}) \cdot I_f \approx \frac{N_f}{2p} \cdot I_f$$

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

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

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

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:

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

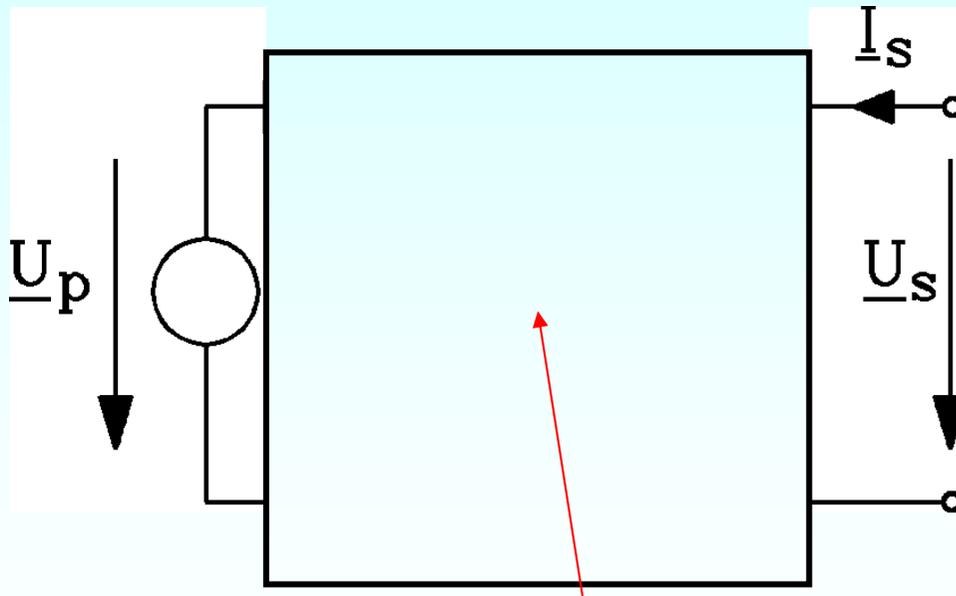
$$U_{i0} = U_p = \sqrt{2} \pi f_s \cdot N_s k_{ws} \Phi_p$$

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:



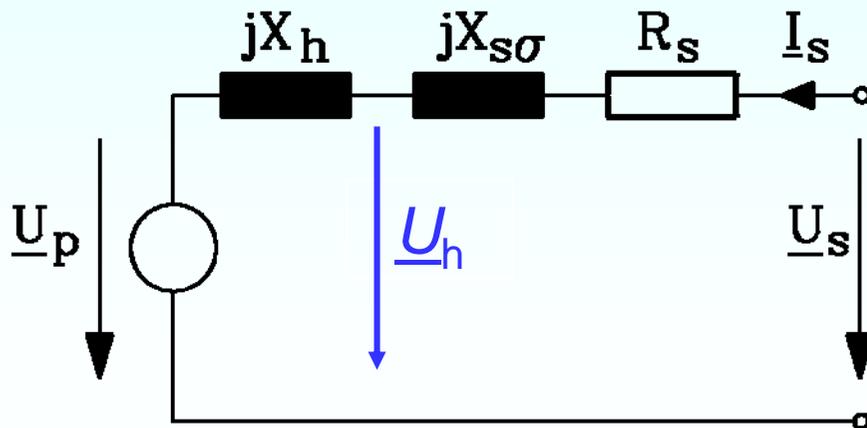
- *Ohm'scher* Spannungsfall durch I_s & Selbstinduktionsspannung durch das Ständerfeld, das von I_s erregt wird.

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 ϑ** .

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

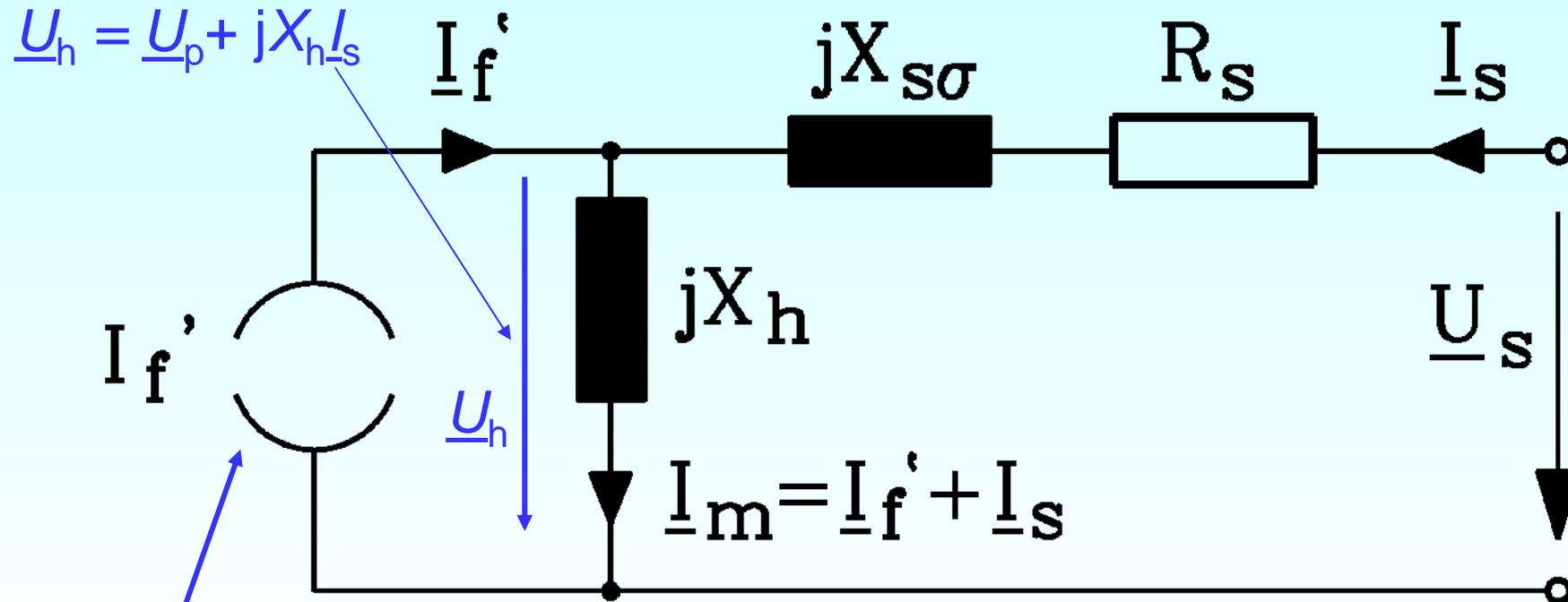
- **Übersetzungsverhältnis für Erregerstrom \underline{u}'_f :** $I'_f = \frac{1}{\underline{u}'_f} I_f$

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

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

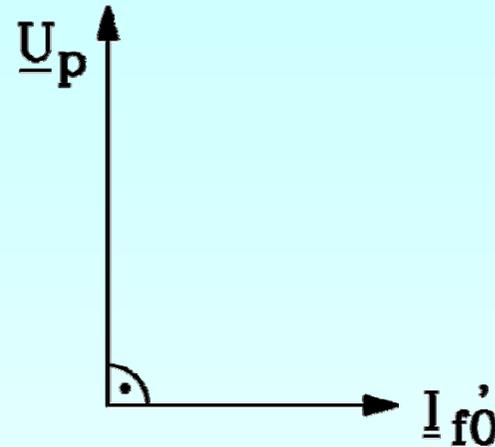
8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

(8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb

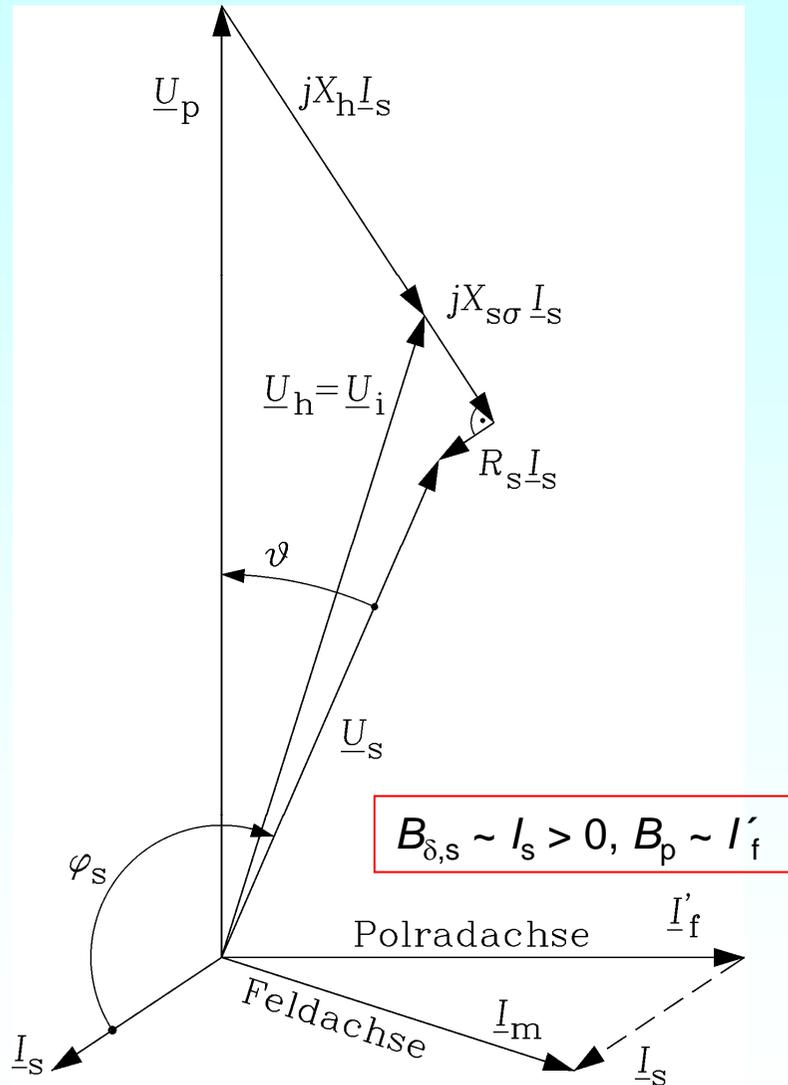
Generator Leerlauf: $I_s = 0$, $n = n_{\text{syn}}$



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 ϑ , 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 ϑ :** 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:

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

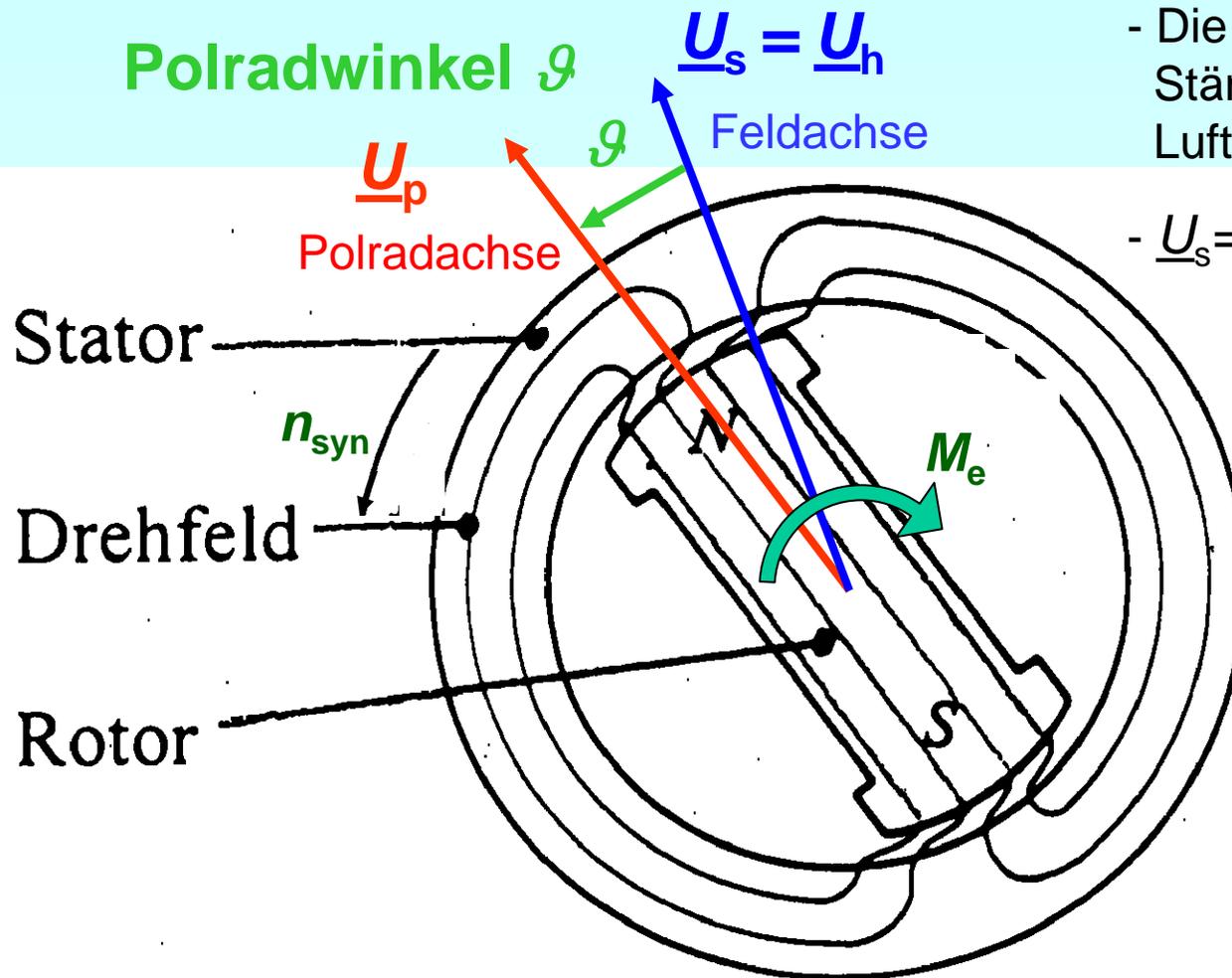
- **Magnetisierungsstrom \underline{I}_m :**
Resultierender Erregerbedarf für Läufer- und Ständer-Luftspaltfeld:

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

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 ϑ - Hauptfeldspannung \underline{U}_h



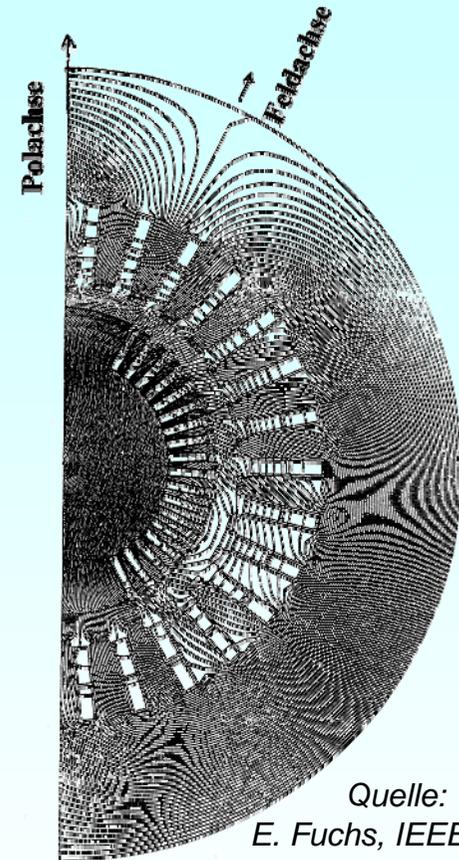
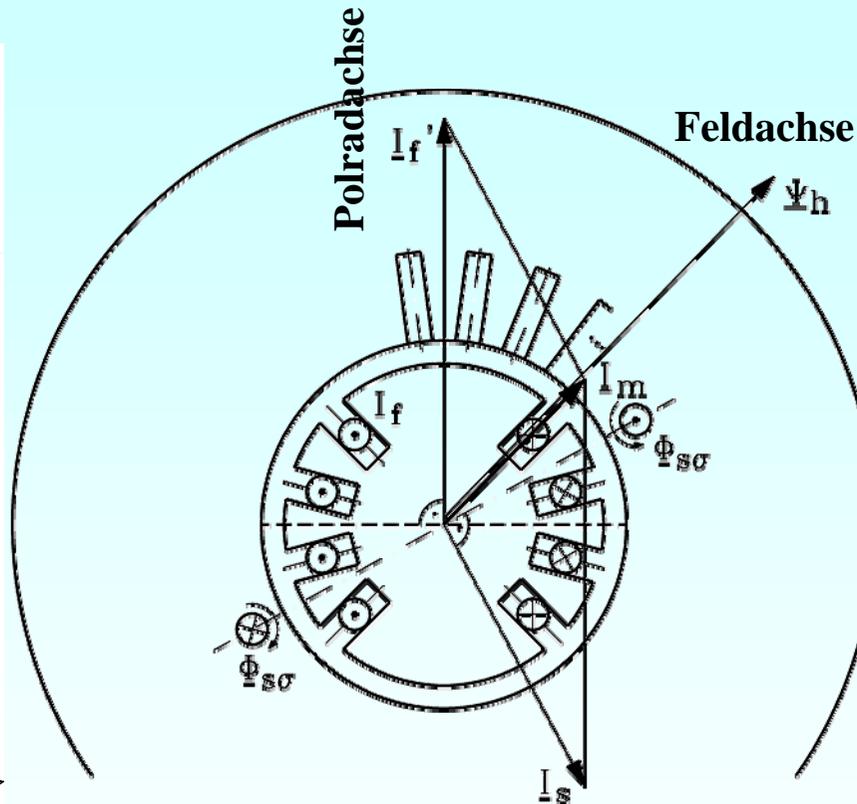
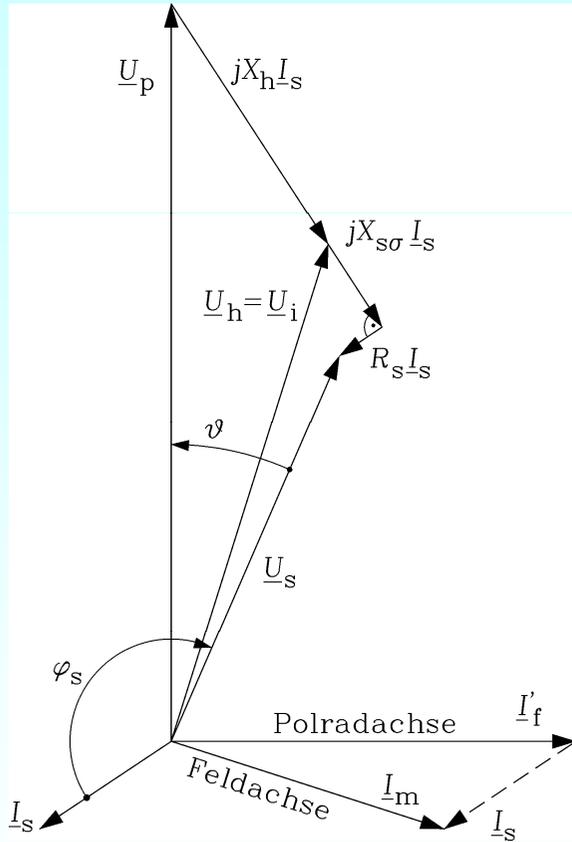
- Die Hauptfeldspannung wird vom Ständer-Hauptfeld (= resultierendes Luftspaltfeld) induziert.

