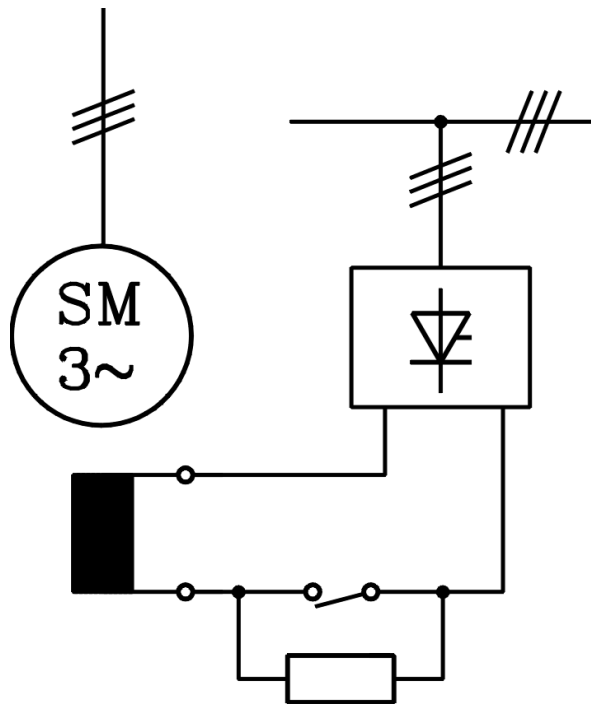


Vorlesungsinhalt

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

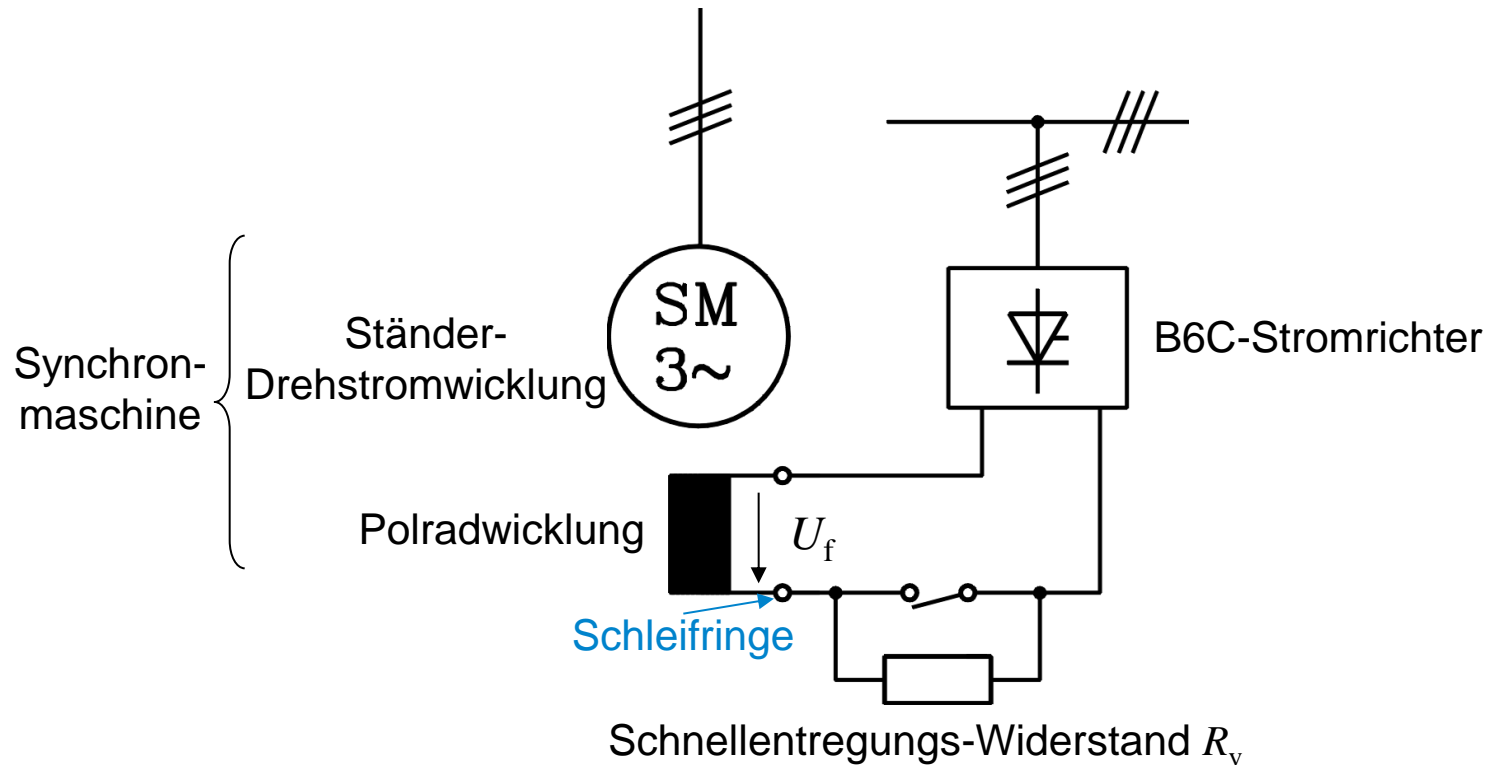


9. Erregereinrichtungen und Kennlinien

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 α)
- U_f über zwei Schleifringe der Polradwicklung zugeführt

Erregung des Polrads über zwei Schleifringe

Beispiel:

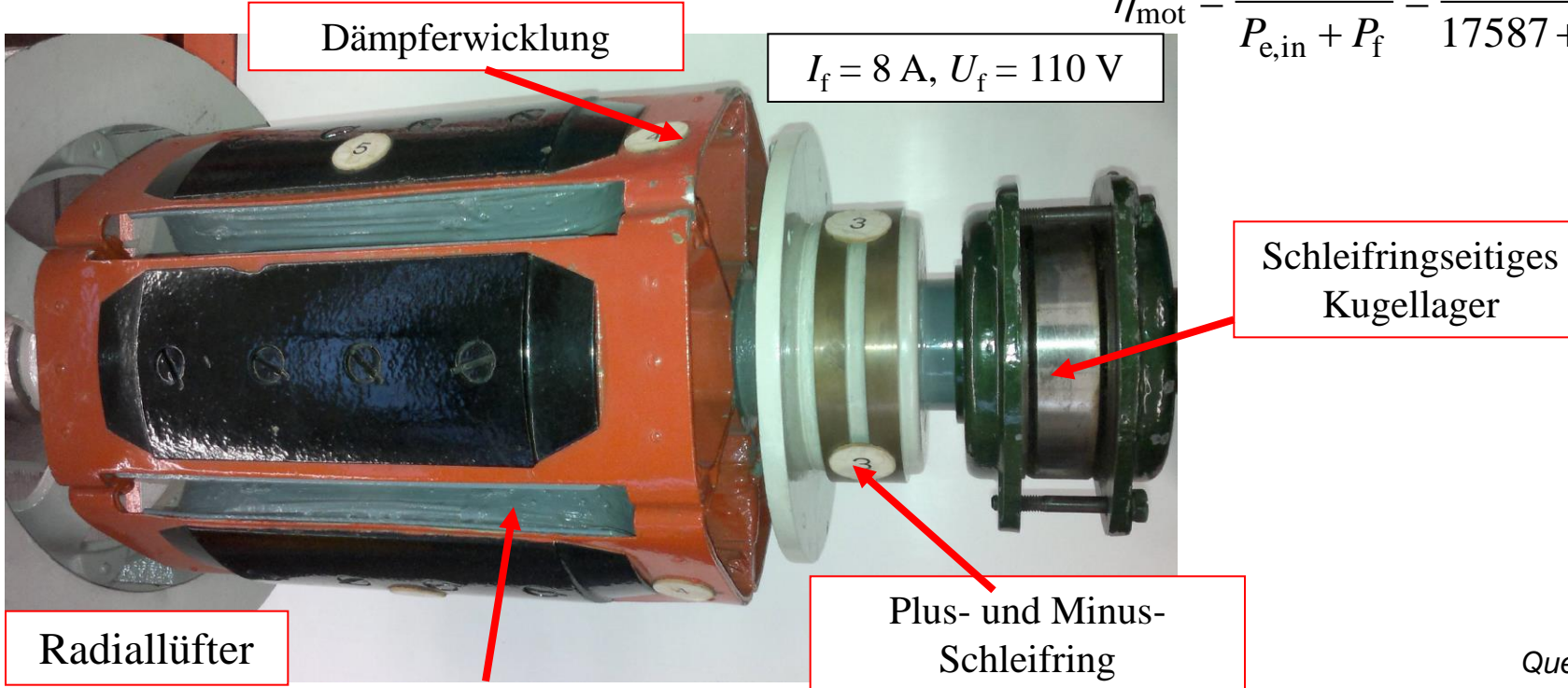
Sechspoliger Schenkelpol-Synchronmotor:

