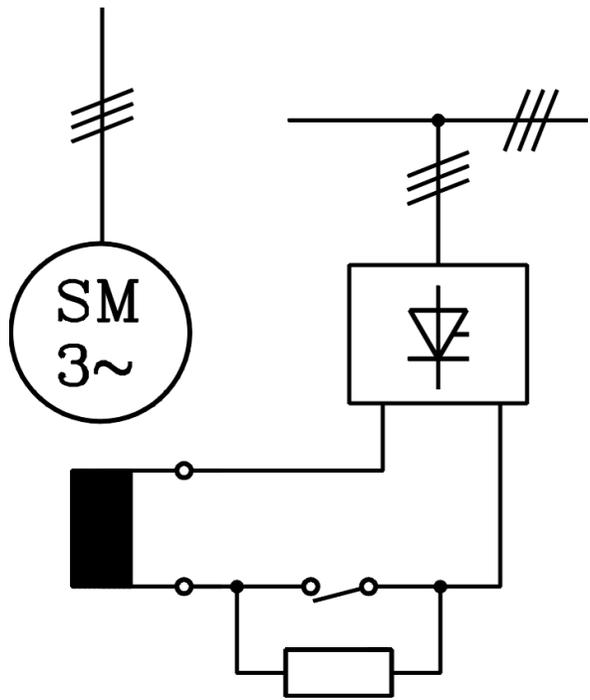


## Vorlesungsinhalt

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

# 9. Erregereinrichtungen und Kennlinien der Synchronmaschine

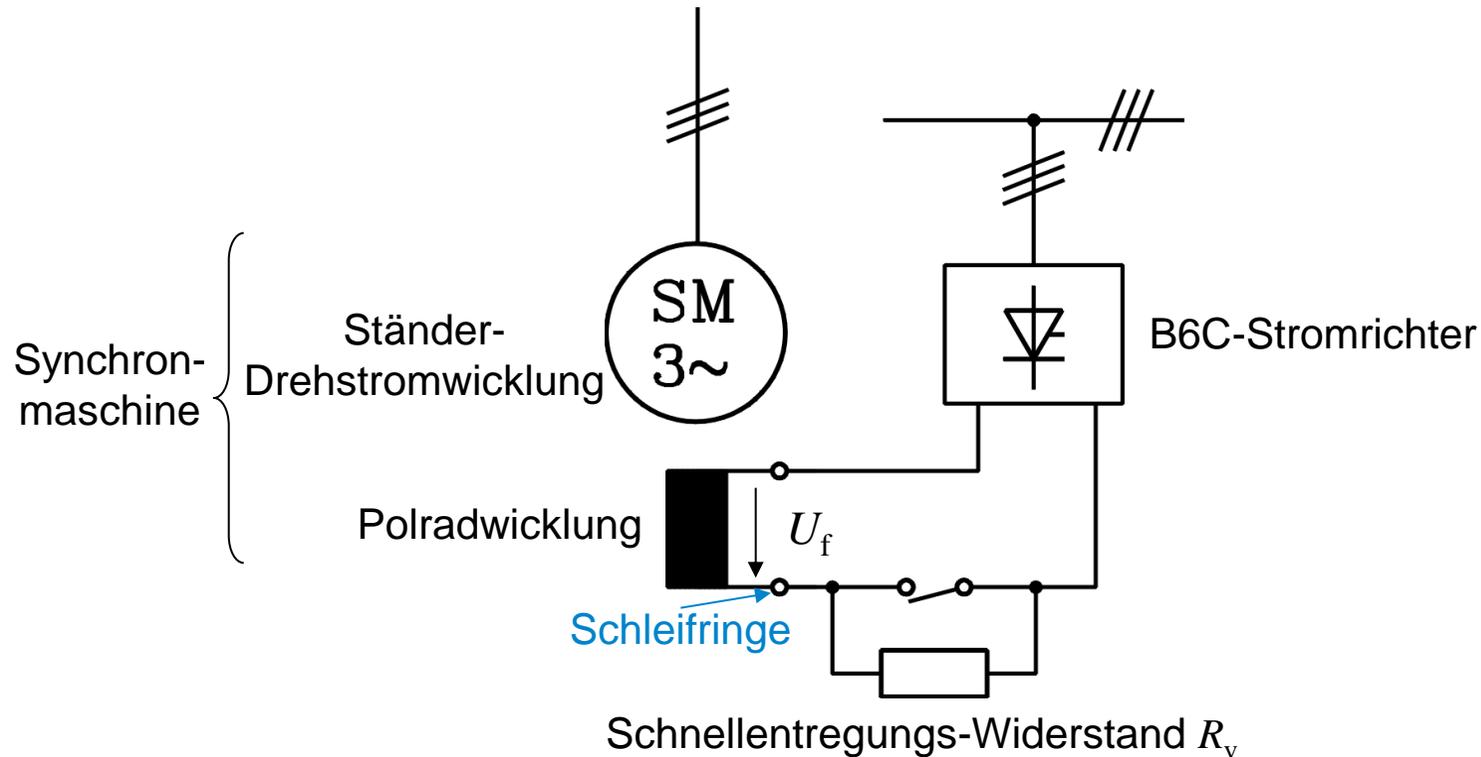


## 9. Erregereinrichtungen und Kennlinien

### 9.1 Elektrische Erregereinrichtungen

### 9.2 Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie

# Stromrichterergespeiste Polrad-Erregung



## Stromrichter-erregung:

- Aus Netz-Drehspannungssystem wird mit gesteuertem Gleichrichter (B6C) variable Gleichspannung  $U_f$  erzeugt (variabel über Zündwinkel  $\alpha$ )
- $U_f$  über zwei Schleifringe der Polradwicklung zugeführt

# Erregung des Polrads über zwei Schleifringe

## Beispiel:

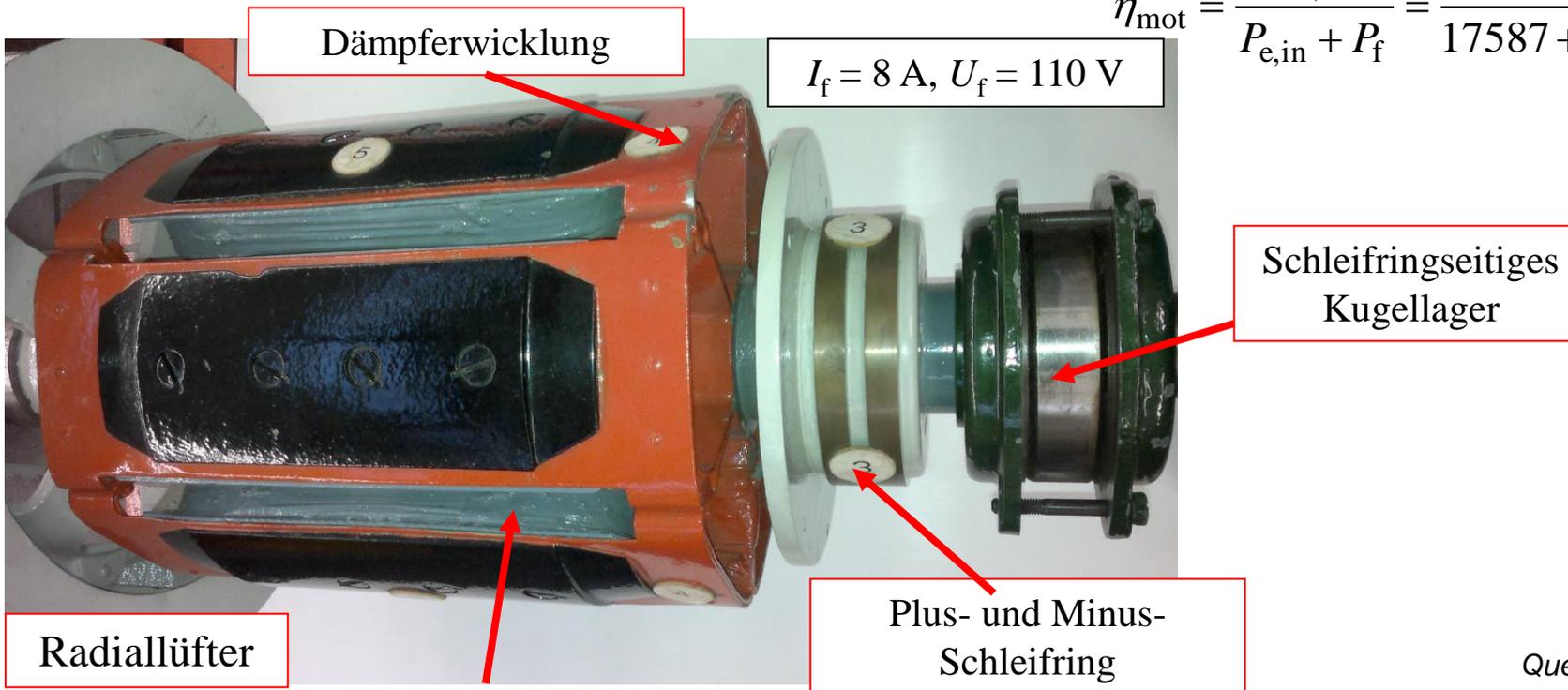
Sechspoliger Schenkelpol-Synchronmotor:

15 kW, 380 V Y, 33.4 A, 50 Hz, 1000/min,  $\cos \varphi = 0.8$  ü.e.

$$P_{e,in} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 33.4 \cdot 0.8 = 17587 \text{ W}$$

$$P_{m,out} = 15000 \text{ W}, \quad P_f = 8 \cdot 110 = 880 \text{ W}$$

$$\eta_{\text{mot}} = \frac{P_{m,out}}{P_{e,in} + P_f} = \frac{15000}{17587 + 880} = 81.22\%$$



