



Technische
Universität
Braunschweig

IMAB Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig



Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Teil 2: Elektromechanische Energieumformung

3. Übung: Drehfelder und Synchronmaschine

SoSe 2024

Prof. Dr.-Ing. Markus Henke, T.-H. Dietrich

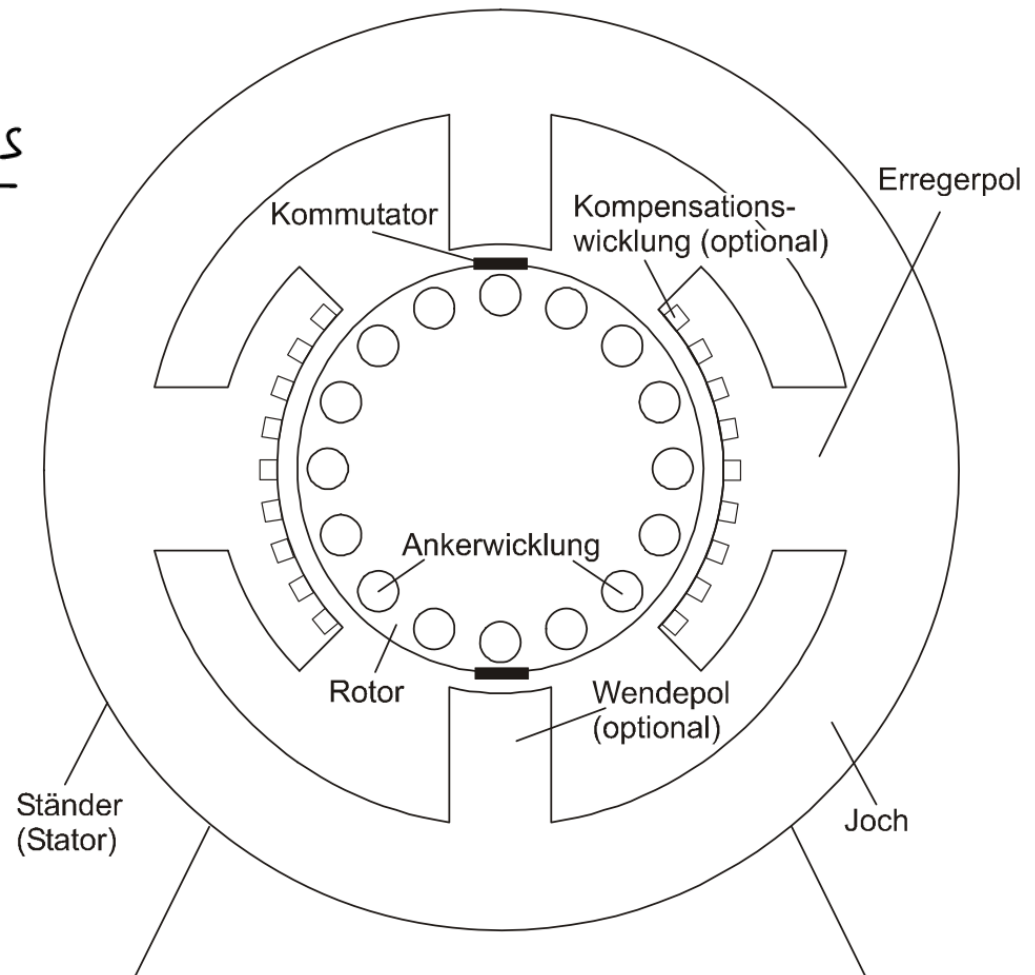
Gliederung

- **Drehfelder**
- Synchronmaschine