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

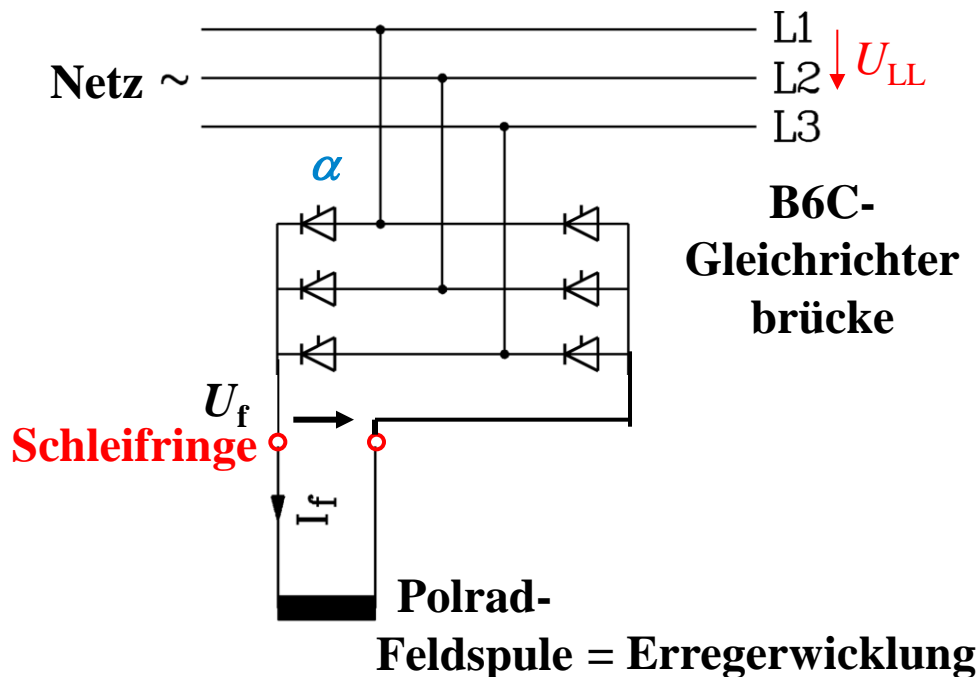
Erreger-Gleichrichter

B6C-Brücke

- Sechspulsige Gleichrichtung über B6C-Thyristor-Gleichrichterbrücke aus Drehstromnetz L1, L2, L3: Gleichgerichtete Spannung $U_d =$ Erregerspannung U_f , **veränderbar über Ansteuerwinkel α !** 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 (α)

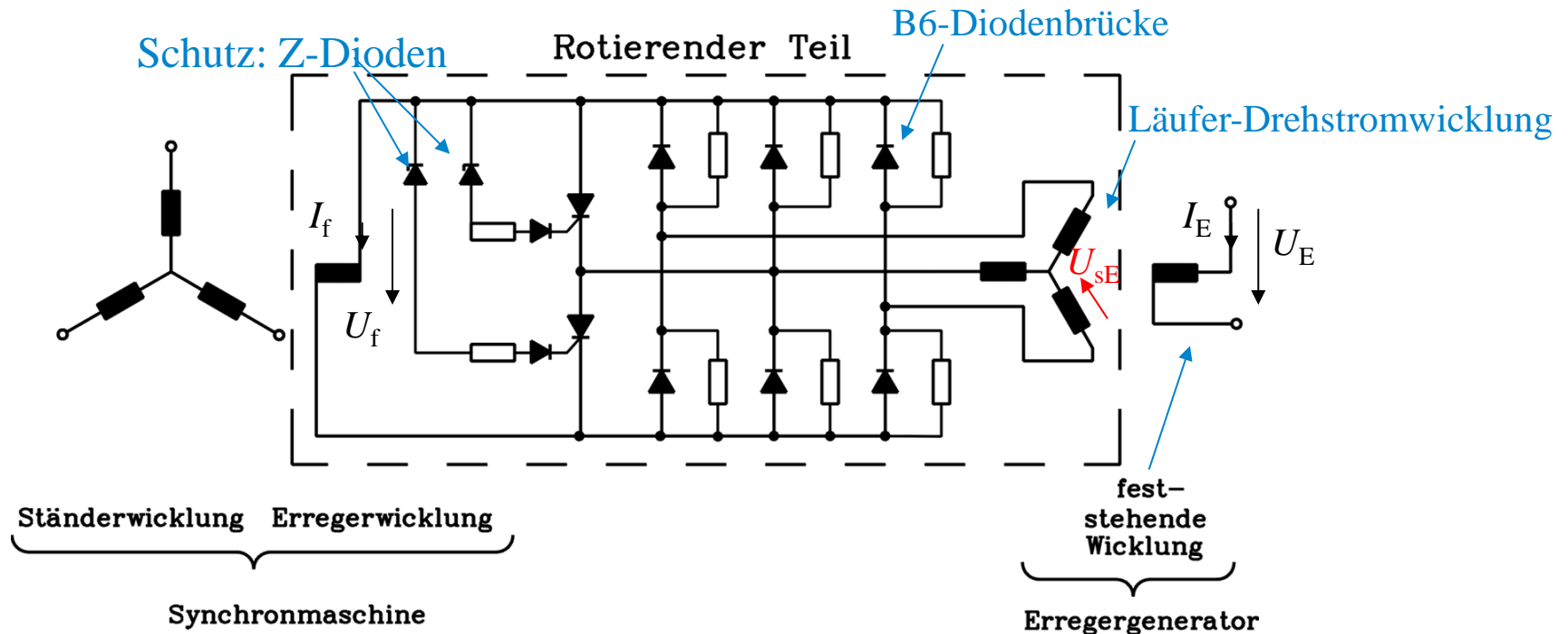


Gesteuerter Brückengleichrichter:

- Variabler Zündwinkel $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$:
- Maximale gleichgerichtete Spannung U_{f0} bei Zündwinkel $\alpha = 0!$
- 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