- $\underline{U}_s = \underline{U}_h$ 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

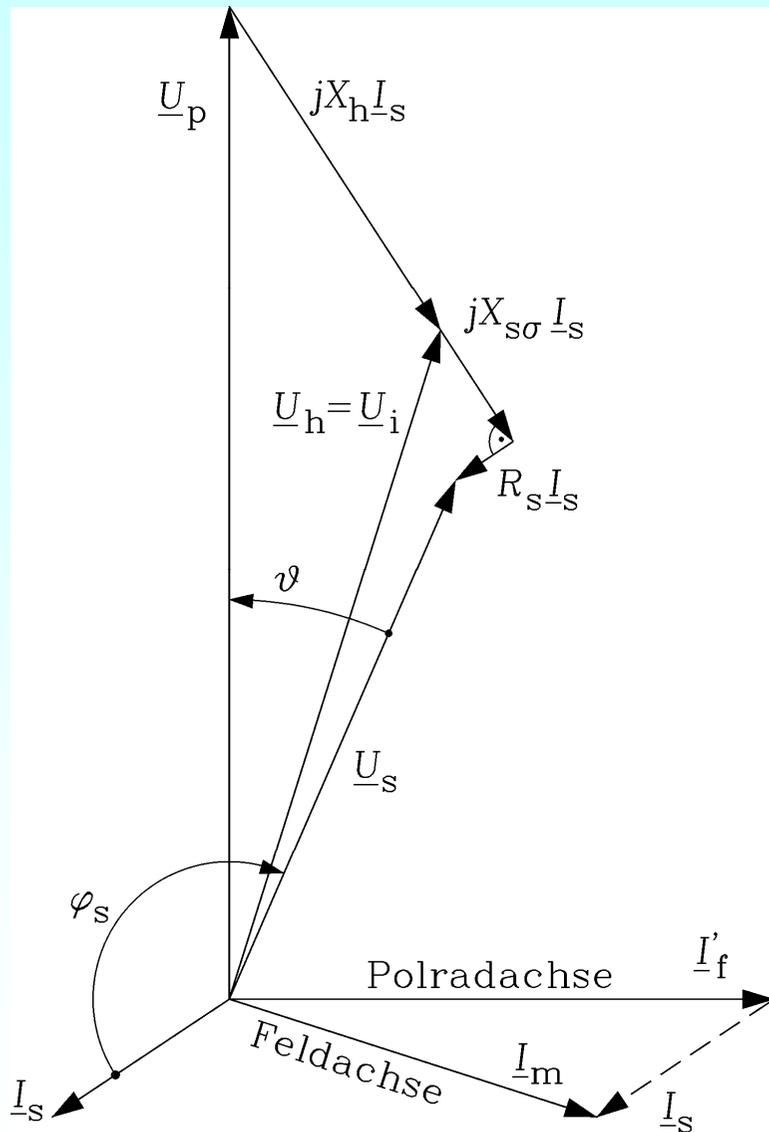


Quelle:
E. Fuchs, IEEE-PAS

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

- 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 φ_s zwischen -90° und -180° :

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 φ_s negativ = Strom eilt Spannung VOR:

$\sin \varphi_s$ negativ:

Q ist negativ = kapazitive Blindleistung:

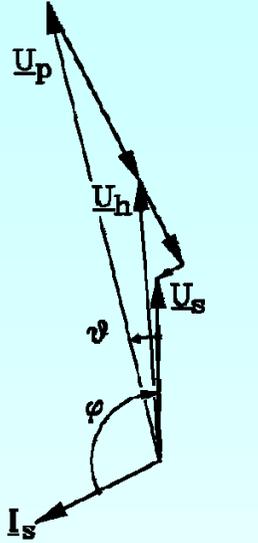
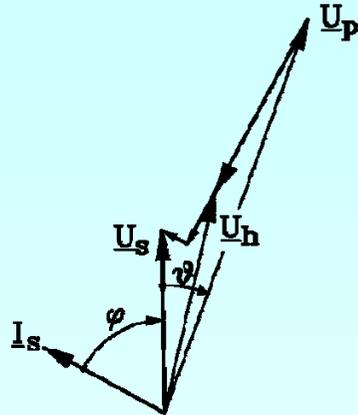
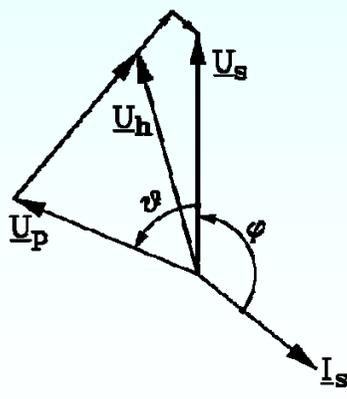
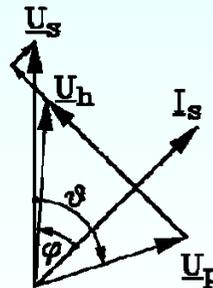
Maschine wirkt als **kapazitiver Verbraucher**.

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

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

Über-/Unterexcit

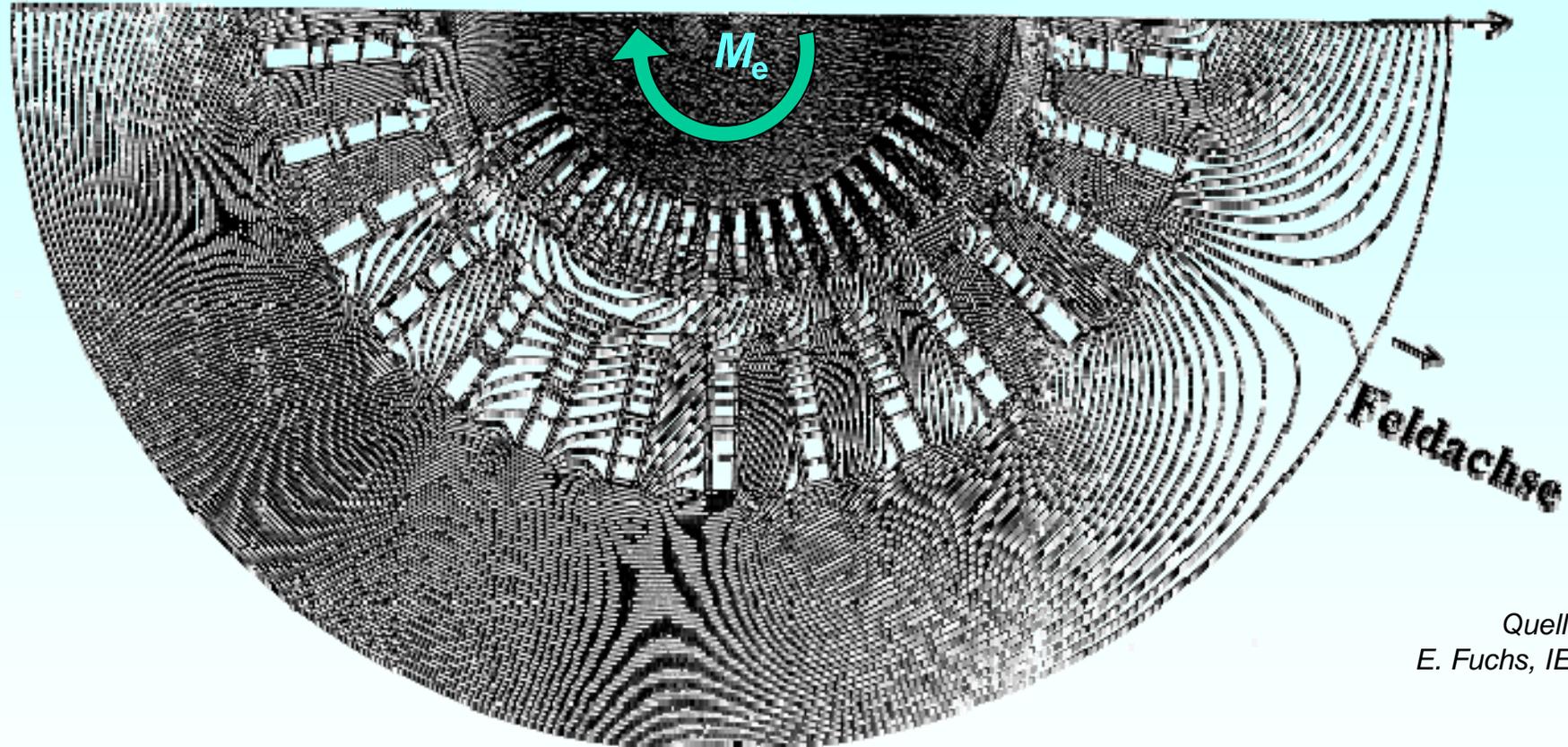
Generator/Motor-Betrieb

<p>GENERATOR: Polrad eilt Drehfeld vor</p>	<p>MOTOR: Polrad läuft Drehfeld nach</p>	
 <p>$\delta > 0$ $\varphi < 0$</p>	 <p>$\delta < 0$ $\varphi < 0$</p>	<p>ÜBERERREGT Induktive Verbraucher können versorgt werden</p>
 <p>$\delta > 0$ $\varphi > 0$</p>	 <p>$\delta < 0$ $\varphi > 0$</p>	<p>UNTERERREGT Kapazitive Verbraucher können versorgt werden</p>

- **Generatorbetrieb:** $\delta > 0$: Polrad läuft VOR dem resultierenden Luftspaltfeld = Zeiger \underline{U}_p liegt VOR \underline{U}_h .
- **Motorbetrieb:** $\delta < 0$: Polrad läuft NACH dem resultierenden Luftspaltfeld = Zeiger \underline{U}_p liegt NACH \underline{U}_h .
- **Überexcit:** Syn.maschine ist kapazitiv: Zeiger \underline{U}_p i. A. deutlich länger als \underline{U}_h : hoher Erregerstrom I_f .
- **Unterexcit:** 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 δ 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

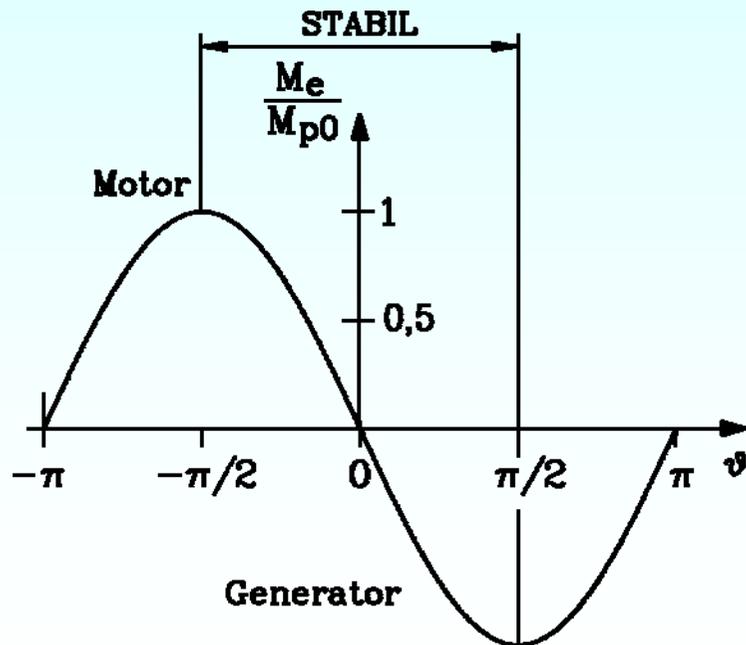
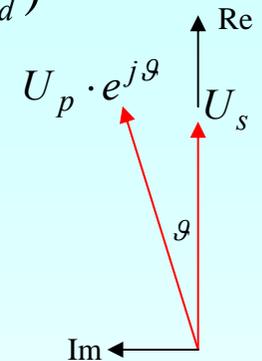
- Feldlinien im Luftspalt haben tangentielle Richtung = tangentialer Magnetzug = elektromagnetisches Drehmoment M_e

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:

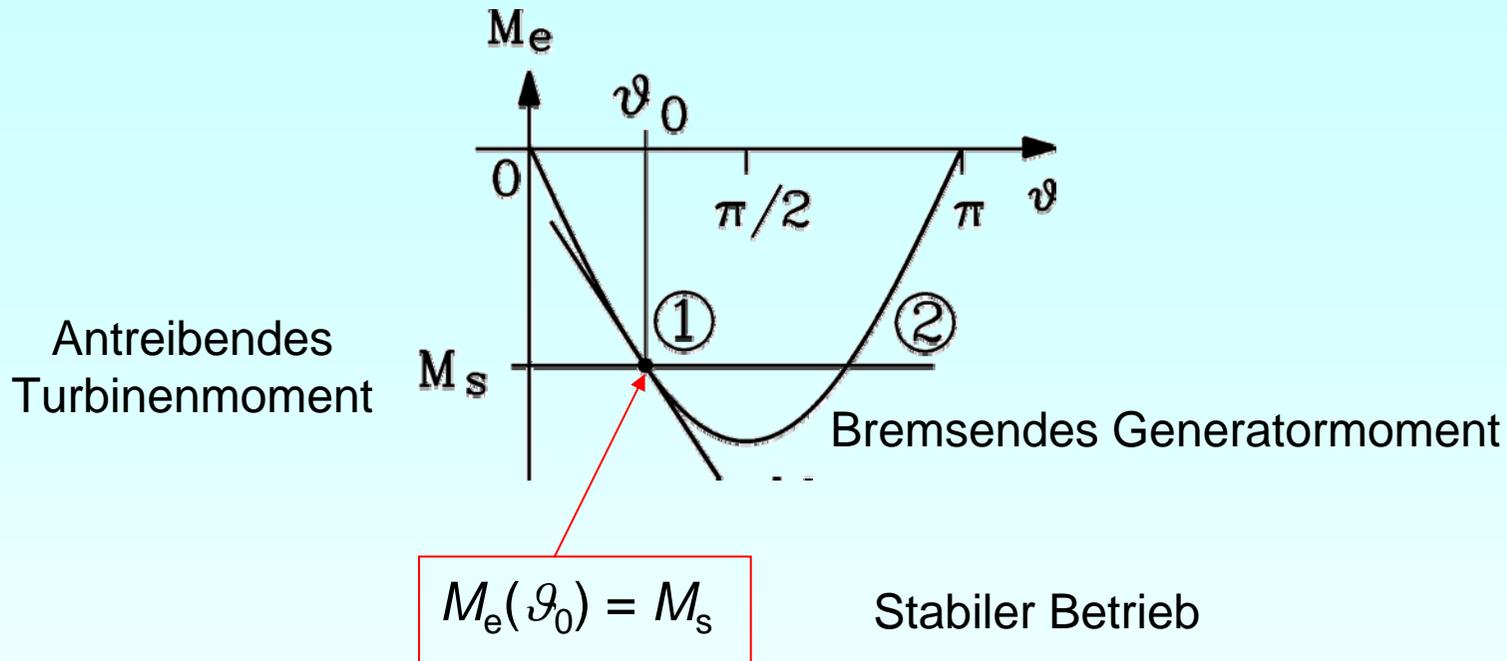
Alle Verluste vernachlässigt (Wirkungsgrad "Eins").

