

# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

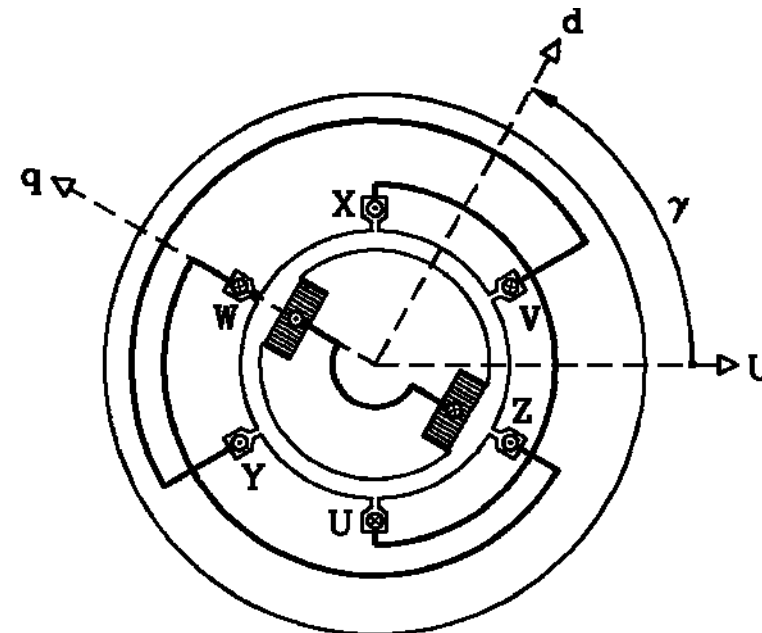
ECPE-Kurs „Die fremderregte Synchronmaschine“, Nürnberg, 1.-2. 7. 2014

**Andreas Binder**

**TU Darmstadt**

Institut für Elektrische Energiewandlung

[abinder@ew.tu-darmstadt.de](mailto:abinder@ew.tu-darmstadt.de)



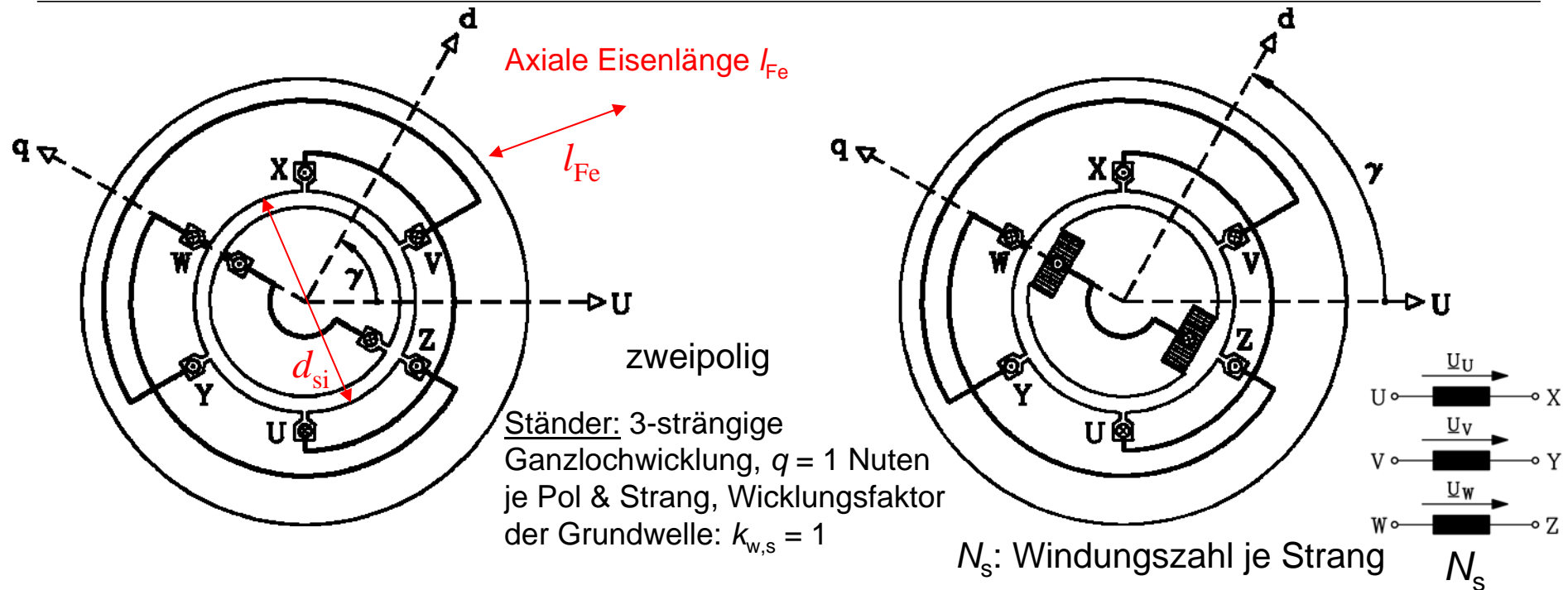
# Inhalt

- Ständer-Leerlaufspannung
- Ständer-Kurzschlussstrom
- Erregerstrom im Läufer
- Berechnung der Leerlauf-Kennlinie
- Berechnung der Ständerstreuinduktivität
- Berechnungsbeispiel
- Zusammenfassung

# Synchronmaschine mit Vollpol- und Schenkelpol-Läufer



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



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

**SCHENKELPOL:** Konzentrische Erreger-Wicklung mit  $d$ -Achse; Luftspalt mit Polrücken in  $q$ -Achse

- **Läufer ("Polrad")** hat Gleichstrom-durchflossene Erregerwicklung (Strom  $I_f$ ), die das Läuferfeld erregt.
- Statorstrom  $I_s$  in dreisträngiger Ständerwicklung U, V, W erregt **Ständerdrehfeld**, dessen Grundwelle rotiert mit dem Läufer **gleich schnell** ("synchron").



# Abschätzung der Hauptabmessungen



Bemessungsdaten: Motor: Nennmoment  $M_N$ , Nenndrehzahl  $n_N$   $P_N = 2\pi n_N M_N$

Geschätzter Wirkungsgrad:  $\eta_N$  (z.B.: 0.91, ohne Läufer-Erregerverluste)

$$3U_{sN} I_{sN} \cos \varphi_{sN} = P_N / \eta_N$$

Festlegung von Nenn-Strangspannung und Nenn-Strangstrom  $U_{sN}$ ,  $I_{sN}$

Nennscheinleistung:  $S_N = 3U_{sN} I_{sN} \approx$  innerer Scheinleistung  $S_\delta = 3U_h I_{sN}$

Ausnutzung der Maschine (ESSON-Zahl  $C$ ):  $S_\delta = C \cdot d_{si}^2 l_{Fe} \cdot n_N$

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot k_{w,s} \cdot A \cdot B_\delta \quad k_{w,s} \approx 0.95 \quad B_\delta \approx 0.9T \quad A = \frac{2 \cdot m \cdot N_s \cdot I_{sN}}{d_{si} \pi} \quad m = 3$$

Kühlart legt effektiven Strombelag fest: z. B.: Flüssigkeitsmantelkühlung:

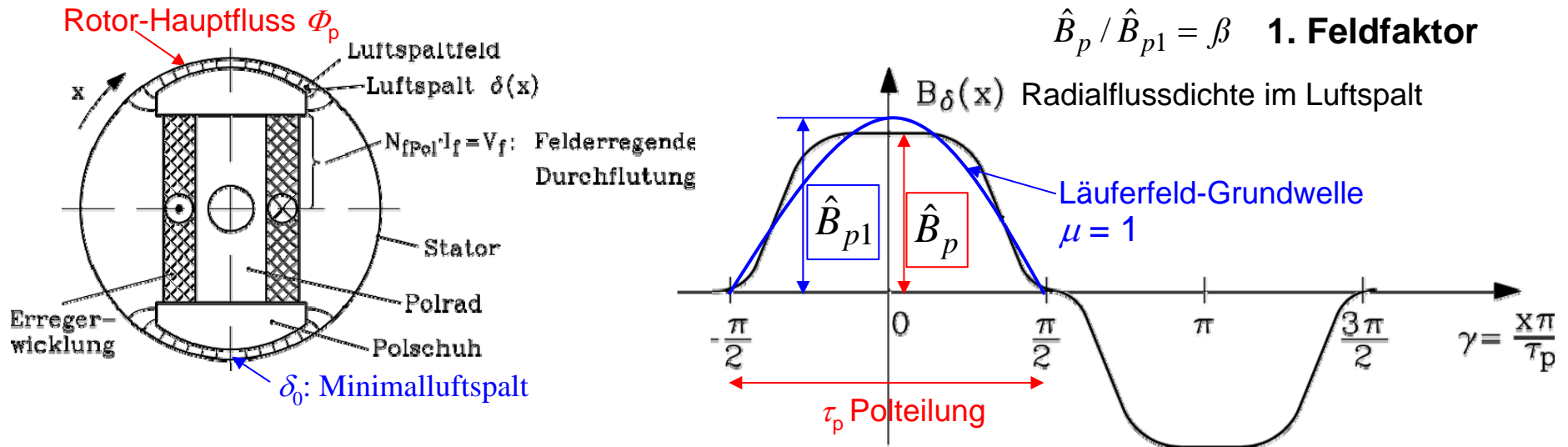
Betrieb S2-30 min.,  $A = 400$  A/cm

Wahl der Polzahl: Schenkelpoltyp:  $2p \geq 6 \dots 8$ , Polteilung:  $\tau_p = \frac{d_{si} \pi}{2p}$

Wicklungsauslegung: Ganzloch- oder Bruchlochwicklung  $q \geq 1$ ; z. B. 1.5 oder 2 etc.