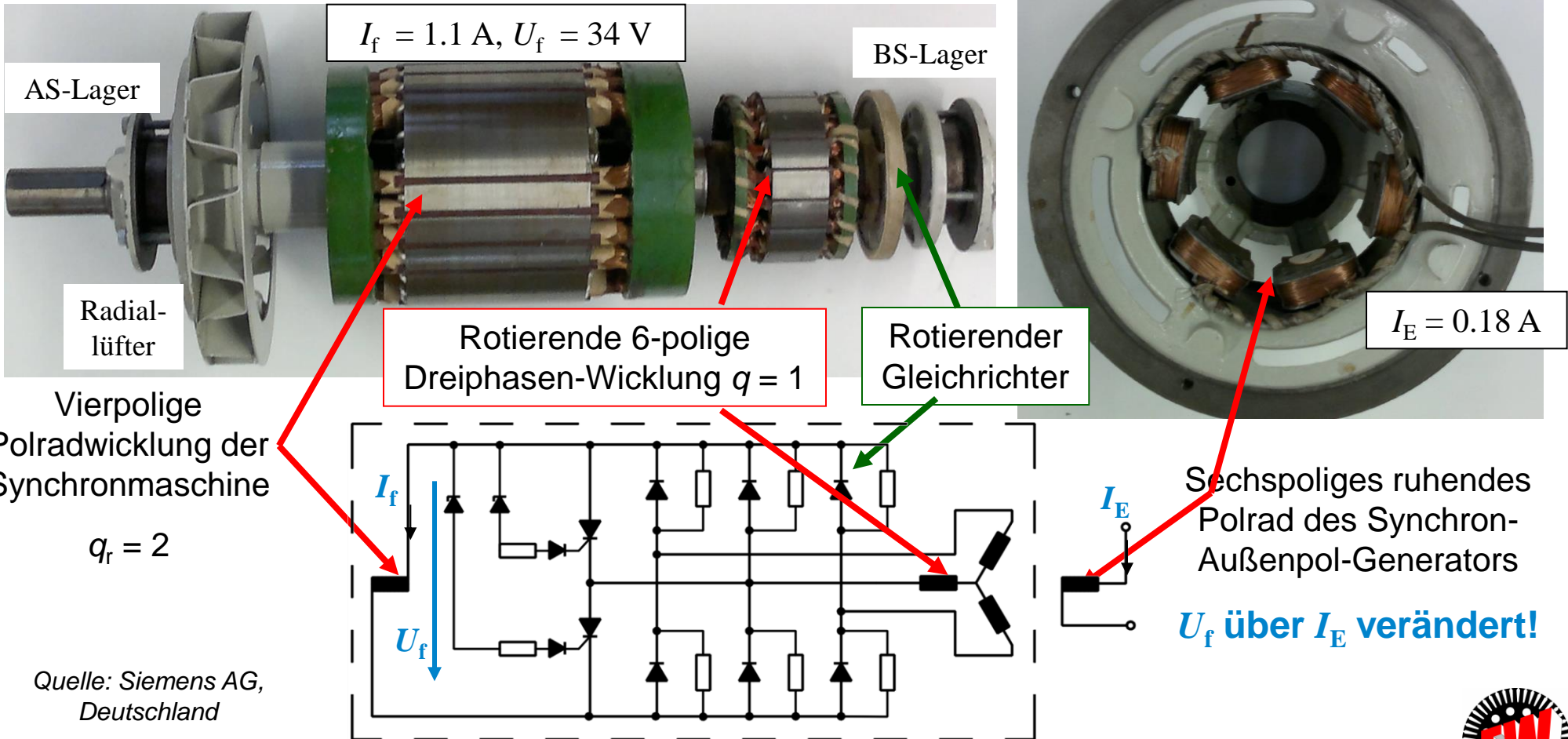
- **Erregergenerator** an Synchron-Hauptmaschine gekuppelt
- Erregergenerator = Synchrongenerator als **Außenpolmaschine**:
 - a) Ständer = "ruhendes Polrad,, (feststehende Wicklung).
 - b) I_E erregt ruhendes Erregermagnetfeld B_{fE} .
 - c) Läufer trägt Drehstromwicklung,
in der durch B_{fE} bei $n \neq 0$ Drehspannungssystem U_{sE} induziert wird.
- Angeschlossene **mitotierende 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, $\eta = 0.97$, ...)

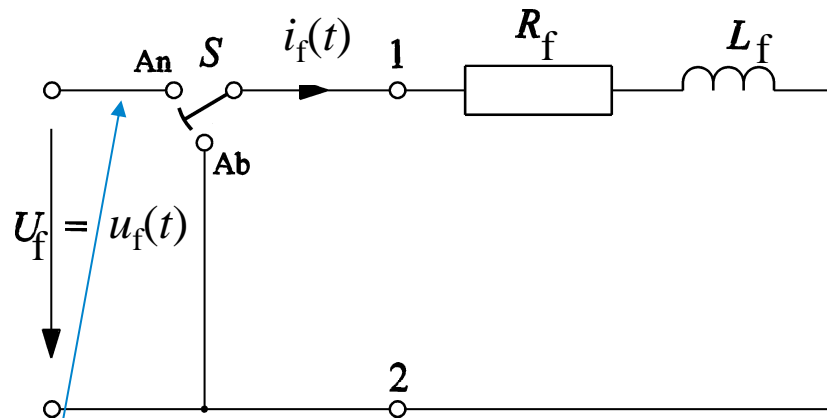


„Lade-Strom“ der Läufer-Feldspulen-Induktivität (1)

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

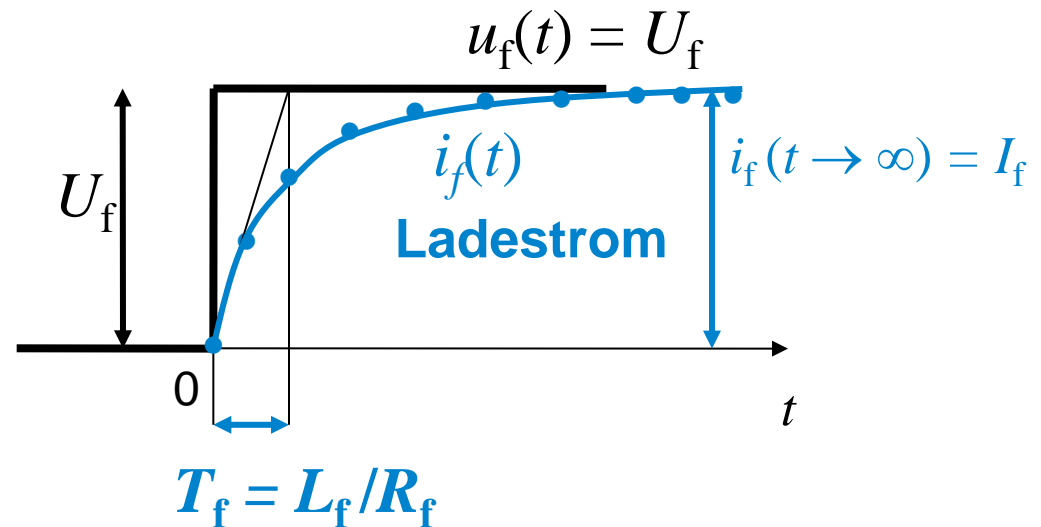
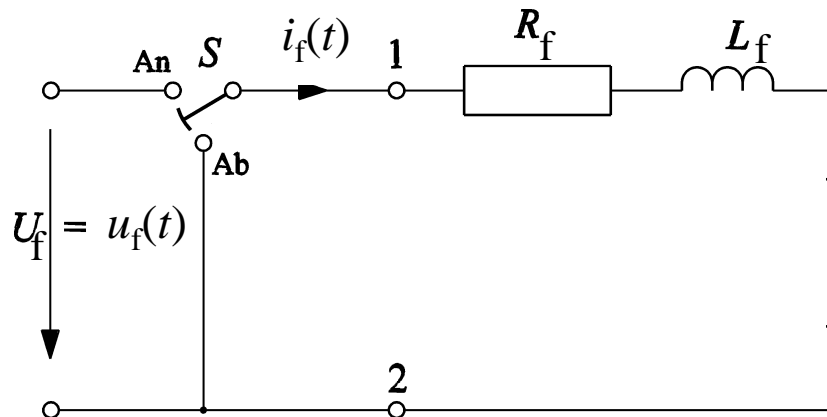


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Lade-Erregerstrom der Erregerwicklung:

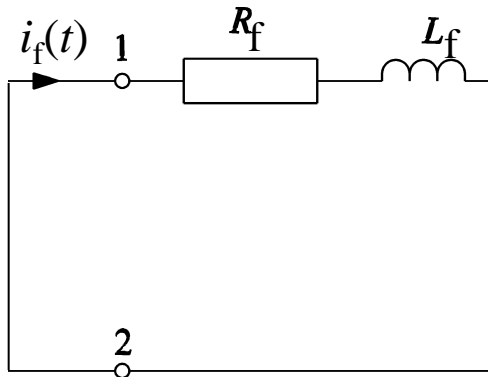
$$i_f(t) = \frac{U_f}{R_f} \cdot \left(1 - e^{-t/T_f}\right)$$