Negatives Moment: Generator: M_e bremst

Positives Moment: Motor: M_e treibt an

Drehzahl ist stets Synchrondrehzahl !

Stationärer Arbeitspunkt: Beispiel: Generatorbetrieb



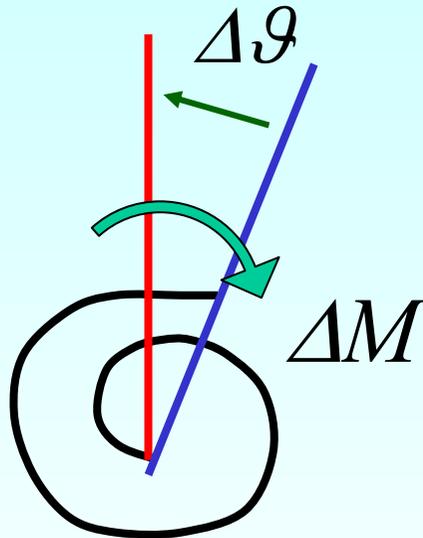
- **Kennlinie** $M_e(\vartheta)$ im Arbeitspunkt ϑ_0 durch **Tangente** angenähert: $M_e(\vartheta_0) = M_s$

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

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

Mechanisches Analogon: Drehfeder

Mechanische Drehfeder:



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

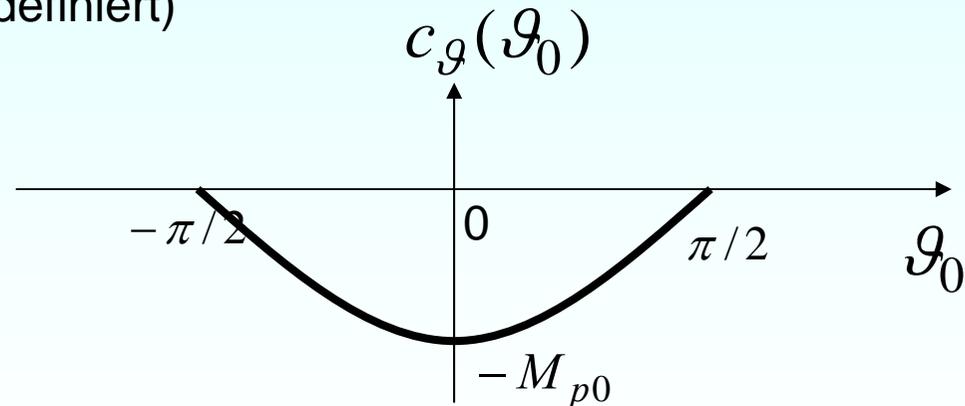
Synchronmaschine:

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

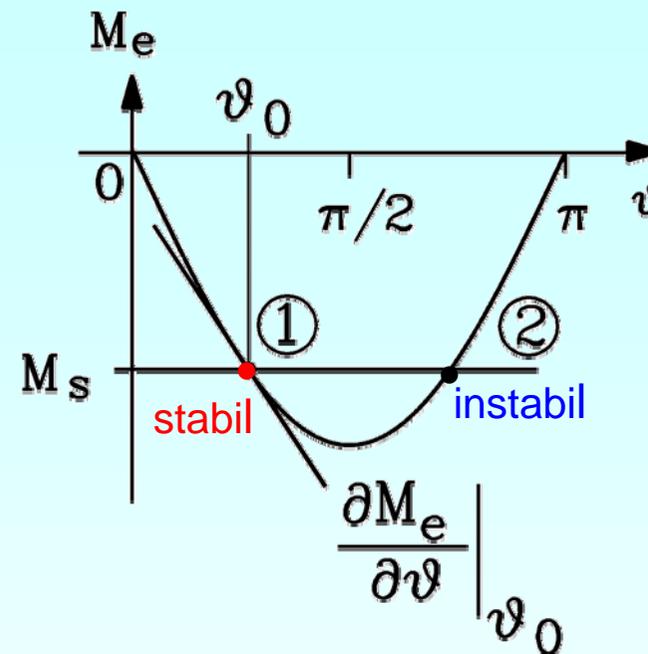
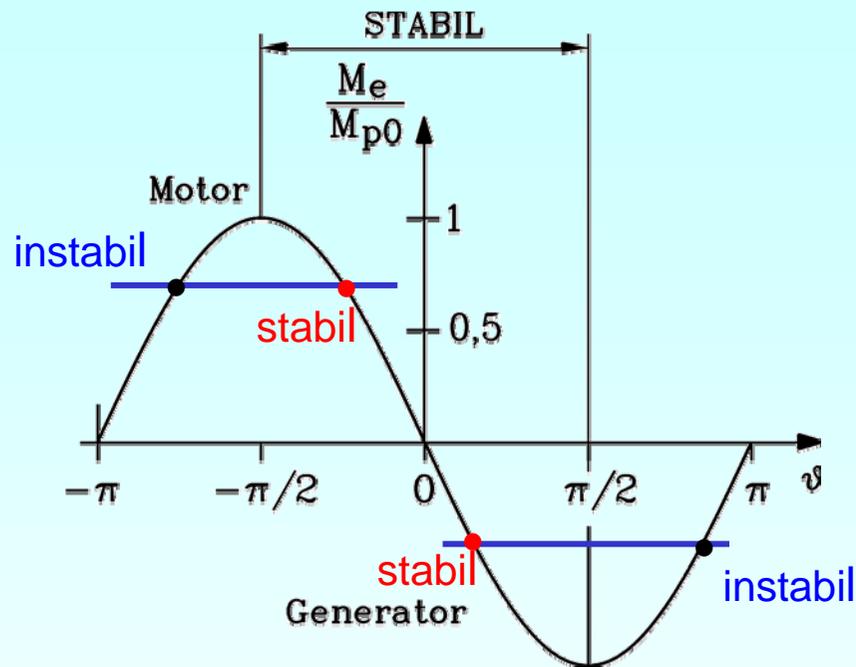
$$c_{\vartheta}(\vartheta_0) = \left. \frac{\partial M_e}{\partial \vartheta} \right|_{\vartheta_0} = -M_{p0} \cos \vartheta_0$$

Nichtlineare negative Federkonstante:

(negativ, weil ϑ 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 ϑ_0 : $M_e(\vartheta_0) = M_s$ $M_e(\vartheta) \cong M_e(\vartheta_0) + \partial M_e / \partial \vartheta \cdot \Delta \vartheta$

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

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

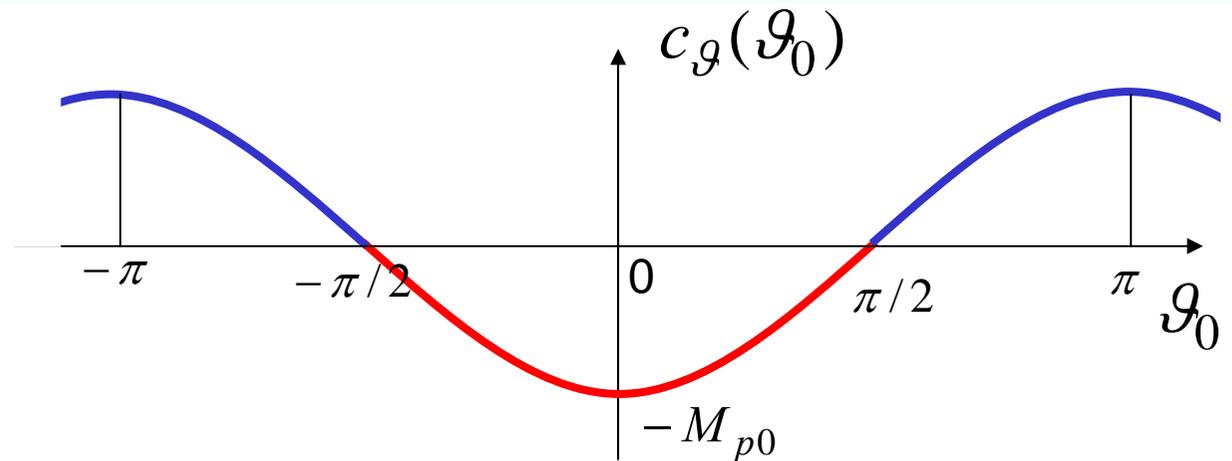
- **Zeitliche Änderung** des Polradwinkels bewirkt **Drehzahländerung** $d\Delta \vartheta / dt = p \cdot \Delta \Omega_m$

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

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

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

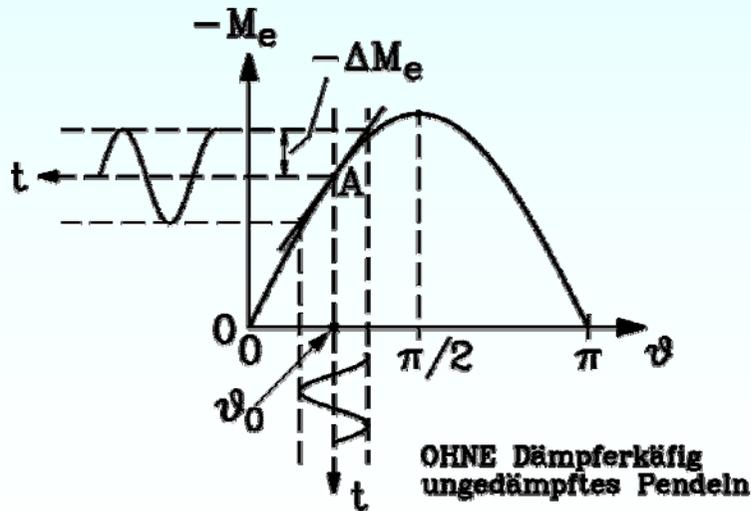
- Abweichungen des Polradwinkels vom stationären Arbeitspunkt im stabilen Bereich:

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

Dies ist eine **Schwingungsgleichung**. Das Polrad schwingt um den Arbeitspunkt ϑ_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

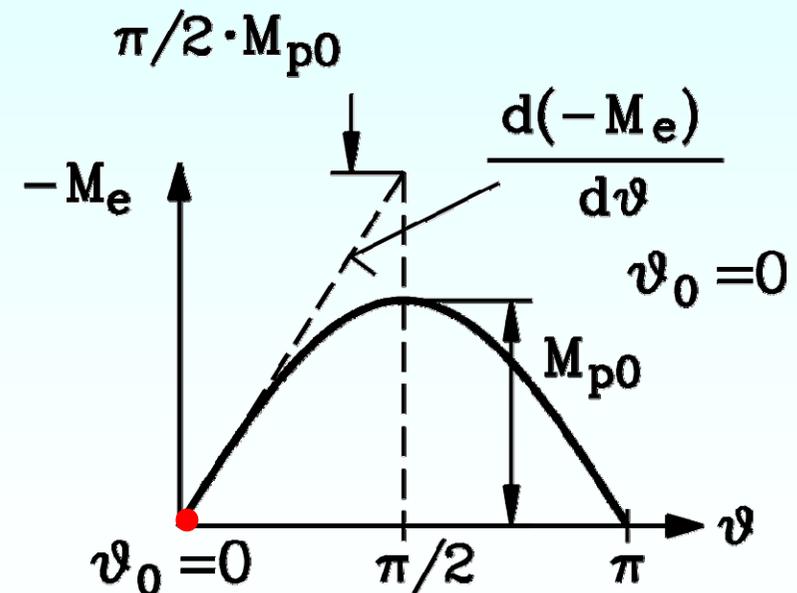
Beispiel: Leerlauf-Arbeitspunkt ($M_e = 0, \vartheta_0 = 0$): $|c_g| = |-M_{p0} \cdot \cos(0)| = M_{p0}$

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

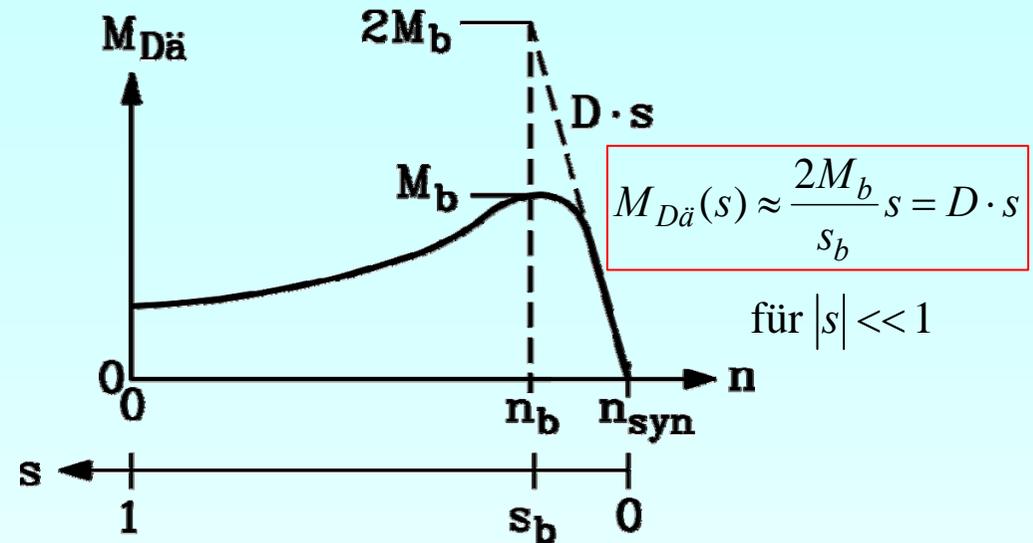
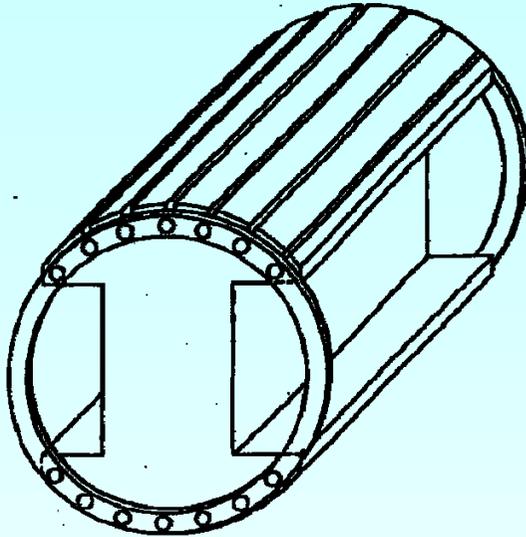
Beispiel: Synchronmotor (Windkanal-Antrieb):

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

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



Elektrisch erregte Synchronmaschinen mit Dämpferwicklung

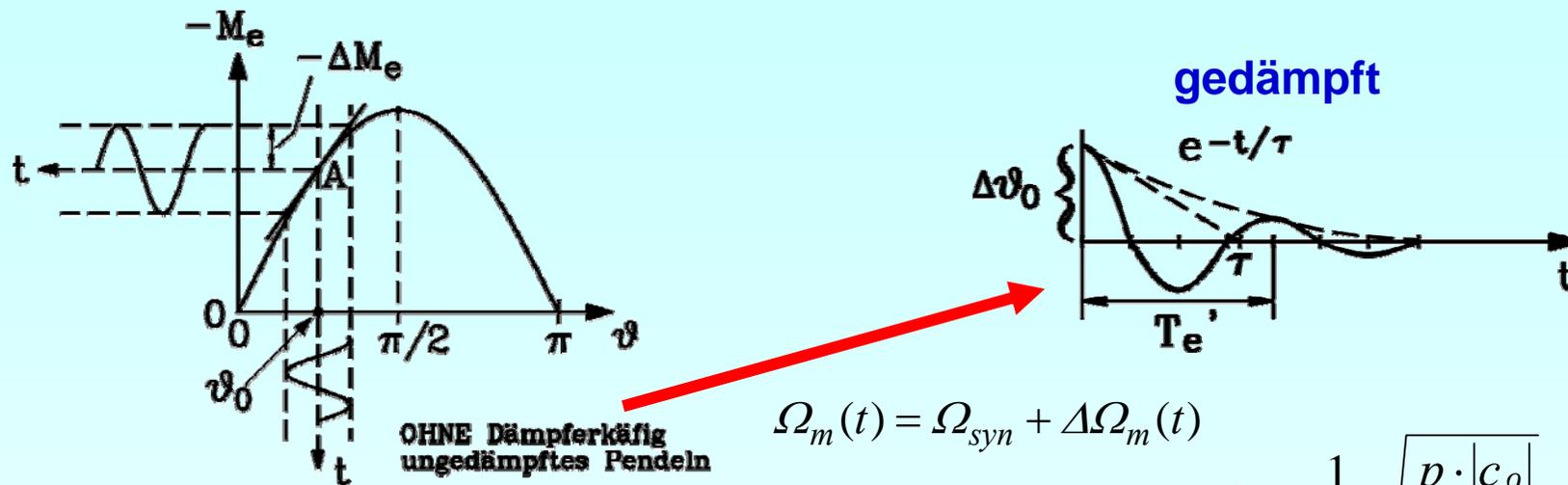


Dämpferkäfig einer zweipoligen Schenkmaschine

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

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

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

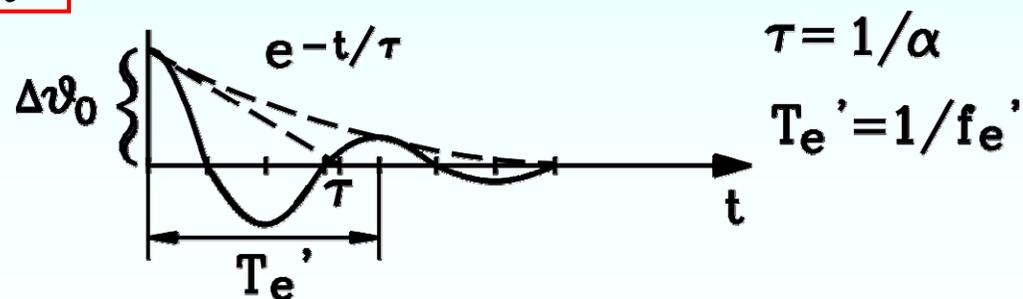
$$\Delta\ddot{\vartheta} + 2\alpha \cdot \Delta\dot{\vartheta} + \omega_e^2 \cdot \Delta\vartheta = 0$$