# Läuferfeld und Polradspannung der Schenkelpolmaschine



- Poldurchflutung  $V_f = N_{f, \text{pol}} \cdot I_f$  erzeugt mit variablem Luftspalt  $\delta(x)$  **glockenförmige Läuferfeldkurve  $B_\delta(x)$**  mit FOURIER-Grundwelle (Ordnungszahl  $\mu = 1$ ) mit Amplitude  $\hat{B}_{p1}$
- Sinusförmige Feld-Grundwelle  $B_{p1}$  induziert **in dreiphasige Ständerwicklung** bei Drehzahl  $n$  die **Polradspannung  $U_p$**  mit der **Frequenz  $f_s = n \cdot p$**

**Rotor-Hauptfluss:**  $\Phi_{p1}(I_f) = \frac{2}{\pi} l_{Fe} \tau_p \hat{B}_{p1}(I_f) \approx l_{Fe} \cdot \int_{-\tau_p/2}^{\tau_p/2} B_\delta(x) \cdot dx = \Phi_p$   $N_s$ : Windungszahl je Statorstrang  
 $k_{w,s}$ : Wicklungsfaktor der Grundwelle

**Polradspannung je Strang (effektiv):**  $U_p(I_f) = U_{p1} = \sqrt{2} \pi f_s \cdot N_s k_{w,s} \cdot \Phi_{p1}(I_f)$

# Einfluss der Läuferfeldoberwellen auf die Spannungsinduktion in einem Wicklungsstrang

**Stator-Zweischichtwicklung:** Wicklungsfaktor:  $k_{w,s,\mu} = k_{p,\mu} \cdot k_{d,\mu}$

Sehnungsfaktor:  $k_{p,\mu} = \sin\left(\mu \frac{\pi}{2} \cdot \frac{W}{\tau_p}\right)$       Zonenfaktor:  $k_{d,\mu} = \frac{\sin\left(\mu \frac{\pi}{2m}\right)}{q \cdot \sin\left(\mu \frac{\pi}{2mq}\right)}$       z.B.:  $m = 3$

Induzierte Spannungsüberschwingung je  $\mu$ -te Läuferoberwelle:

$$U_{i,\mu} = \sqrt{2} \pi \cdot \mu \cdot f_s \cdot N_s \cdot k_{w,s,\mu} \cdot \frac{2}{\pi} \frac{\tau_p}{\mu} l_{Fe} \hat{B}_{\delta\mu} \quad \boxed{U_{i,\mu} \sim \hat{B}_{\delta\mu} k_{w,s,\mu}}$$

**Beispiel:** Zwölfpolige Synchronmaschine:  $n = 500/\text{min}$ ,  $2p = 12$ ,  $f_s = 50$  Hz

- Ständerwicklung:  $N_c = 2$ ,  $q = 2$ ,  $W = 5/6 \tau_p$ ,  $a = 1$ ,  $\tau_p = 0.5$  m,  $l_{Fe} = 1$  m

- Strangwindungszahl:  $N_s = 2p \cdot q \cdot N_c / a = 12 \cdot 2 \cdot 2 / 1 = \underline{\underline{48}}$

$N_c$ : Windungszahl je Spule

$W$ : Spulenweite

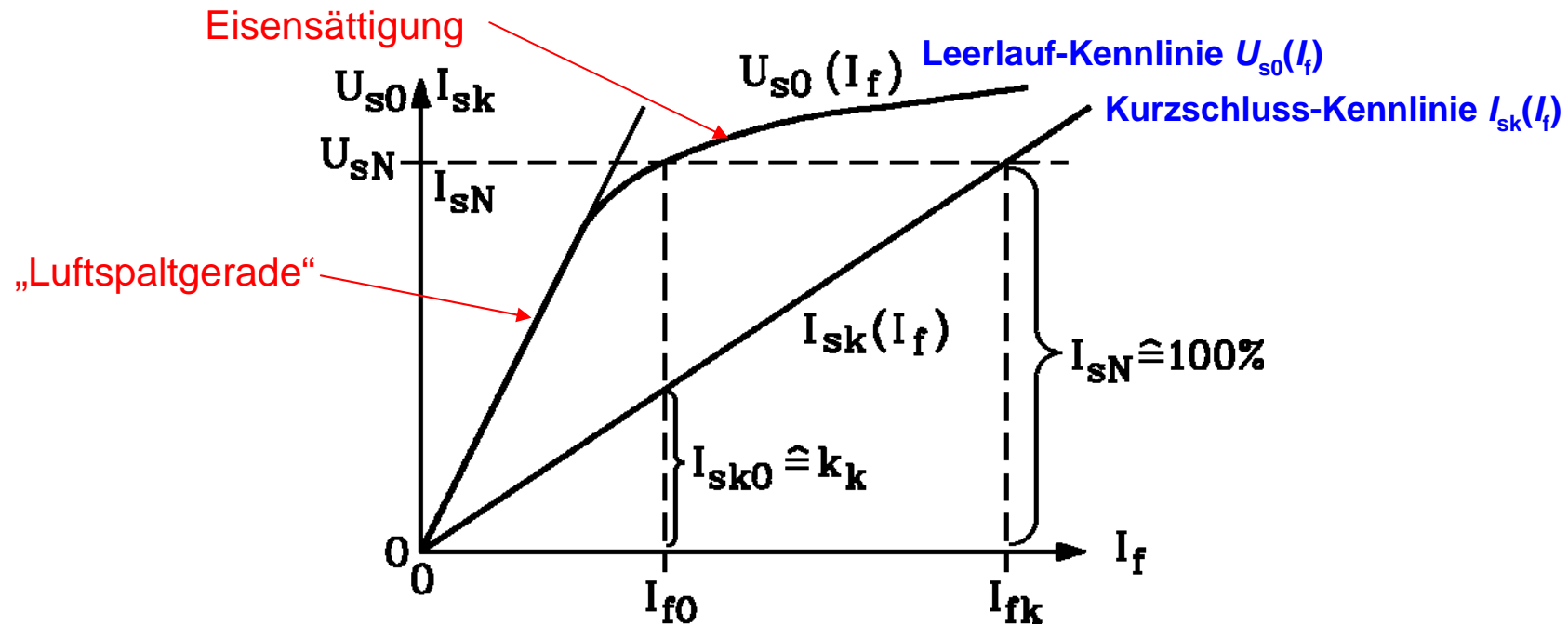
$a$ : Anzahl paralleler Zweige je Strang

$\mu$	$\hat{B}_{p\mu}$	$\hat{B}_{p\mu} / \hat{B}_{p1}$	$\mu \cdot f_s$	$\Phi_\mu$ je Spule	$U_{p,\mu}$	$U_{p,\mu} / U_{p,1}$
-	T	%	Hz	mWb	V	%
1	0.9	100	50	276.7	2850.1	100
3	0.15	16.7	150	-11.3	-254.6	8.9
5	0.05	5.6	250	0.8	11.4	0.4
7	0.05	5.6	350	-0.6	-11.4	0.4

Entfällt bei Sternschaltung von U, V, W

Durch Sehnung und Spulengruppe  $q$  werden Spannungsüberschwingungen verringert.

# Leerlauf-Kennlinie $U_{s0}(I_f)$



- Bei Generatorbetrieb mit konstanter Drehzahl  $n$  und offener Ständerwicklung: Ständerklemmenspannung  $U_{s0}$  ist "Polradspannung  $U_p$ ":  $U_{s0}(I_f) = U_p(I_f)$
- **Linearer Teil:** Luftspaltemagnetisierung = „Luftspaltgerade“
- **Gekrümmter Teil der Kennlinie:** bei hohem  $I_f$  (= hoher Fluss): Eisen sättigt

# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine



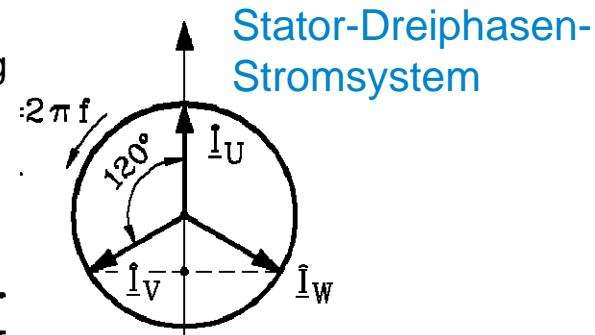
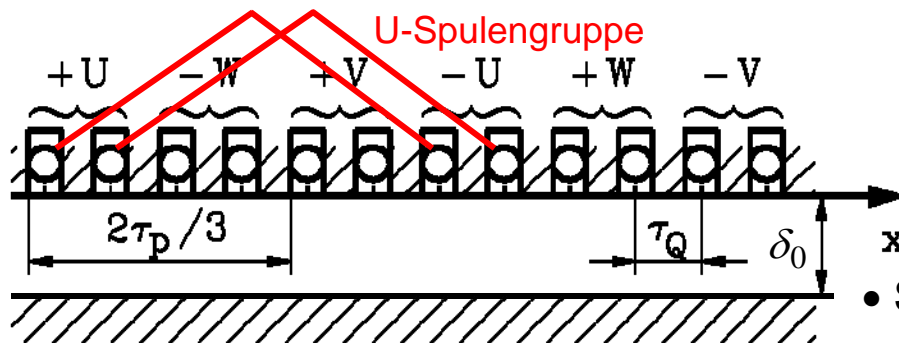
- Ständer-Leerlaufspannung
- Ständer-Kurzschlussstrom
- Erregerstrom im Läufer
- Berechnung der Leerlauf-Kennlinie
- Berechnung der Ständerstreuinduktivität
- Berechnungsbeispiel
- Zusammenfassung





# Ständerfeld ungesättigt: Hauptinduktivität bei konstantem Luftspalt $\delta_0$

**Beispiel:** Einschicht-Wicklung  
 $m = 3, q = 2, W/\tau_p = 1, \tau_Q$ : Stator-Nutteilung



- Stator-Drehstromsystem  $I_s$  erregt Stator-Luftspalt-

Drehfeld  $B_{\delta,s}(x)$  mit Grundwellenamplitude  $\hat{B}_s$

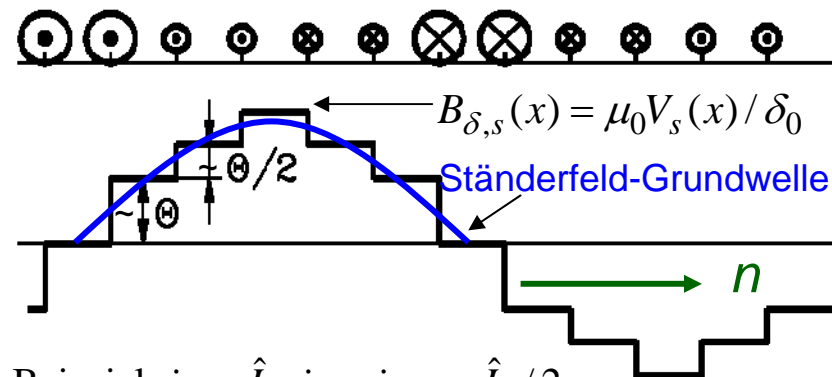
$$\hat{B}_s = \mu_0 \hat{V}_s / \delta_0 \quad \hat{V}_s = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{m}{p} \cdot k_{w,s} \cdot N_s \cdot I_s$$