- 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):

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

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

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

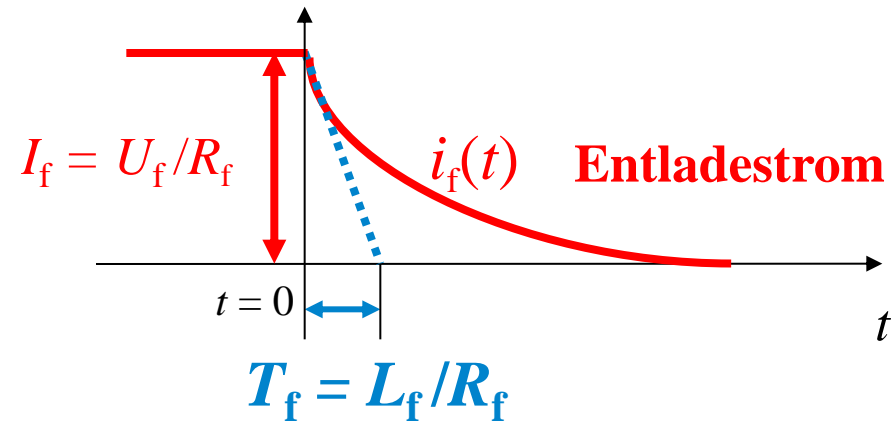
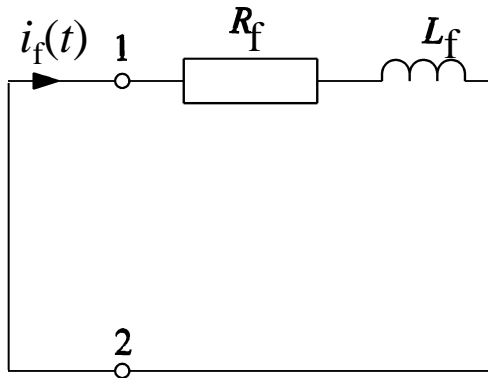
$$i_f(0) = C_2 \cdot e^{-0} = I_f = U_f / R_f \quad \Rightarrow \quad C_2 = U_f / R_f$$

- Abklingender Erregerstrom:

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



- Entladen der Spule: $u_f = 0$

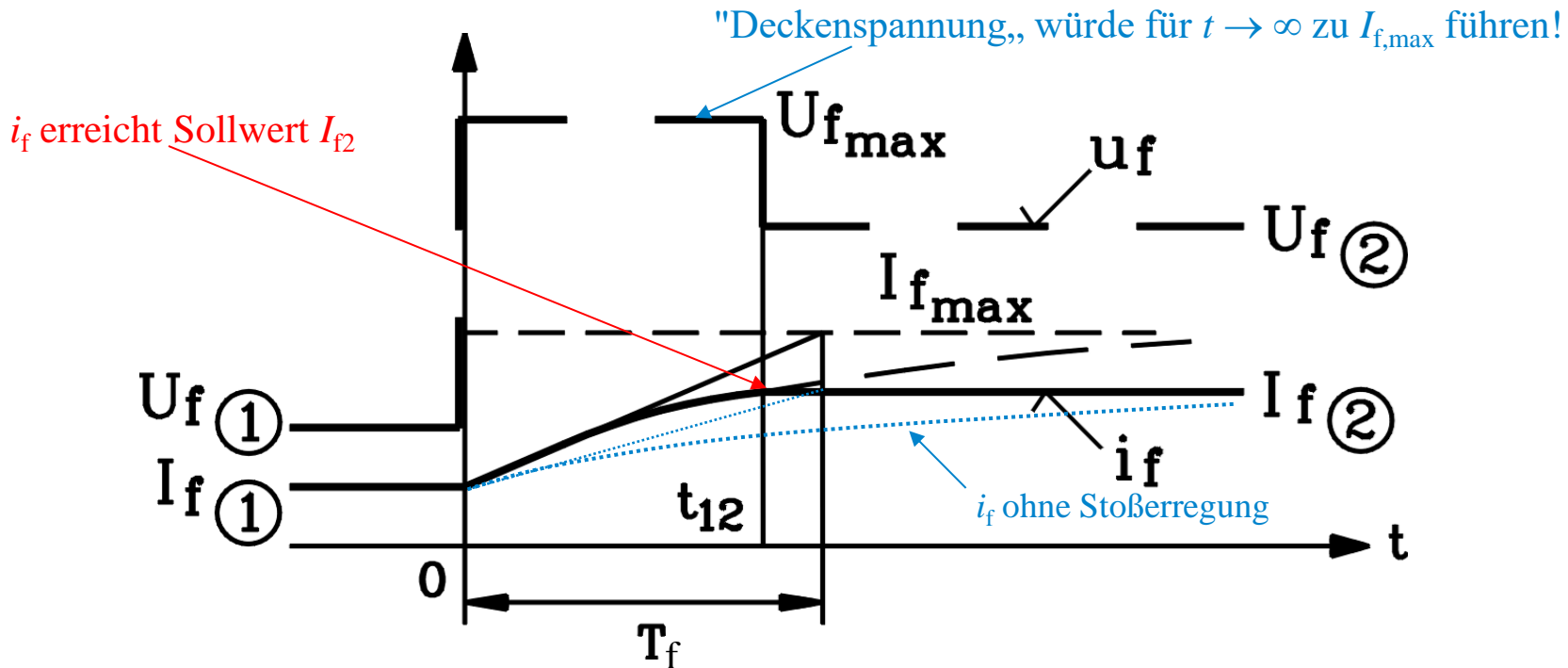


- Abklingender Erregerstrom:
$$i_f(t) = \frac{U_f}{R_f} \cdot e^{-t/T_f}$$

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

Stoßerregung

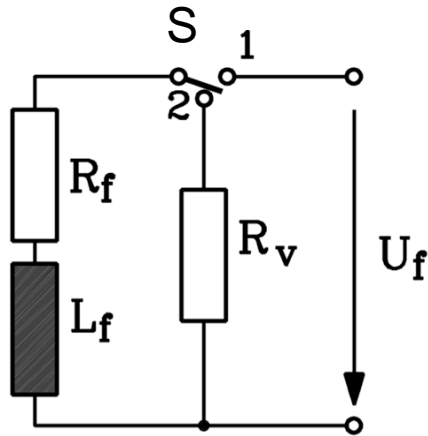
Möglichst rascher Feldaufbau (1)



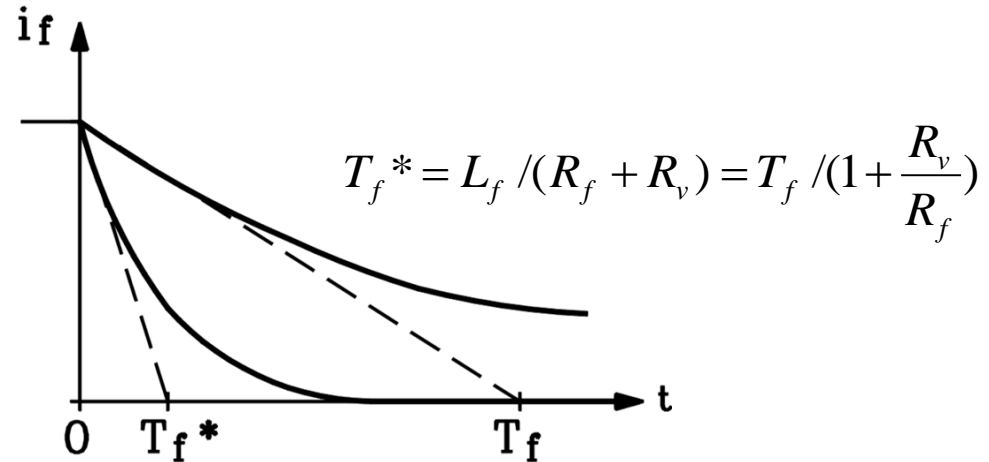
- **Stoßerregung:** Für möglichst raschen Läuferfeld**aufbau**:
Einprägen der "Deckenspannung" $U_{f\max}$ für $0 \leq t \leq t_{12}$ über Steuerwinkel $\alpha = 0!$
- Erregerstrom i_f wird in minimaler Zeit $t_{12} < T_f$ vom Ausgangswert I_{f1} zum neuen Sollwert I_{f2} geführt.
- Bei offener Ständerwicklung: 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“ $U_f < 0$