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

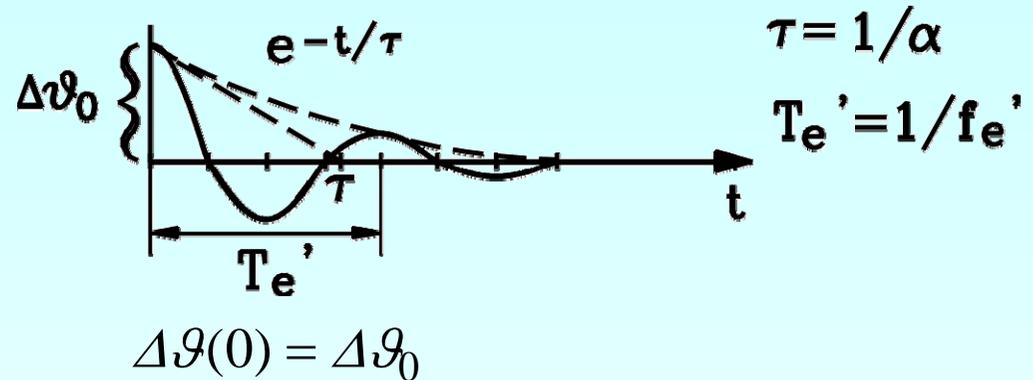
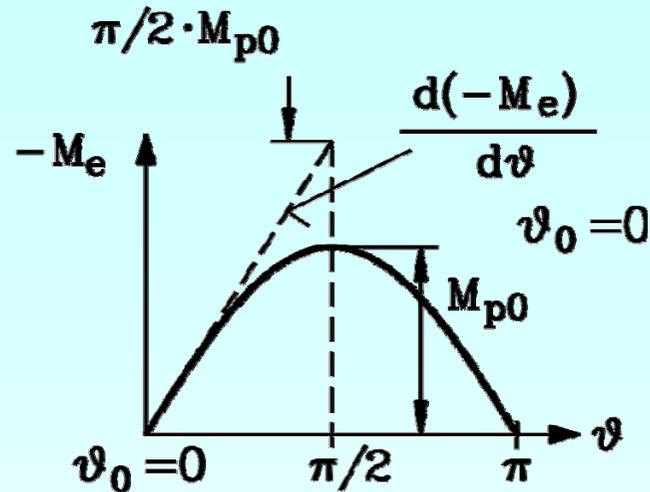
$$\Delta\vartheta(t) = \vartheta(t) - \vartheta_0 = \Delta\vartheta_0 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos(2\pi f_e' t)$$

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

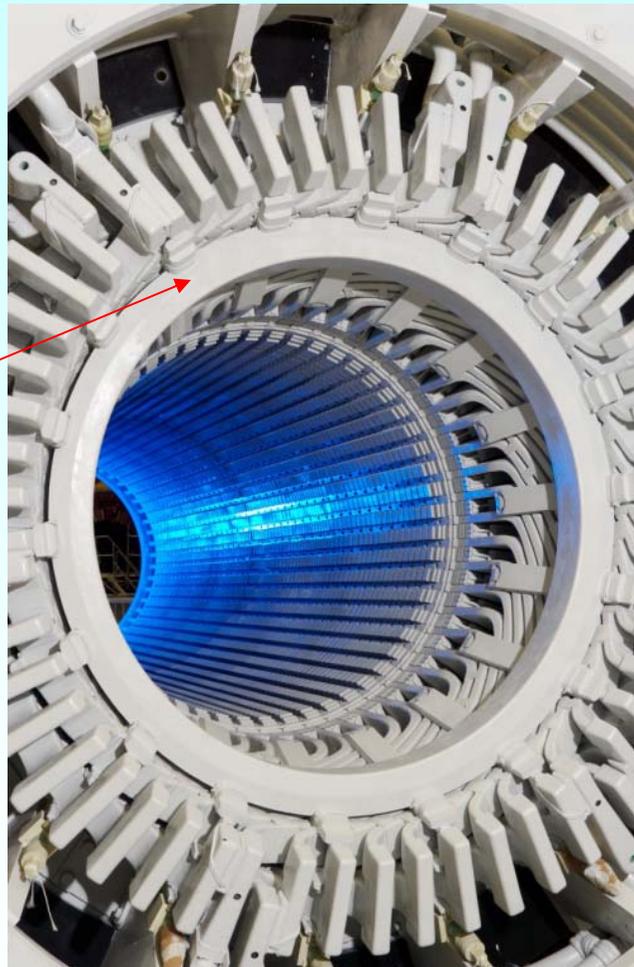
Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



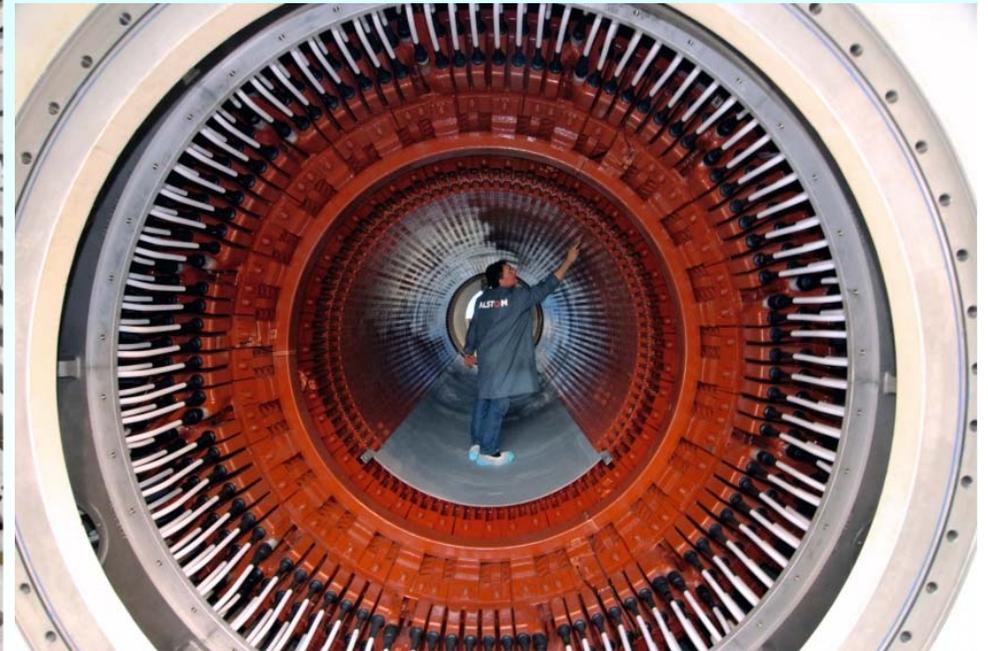
Vollpol-Synchronmaschine – bewickelter isolierter Stator

Zweipoliger
Turbogenerator
ca. 800 MW für
ein
Dampfkraftwerk

Stützringe für die
Wickelkopf-
versteifung
Wasserstoff-
Gaskühlung



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



Quelle:

ALSTOM

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



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

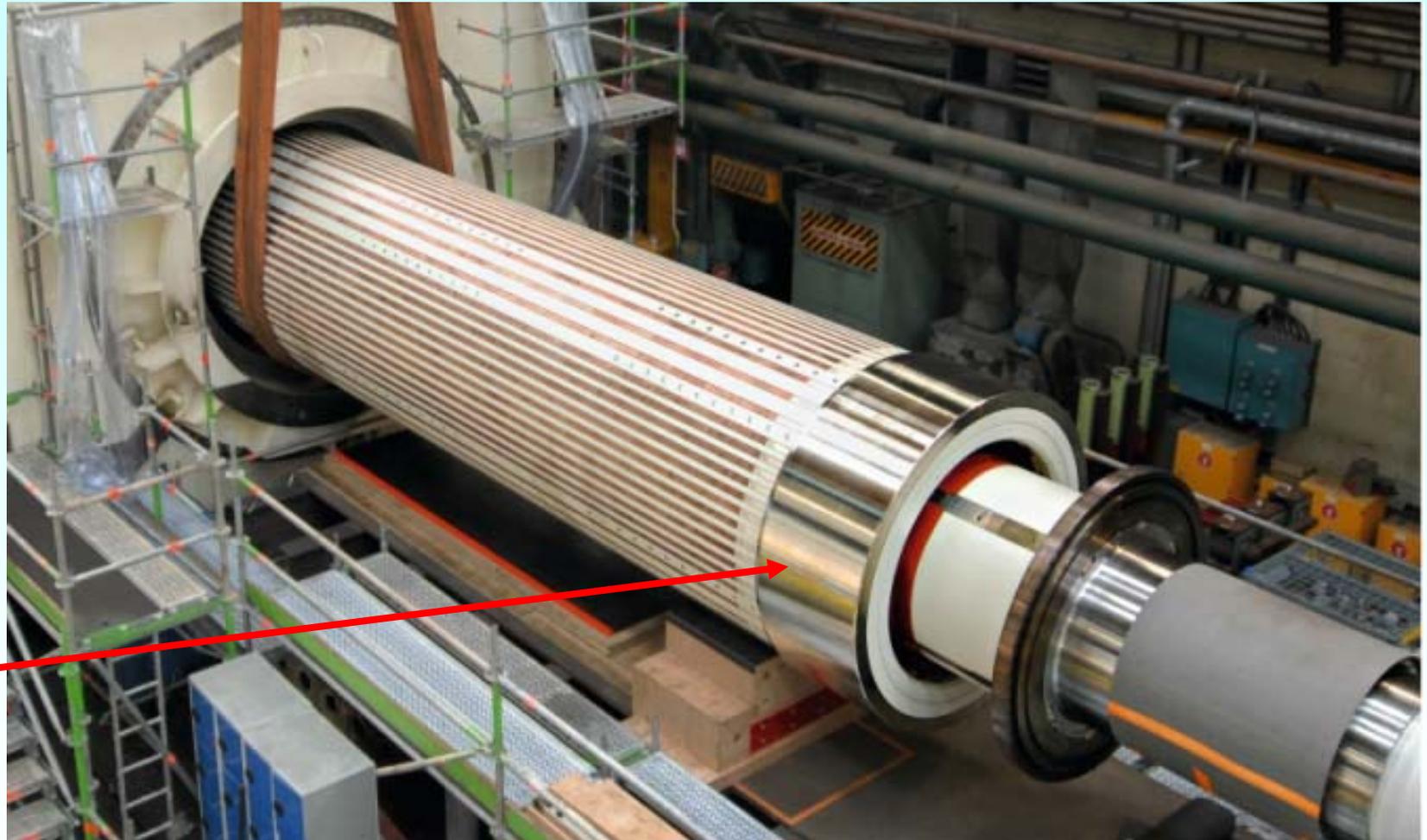
Vierpoliger
Turbo-
Generator

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°
- 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

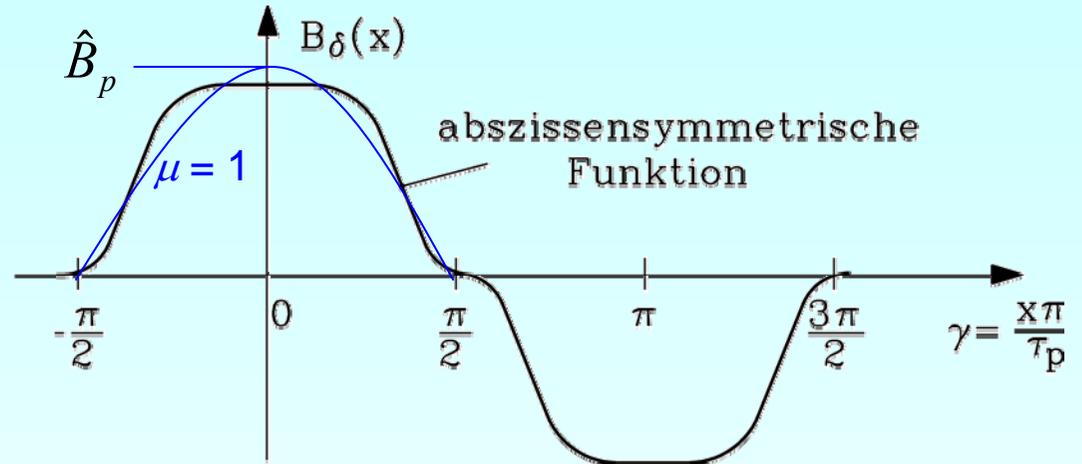
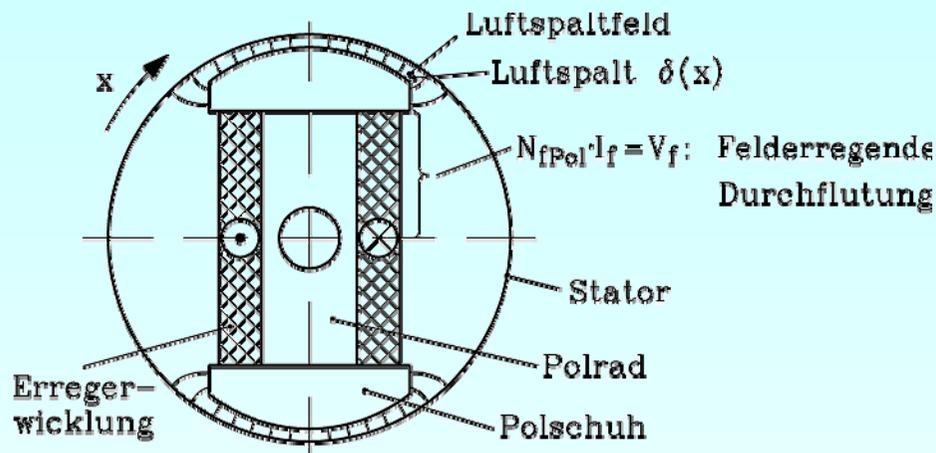
8.4 Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

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**")

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

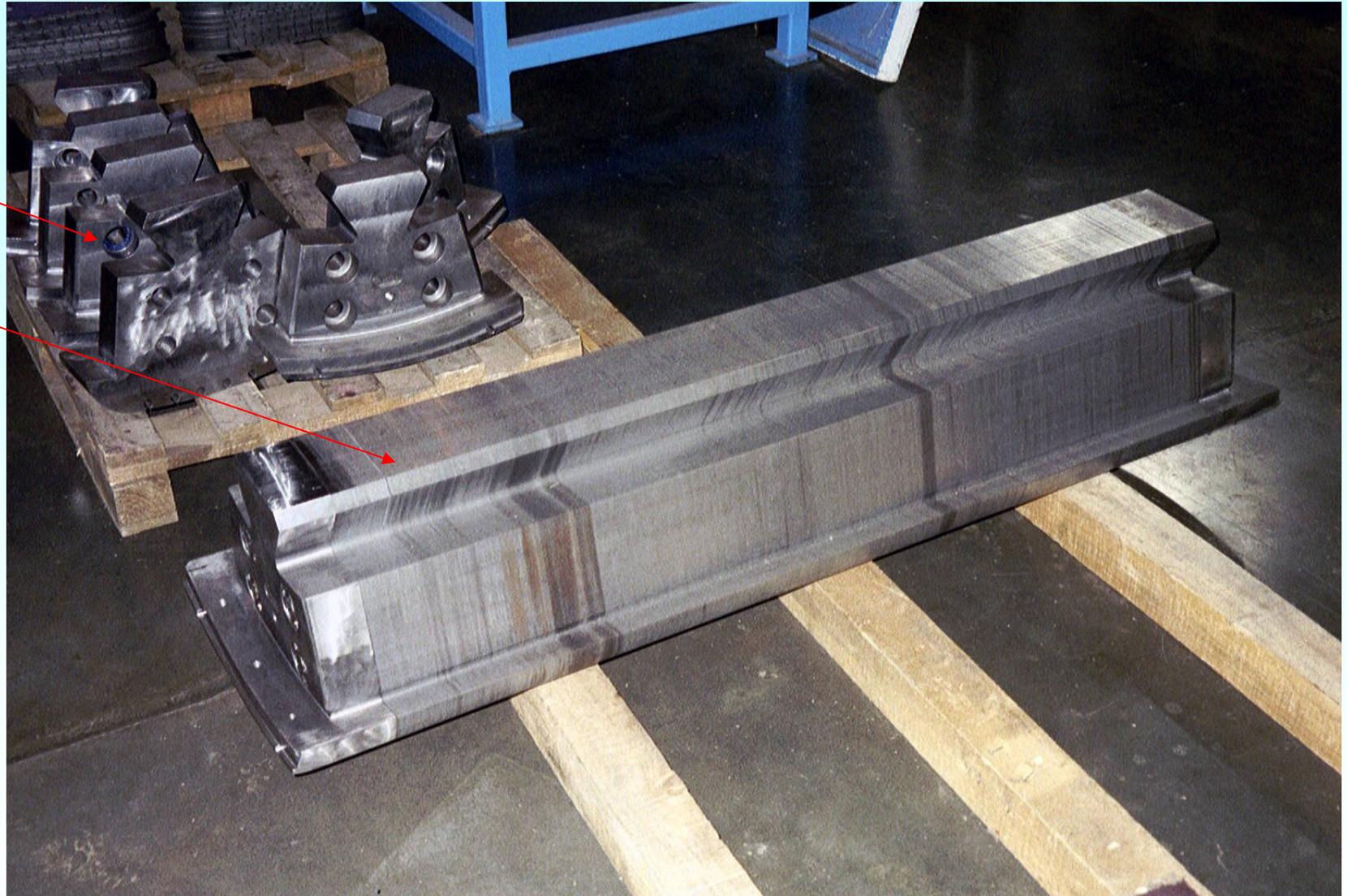
mit der **Frequenz** $f_s = n \cdot p$

Rotor-Schenkelpole während der Fertigung (unbewickelt)