- Selbstinduzierte Spannung  $U_{i,s}$  mit Frequenz  $f_s$  in die 3 Ständer-Wicklungsstränge U, V, W

- Dies entspricht Hauptinduktivität  $L_h$

$$U_{i,s} = 2\pi f_s \cdot L_h \cdot I_s$$

$$L_h = \mu_0 \cdot k_{w,s}^2 N_s^2 \cdot \frac{2m}{\pi^2} \cdot \frac{l_{Fe} \tau_p}{p \cdot \delta_0}$$



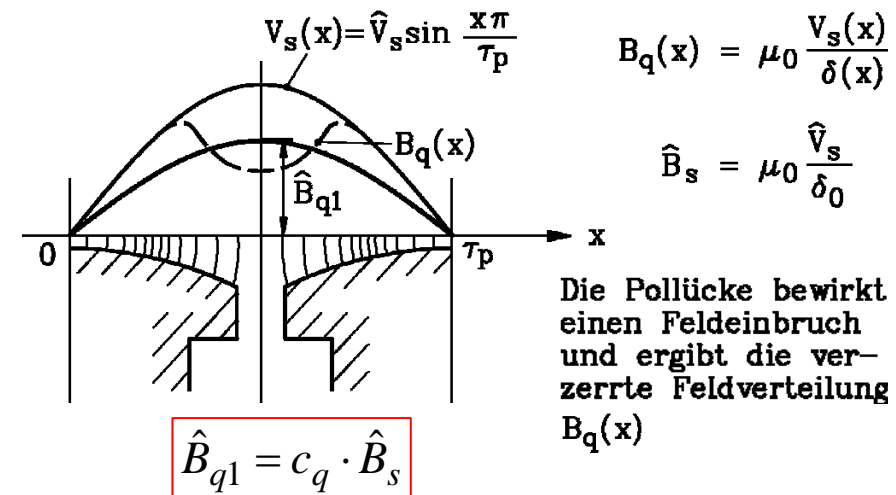
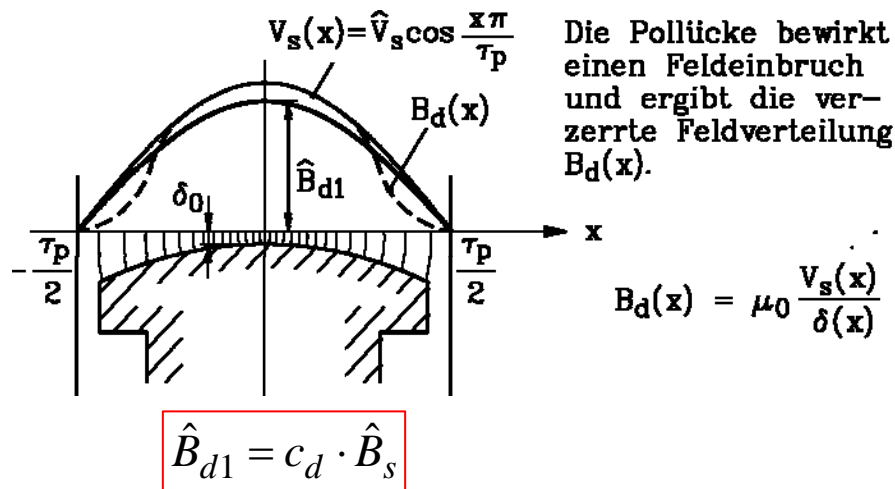
Beispiel:  $i_U = \hat{I}_s, i_V = i_W = -\hat{I}_s / 2$

$\Theta$ : Maximale Nutdurchflutung

# Schenkelpolmaschine ungesättigt: Ständerluftspaltfeld



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

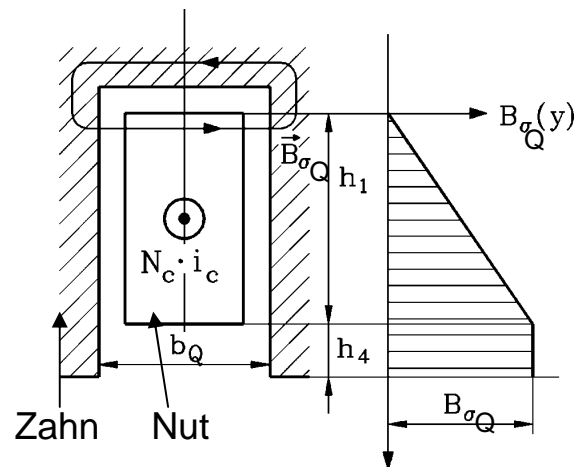


- Ständermagnetisierung in d-Achse: Pollückeneinfluss klein!  
Ständerluftspaltflussdichte  $B_d(x)$  nichtsinusförmig mit Amplitude:  $\hat{B}_s = \mu_0 \hat{V}_s / \delta_0$
- **FOURIER-Grundwelle mit Amplitude:**  $\hat{B}_{d1} = c_d \cdot \hat{B}_s$   $c_d \approx 0.9 < 1$
- Ständermagnetisierung in q-Achse: Pollückeneinfluss groß!  
Ständerluftspaltflussdichte  $B_q(x)$  nichtsinusförmig mit großem „Feldeinbruch“
- **FOURIER-Grundwelle mit Amplitude:**  $\hat{B}_{q1} = c_q \cdot \hat{B}_s$   $c_q \approx 0.4..0.5 < 1$

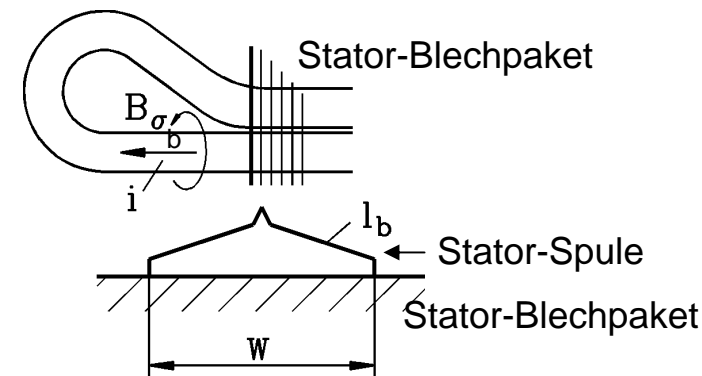


# Schenkelpolmaschine ungesättigt: Synchroninduktivität

- Ständer-Hauptinduktivität der Grundwelle:
- d-Achse:  $L_{dh} = c_d \cdot L_h$       q-Achse:  $L_{qh} = c_q \cdot L_h$
- Korrektur für Ständer-Oberwellen:  $L_{\sigma,o} = \sigma_o \cdot L_h$      $\sigma_o \approx 0.03 \dots 0.09$  für  $q$  ganze Zahl
- Ständer-Nutstreuinduktivität  $L_{\sigma,Q}$  wegen Nutstreuflussdichte  $B_{\sigma,Q}$
- Ständer-Stirstreuinduktivität  $L_{\sigma,b}$  wegen Stirstreuflussdichte  $B_{\sigma,b}$
- Synchron-Induktivitäten (ungesättigt):  $L_d = L_{dh} + L_{s\sigma}$      $L_q = L_{qh} + L_{s\sigma}$      $L_{s\sigma} = L_{\sigma,Q} + L_{\sigma,b} + L_{\sigma,o}$



Nutstreuflussdichte  $B_{\sigma,Q}$  quer zur Nut, steigt linear vom Nutgrund an



Stirstreuflussdichte  $B_{\sigma,b}$  als dreidim. Feld im Statorraum über den Stirnverbindungen  $l_b$

# Kurzschlusskennlinie der Ständerwicklung bei $n = \text{konst.}$

- **Kurzschluss** = Ständerklemmenspannung ist 0:  
Summe aus Polradspannung + Selbstinduktionsspannung = 0, wenn der Ständerwicklungswiderstand/Strang  $R_s \approx 0$  vernachlässigt wird!

$$\omega_s = 2\pi f_s : U_p + \omega_s L_{dh} I_s + \omega_s L_{s\sigma} I_s = 0 \quad X_d = \omega_s L_d \quad X_{dh} = \omega_s L_{dh} \quad X_{s\sigma} = \omega_s L_{s\sigma}$$

- **Kurzschluss-Strom:**  $U_p + X_d I_{sk} = 0 \Rightarrow |I_{sk}| = U_p / X_d$

- Im Luftspalt verbleibt nur ein **kleines Rest-Luftspaltfeld  $B_{\delta k}$** , das eine zur Streuspannung  $\omega_s L_{s\sigma} I_{sk}$  **gegenphasige** Spannung induziert, damit die Klemmenspannung Null ist.

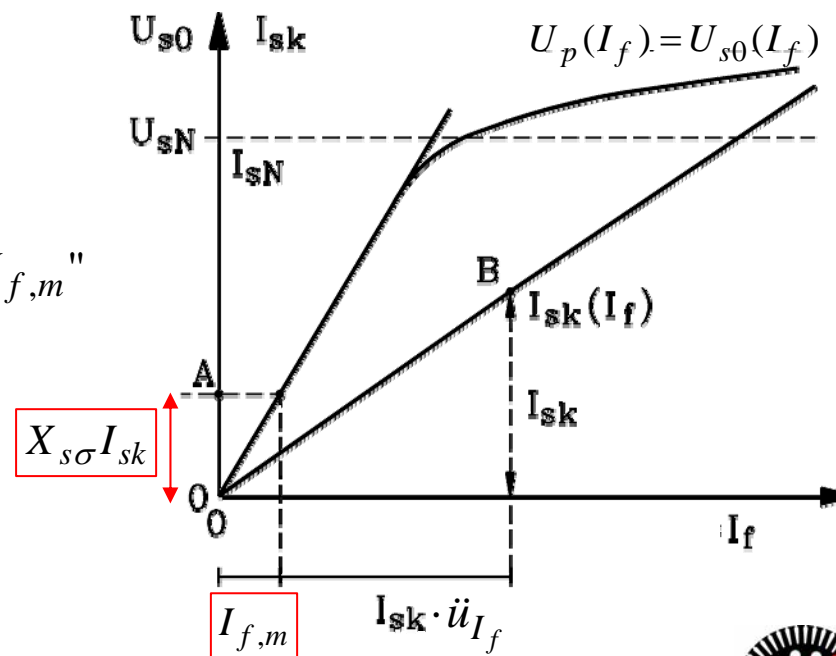
$$\text{Dreisatz: } U_p \leftrightarrow B_p \leftrightarrow I_f \quad X_{s\sigma} I_{sk} \leftrightarrow B_{\delta,k} \leftrightarrow "I_{f,m}"$$