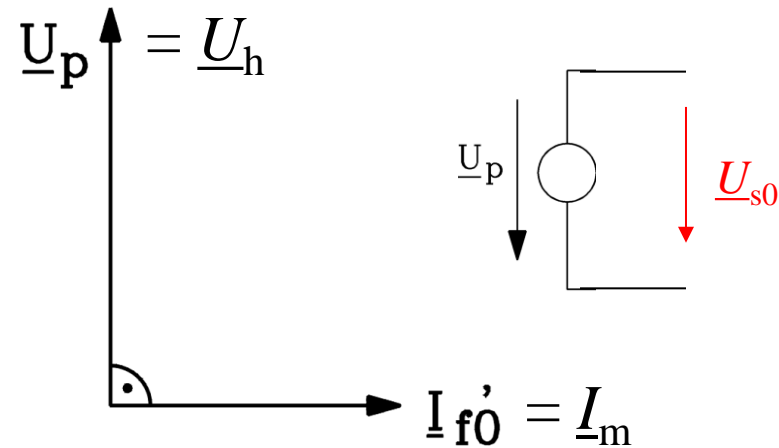
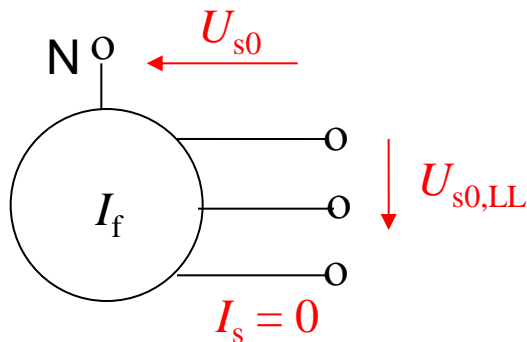
9. Erregereinrichtungen und Kennlinien

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

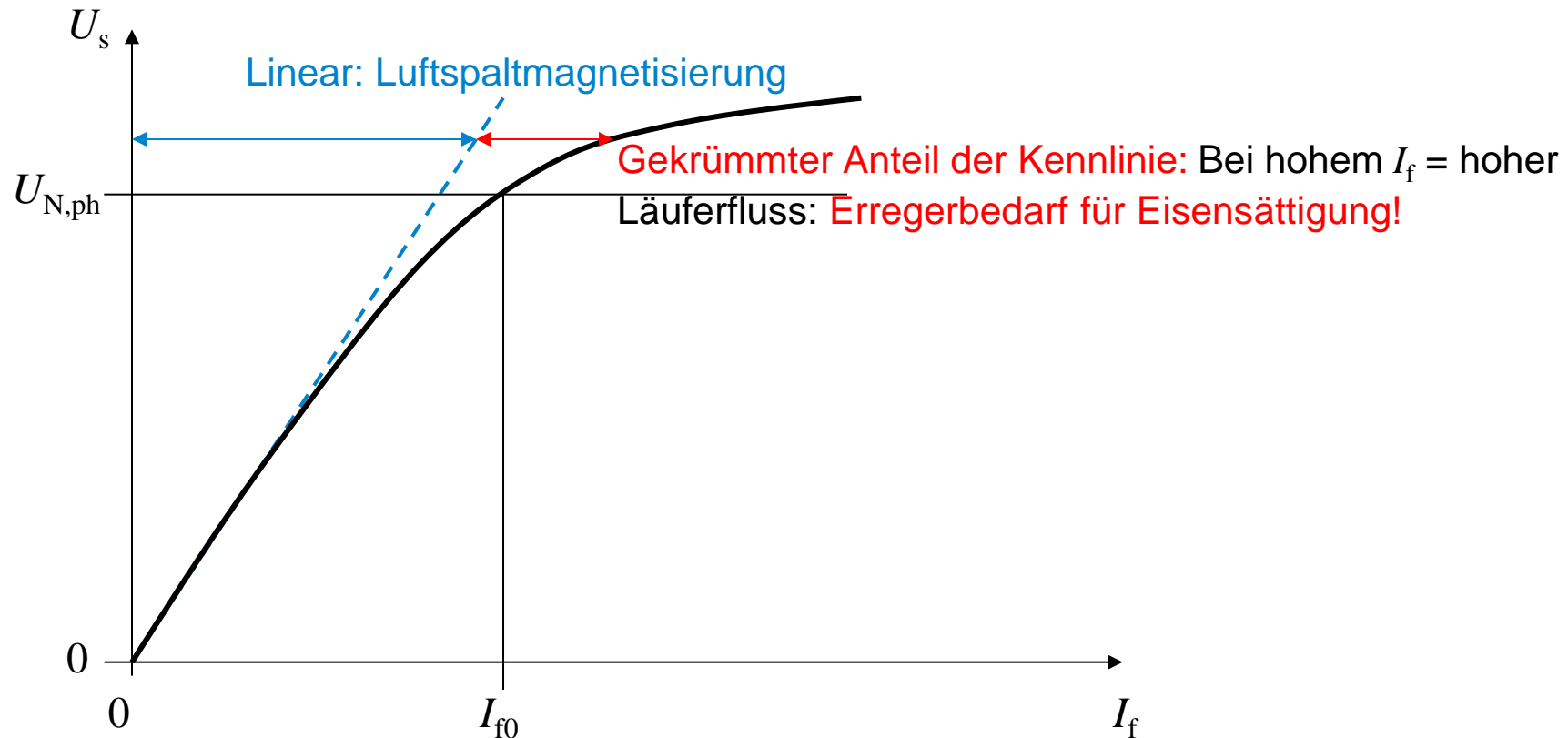
$$\underline{U}_p = jX_h \underline{I}'_{f0}$$