Sechspolige Polradwicklung des Synchronmotors

Quelle: Fa. Dornhoff,  
Deutschland

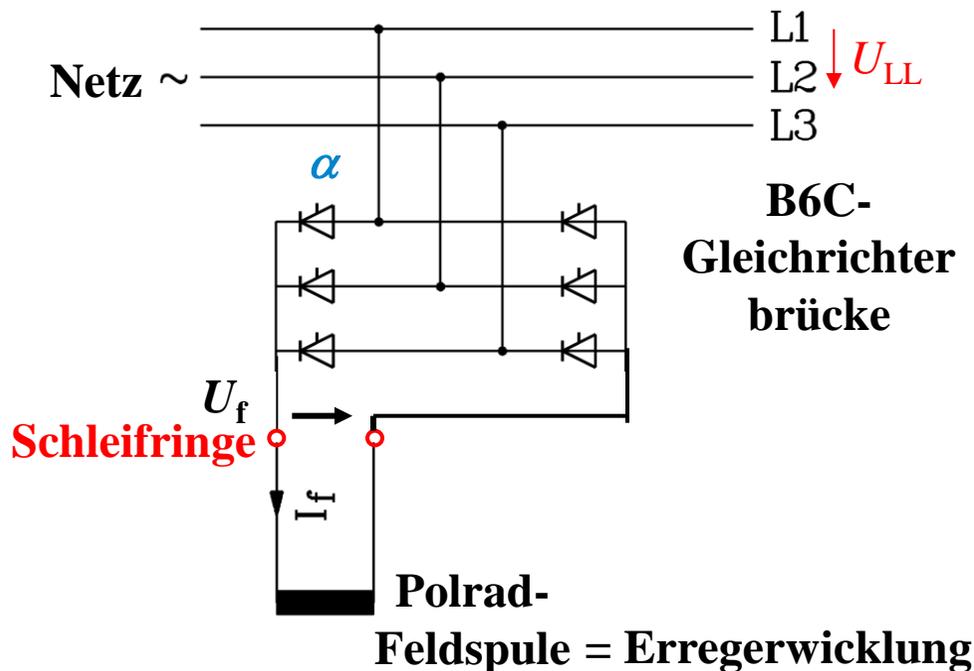
# Erreger-Gleichrichter

## B6C-Brücke

- Sechspulsige Gleichrichtung über B6C-Thyristor-Gleichrichterbrücke aus Drehstromnetz L1, L2, L3: Gleichgerichtete Spannung  $U_d =$  Erregerspannung  $U_f$ , **veränderbar über Ansteuerwinkel  $\alpha$ !** Große Induktivität  $L_f$  glättet  $I_f =$  (nahezu) Gleichstrom!

$$U_f = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot U_{LL} \cdot \cos \alpha = U_{f0} \cdot \cos \alpha$$

**B6C: B: Bridge, 6-pulsig, Controlled ( $\alpha$ )**

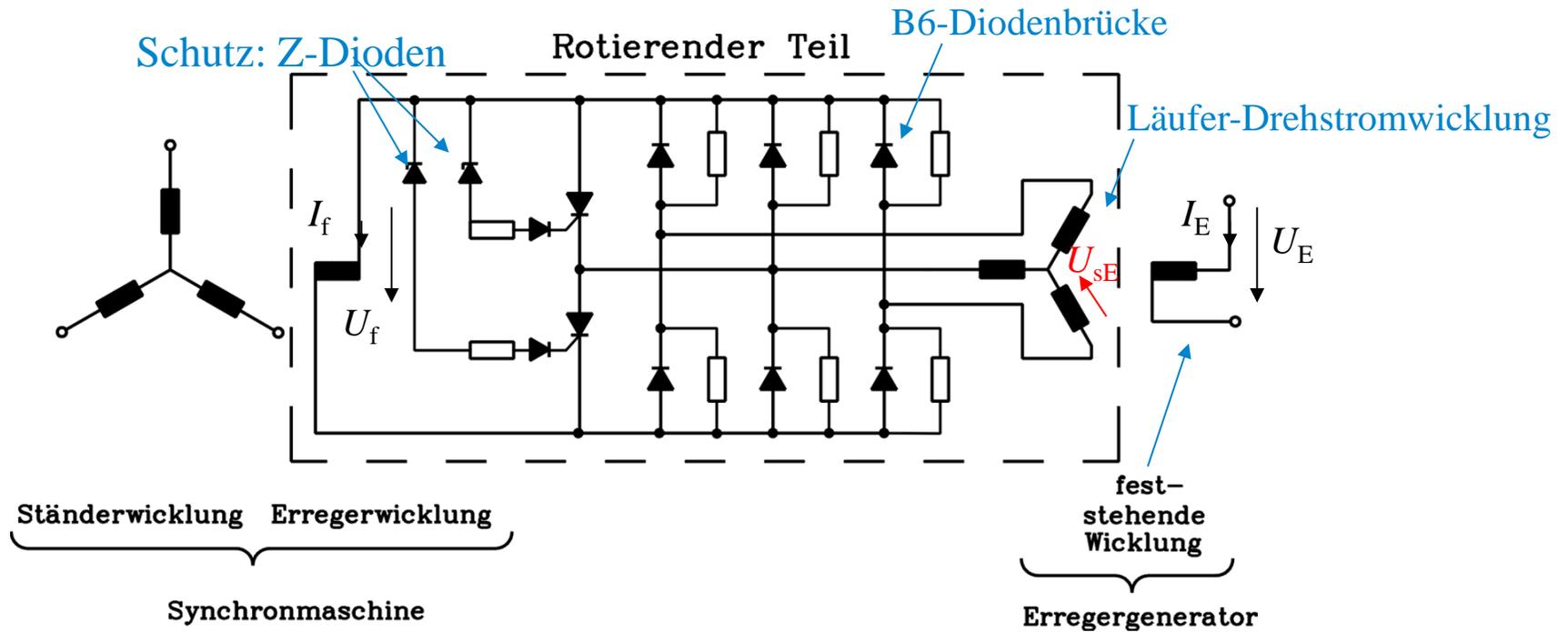


### Gesteuerter Brückengleichrichter:

- Variabler Zündwinkel  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ :
- Maximale gleichgerichtete Spannung  $U_{f0}$  bei Zündwinkel  $\alpha = 0^\circ$ !
- Mittlere gleichgerichtete Spannung Null:  $U_f = 0$ : bei Zündwinkel  $\alpha = 90^\circ$ !
- Maximal negative gleichgerichtete Spannung  $U_f < 0$  bei Zündwinkel  $\alpha = 180^\circ$ !
- Wechselrichter-Trittgrenze:  $\alpha_{\max} < 180^\circ$ !

# Bürstenlose Erregung

## KEINE Schleifringe



# Bürstenlose Erregung

## Funktionsweise

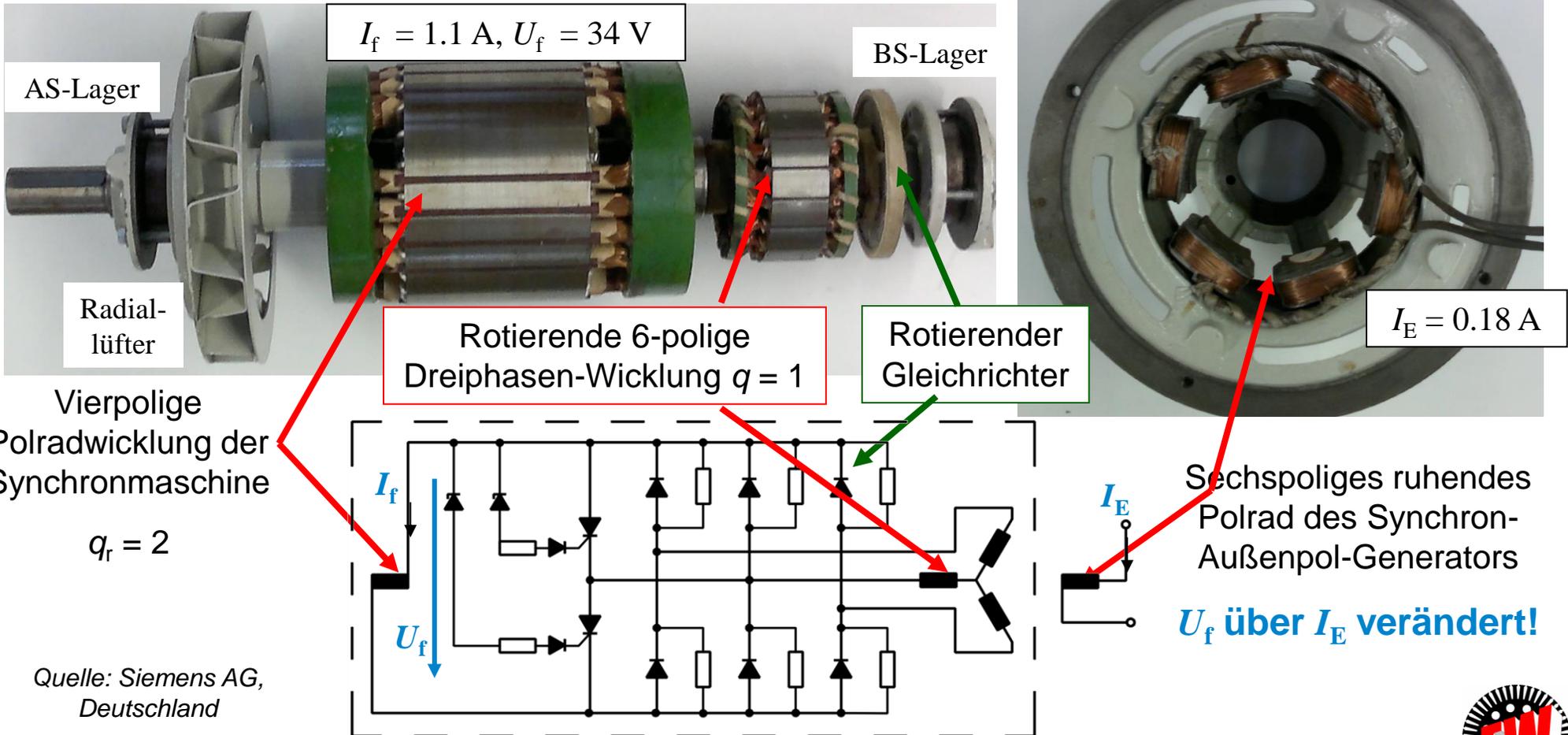
- **Erregergenerator** an Synchron-Hauptmaschine gekuppelt
- Erregergenerator = Synchrongenerator als **Außenpolmaschine**:
  - a) Ständer = "ruhendes Polrad,, (feststehende Wicklung).
  - b)  $I_E$  erregt ruhendes Erregermagnetfeld  $B_{fE}$ .
  - c) Läufer trägt Drehstromwicklung,  
in der durch  $B_{fE}$  bei  $n \neq 0$  Drehspannungssystem  $U_{sE}$  induziert wird.
- Angeschlossene **mitrotierende B6-Diodenbrücke** richtet  $U_{sE}$  gleich als  $U_f$ .
- DC-Spannung  $U_f$  speist OHNE Schleifringe direkt die Erregerwicklung der Synchron-Hauptmaschine und treibt  $I_f$ .
- **VORTEILE: KEINE Bürsten, KEINE Schleifringe.**
- $U_f$  wird verändert über  $I_E$ :