- **Definition:**  $U_p = (X_{dh} \cdot I_f) / \ddot{u}_{I_f}$

$$|U_p| = |-X_{dh} I_{sk} - X_{s\sigma} I_{sk}| = |X_{dh} I_{sk}| + |X_{s\sigma} I_{sk}|$$

$$X_{dh} I_f / \ddot{u}_{I_f} = X_{dh} I_{sk} + X_{dh} I_{f,m} / \ddot{u}_{I_f}$$

$$I_f = \ddot{u}_{I_f} \cdot I_{sk} + I_{f,m}$$



# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine



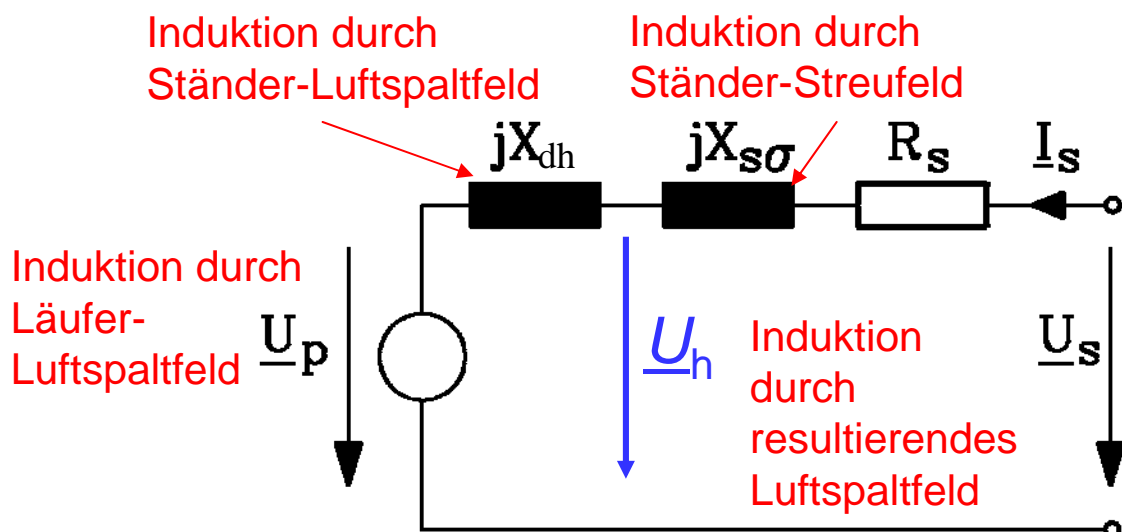
- Ständer-Leerlaufspannung
- Ständer-Kurzschlussstrom
- Erregerstrom im Läufer
- Berechnung der Leerlauf-Kennlinie
- Berechnung der Ständerstreuinduktivität
- Berechnungsbeispiel
- Zusammenfassung



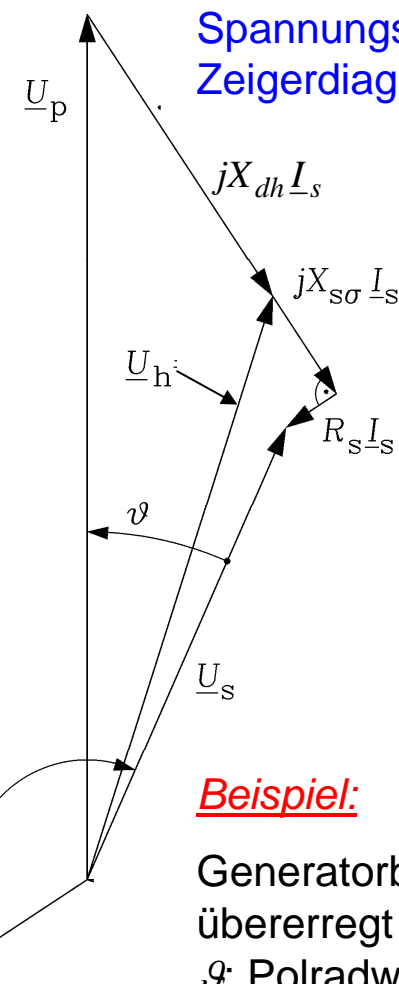
# Vereinfachte Betrachtung der Schenkelpolmaschine als Vollpolmaschine

Ersatzschaltbild der Ständerwicklung je Strang:

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



Spannungs-  
Zeigerdiagramm



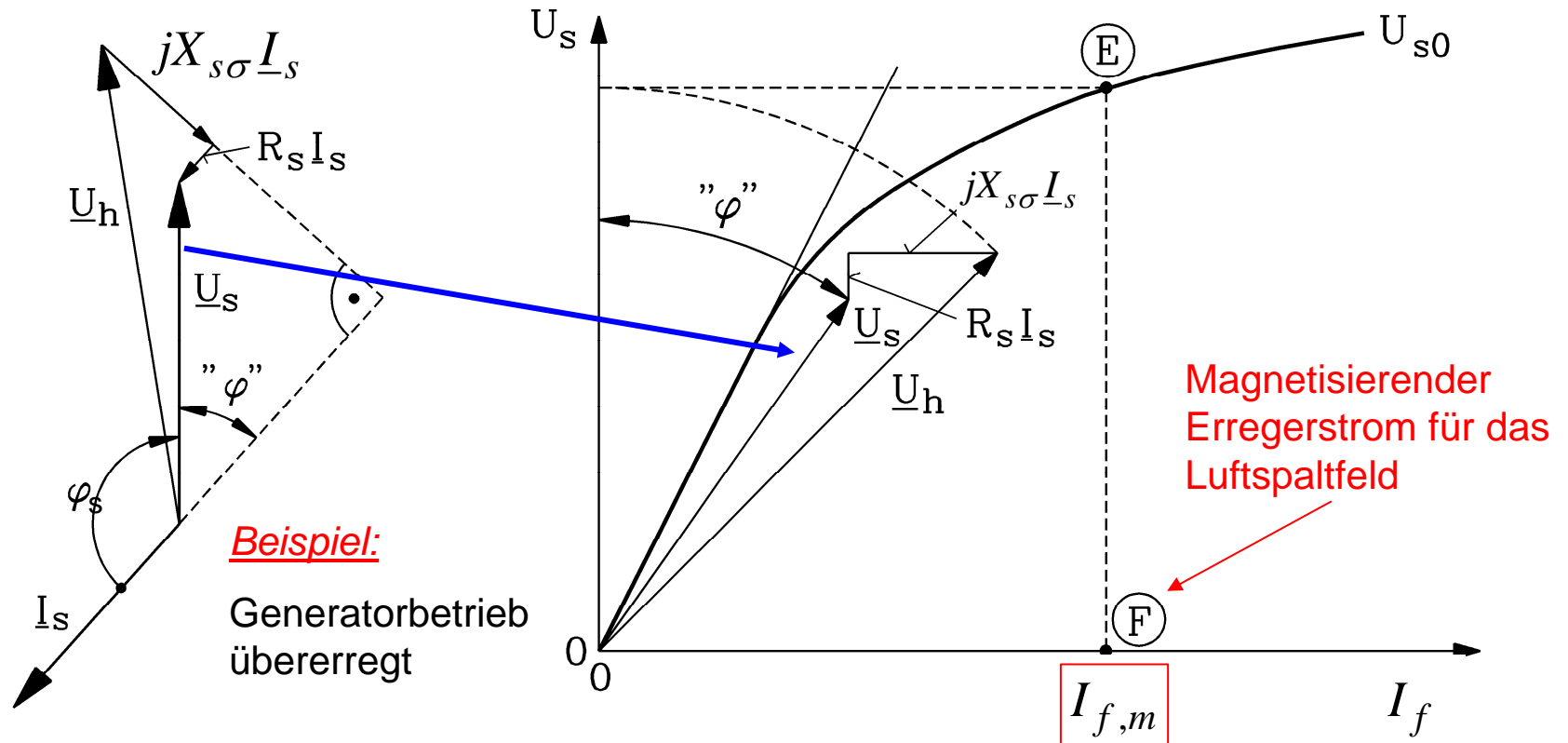
**Beispiel:**

Generatorbetrieb  
übererregt  
 $\vartheta$ : Polradwinkel

- **Läufer: Erregerwicklung:**  $U_f$ : Erregerspannung prägt über Schleifringe **Erreger-Gleichstrom  $I_f$**  in Erregerwicklung (Widerstand  $R_f$ ) ein.

$$U_f = R_f I_f$$

# Magnetischer Arbeitspunkt E in der Leerlauf-Kennlinie bei Vorgabe von $U_s$ , $I_s$ , $\cos\varphi_s$



Vorgabe von  $U_s$ ,  $I_s$ ,  $\varphi_s$ : Graphische Ermittlung von  $U_h$  ( $R_s$ ,  $X_{s\sigma}$  bereits bekannt)