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

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

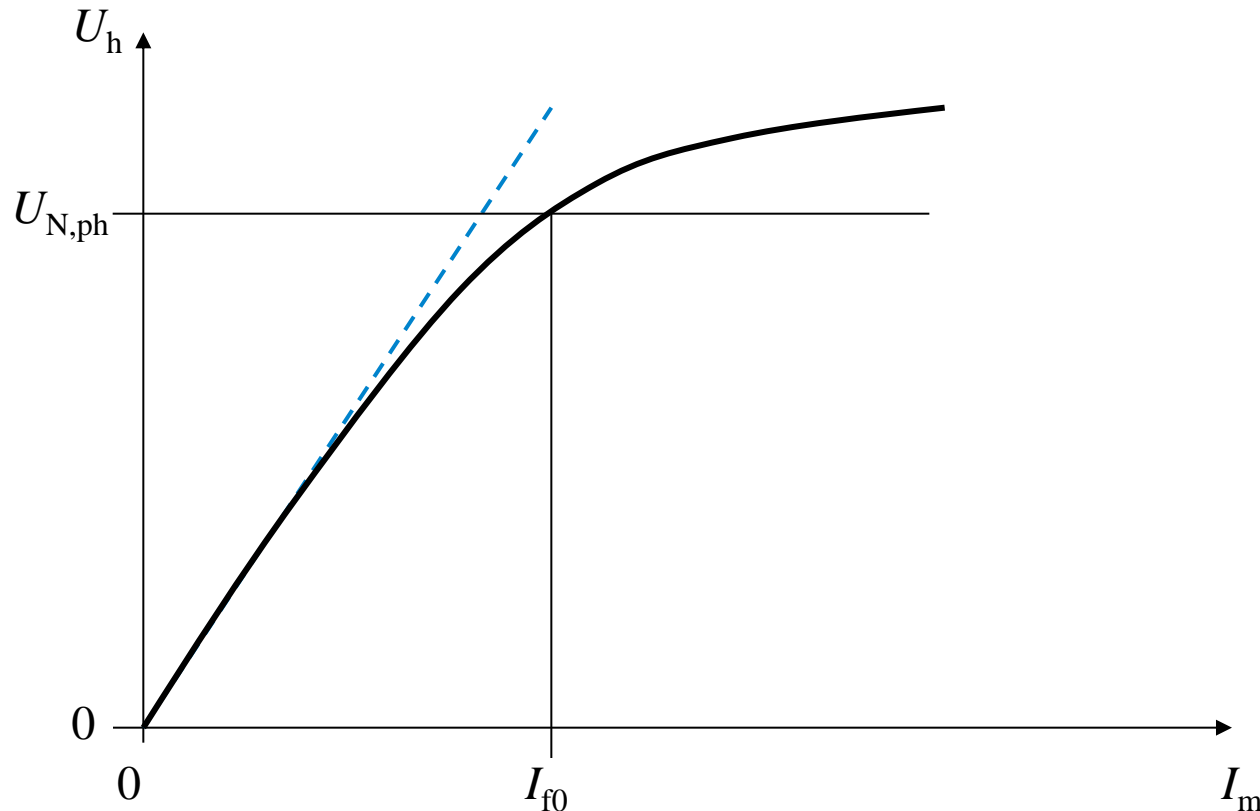
Leerlaufkennlinie $U_s(I_f)$ bei $n = \text{konst.}$

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



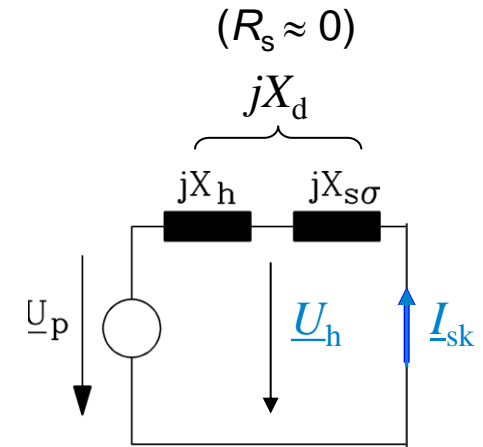
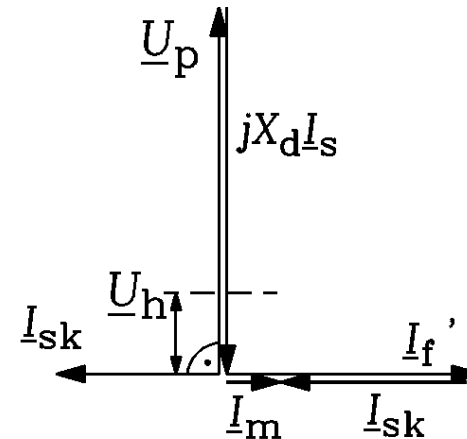
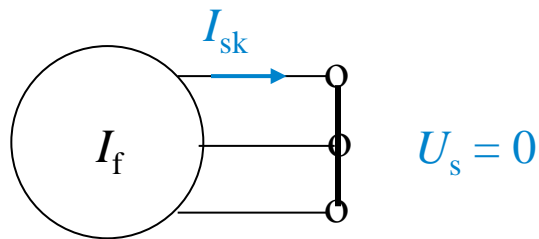
Leerlaufkennlinie $U_s(I_f) =$ Magnetisierungskennlinie $U_s(I_m)$

- **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. $I_{sk}(I_f')$

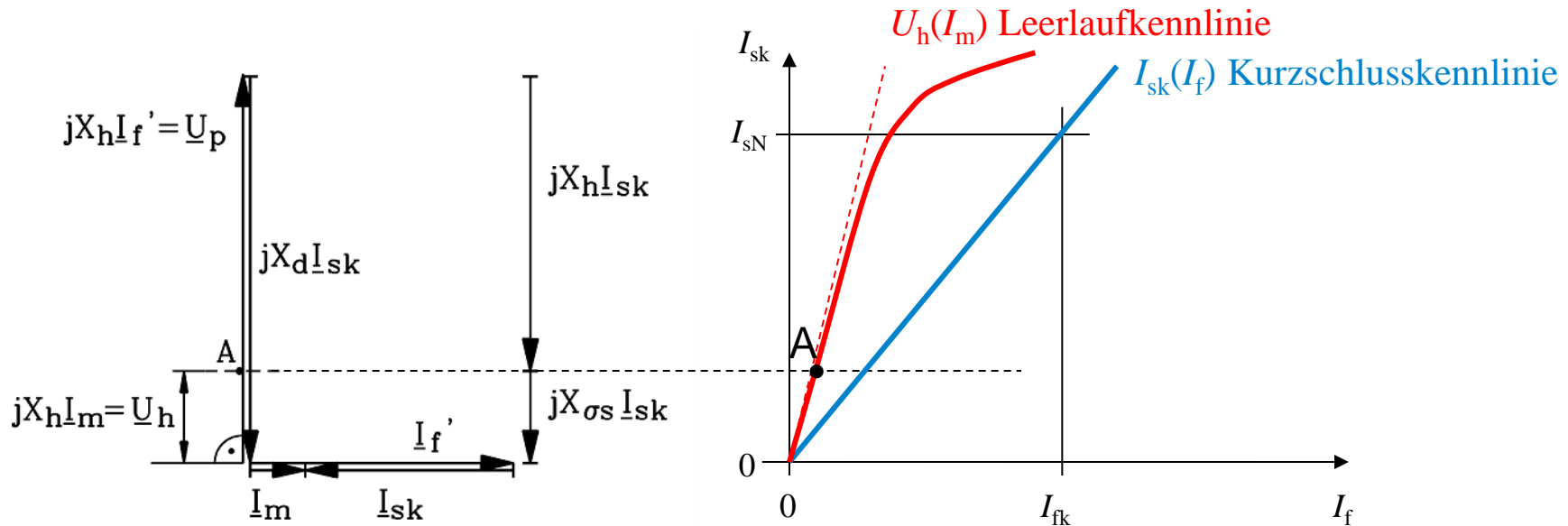
$$\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_f = \underline{I}'_f$$