$$U_f \sim U_{sE} \sim B_{fE}(I_E)$$

# Erregung des Polrads über einen rotierenden Gleichrichter

**Beispiel:** Vierpolige Vollpol-Synchronmaschine

14 kVA, 231 V Y, 35 A, 50 Hz, 1500/min,  $\cos \varphi = 0.8$  ü.e.



# Beispiel: Vollpol-Synchron-Generator (Notstromdiesel-Aggregat)

Übung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Vierpolige Vollpol-Synchronmaschine, 14 kVA, 231 V Y, 35 A, 50 Hz, 1500/min,  $\cos \varphi = 0.8$  ü.e., Erregerwicklung:  $I_f = 1.1$  A,  $U_f = 34$  V

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 231 \cdot 35 = 14000 \text{ VA}$$

$$P_{e,\text{out}} = S_N \cdot \cos \varphi_N = 14000 \cdot 0.8 = 11200 \text{ W}$$

$$P_f = U_f \cdot I_f = 34 \cdot 1.1 = 37.4 \text{ W}$$

- Wirkungsgrad ohne  $P_f$ :  $\eta = 85.0\%$

$$P_{m,\text{in}} = P_{e,\text{out}} / \eta = 11200 / 0.85 = 13177 \text{ W}$$

$$M_N = P_{m,\text{in}} / (2\pi \cdot n_N) = 13177 / (2\pi \cdot 1500 / 60) = 83.9 \text{ Nm}$$

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{P_{e,\text{out}}}{P_{m,\text{in}} + P_f} = \frac{11200}{13177 + 37.4} = 84.76\%$$

- Wirkungsgrad mit  $P_f$ :  $\eta = 84.76\%$  (OHNE Außenpolgenerator und Gleichrichter)
- Wirkungsgrad mit  $P_f$ :  $\eta = 84.63\%$  (MIT Außenpolgenerator,  $\eta = 0.7$ ; Gleichrichter,  $\eta = 0.97$ , ...)

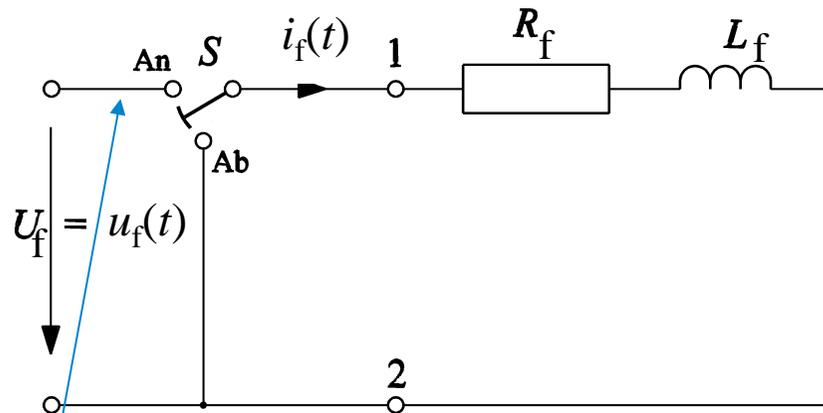


# „Lade-Strom“ der Läufer-Feldspulen-Induktivität (1)

Wiederholung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



- Feldspule (Erregerwicklung im Polrad) als reale lineare Spule ( $L_f = \text{konst.}$ ,  $R_f = \text{konst.}$ )

$$u_f(t) = L_f \cdot \frac{di_f(t)}{dt} + i_f(t) \cdot R_f$$

Anschalten einer Gleichspannung  $u_f(t) = U_f$ :

- Lösung der linearen Differentialgleichung:
- Anfangsbedingung  $i_f(0) = 0$

$$\frac{di_f}{dt} + i_f \cdot \frac{R_f}{L_f} = \frac{U_f}{L_f}$$

homogene Lösung:  $i_h(t) = C_1 e^{-t/T}$ , partikuläre Lösung:  $i_p(t) = K = U_f / R_f$

Anfangsbedingung liefert  $C_1$ :  $i_f(0) = C_1 \cdot e^{-0} + (U_f / R_f) = 0 \Rightarrow C_1 = -U_f / R_f$

- Ladestrom der Spule:  $i_f(t) = \frac{U_f}{R_f} \cdot \left(1 - e^{-t/T_f}\right)$  Zeitkonstante:  $T_f = L_f / R_f$



# „Lade-Strom“ der Läufer-Feldspulen-Induktivität (2)

Wiederholung

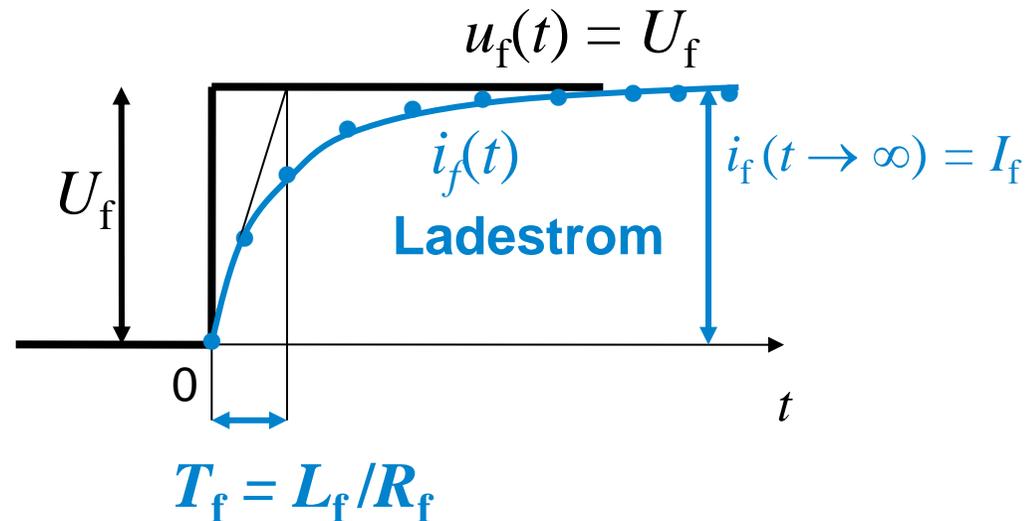
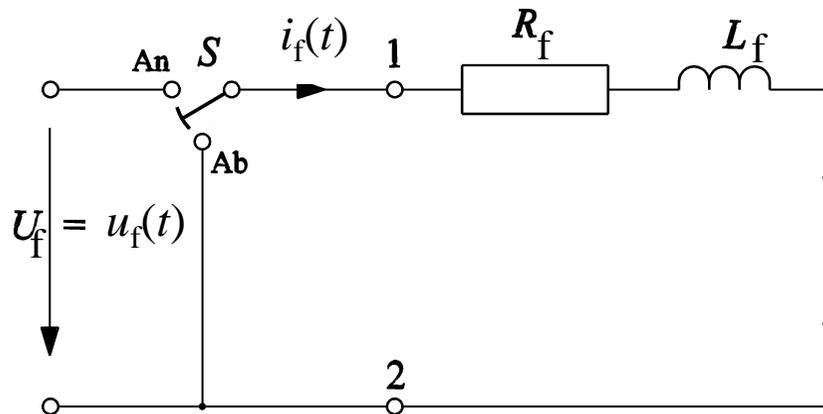


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

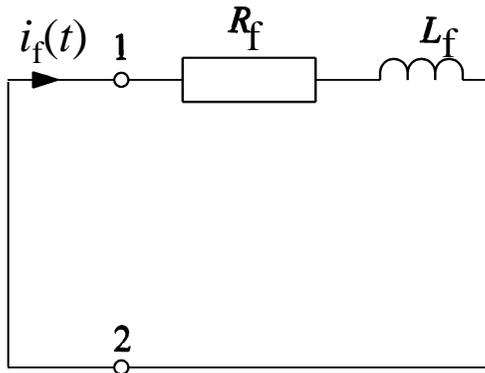
- Lade-Erregerstrom der Erregerwicklung:

$$i_f(t) = \frac{U_f}{R_f} \cdot \left(1 - e^{-t/T_f}\right)$$

- Nach unendlich langer Zeit (real nach ca.  $3 \cdot T_f$ ) fließt der Gleichstrom:  $i_f = I_f = U_f / R_f$ .