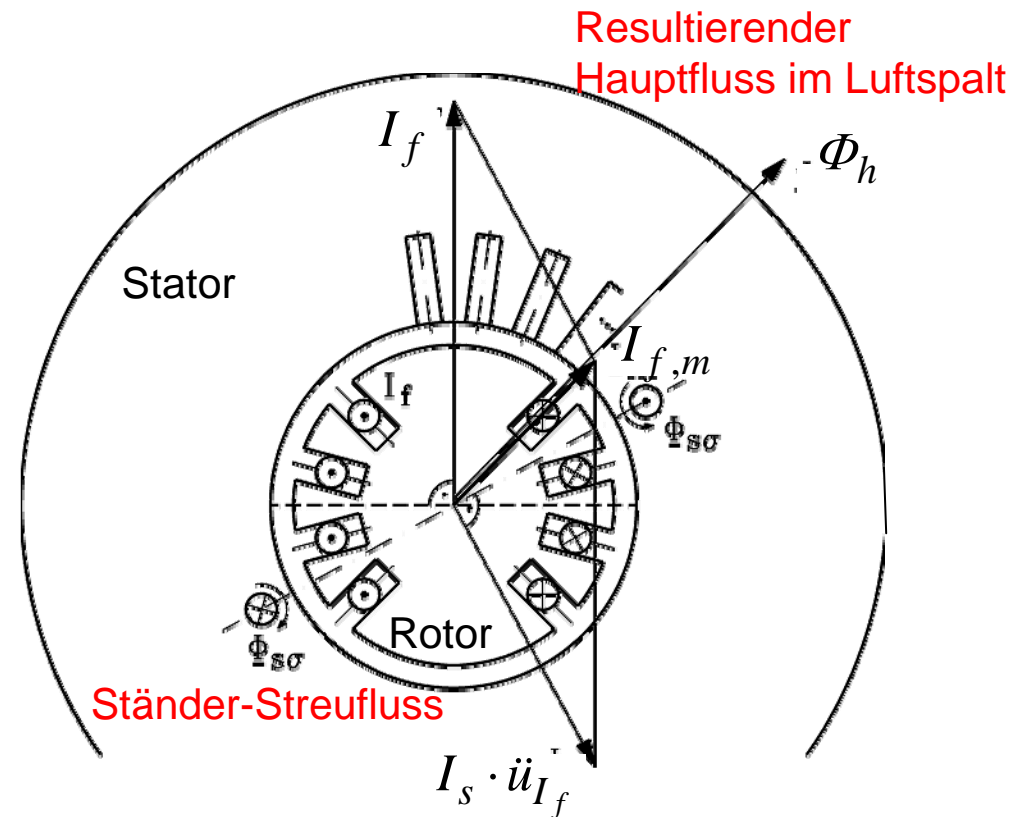
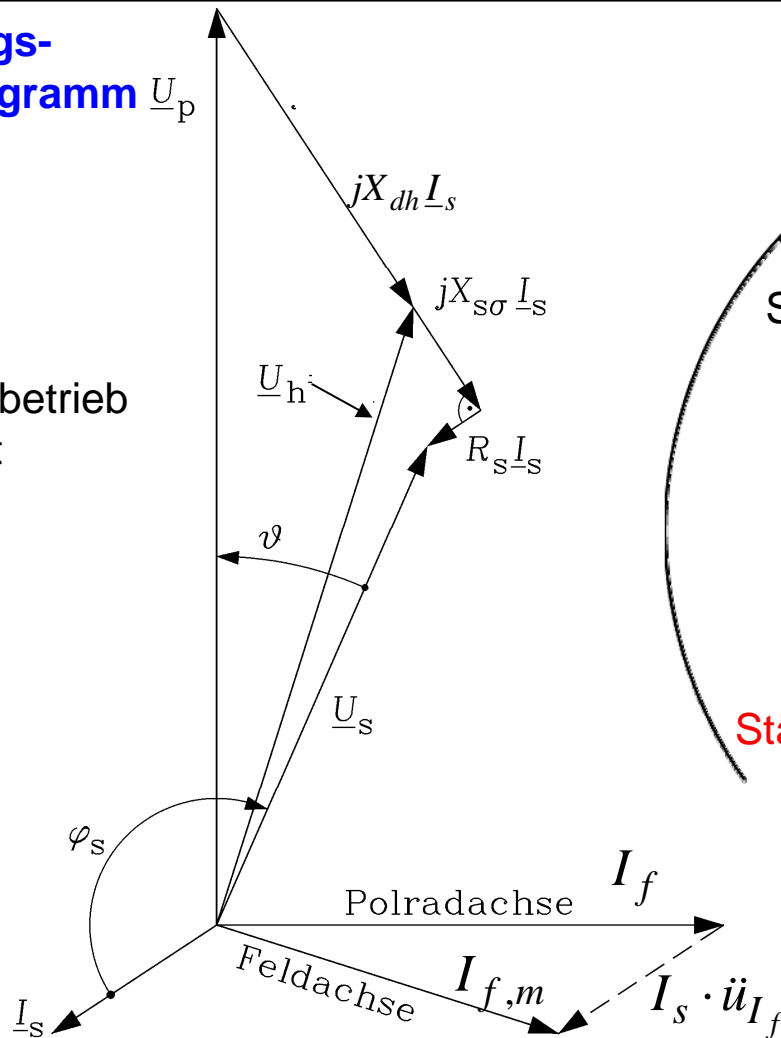
Eintragen von  $U_h =$  Punkt E; „magnetisierender“ Erregerstrom bei Punkt F

# Zu den Spannungen zugehörige Ströme

Spannungs-  
Zeigerdiagramm  $\underline{U}_p$

Beispiel:

Generatorbetrieb  
übererregt



Querschnitt 2-polige Vollpolmaschine

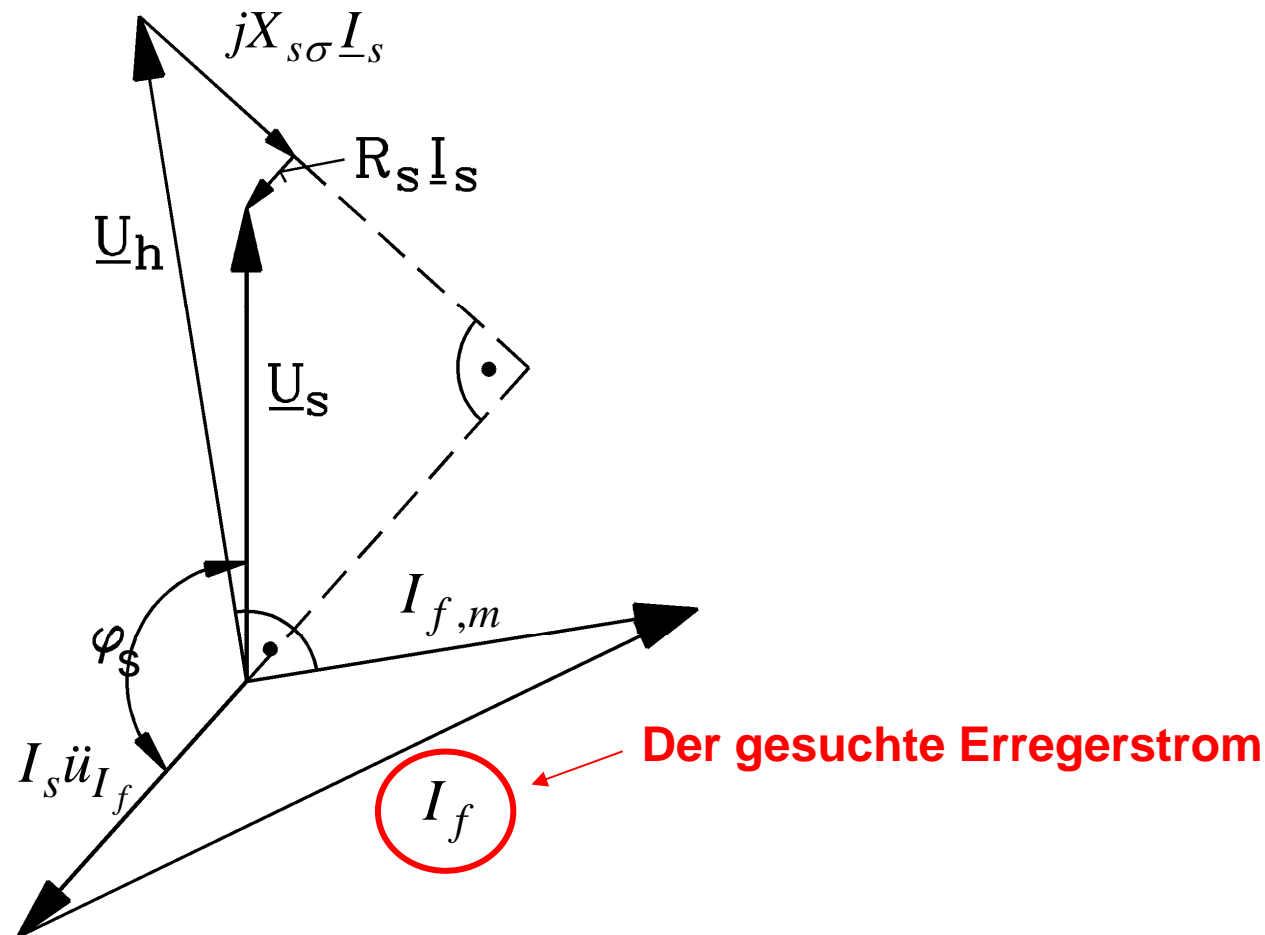
$\underline{I}_f$  normal auf  $\underline{U}_p$ ,  $\underline{I}_{f,m}$  normal auf  $\underline{U}_h$



# Geometrische Ermittlung des Erregerstroms $I_f$ zum Lastpunkt ( $U_s, I_s, \varphi_s$ )



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



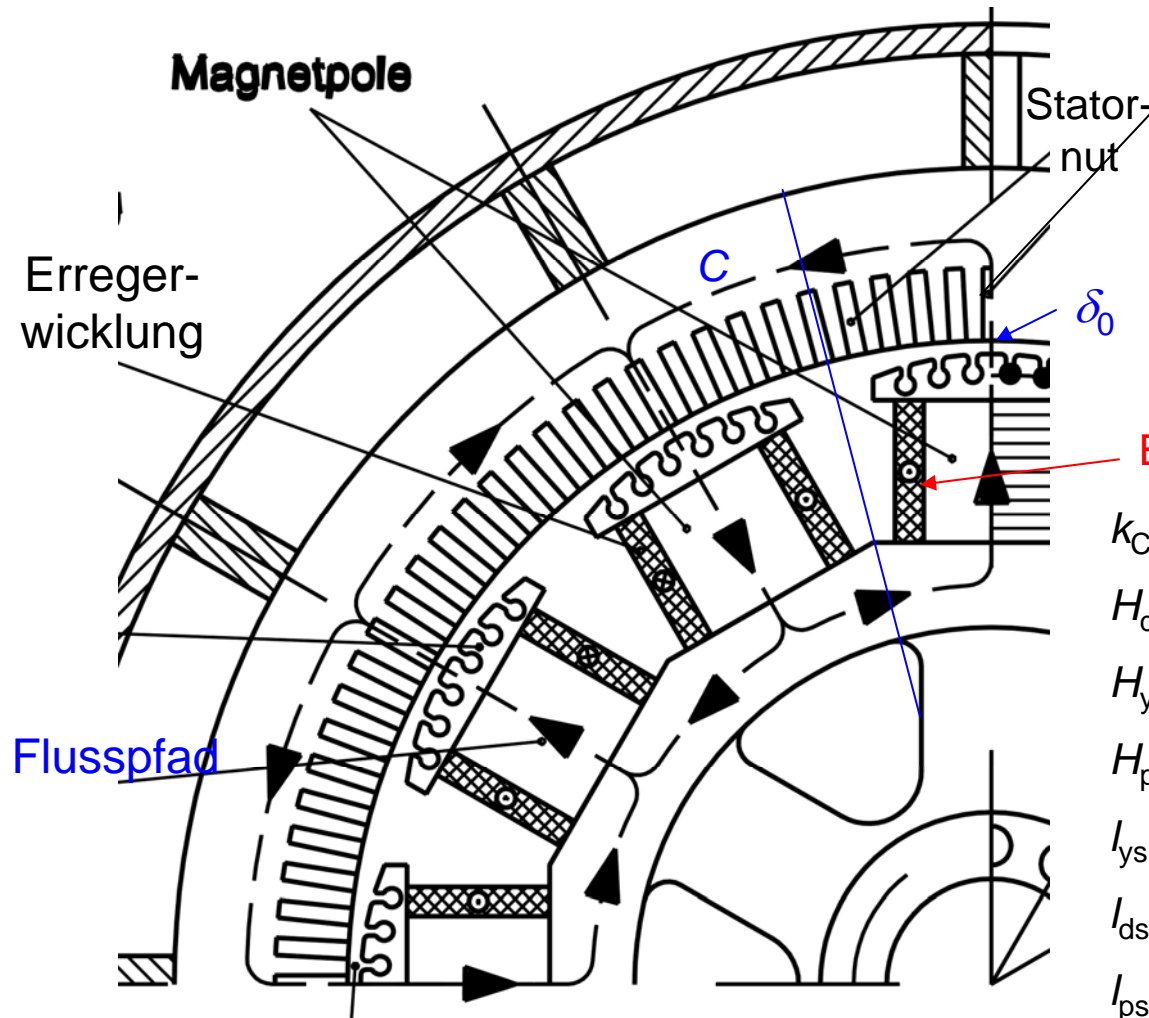
# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine