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

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

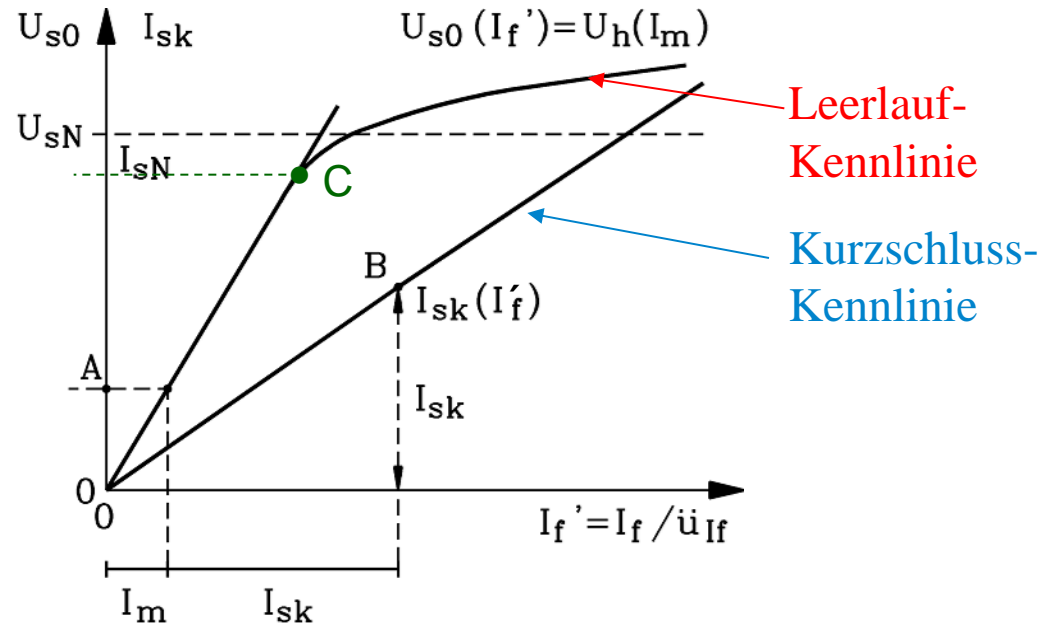
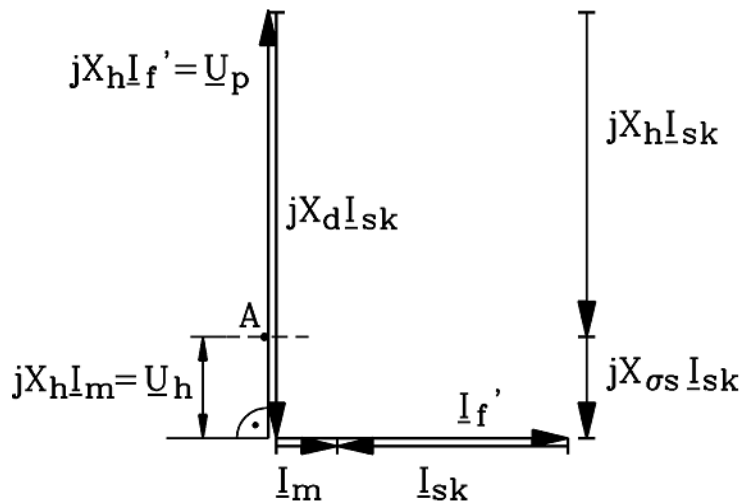
Bei Schenkelpol-
Maschinen: $X_h = X_{dh}$

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).

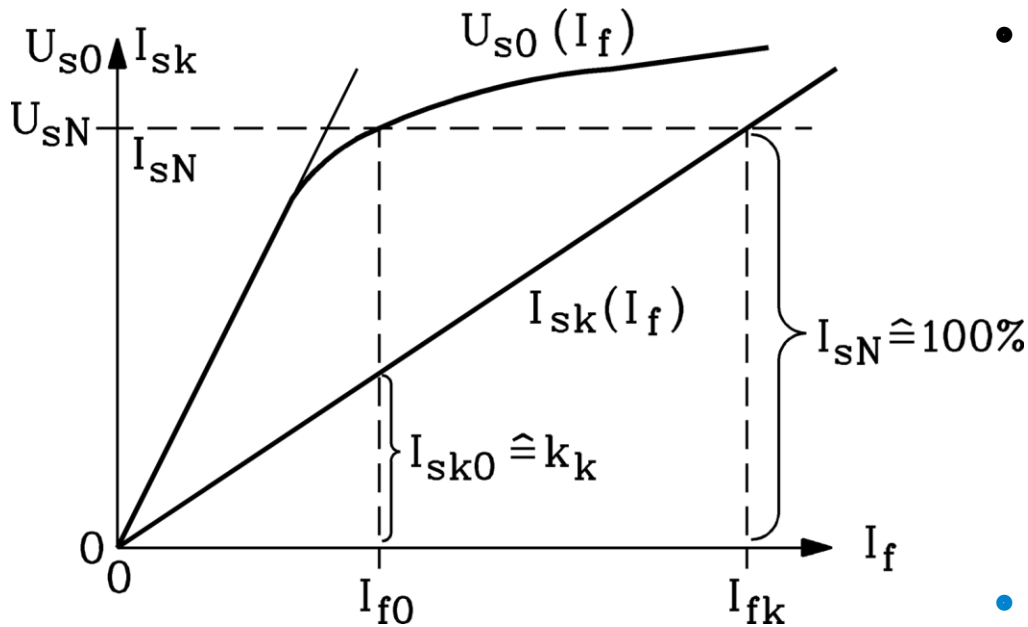
Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie bei $n = \text{konst.}$ ($R_s = 0$)



- 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**" $k_K = 1/x_d$.

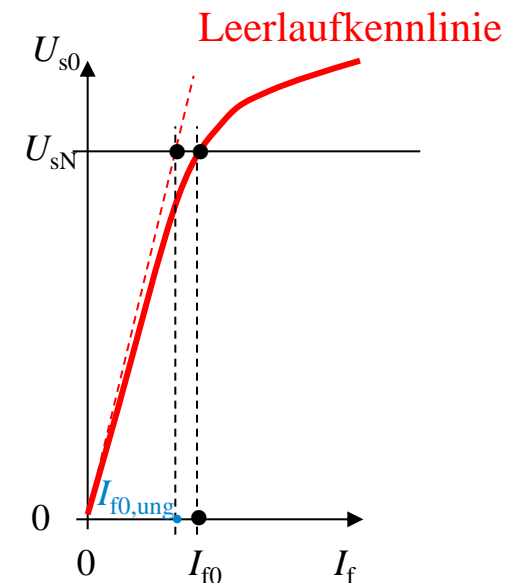
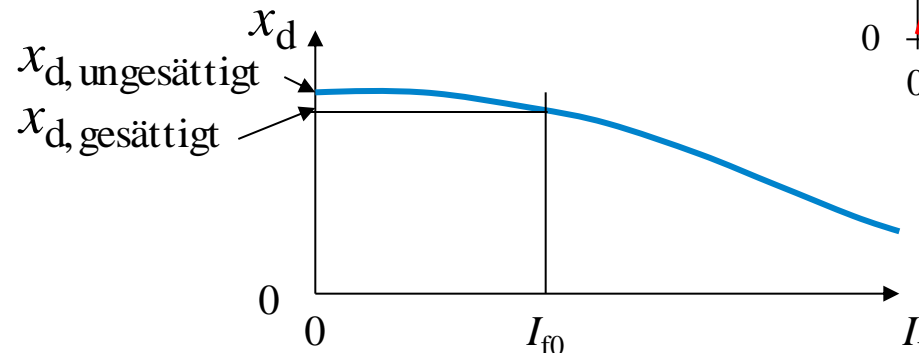
$$k_K = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{I_f(U_s = U_{sN}, I_s = 0)}{I_f(U_s = 0, I_s = I_{sN})} = \frac{1}{x_d}$$

- 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: $V_\delta = H_\delta \delta$

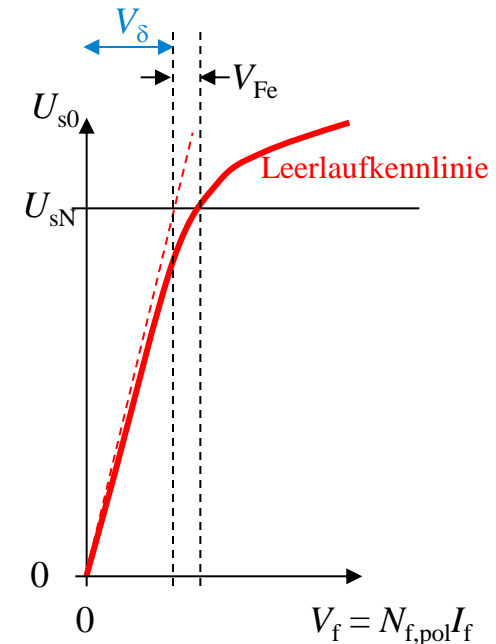
$$L_{dh} = L_h : L_{h, \text{ungesättigt}} = c_d \cdot \mu_0 \cdot \frac{2m}{\pi^2 p} \cdot (N_s k_{ws})^2 \cdot \frac{\tau_p \cdot l_{Fe}}{\delta}$$

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 $X_h \sim N_s^2 \tau_p / \delta$.