- Entladen der Spule:  $u_f = 0$  (Steuerwinkel  $\alpha = 90^\circ$ )



Feldspule (Erregerwicklung im Polrad):

$$L_f = \text{konst.}, R_f = \text{konst.}!$$

$$\frac{di_f}{dt} + i_f \cdot \frac{R_f}{L_f} = 0 \quad \text{Anfangsbedingung } i_f(0) = I_f$$

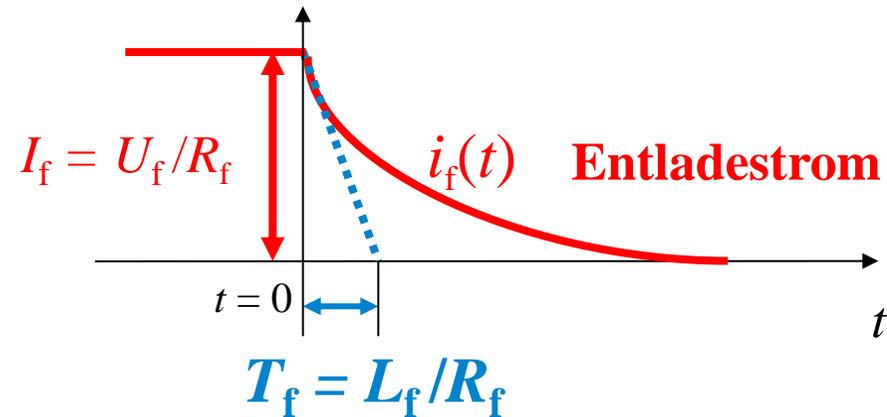
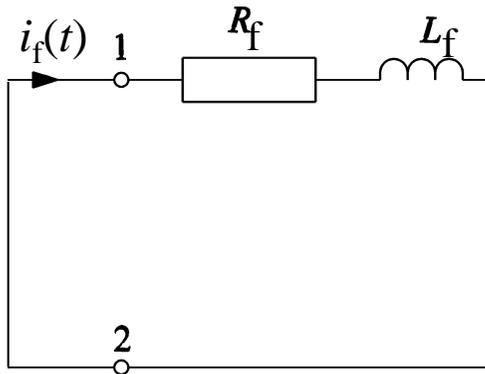
$$\text{Lösung: } i_f = i_h + i_p = i_h = C_2 \cdot e^{-t/T_f}$$

$$i_f(0) = C_2 \cdot e^{-0} = I_f = U_f / R_f \quad \Rightarrow \quad C_2 = U_f / R_f$$

- Abklingender Erregerstrom:

$$i_f(t) = \frac{U_f}{R_f} \cdot e^{-t/T_f}$$

- Entladen der Spule:  $u_f = 0$

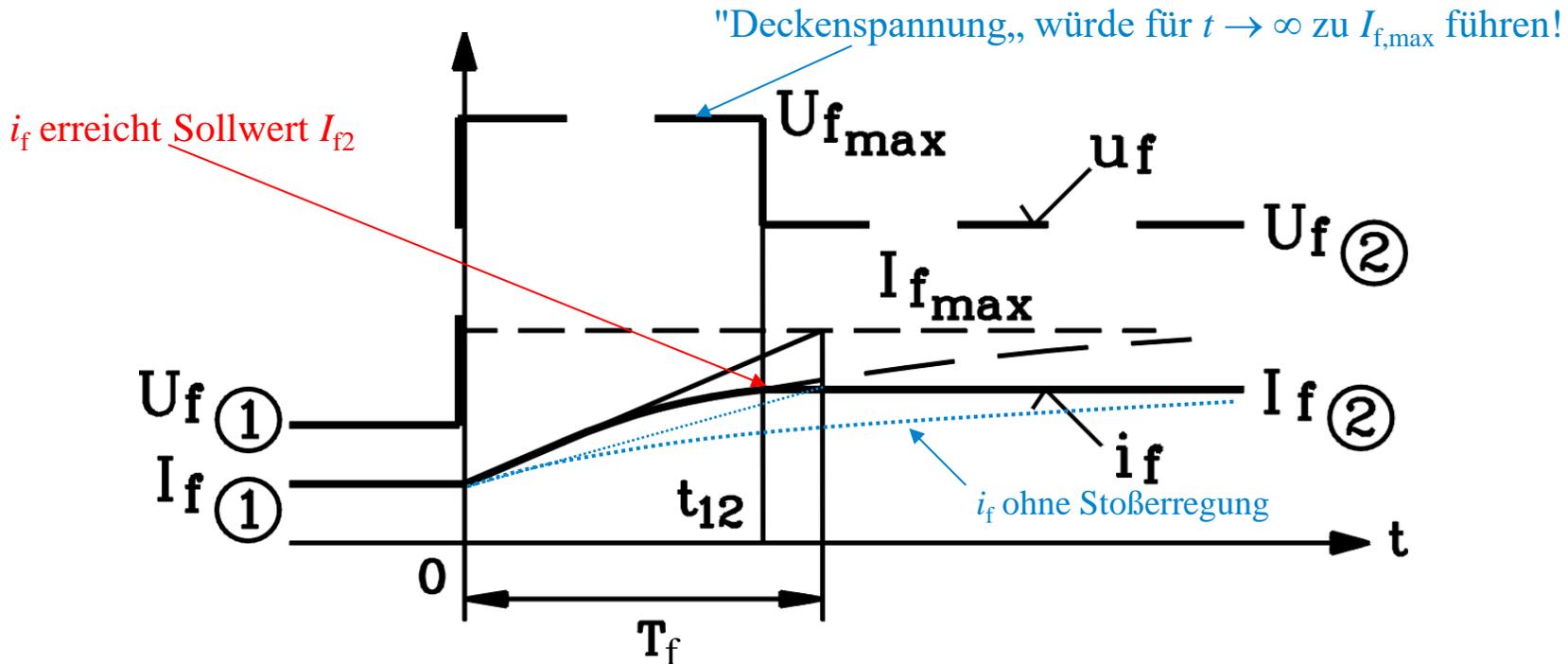


- Abklingender Erregerstrom:  $i_f(t) = \frac{U_f}{R_f} \cdot e^{-t/T_f}$

- Nach unendlich langer Zeit (real nach ca.  $3 \cdot T_f$ ) fließt kein Erregerstrom mehr!

# Stoßerregung

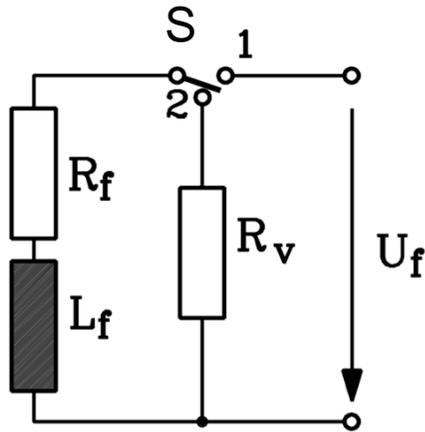
## Möglichst rascher Feldaufbau (1)



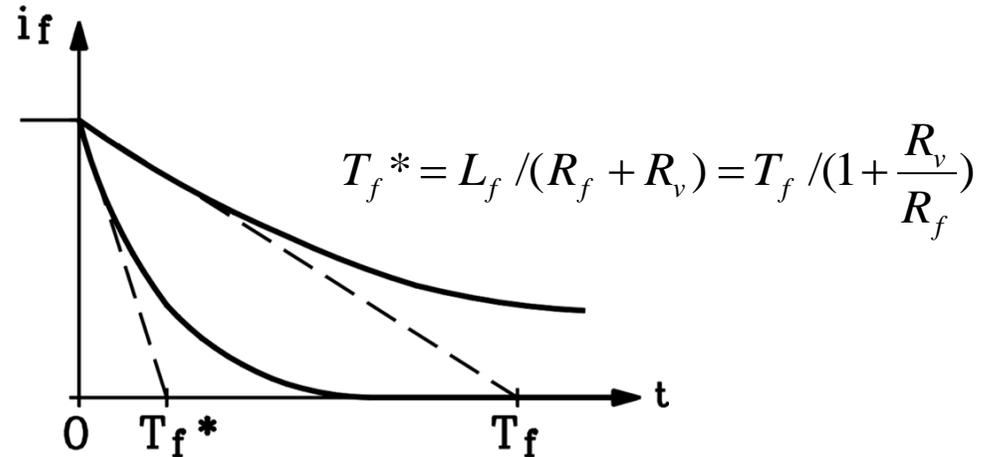
- **Stoßerregung:** Für möglichst raschen Läuferfeld**aufbau**:  
Einprägen der "Deckenspannung"  $U_{f\max}$  für  $0 \leq t \leq t_{12}$  über Steuerwinkel  $\alpha = 0!$
- Erregerstrom  $i_f$  wird in minimaler Zeit  $t_{12} < T_f$  vom Ausgangswert  $I_{f1}$  zum neuen Sollwert  $I_{f2}$  geführt.
- Bei offener Ständerwicklung: Zeitkonstante = **Feld-Leerlaufzeitkonstante**  $T_f = L_f/R_f$
- **OHNE Stoßerregung:** Stromaufbau dauert ca.  $(3 \dots 5) \cdot T_f$

# Schnellentregung

## Möglichst rascher Feldabbau



Vorwiderstand  $R_v$



Erregerstromverlauf

**Beispiel:** Bei  $R_v = 9R_f$  sinkt  $T$  von  $T_f$  auf  $T_f^* = T_f/10$ , z. B. von 3 s auf 0.3 s.  
Nach ca.  $3 \cdot T_f^* = 1$  s ist das Läuferfeld Null.

# Schnellentregung

## Möglichst rascher Feldabbau

### a) Mit Schnellentregungswiderstand:

Einschalten eines Vorwiderstands  $R_v$  (Schalter S in Stellung 2),  
der die Feldzeitkonstante  $T_f$  um  $1 + R_v/R_f$  verkleinert.