Massive
Polpress-
platten

Schwalben-
schwanzbe-
festigung im
Rotorjoch

Rotorbleche
werden
durch
Pressplatten
fixiert



Quelle:

Andritz Hydro,
Bhopal, Indien

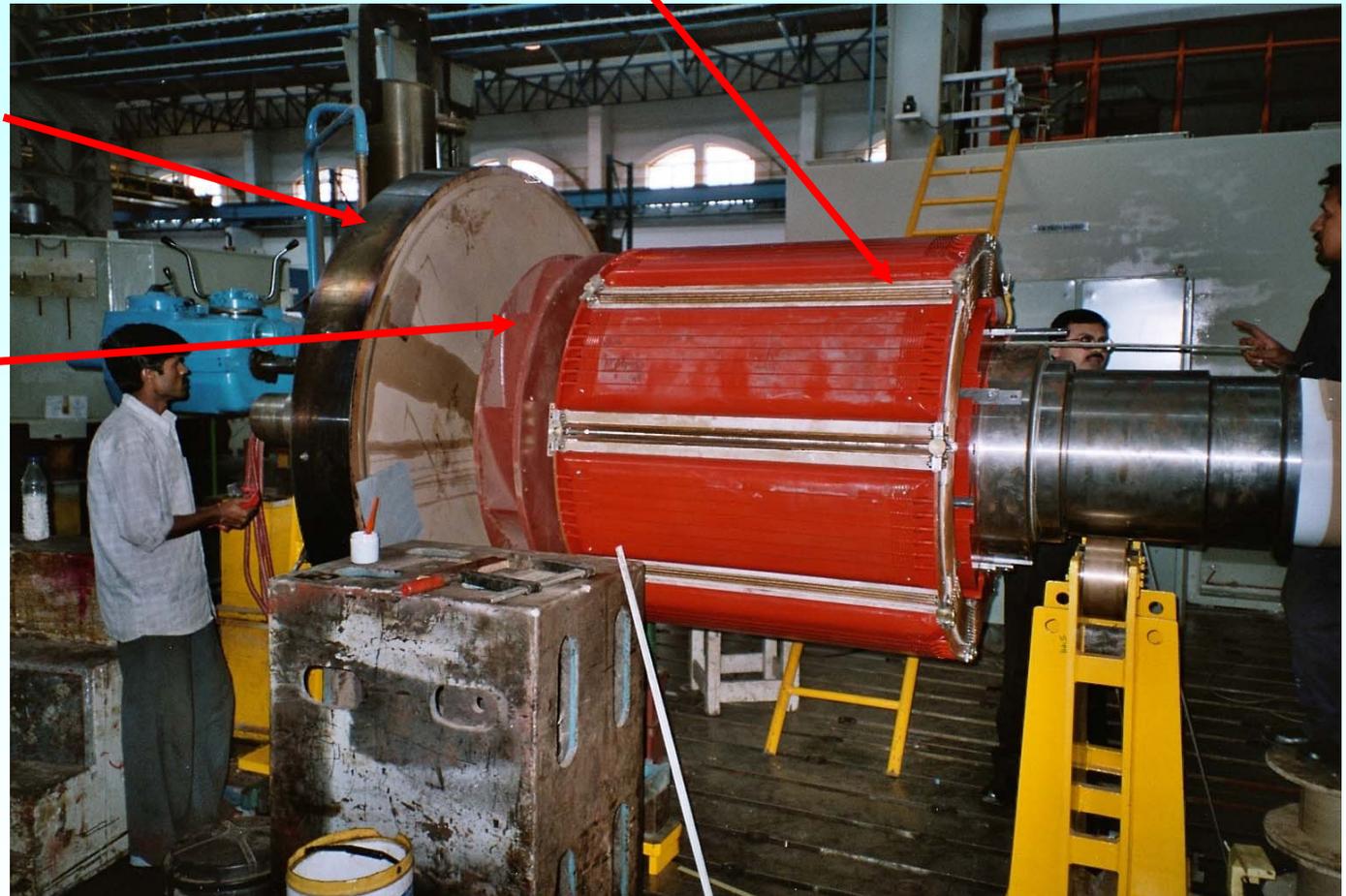
Komplettiertes Polrad mit Schenkelpolen, Lüfter und Schwungrad, 8-polig

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

Vierpoliger Schenkelpollläufer mit Massivpolen für Motorbetrieb mit asynchronem Netzanlauf

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

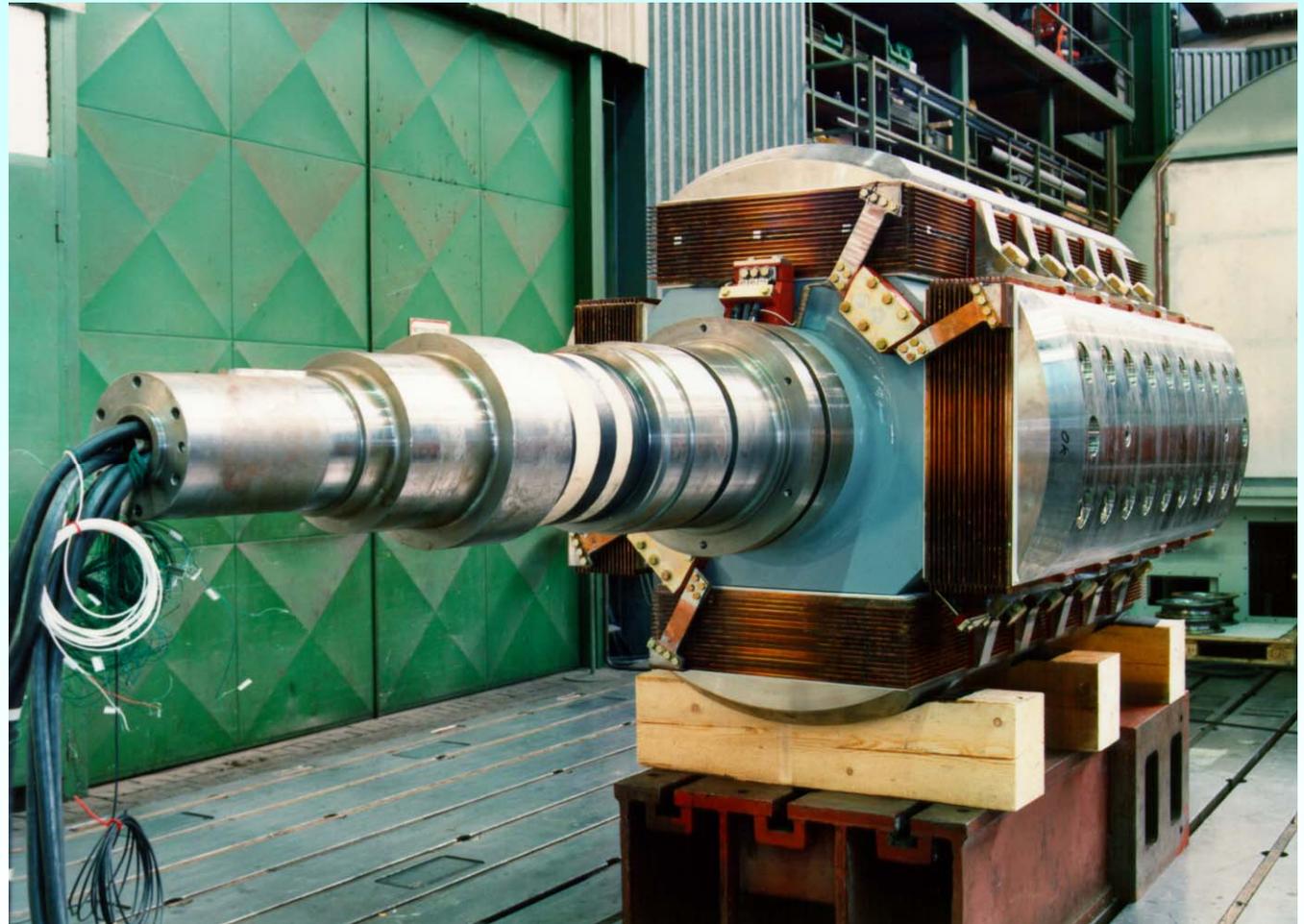
-Bei asynchronem Netzanlauf induziert das Ständerfeld in die massiven Läuferpolschuhe Wirbelströme.

- Diese Wirbelströme erzeugen mit dem Ständerfeld das Anlaufmoment.

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

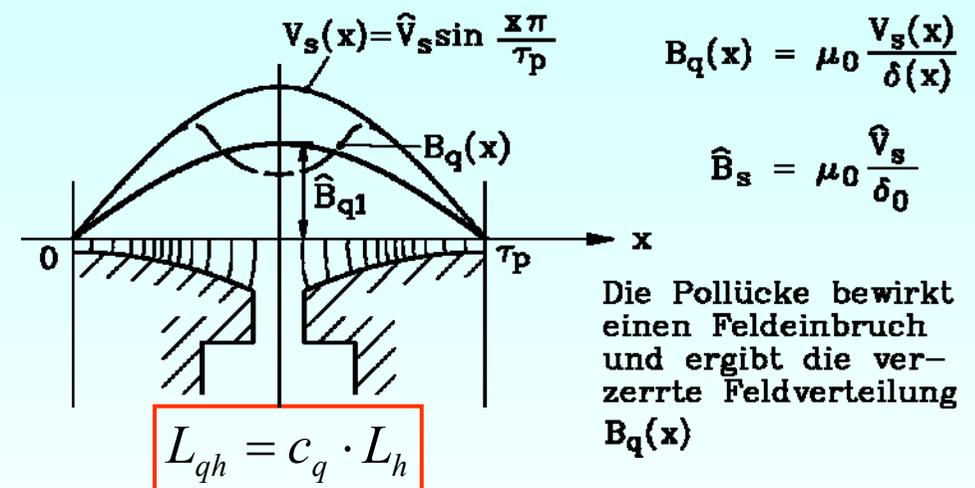
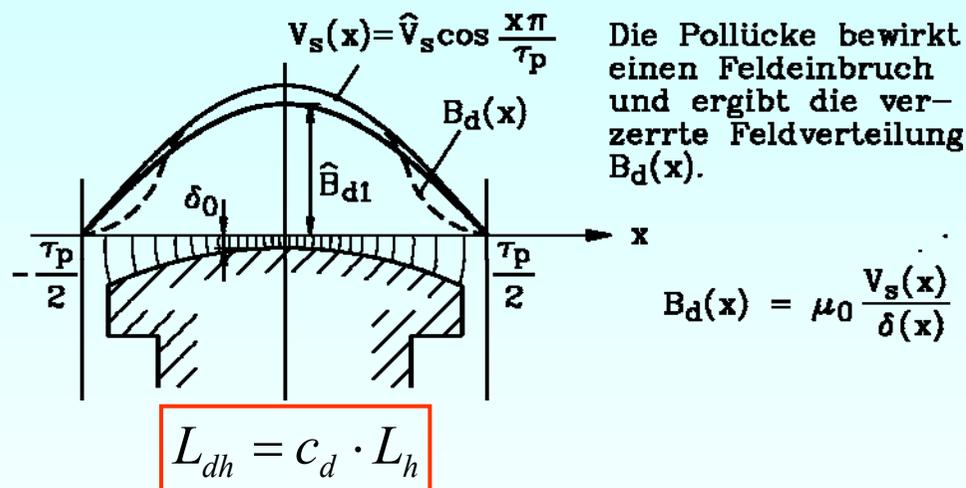
Quelle:

Andritz Hydro,
Österreich



Schenkelpolmaschine: Ständerluftspaltfeld & Hauptinduktivität

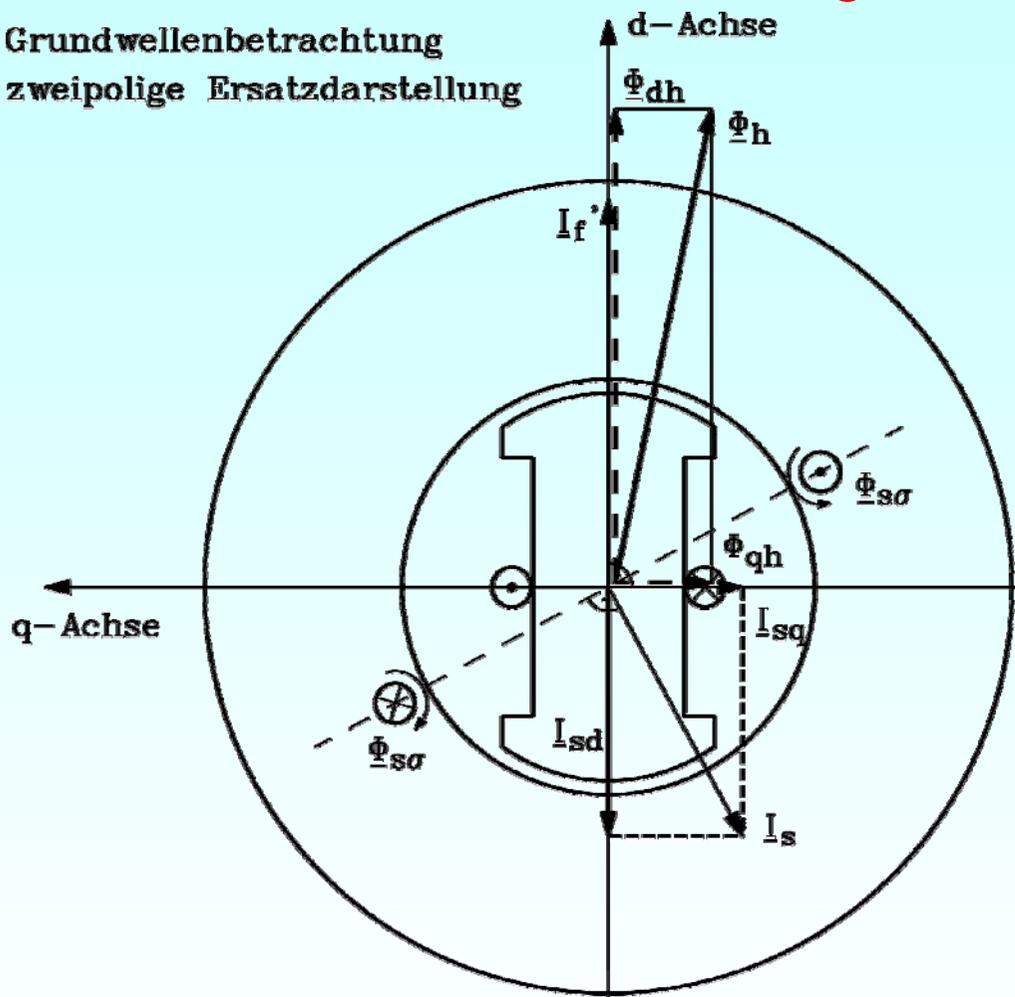
- Ständerwicklung:** Sie ist Drehfeldwicklung wie bei Asynchronmaschine, ABER der Luftspalt ist in der **Pollücke (q-Achse) GRÖßER** als in der **Polachse (d-Achse)**. Daher ist bei gleicher magnetischer Spannung V_s (Grundwelle $\nu = 1$) das zugehörige Luftspaltfeld in der q-Achse **KLEINER** als in der d-Achse.



- Ständerfeld in d-Achse:** Grundwellenamplitude **etwas** kleiner als bei konstantem Luftspalt δ_0 : $c_d = \hat{B}_{d1} / \hat{B}_s < 1$ **daher:** $L_{dh} \approx 0.95 \cdot L_h$
- Ständerfeld in q-Achse:** Grundwellenamplitude **um ca. 50%** kleiner als bei konstantem Luftspalt δ_0 : $c_q = \hat{B}_{q1} / \hat{B}_s \approx 0.4 \dots 0.5 < 1$ $L_{qh} \approx (0.4 \dots 0.5) \cdot L_h$

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 Φ_{dh} .