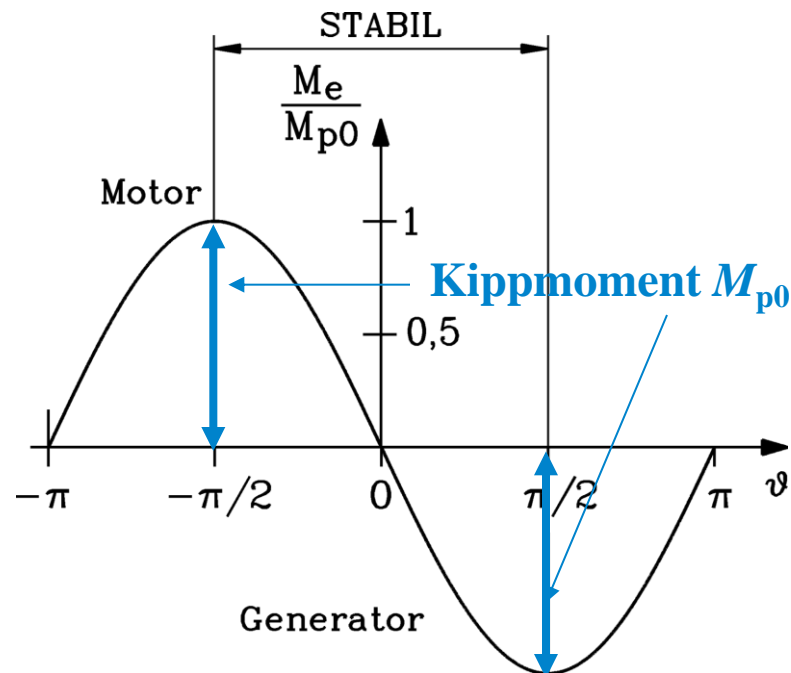
	Polzahl $2p$	Synchronreaktanz x_d /p.u.
Turbogeneratoren	2	ca. 2.0
Schenkelpolmaschinen	≥ 4	0.8 ... 1.2
PM-Maschinen mit Oberflächenmagneten (Selten-Erd-Magnete: Permeabilität $\approx \mu_0$)	≥ 4	0.3 ... 1.0

- Bei zweipoligen Synchronmaschinen ist τ_p groß, daher auch x_d **groß!**

Bezogene synchrone Reaktanz

$$x_d = X_d / Z_N$$

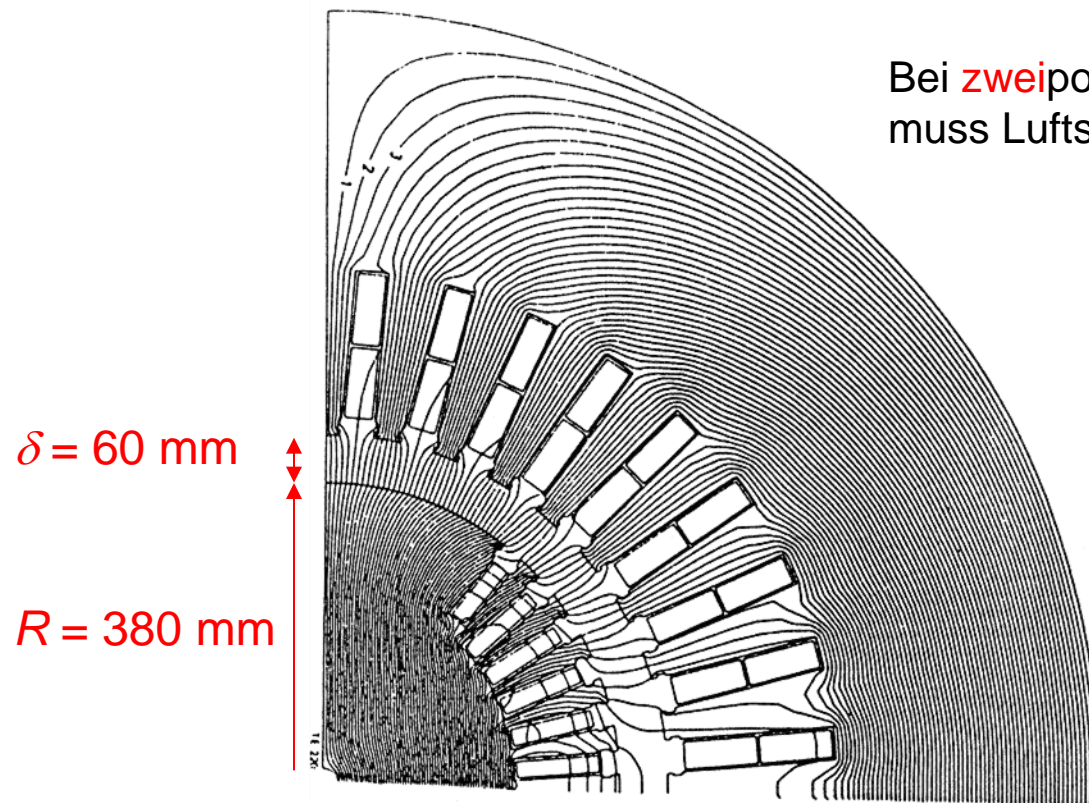
- Es muss X_d für ausreichend **großes Kippmoment** $M_{p0} \sim U_s U_p / X_d$ hinreichend klein sein.
- Gegensatz zur Asynchronmaschine:
Bei ASM muss X_h groß sein für kleinen I_m , da vom Netz und nicht vom Läufer magnetisiert wird!
Großes Kippmoment M_b über kleines X_σ erreicht!



Luftspaltweite δ der Synchronmaschine

Beispiel:

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



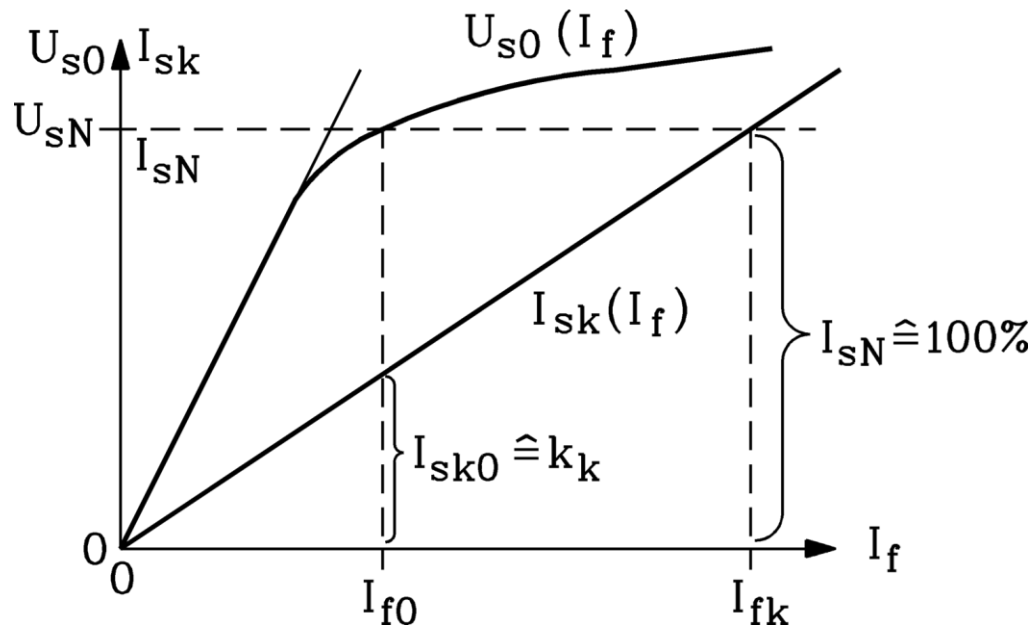
Bei **zwei**poligen Synchronmaschinen (τ_p groß !)
muss Luftspalt δ **groß** sein für Verkleinerung von x_d !

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 $N_{f,\text{pol}} \cdot I_f$