### b) Mit Gegenspannung durch den Stromrichter:

$\alpha = \text{maximal (z. B. } 150^\circ < 180^\circ\text{)}$ :

Negative Spannung  $U_f$  zwingt  $I_f$  gegen Null.  
Dann sperren die Thyristoren.

## Zusammenfassung: Elektrische Erregereinrichtungen

- Gleichspannungsquelle (Stromrichter) und zwei Schleifringe
- Rotierende Synchron-Außenpol-Erregermaschine mit Gleichrichter
- Zeitkonstante für Feldaufbau und Feldabbau
- Stoßerregung mit Deckenspannung
- Schnellentregung mit Vorwiderstand oder „Gegenspannung“  $U_f < 0$

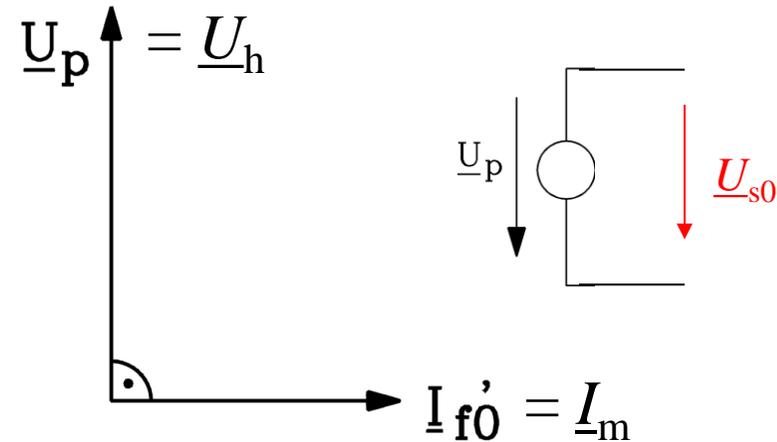
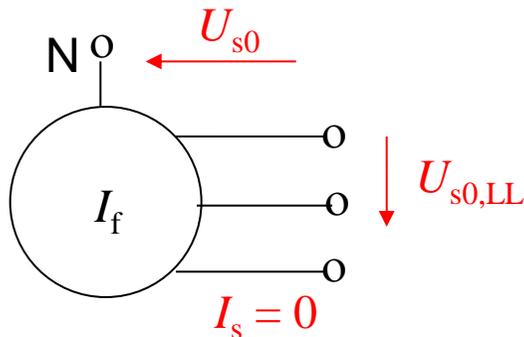
## 9. Erregereinrichtungen und Kennlinien

### 9.1 Elektrische Erregereinrichtungen

### 9.2 Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie

# Leerlaufbetrieb $I_s = 0$ bei $n = \text{konst.}$

- **Generatorbetrieb:** Angetriebene, im Läufer erregte Synchronmaschine:  $I_f > 0$ ,
- Stator-Drehfeldwicklung (meist in Y geschaltet) hat offene Klemmen U, V, W



## Generator Leerlauf-Betrieb:

Ständerklemmenspannung =  
= Polradspannung je Strang

$U_{s0}(I_f)$  bzw.  $U_{s0}(I_f')$ :  $U_{s0} = U_p = U_h$

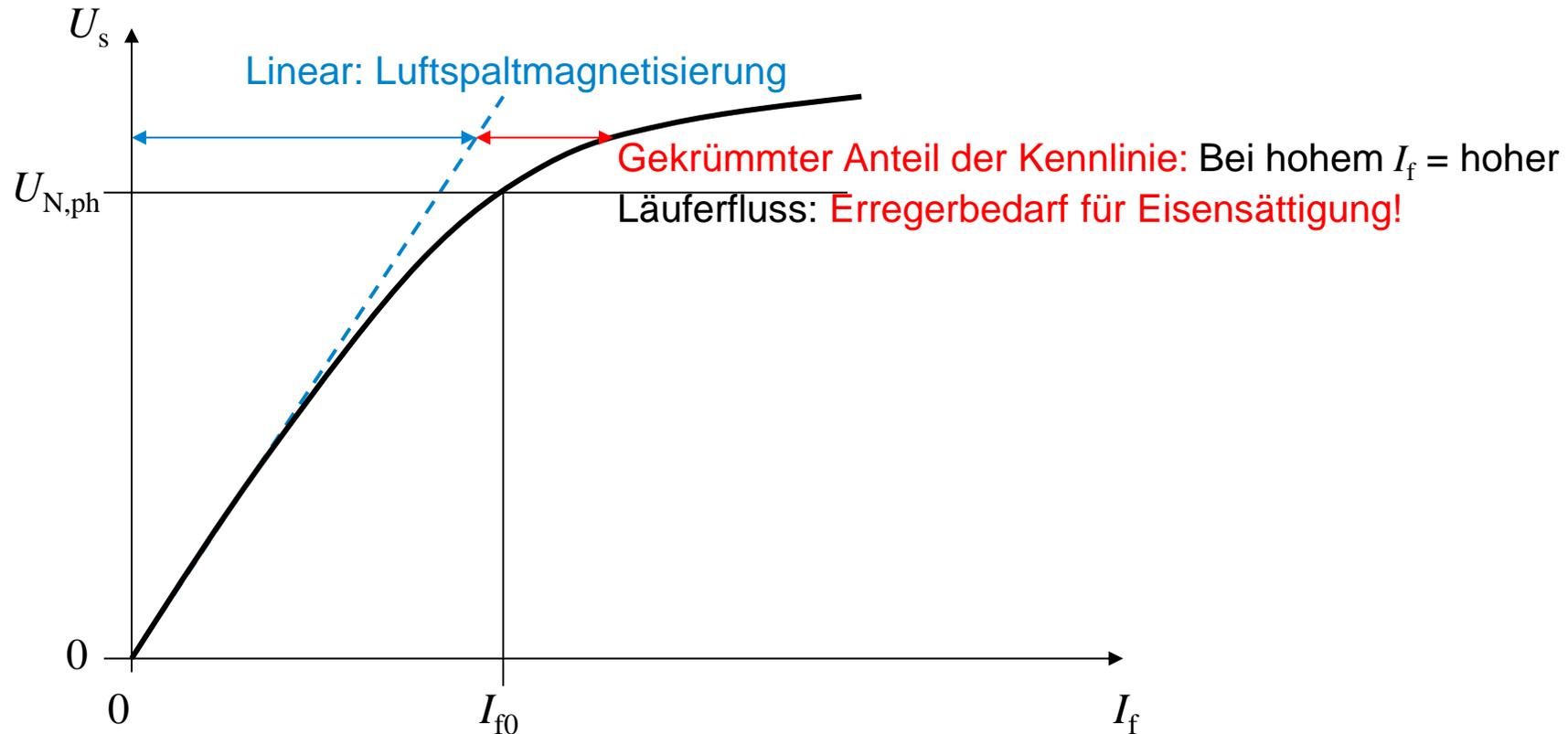
$$\underline{U}_p = jX_h \underline{I}'_{f0}$$

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

$$\underline{U}_h = jX_h \underline{I}_m$$

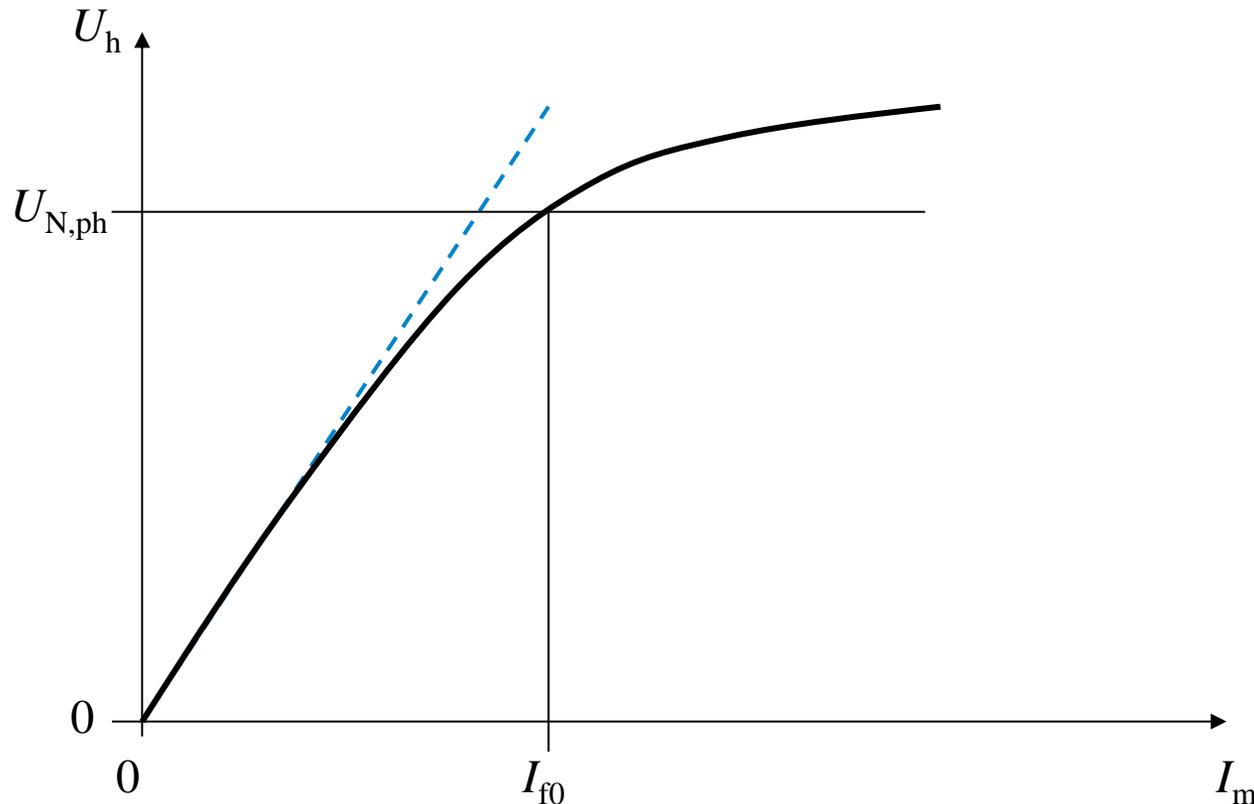
# Leerlaufkennlinie $U_s(I_f)$ bei $n = \text{konst.}$

- **Leerlaufkennlinie:**  $U_{s0}(I_f)$  bzw.  $U_{s0}(I'_f)$ .
- $U_{s0} = U_p = U_h$  und  $I_f = I_m$ .