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

- **Selbstinduktionsspannung:** Zwei um
 90° phasenverschobene Komponenten:

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

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

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

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

Ständer-Spannungsgleichung der Schenkelpolmaschine

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

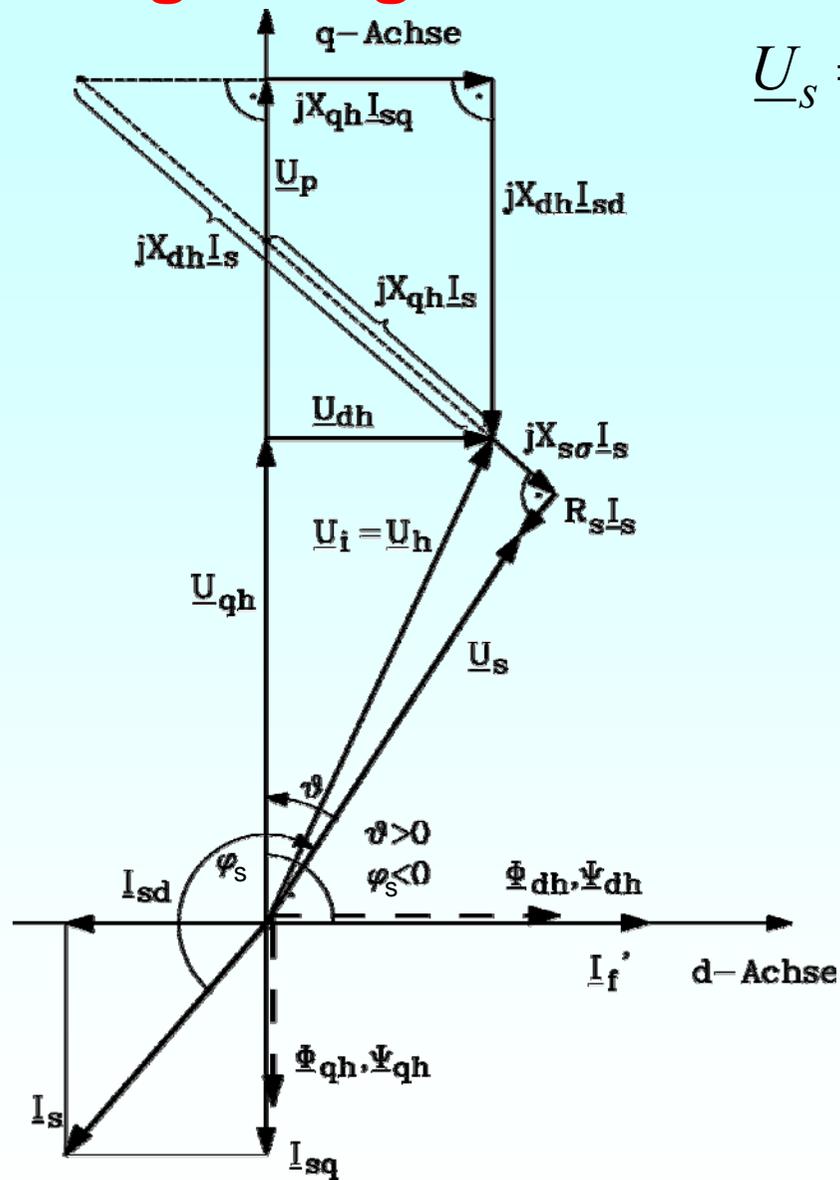
$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_{qh} \underline{I}_{sq} + j\omega_s L_{dh} \underline{I}_{sd} + \underline{U}_p \quad \underline{U}_p = j\omega_s L_{dh} \underline{I}'_f$$

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

- 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 ϑ ,

- Phasenwinkel φ_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:

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

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

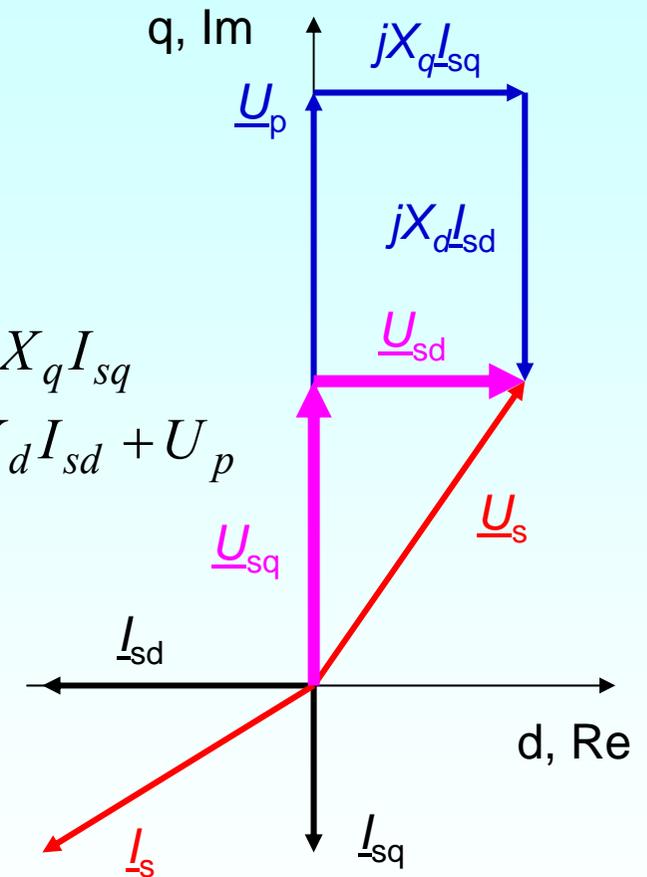
$$U_{sd} = -X_q I_{sq}$$

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

- **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

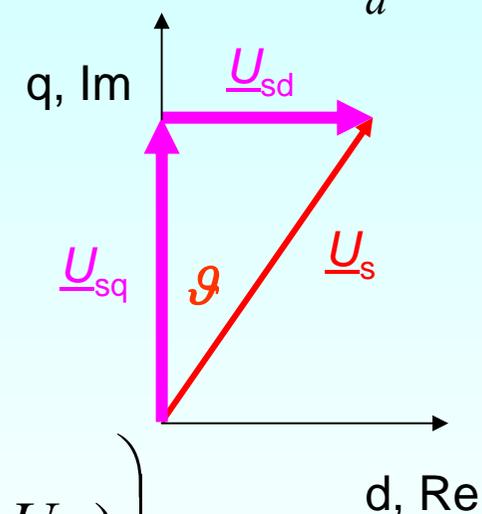
b) "**Reluktanz**"moment wegen $X_d \neq X_q$.

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

Drehmoment als Funktion des Polradwinkels ϑ

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

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



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

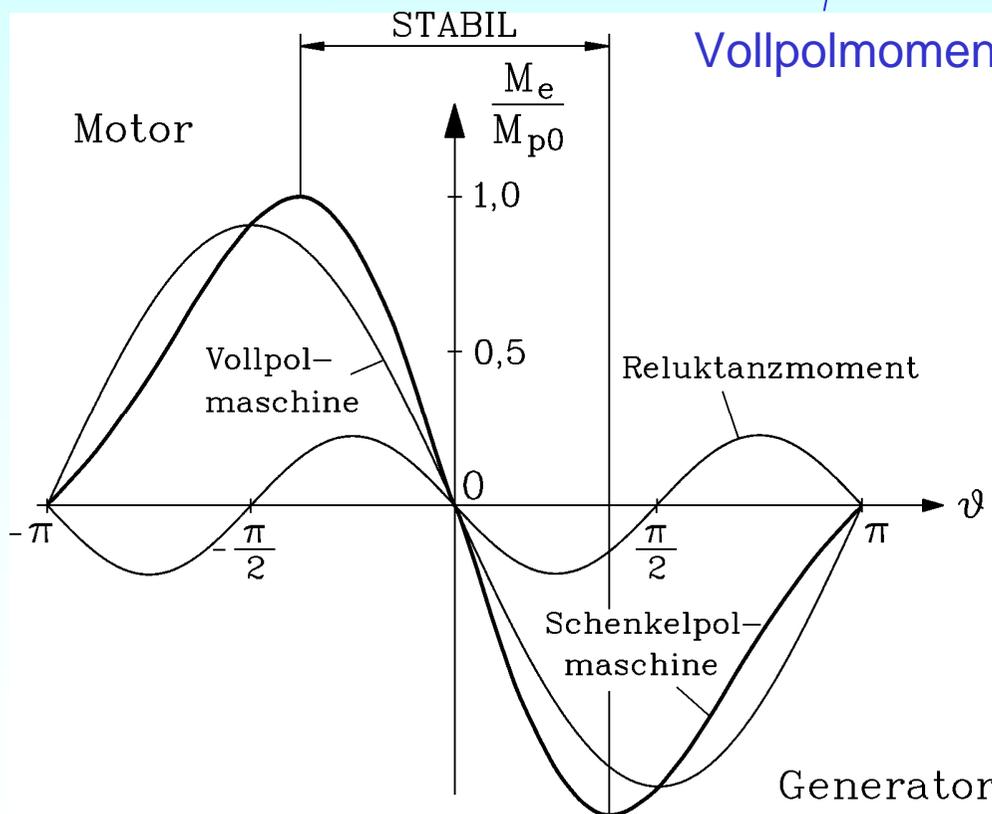
$$= \frac{m_s}{\Omega_{syn}} \cdot \left(-\frac{U_p U_s \sin \vartheta}{X_q} - \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cdot U_s \sin \vartheta \cdot (U_s \cos \vartheta - U_p) \right)$$

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

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

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

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



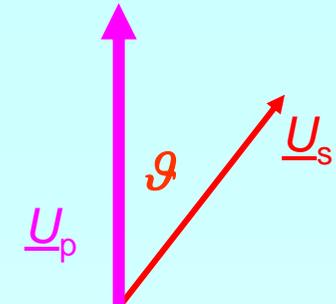
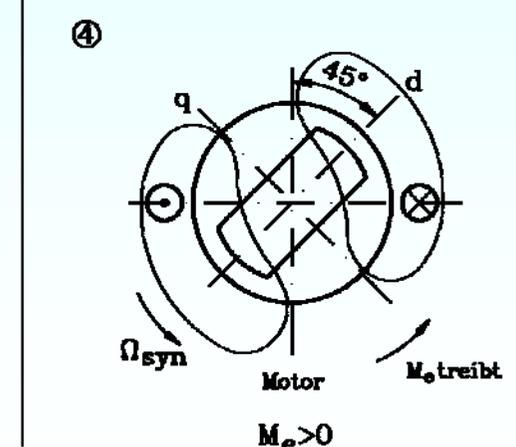
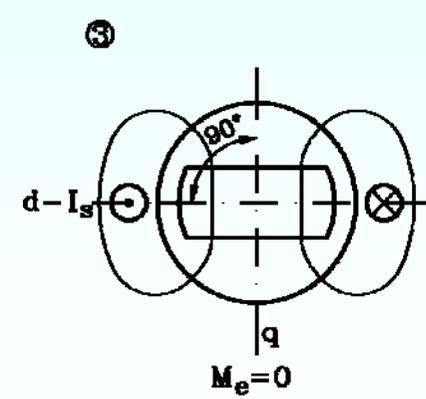
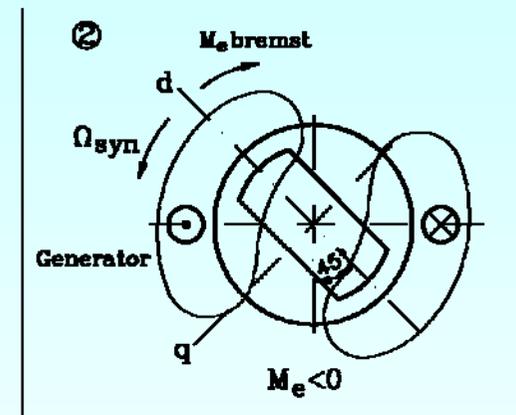
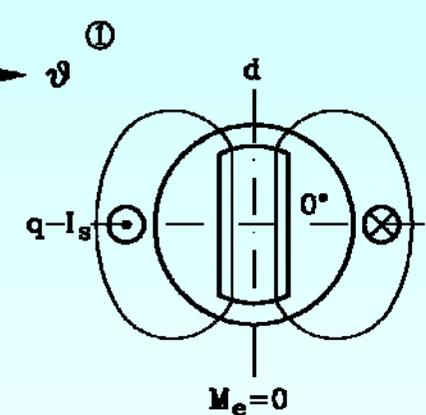
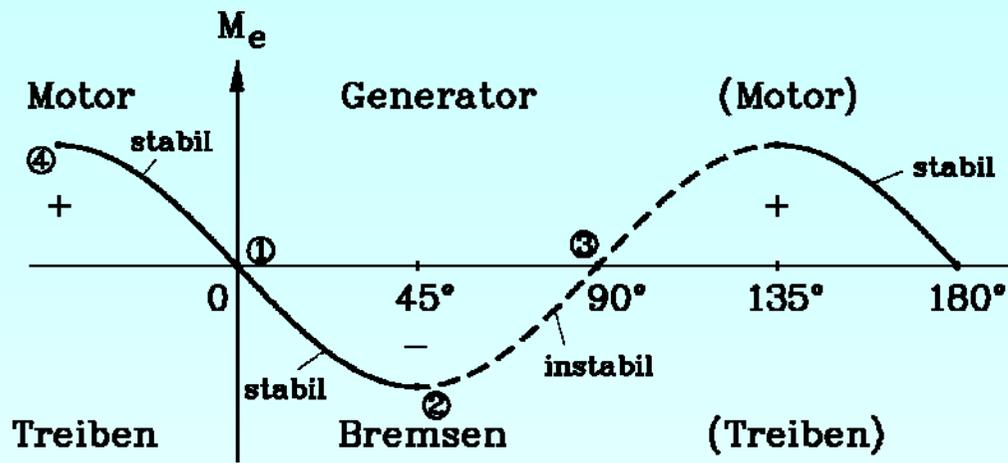
Vollpolmoment Reluktanzmoment

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

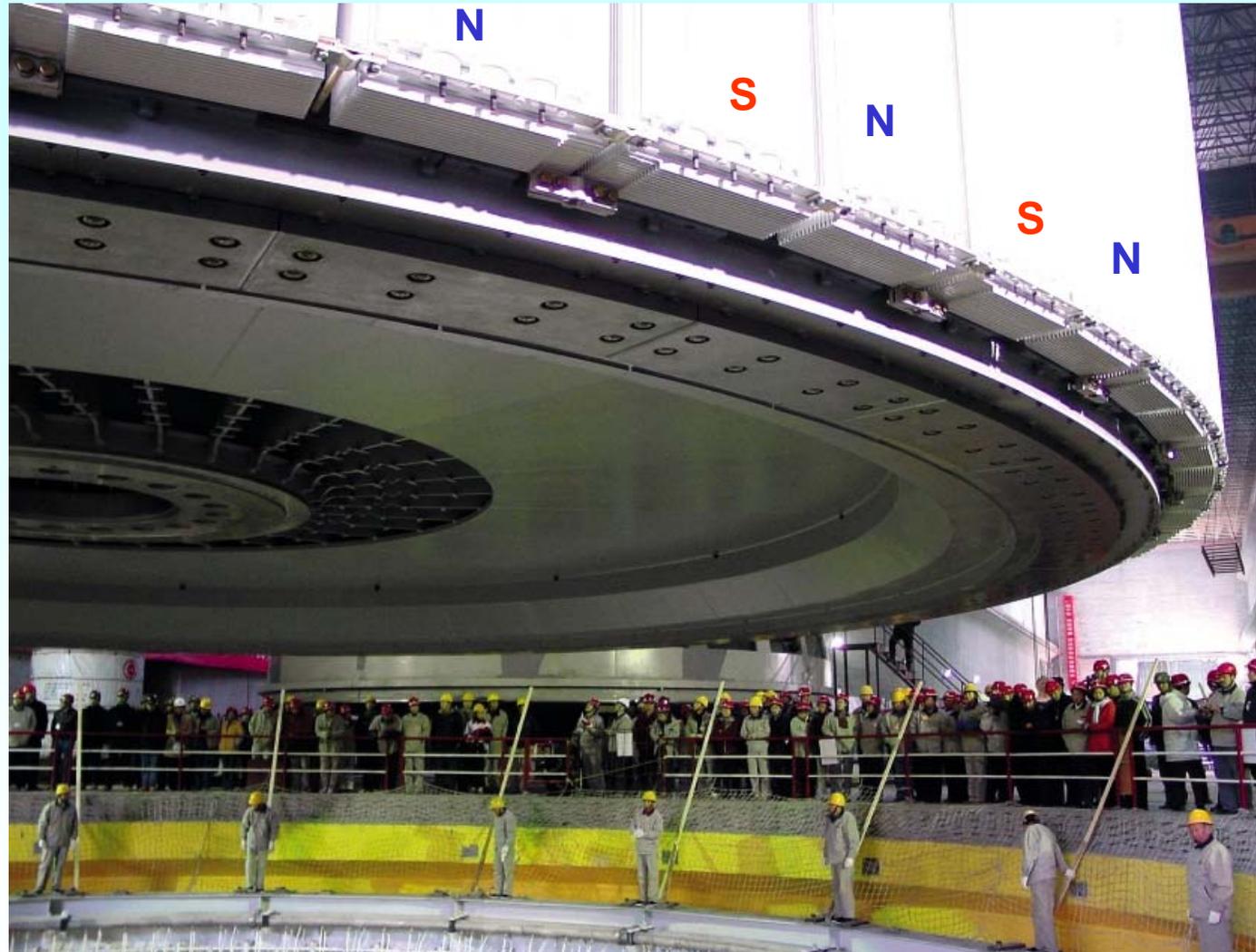
Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