- Ständer-Leerlaufspannung
- Ständer-Kurzschlussstrom
- Erregerstrom im Läufer
- **Berechnung der Leerlauf-Kennlinie**
- Berechnung der Ständerstreuinduktivität
- Berechnungsbeispiel
- Zusammenfassung



# Feldlinienpfad bei Leerlauf



Feldlinie als geschlossene Kurve C für Durchflutungssatz

Halber Magnetkreis:  $C/2$ :

$$\frac{\hat{B}_p}{\mu_0} \cdot \delta_0 k_C + H_d l_d + H_{ys} l_{ys} + H_{ps} l_{ps} + H_{pr} l_p + H_{yr} l_{yr} = N_{f,Pol} I_f$$

Erregerdurchflutung pro Läuferpol

$k_C$ : CARTER-Faktor

$H_d$ : Zahnfeldstärke

$H_{ys}, H_{yr}$ : Jochfeldstärke (Stator/Rotor)

$H_p, H_{ps}$ : Polschaft-/Polschuh-Feldstärke

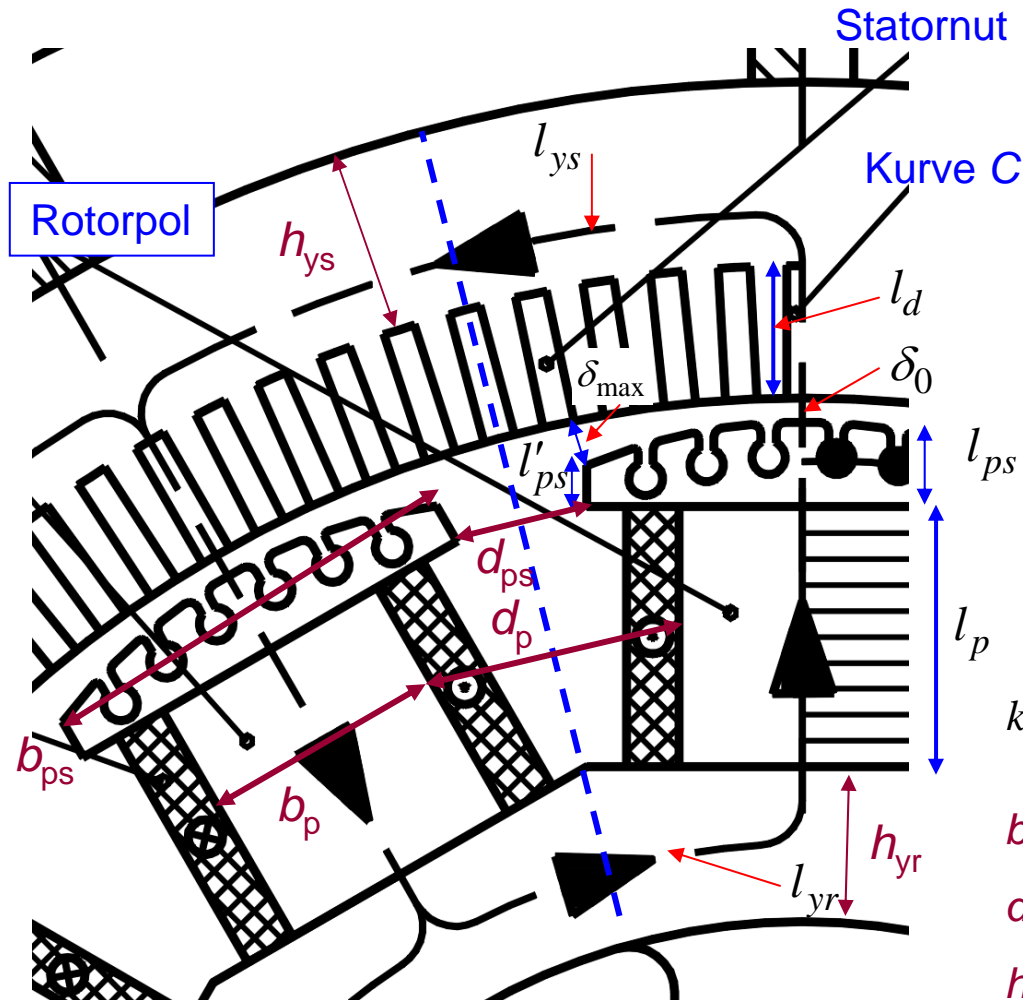
$l_{ys}, l_{yr}$ : Stator-/Rotor-Jochabschnittslänge

$l_{ds}$ : Statorzahnlänge

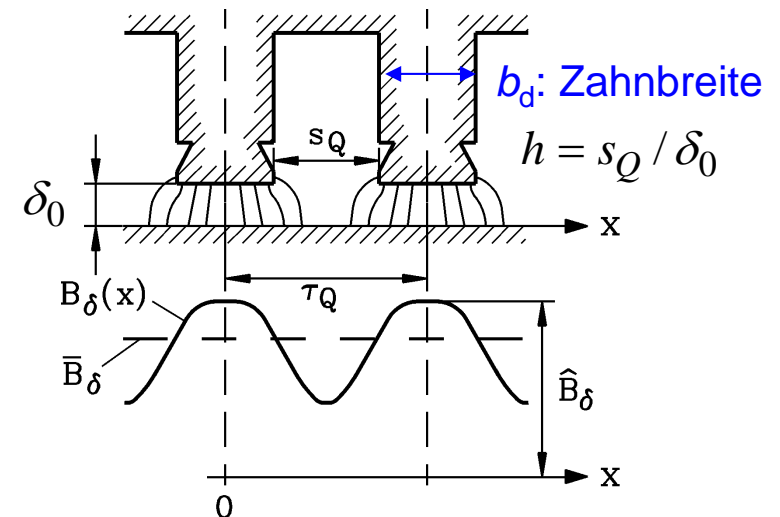
$l_{ps}, l_p$ : Polschuh-/ Polschaftlänge



# Abmessungen des magnetischen Pfads



CARTER-Faktor  $k_C$ : Einfluss der Nutöffnungen auf das Luftspaltfeld



$$k_C = \hat{B}_\delta / \bar{B}_\delta = \frac{\tau_Q}{\tau_Q - \zeta(h) \cdot \delta_0} > 1 \quad \zeta(h) \approx \frac{h^2}{h+5}$$

$b_p, b_{ps}$ : Polschaft-/Polschuh-Breite

$d_p, d_{ps}$ : Polschaft-/Polschuh-Lückenbreite

$h_{ys}, h_{yr}$ : Stator-/Rotor-Jochhöhe

# Stator: Flussdichten und Feldstärken

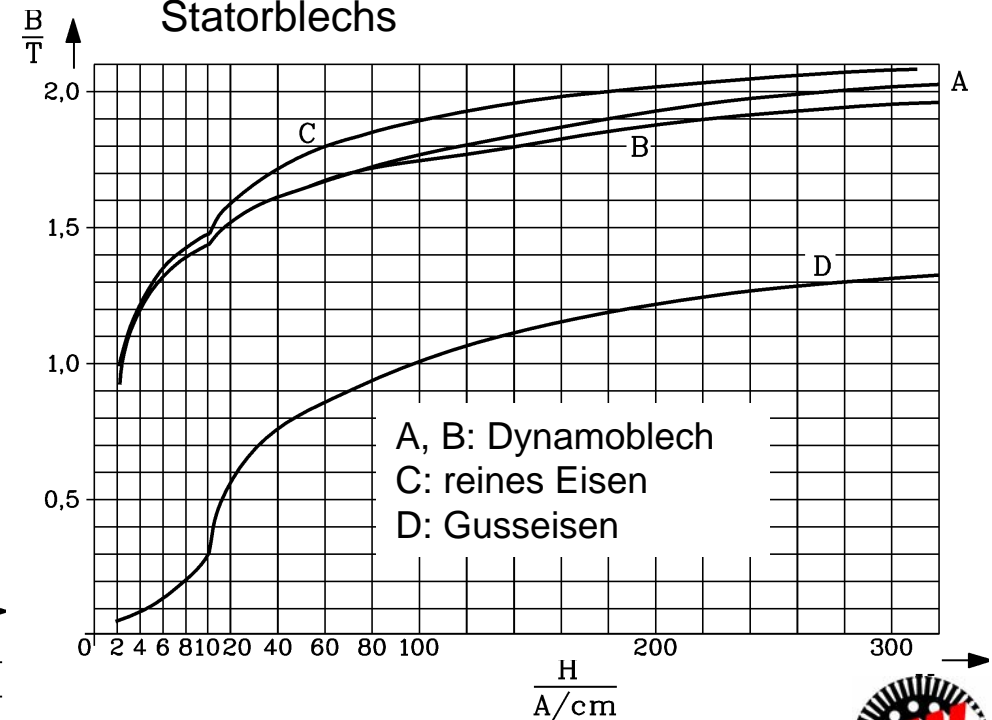
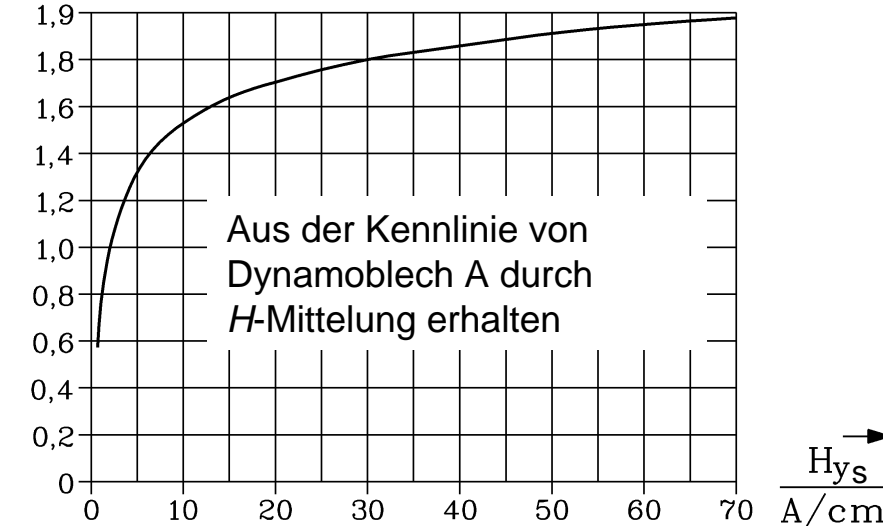
Stator: Zahn:  $B_d \approx \frac{\Phi_{\delta Q}}{k_{Fe} \cdot b_d \cdot l_{Fe}}$      $\Phi_{\delta Q} = \hat{B}_p \cdot \tau_Q \cdot l_{Fe}$      $H_d = f^{-1}(B_d)$