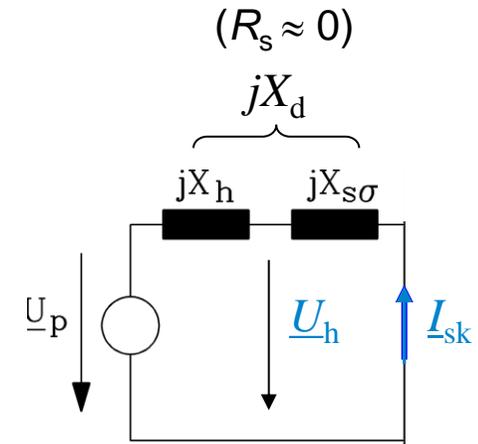
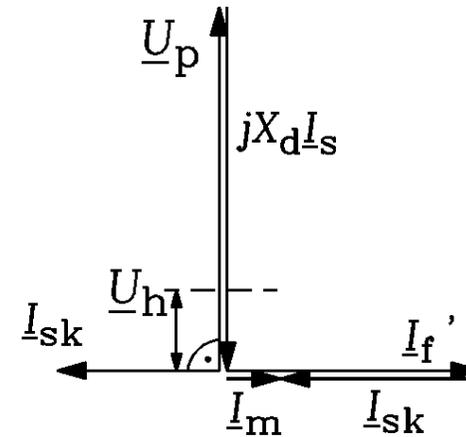
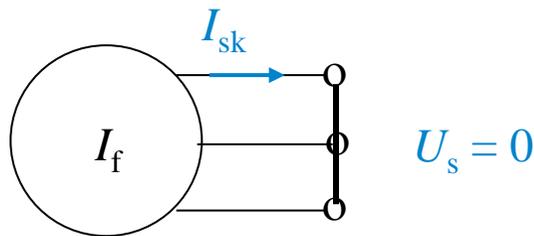
# Leerlaufkennlinie $U_s(I_f) =$ Magnetisierungskennlinie $U_s(I_m)$

- **Leerlaufkennlinie:**  $U_{s0}(I_f) = U_h(I_m)$



# Kurzschlussbetrieb $U_s = 0$ bei $n = \text{konst.}$ ( $R_s = 0$ )

- **Generatorbetrieb:** Angetriebene, im Läufer erregte Synchronmaschine:  $I_f > 0$ ,
- Stator-Drehfeldwicklung (meist in Y geschaltet) an Klemmen U, V, W kurzgeschlossen.



## Generator Kurzschlussbetrieb:

Ständerstrom/Strang = Kurzschlussstrom  $I_s = I_{sk}$ ,

$I_{sk}(I_f)$  bzw.  $I_{sk}(I'_f)$

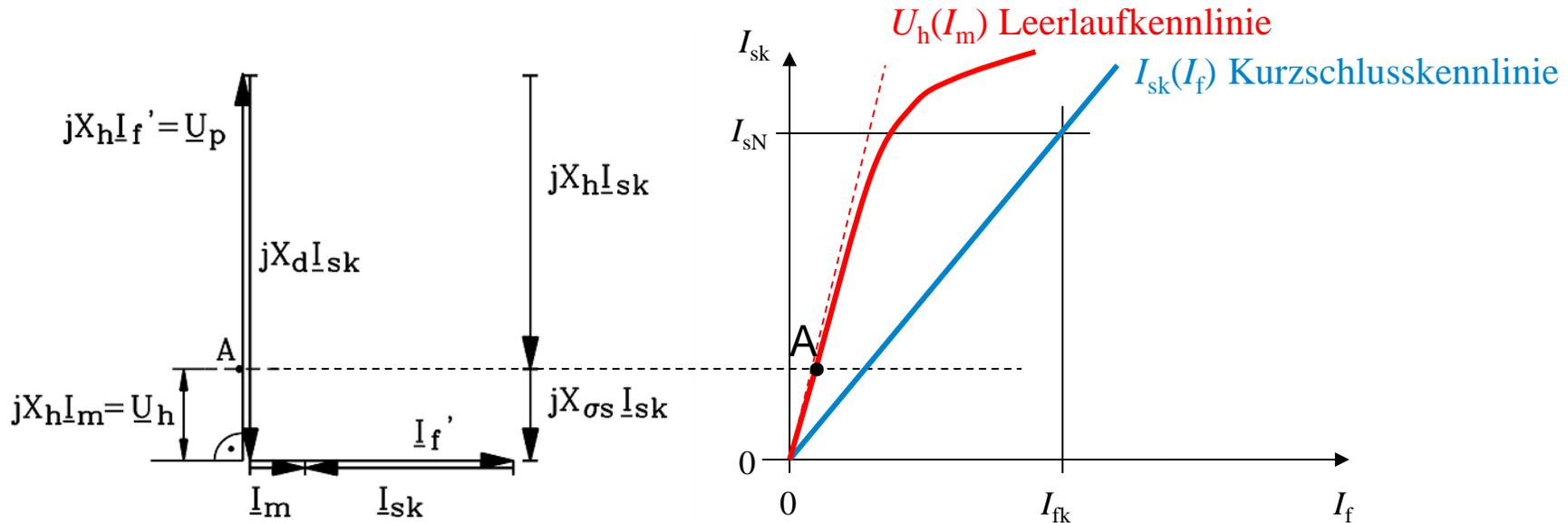
$$\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_f = \underline{I}'_f$$

$$\underline{U}_p = jX_h \underline{I}'_f = -jX_d \underline{I}_{sk}$$

$$\underline{U}_h = jX_h \underline{I}_m = -jX_{s\sigma} \underline{I}_{sk}$$

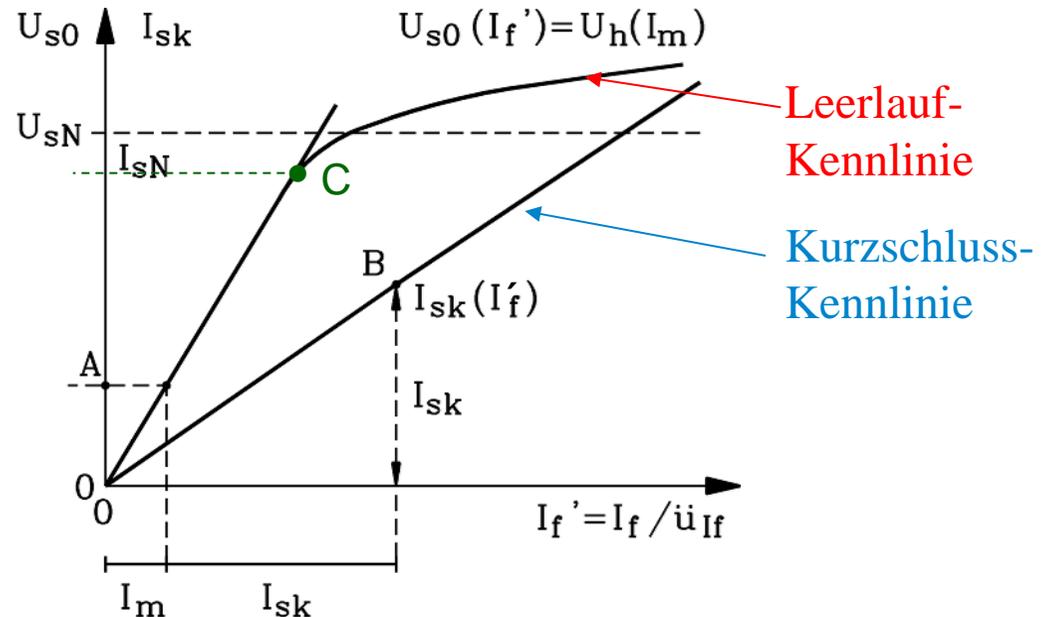
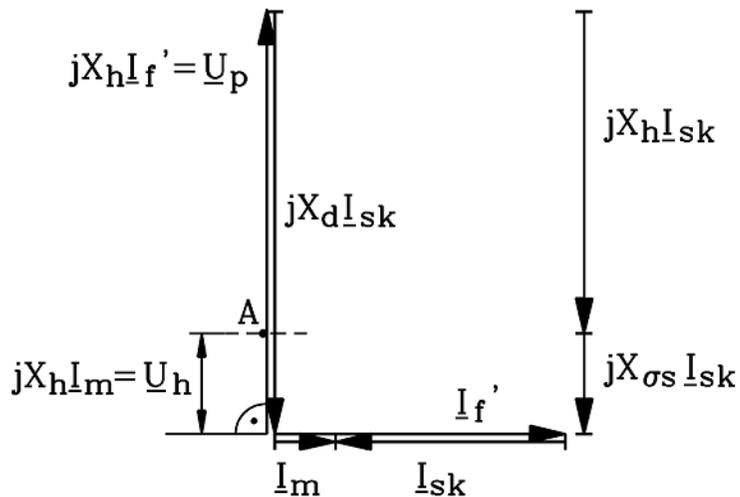
Bei Schenkelpol-  
Maschinen:  $X_h = X_{dh}$

# Kurzschlusskennlinie bei $n = \text{konst.}$ ( $R_s = 0$ )



- **Kurzschlusskennlinie:**  $I_{sk}(I_f)$  bzw.  $I_{sk}(I_f')$
- $I_m = I_f' - I_{sk}$  klein, daher Luftspaltfeld und  $U_h$  klein
- Magnetischer Arbeitspunkt A auf Magnetisierungskennlinie dort, wo Eisen nicht gesättigt.
- Daher ist **Kurzschlusskennlinie**  $I_{sk}(I_f)$  bzw.  $I_{sk}(I_f')$  **LINEAR** (ungesättigt).