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)

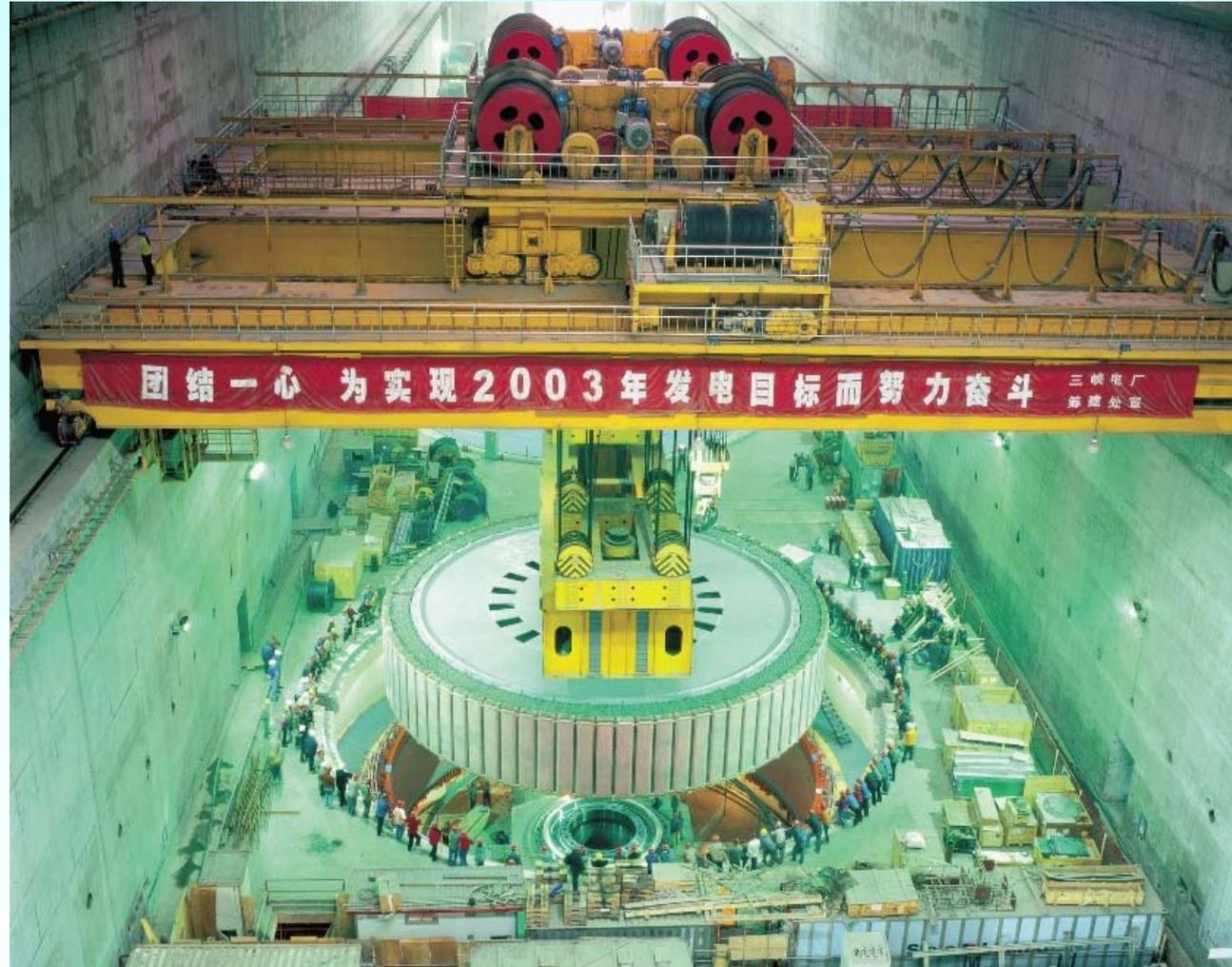
Wasserkraftgenerator

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

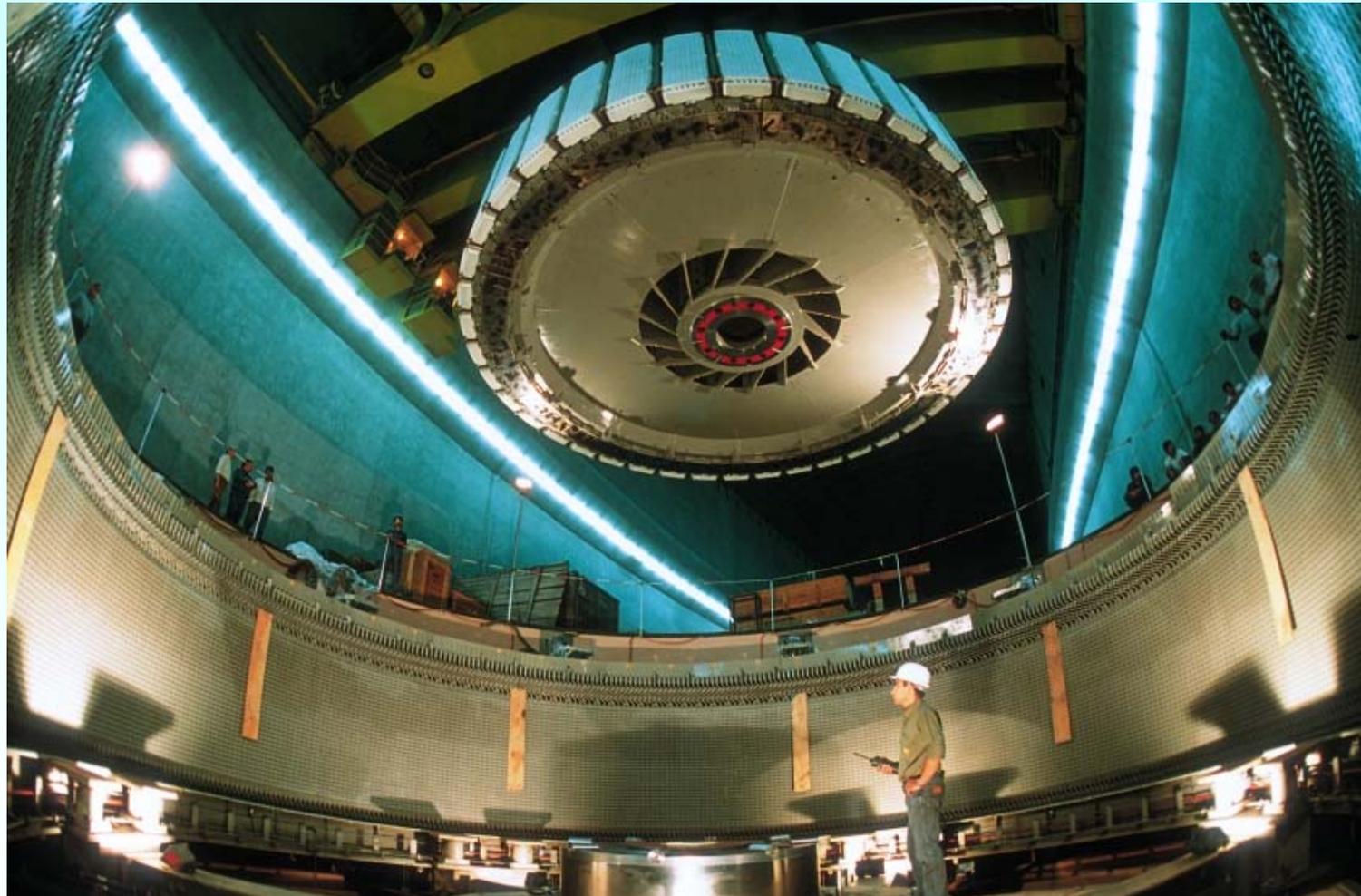
*Karakaya
(Türkei)*

315 MVA
40 polig

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

Quelle:

ALSTOM



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

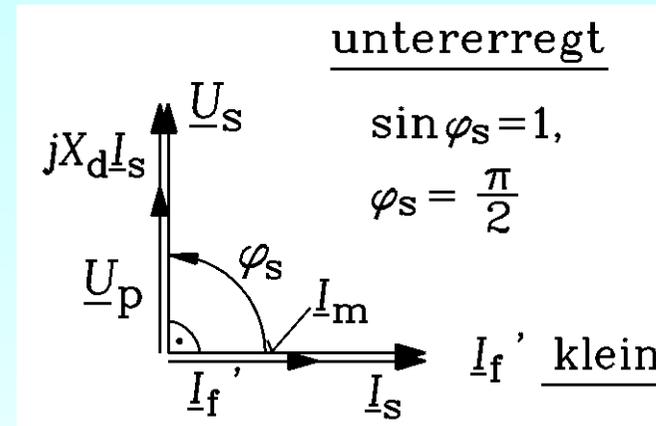
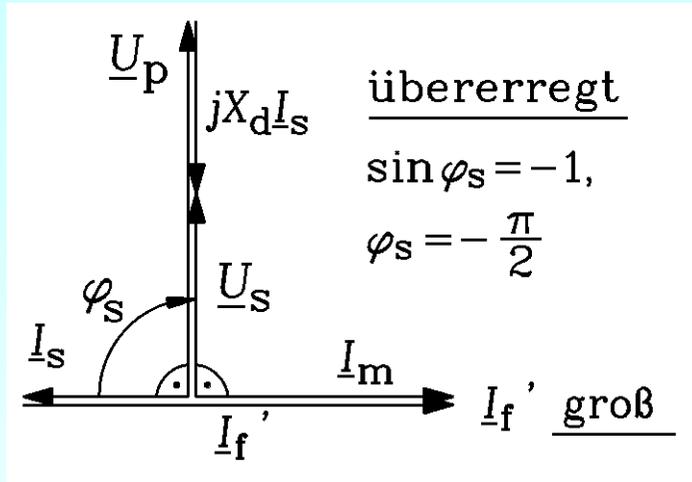
Prof. A. Binder : Elektrische Maschinen und Antriebe
8/61

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

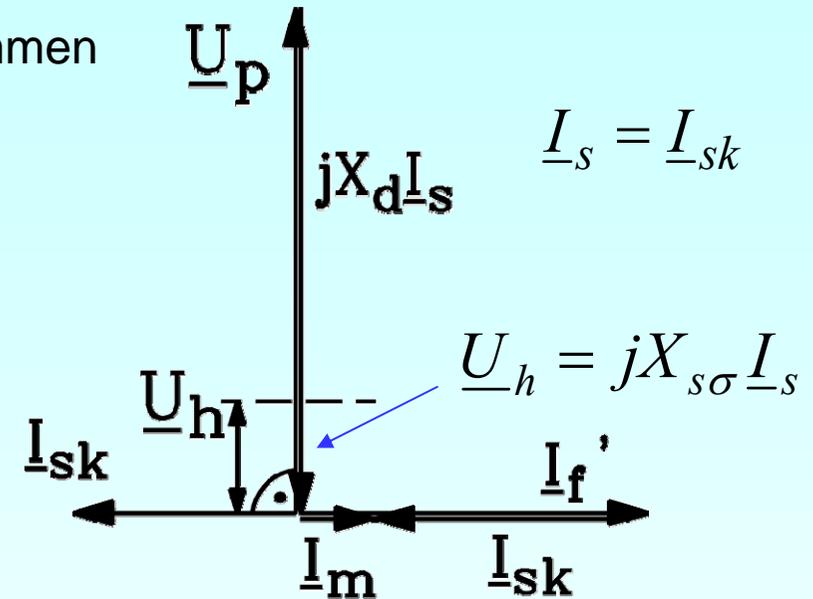
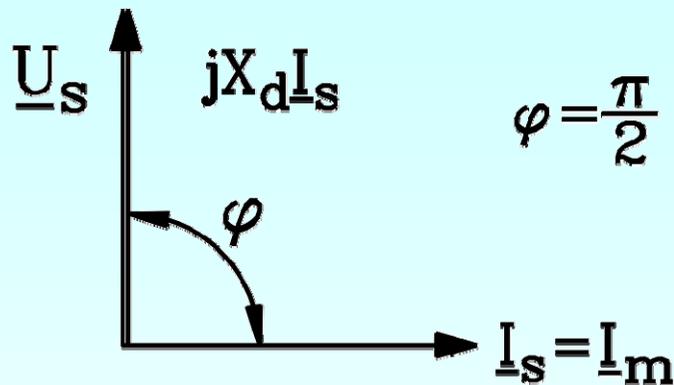
$$R_s = 0: \quad \underline{U}_s = \underline{U}_p + jX_d \underline{I}_s \quad \underline{I}_{sq} = 0, \underline{I}_s = \underline{I}_{sd}$$

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

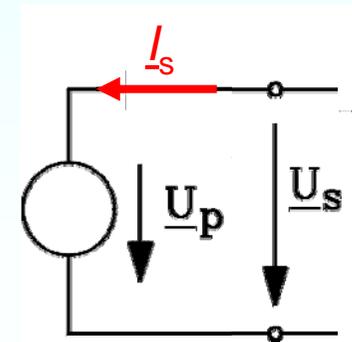
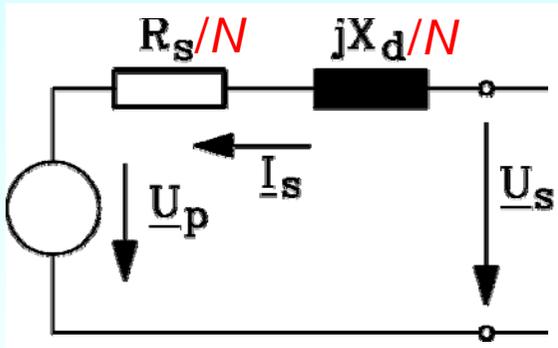
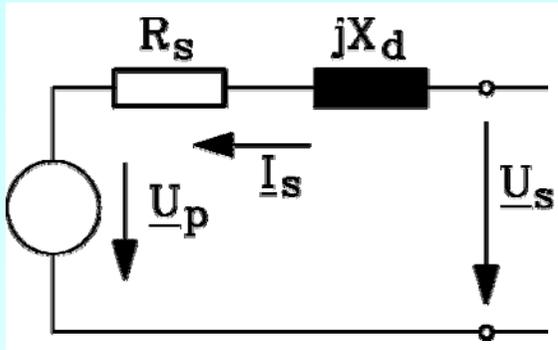
$$R_s = 0: \quad \underline{U}_s = jX_d \underline{I}_s$$

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°
- 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

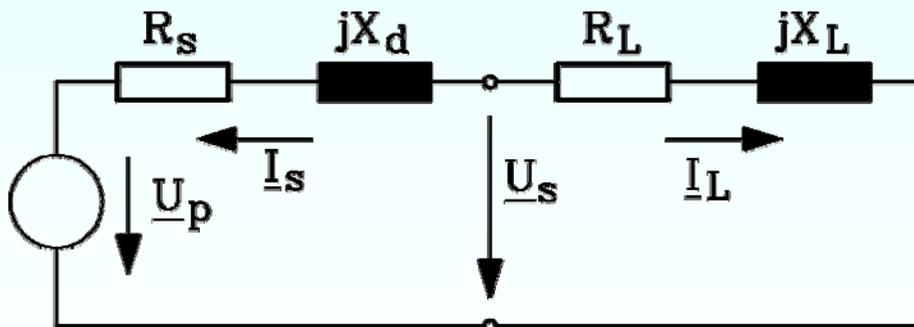
8.5 Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz

(8.6 Verlustbilanz bei Synchronmaschinen)

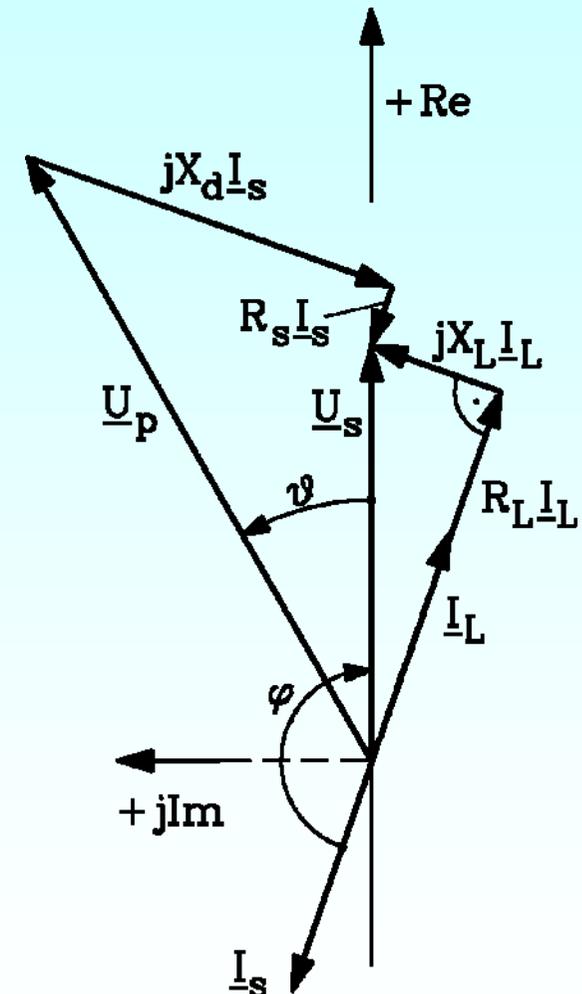
8.7 Synchrongeneratoren im Inselbetrieb

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 $\underline{I}_L = -\underline{I}_s$)

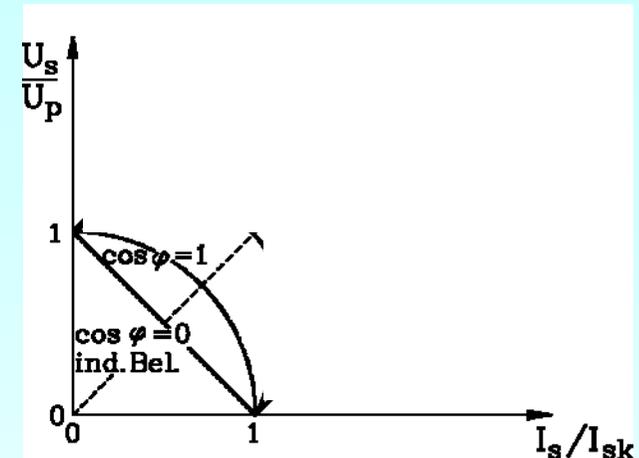


Lastimpedanz: allgemein \underline{Z}_L (hier: $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$)



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 !