Joch:  $B_{ys} = \frac{\Phi_p / 2}{h_{ys} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}}$      $H_{ys} = g^{-1}(B_{ys})$

$k_{Fe}$ : Blechpaket-Füllfaktor (ca. 0.97)

$B = f(H)$ : Eisenkennlinie des verwendeten Statorblechs

$\frac{B_{ys}}{T}$  ↑  $B_{ys} = g(H_{ys})$ : max. Jochflussdichte über mittlerer Jochfeldstärke



# Rotor: Flussdichten und Feldstärken

Rotor: Polschuh:  $B_{ps} = \frac{\Phi_{p,res}}{k_{Fe} \cdot b_{ps} \cdot l_{Fe}}$  Joch:  $B_{yr} = \frac{\Phi_{p,res} / 2}{h_{yr} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}}$   $H_{yr} = f^{-1}(B_{yr})$

Polschaft:  $B_{pr} = \frac{\Phi_{p,res}}{k_{Fe} \cdot b_p \cdot l_{Fe}}$   $H_{pr} = f^{-1}(B_{pr})$   $H_{ps} = f^{-1}(B_{ps})$

$B = f(H)$ : Eisenkennlinie des verwendeten Rotorblechs

Resultierender Rotorpolfluss:  $\Phi_{p,res} = \Phi_p + \Phi_{f\sigma}$

Polstreufloss: KORNDÖRFER-Formel, für  $2p \geq 6$

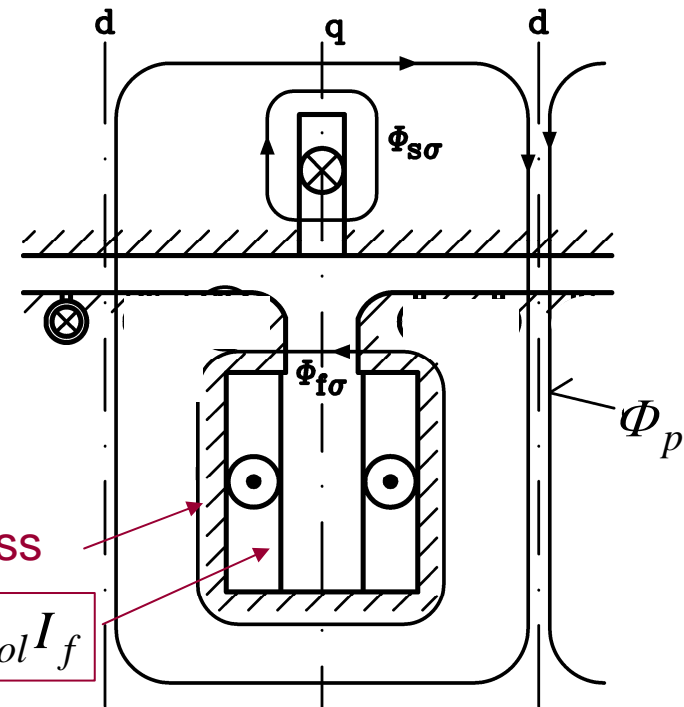
$$\Phi_{f\sigma} = \mu_0 \cdot 4 \cdot (\Lambda_{ps} + \Lambda_p / 2) \cdot V_f$$

$$\Lambda_{ps} = \frac{l'_{ps} + \delta_{max} / 2}{d_{ps}} \cdot l_{Fe} + \ln(1 + b_{ps} / d_{ps}) \cdot (l_{ps} + l'_{ps}) / 2$$

$$\Lambda_p = l_p \cdot \left[ l_{Fe} / d_p + \ln(1 + b_p / d_p) \right]$$

Polstreufloss

$$V_f = N_{f,Pol} I_f$$



# Berechnung der Leerlauf-Kennlinie

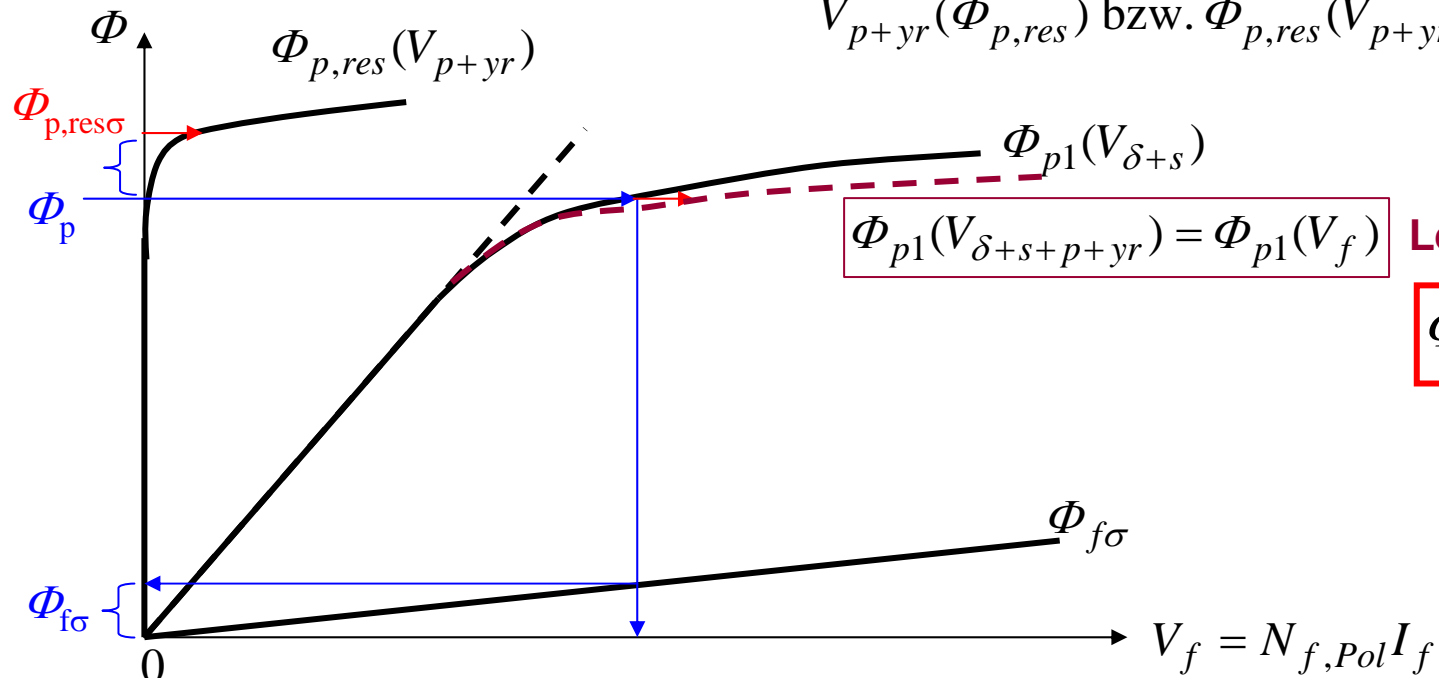
**Halber Magnetkreis:  $C/2$ :** Vorgabe:  $\hat{B}_p$

Magnetisierungsbedarf für Luftspalt und Stator-Eisen:  $V_{\delta+s} = \frac{\hat{B}_p}{\mu_0} \cdot \delta_0 k_C + H_d l_d + H_{ys} l_{ys}$

$V_{\delta+s}(\hat{B}_p)$  bzw.  $\hat{B}_p(V_{\delta+s}) \rightarrow \hat{B}_{p1} = \hat{B}_p / \beta \rightarrow \Phi_{p1} = (2/\pi) \cdot \tau_p l_{Fe} \hat{B}_{p1}$

Magnetisierungsbedarf für Rotor-Eisen:  $V_{p+yr} = H_{ps} l_{ps} + H_p l_p + H_{yr} l_{yr}$

$V_{p+yr}(\Phi_{p,res})$  bzw.  $\Phi_{p,res}(V_{p+yr})$



**Leerlauf-Kennlinie**

$$\Phi_{p1}(V_f) \sim U_{s0}(I_f)$$

# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine



- Ständer-Leerlaufspannung
- Ständer-Kurzschlussstrom
- Erregerstrom im Läufer
- Berechnung der Leerlauf-Kennlinie
- Berechnung der Ständerstreuinduktivität
- Berechnungsbeispiel
- Zusammenfassung