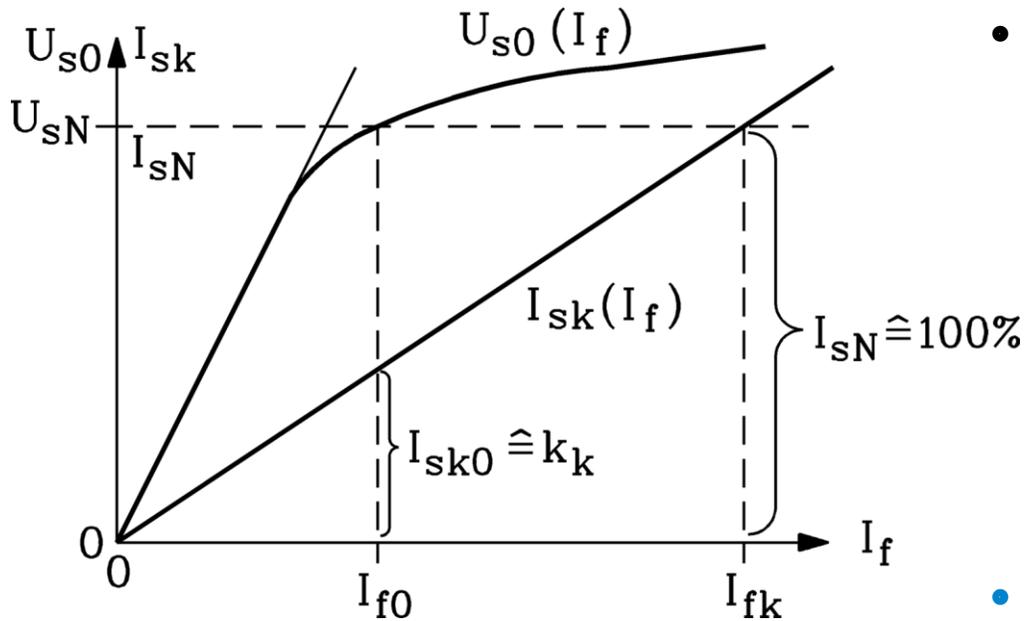
# Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie bei $n = \text{konst.}$ ( $R_s = 0$ )



- Punkt B der Kurzschlusskennlinie  $I_{sk}(I'_f)$  ermittelt aus Vorgabe  $I_{sk}$ :  $I_{sk} \cdot \sqrt{R_s^2 + X_{s\sigma}^2} = U_h \approx I_{sk} \cdot X_{s\sigma}$   
 $U_h \rightarrow$  Punkt A  $\rightarrow I_m$ :  $I'_f = |I'_f| = |I_{sk}| + |I_m|$
- Kurzschlusskennlinie **linear bis zu jenem  $I_{sk}$** , wo  $I_{sk} \cdot X_{s\sigma}$  Arbeitspunkt C erreicht!

# Synchronreaktanzen $X_d$

## Messung



- Wegen  $I_{sk} = U_p / X_d$  (bei  $R_s = 0$ ):
  - Bei "**Leerlauf-Erregerstrom**"  $I_{f0}$  ist die Leerlaufspannung die Nenn-Strangspannung:  $U_{s0} = U_{sN}$
  - Bei Erregerstrom  $I_{f0}$  fließt bei Klemmenkurzschluss der **Kurzschlussstrom**  $I_{sk0}$ :

$$I_{sk0} = \frac{U_p(I_{f0})}{X_d} = \frac{U_{s0}}{X_d} = \frac{U_{sN}}{X_d}$$

- Synchronreaktanzen:**  $X_d = \frac{U_{sN}}{I_{sk0}}$

- Synchronreaktanzen  $x_d$  auf Nennimpedanz  $Z_N = U_{sN} / I_{sN}$  bezogen:**

$$x_d = \frac{X_d}{Z_N} = \frac{U_{sN}}{I_{sk0}} \cdot \frac{I_{sN}}{U_{sN}} = \frac{I_{sN}}{I_{sk0}} = \frac{I_{fk}}{I_{f0}}$$

# Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis $k_K$

- Bezogene synchrone Reaktanz  $x_d$ : Verhältnis des Kurzschluss-Erregerstroms  $I_{fk}$  zum Leerlauf-Erregerstrom  $I_{f0}$ .
- Kehrwert heißt "**Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis**"  $k_K = 1/x_d$ .

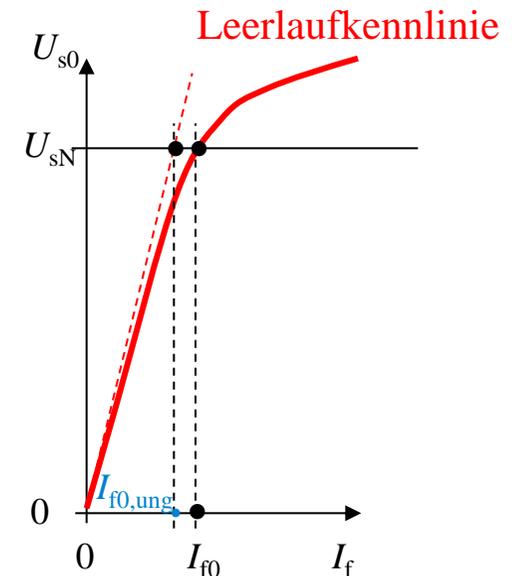
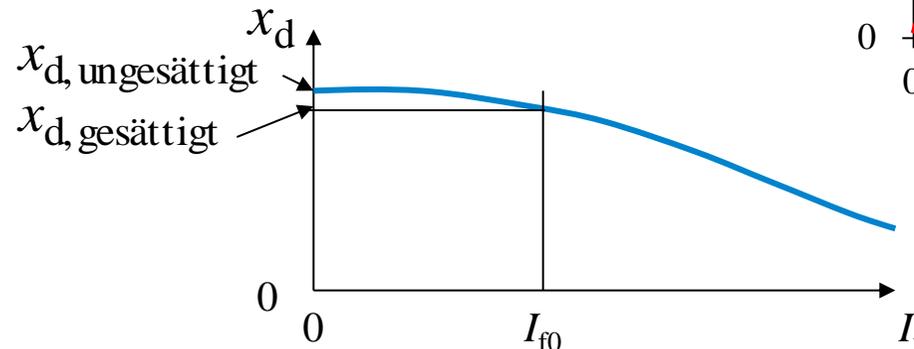
$$k_K = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{I_f (U_s = U_{sN}, I_s = 0)}{I_f (U_s = 0, I_s = I_{sN})} = \frac{1}{x_d}$$

- Da  $I_{f0}$  bei Eisensättigung höher ist als bei ungesättigtem Eisen  $I_{f0,unges}$ , ist das **gesättigte**  $k_K$  größer als das ungesättigte  $k_{K,ung} < k_K$ .
- Daher ist die **gesättigte Synchronreaktanz** kleiner als die ungesättigte !

$$x_{d, gesättigt} = 1/k_K$$

$$x_{d, ungesättigt} = 1/k_{K, ung}$$

$$x_{d, gesättigt} < x_{d, ungesättigt}$$



# Synchronreaktanzen $X_d$

## Einfluss der Eisensättigung

$$X_d = 2\pi f \cdot L_d \quad L_d = L_{s\sigma} + L_{dh}$$

### a) Ideal ungesättigtes Eisen ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ ):

Nur Luftspalt wird magnetisiert:

Magnetische Spannung:  $V_\delta = H_\delta \delta$

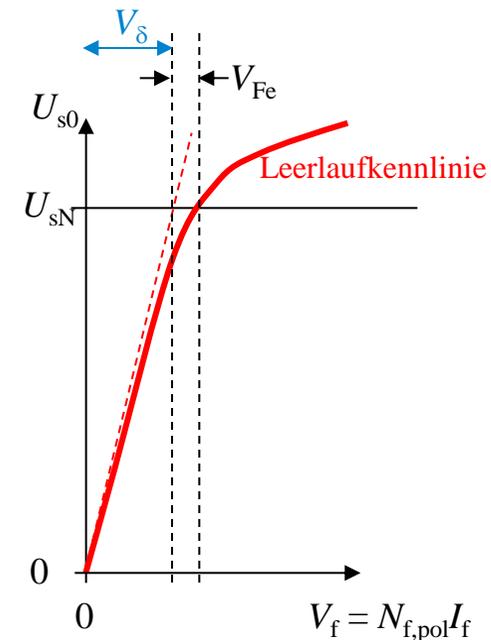
$$L_{dh} = L_h : L_{h, \text{ungesättigt}} = c_d \cdot \mu_0 \cdot \frac{2m}{\pi^2 p} \cdot (N_s k_{ws})^2 \cdot \frac{\tau_p \cdot l_{Fe}}{\delta}$$

### b) Gesättigtes Eisen ( $\mu_{Fe} < \infty$ ):

Zusätzlich zu  $V_\delta \sim \delta$  muss auch Flusspfad des Ständerfelds im Ständer- und Läuferisen magnetisiert werden:

Zusätzliche magnetische Spannung:  $V_{Fe}$

$$L_{h, \text{gesättigt}} = \frac{L_{h, \text{ungesättigt}}}{1 + \frac{V_{Fe}}{V_\delta}} < L_{h, \text{ungesättigt}}$$



# Bezogene synchrone Reaktanz

$$x_d = X_d / Z_N$$

- **Synchrone Reaktanz**  $X_d = X_{dh} + X_{s\sigma} \approx$  Hauptinduktivität  $X_h \sim N_s^2 \tau_p / \delta$ .