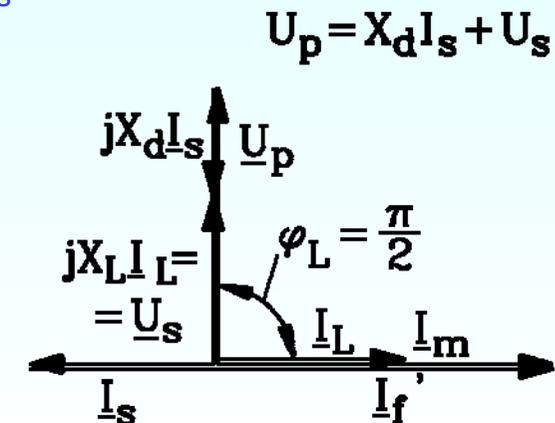
$$\underline{Z}_L = j\omega L_L = jX_L$$

$$U_p = U_s + X_d I_s$$

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

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

$$u = 1 - i$$



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

- Ohm'sche Last:

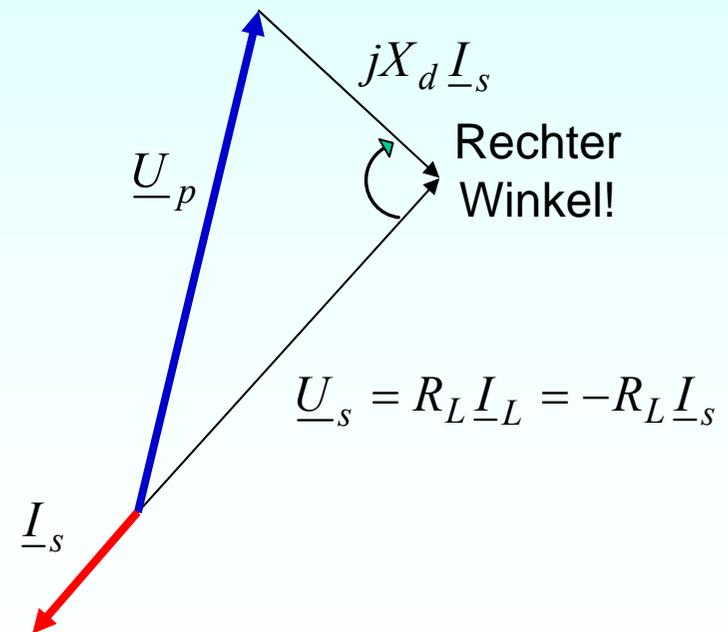
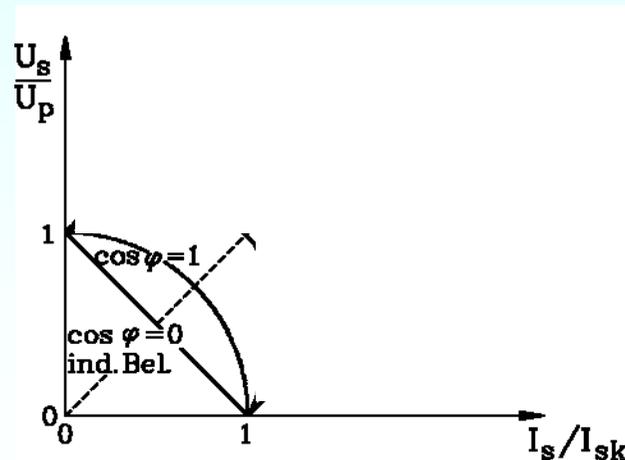
Das Zeigerdiagramm zeigt, dass die Spannungsfälle ein rechtwinkliges Dreieck ergeben:

Pythagoras:

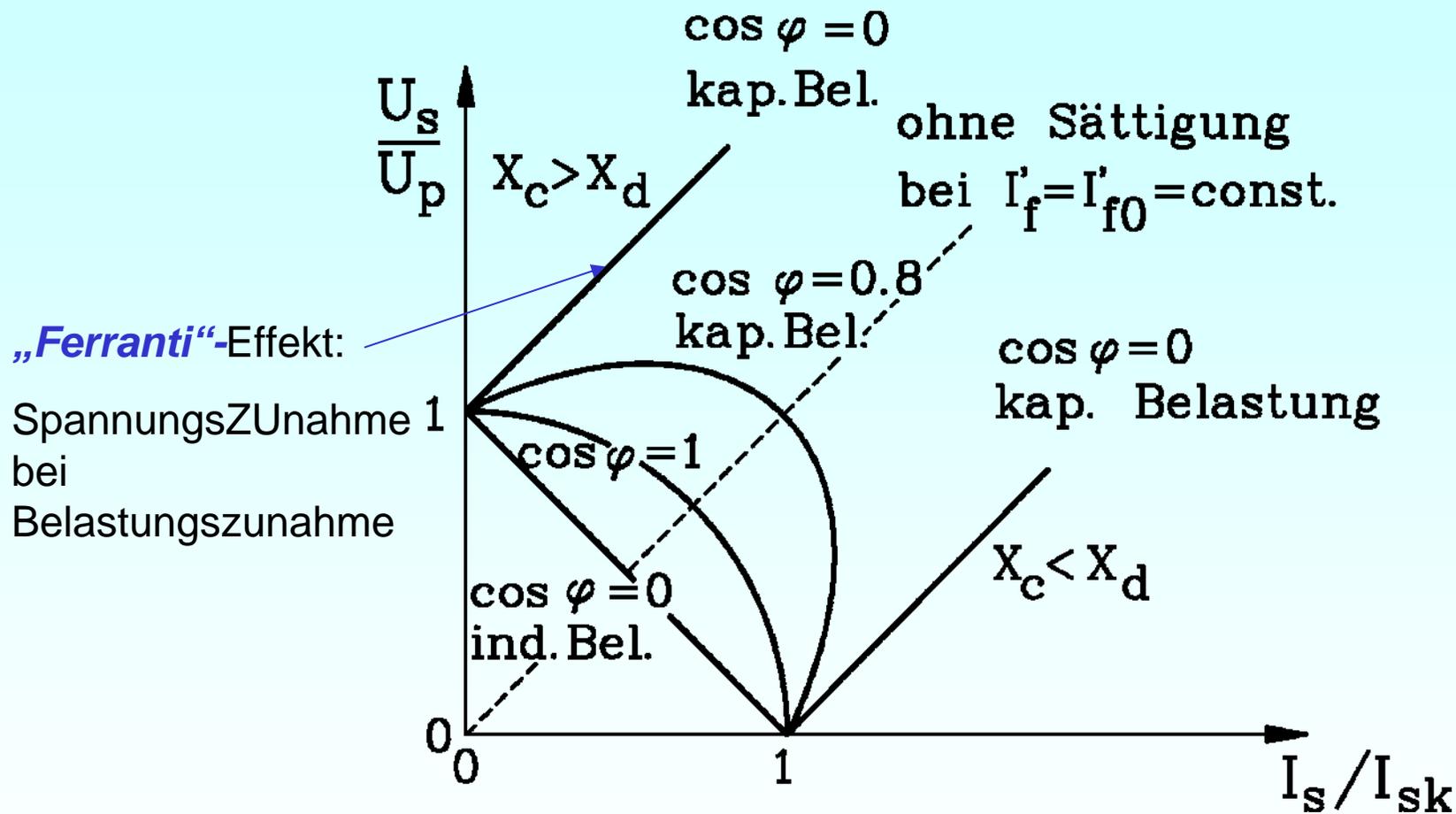
$$U_p^2 = U_s^2 + (X_d I_s)^2$$

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

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

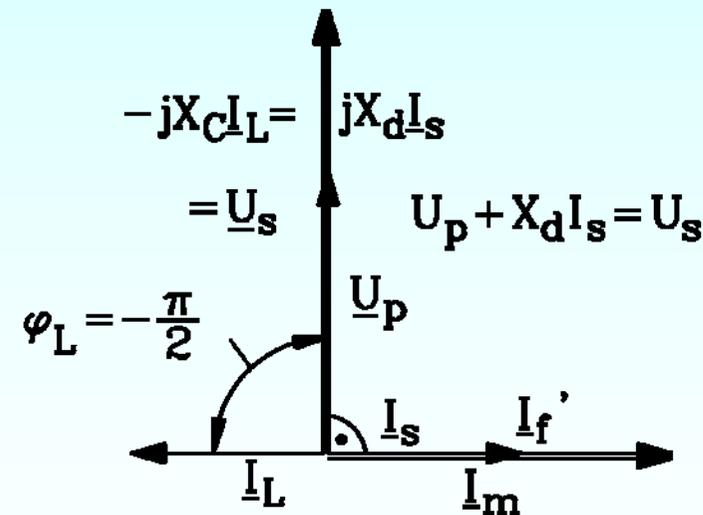
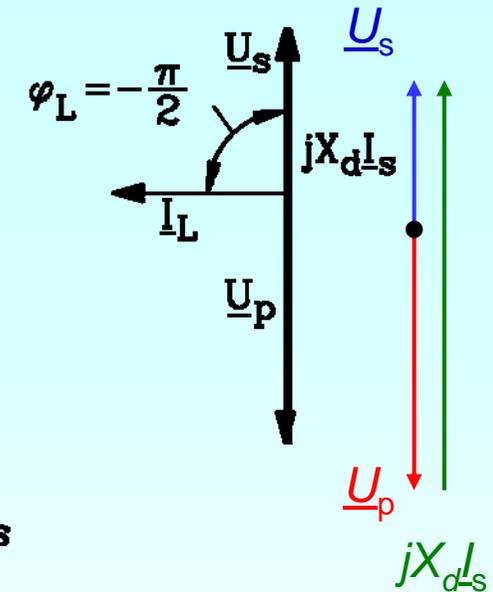
$$-U_p = U_s - X_d I_s$$

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

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

$$U_p = U_s - X_d I_s$$

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



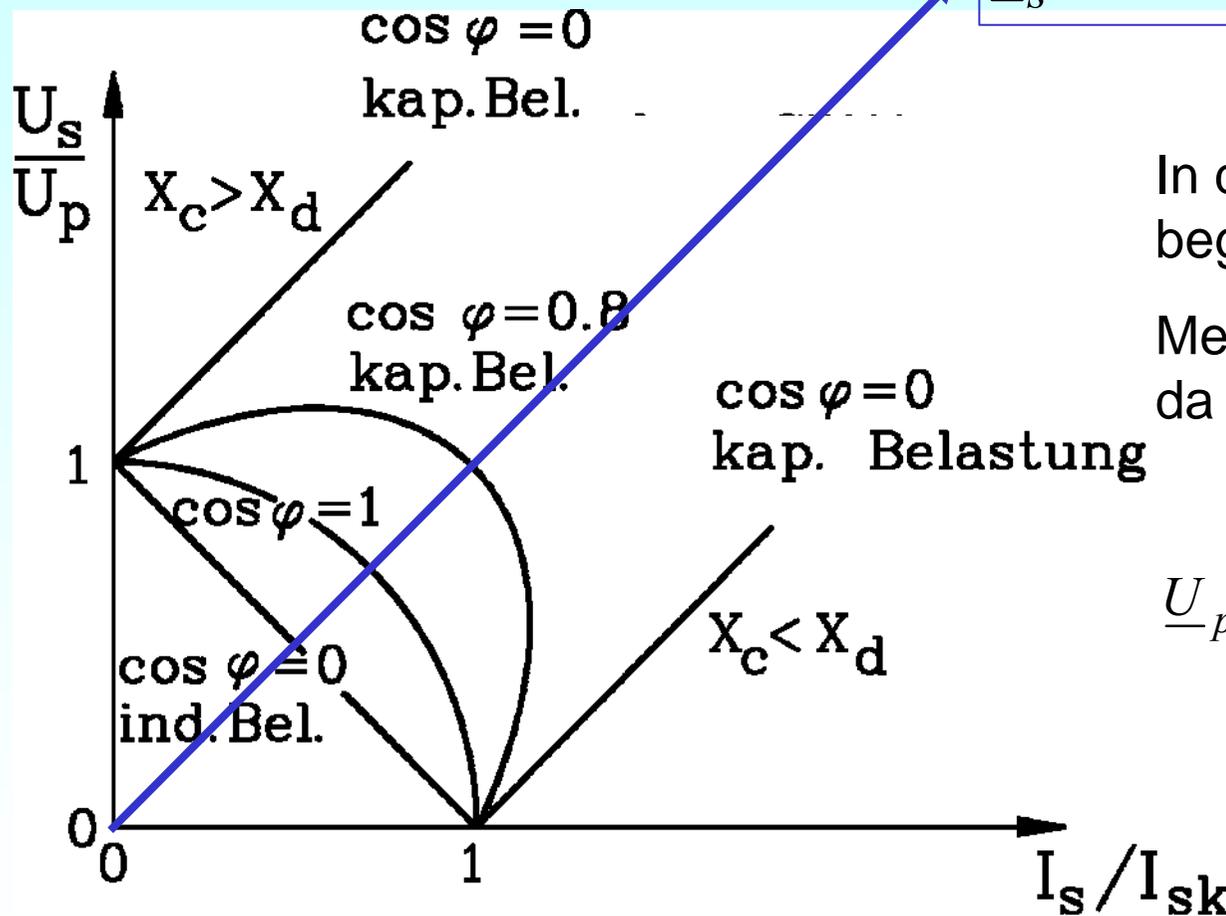
MEIST Fall b), da C klein ist!

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!

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

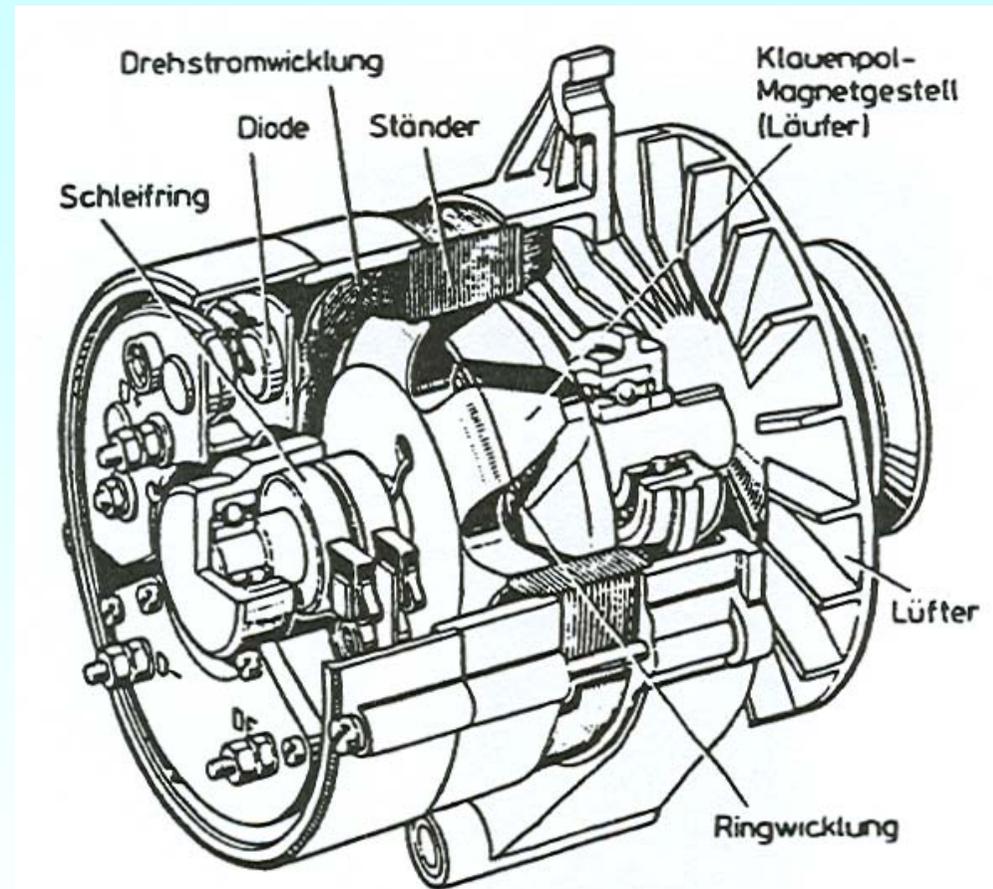
$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_p}{j(X_C - X_d)}$$

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