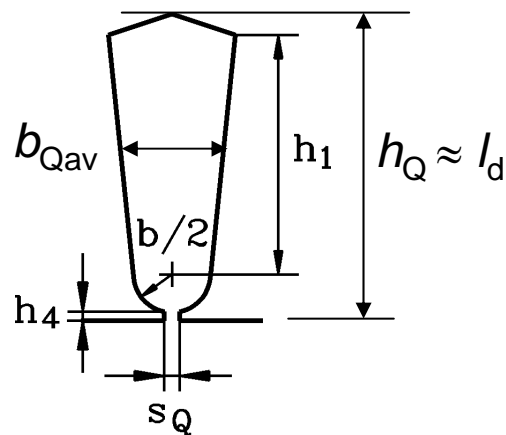




# Nut-, Stirn- und Zahnkopfstromung

## Nutstromung:

Runddraht-Einschichtwicklung in halbgeschlossenen Nuten mit parallel flankigen Zähnen



Dissertation ROTHERT:

$$\lambda_{Qs} = \frac{h_1}{3b_{Qav}} + 0.685 + \frac{h_4}{s_Q}$$

**Ständer-Streuinduktivität:**

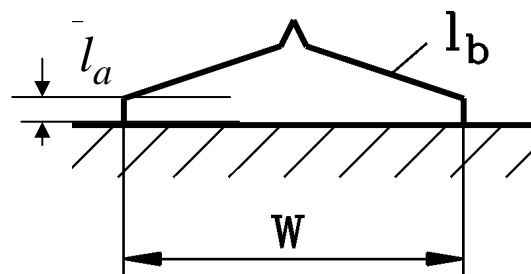
$$L_{s\sigma} = \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot \frac{2}{p} \cdot \left( \frac{\lambda_{Qs} + \lambda_d}{q} \cdot l_{Fe} + \lambda_b \cdot l_b \right)$$

## Stirnstromung:

Runddraht-Einschichtwicklung:

$$W = \tau_p$$

eng geformter Wickelkopf



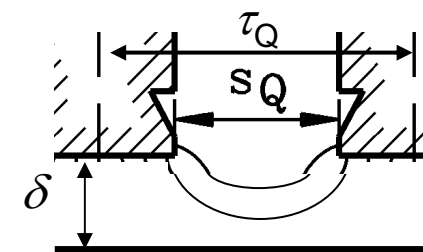
$$l_b \approx 1.3 \cdot W + 3 \cdot h_Q + 2 \cdot l_a$$

Dissertation KÜRZEL:

$$\lambda_b \approx 0.3$$

## Zahnkopfstromung:

Bei rel. großem Luftspalt; dafür kann dann Oberfelder-Streuung  $L_{\sigma,0}$  vernachlässigt werden



$$\lambda_d \approx \ln(\tau_Q / s_Q) / \pi$$

# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine



- Ständer-Leerlaufspannung
- Ständer-Kurzschlussstrom
- Erregerstrom im Läufer
- Berechnung der Leerlauf-Kennlinie
- Berechnung der Ständerstreuinduktivität
- **Berechnungsbeispiel**
- Zusammenfassung



# Berechnungsbeispiel - Daten

- Aus Zeitgründen kann im Rahmen dieses Vortrags kein Berechnungsbeispiel gezeigt werden
- Auf Wunsch kann ein Berechnungsbeispiel bei unserem Institut für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt, [aptaschek@ew.tu-darmstadt.de](mailto:aptaschek@ew.tu-darmstadt.de) erhalten werden.

## Berechnungsbeispiel: Fremderregter Synchronmotor im Kfz

### 1. Bemessungsdaten – Hauptabmessungen

Batteriespannung  $U_B = 300 \text{ V}$ , Nennmoment  $M_N = 140 \text{ Nm}$ , Nenndrehzahl  $n_N = 2200/\text{min}$ , 6-polige Synchronmaschine  $2p = 6$

Bemessungsleistung  $P_N = 2\pi n_N M_N = 32 \text{ kW}$ , Nennfrequenz  $f_N = p \cdot n_N = 110 \text{ Hz}$

Verkettete Ständerspannung  $U_{LL} = U_B / \sqrt{2} = 212 \text{ V}$

Nenn-Strangspannung  $U_s = U_{LL} / \sqrt{3} = 122 \text{ V}$ , mit kleiner Spannungsreserve:  $U_{sN} = 115 \text{ V}$

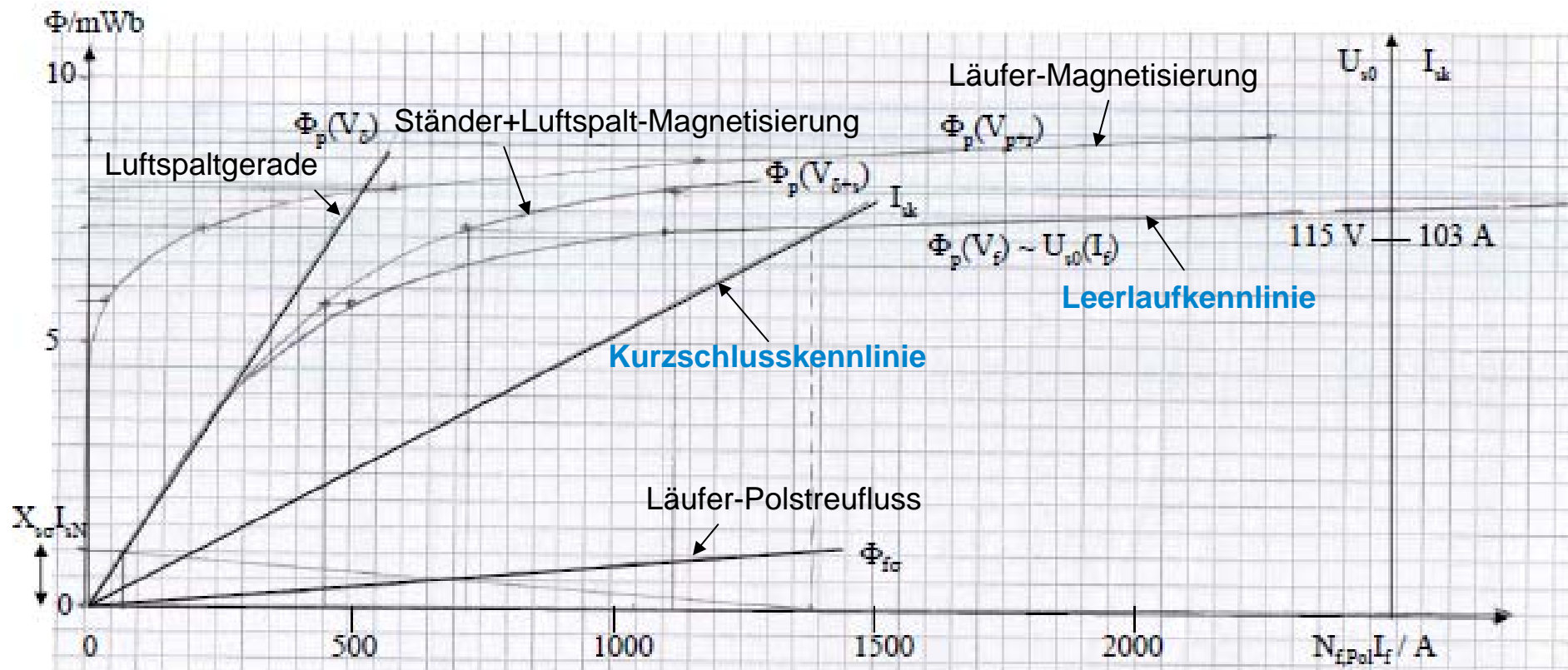
Geschätzter Wirkungsgrad  $\eta_N = 0.9$  ohne Erregerverluste

$m = 3$  Stränge: elektrische Aufnahmeleistung  $P_e = P_N / \eta_N = 3U_{sN} I_{sN} \cos \varphi_{sN} = 35.58 \text{ kW}$

Nennscheinleistung bei  $\cos \varphi_{sN} = 1$  für minimale Umrichterleistung:  $S_N = 3U_{sN} I_{sN} = 35.58 \text{ kVA}$

# Berechnungsbeispiel – magn. Kennlinien

Fremderregter Synchronmotor im Kfz,  $M_N = 140 \text{ Nm}$ ,  $n_N = 2200/\text{min}$ , 6-polig



# Literatur zur analytischen Auslegung von elektrisch erregten Synchronmaschinen



*Rziha E von* (1955) Starkstromtechnik. Band 1, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin

*Schuisky W* (1960) Berechnung elektrischer Maschinen. Springer, Wien

*Richter R, Brüderlink R* (1963) Elektrische Maschinen: Synchronmaschinen und Einankerumformer. Band 2 von 5, Birkhäuser Verlag, Basel Stuttgart

*Jordan H, Weis M* (1970) Synchronmaschinen, Band I + Band II. Vieweg, Braunschweig

*Bödefeld TH, Sequenz H* (1971) Elektrische Maschinen - Eine Einführung in die Grundlagen. Springer, Wien

*Böning W* (1978) HÜTTE - Elektrische Energietechnik, Bd.1: Maschinen. Springer, Berlin

*Vogt K* (1996) Berechnung elektrischer Maschinen. VCH Verlag, Weinheim  
(ältere Auflagen aus dem VEB-Verlag tw. noch erhältlich)

*Müller G, Vogt K, Ponick B* (2007) Berechnung elektrischer Maschinen. Wiley-VHC Verlag, Weinheim



# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine



- Ständer-Leerlaufspannung
- Ständer-Kurzschlussstrom
- Erregerstrom im Läufer
- Berechnung der Leerlauf-Kennlinie
- Berechnung der Ständerstreuinduktivität
- Berechnungsbeispiel
- Zusammenfassung



# Zusammenfassung

- Der **Erregerbedarf der Schenkelpolmaschine** wird näherungsweise mit dem Vollpol-Modell berechnet OHNE Zerlegung des Ständerfelds in d- und q-Komponente. Folge: Überschätzung des Erregerbedarfs
- Weiter ist die **progressive Sättigung des Läuferpols** auf Grund des Polstreufusses bei der Erregerbedarfsbestimmung unter Last vernachlässigt. Folge: Unterschätzung des Erregerbedarfs
- Die **lastabhängige einseitige Polschuhsättigung** wird analytisch vernachlässigt.
- Die **Verlustberechnung** muss bei hohen Drehzahlen auch die Polschuhoberflächenverluste durch die Ständernutöffnungen berücksichtigen.
- Zur analytischen Berechnung gehört auch ein **thermisches Mehrkörpermodell** und eine **Festigkeitsberechnung** des Läufers mit der Fixierung der Erregerwicklung

---

# Analytische Auslegung der fremderregten Synchronmaschine

---



**Danke für Ihre Aufmerksamkeit !**