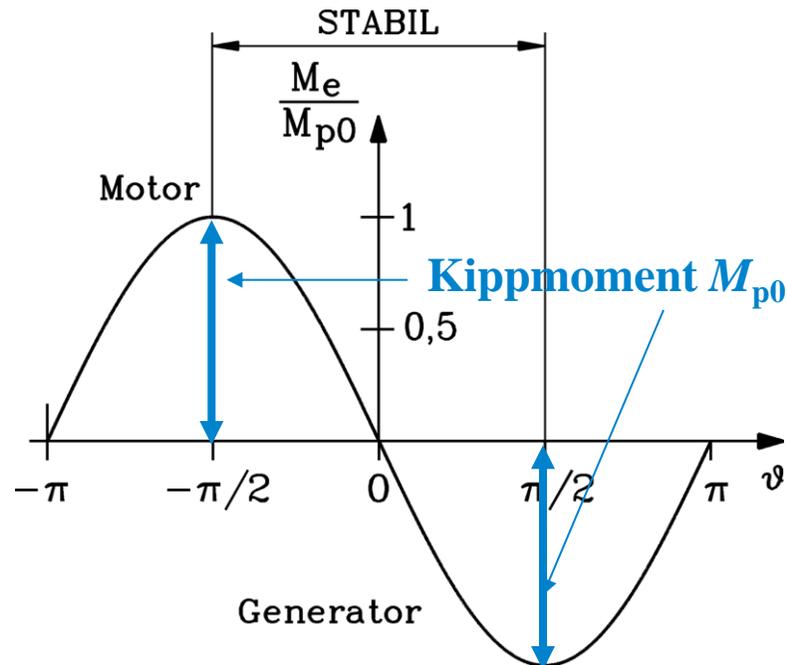
	Polzahl $2p$	Synchronreaktanz $x_d$ /p.u.
<b>Turbogeneratoren</b>	2	<b>ca. 2.0</b>
<b>Schenkelpolmaschinen</b>	$\geq 4$	<b>0.8 ... 1.2</b>
<b>PM-Maschinen mit Oberflächenmagneten</b> (Selten-Erd-Magnete: Permeabilität $\approx \mu_0$ )	$\geq 4$	<b>0.3 ... 1.0</b>

- Bei zweipoligen Synchronmaschinen ist  $\tau_p$  groß, daher auch  $x_d$  **groß!**

# Bezogene synchrone Reaktanz

$$x_d = X_d / Z_N$$

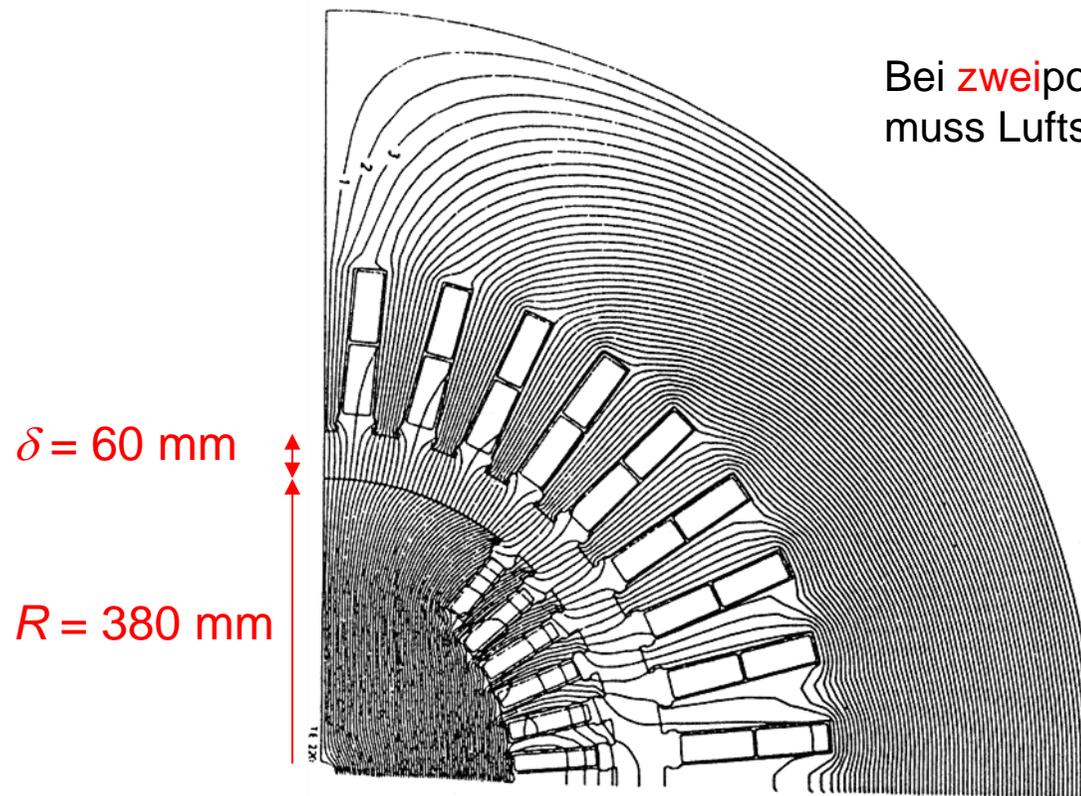
- Es muss  $X_d$  für ausreichend **großes Kippmoment**  $M_{p0} \sim U_s U_p / X_d$  hinreichend klein sein.
- Gegensatz zur Asynchronmaschine:  
Bei ASM muss  $X_h$  groß sein für kleinen  $I_m$ , da vom Netz und nicht vom Läufer magnetisiert wird!  
Großes Kippmoment  $M_b$  über kleines  $X_\sigma$  erreicht!



# Luftspaltweite $\delta$ der Synchronmaschine

## Beispiel:

- a) Vollpolmaschine:  $2p = 2$ , 125 MVA,  $\delta = 60$  mm (großer Luftspalt!)
- b) Schenkelpolmaschine:  $2p = 12$ , 70 MVA,  $\delta = 27$  mm !



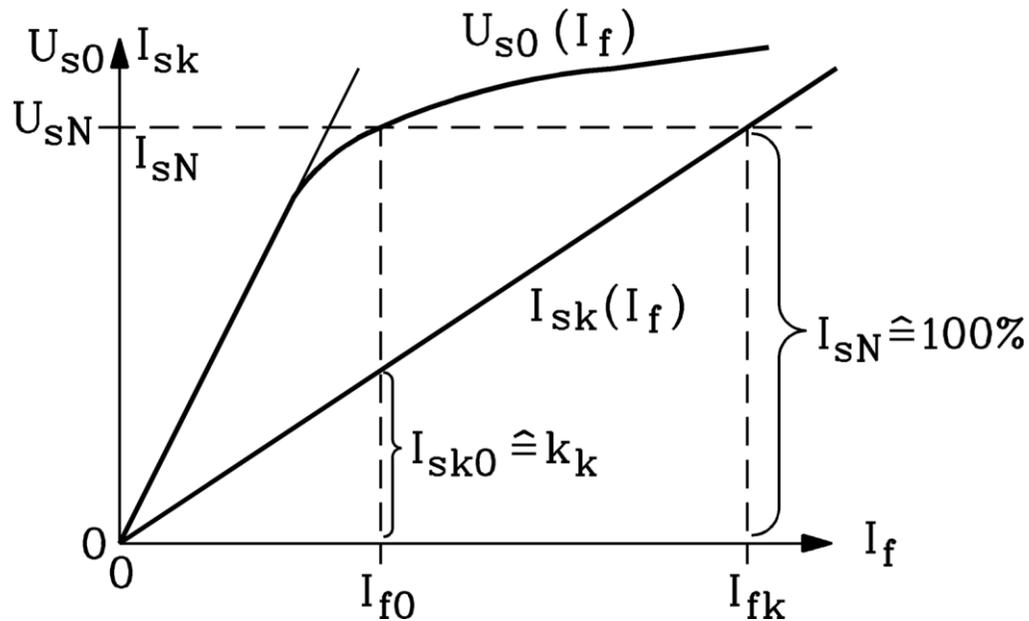
Bei **zwei**poligen Synchronmaschinen ( $\tau_p$  groß !)  
muss Luftspalt  $\delta$  **groß** sein für Verkleinerung von  $x_d$ !

Quelle:  
E. Fuchs, IEEE-PAS

Vollpolmaschine:  $2p = 2$ , 125 MVA

# Beispiel: Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis $k_K$

Zweipolige Vollpolmaschine:  $2p = 2$ , 125 MVA:



$$k_K = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{1}{x_d}$$

Aus Leerlauf-/Kurzschlusskennlinie (siehe Bild) folgt:  $k_K = 0.43$ ,  $x_d = 1/0.43 = 2.32$  p.u.

## Zusammenfassung: Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie

- Gekrümmte (gesättigte) Leerlaufkennlinie (LL) bei  $n = \text{konst.}$
- Lineare (ungesättigte) Kurzschlusskennlinie (KS) bei  $n = \text{konst.}$
- Prüffeldmessung: Bestimmung von  $x_d$  aus LL- und KS-Kennlinie
- Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis  $k_K = 1/x_d$
- $x_d$  soll klein sein für hohes Kippmoment;  
deshalb bei  $2p = 2$ :  
Luftspalt vergrößert, aber dafür erhöhter Erregerbedarf  $N_{f,\text{pol}} \cdot I_f$