Gleichstrommaschinen

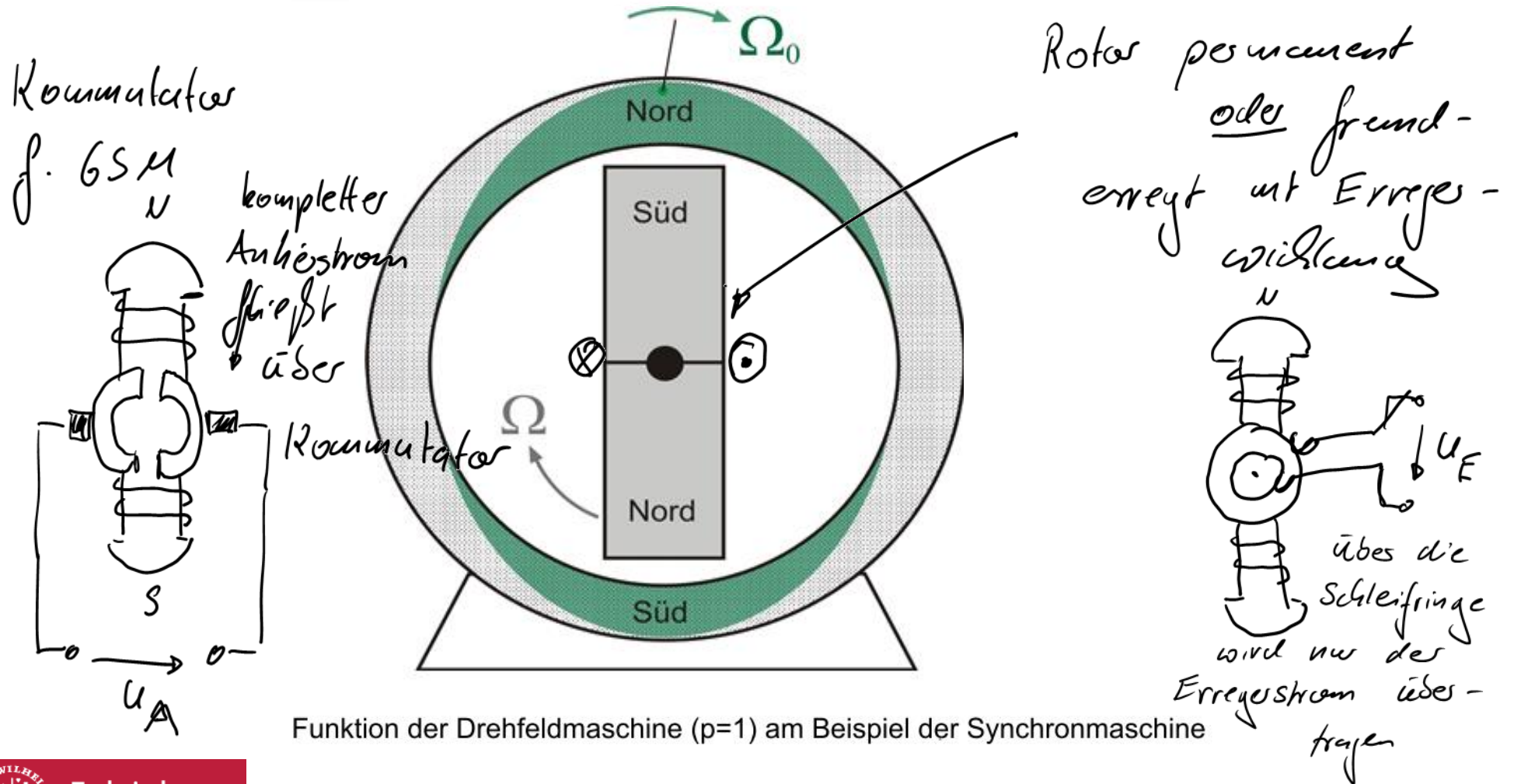
Nachteile des Kommutators

- Bauraumbedarf größer
- Verschleiß an Bürsten und Lamellen
- U_A wird durch die Lamellenspannung begrenzt



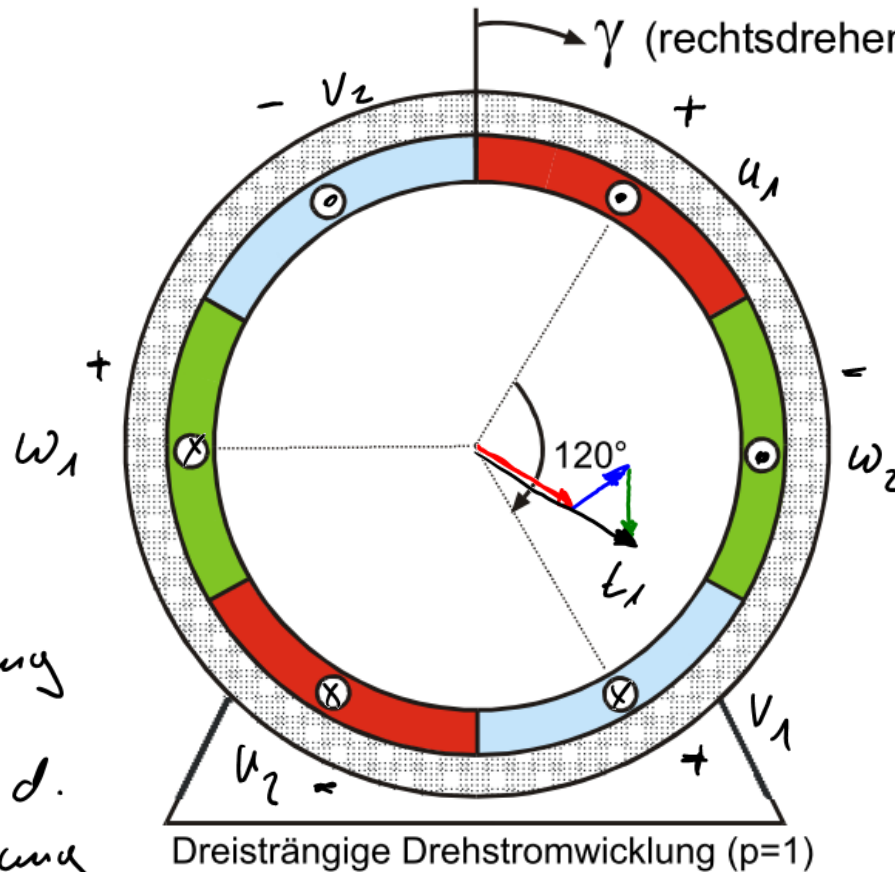
Drehfelder

Ziel: Erzeugung einer umlaufenden Luftspaltfeldwelle in der Maschine



Drehfelder

Prinzip: Drehfelder entstehen, wenn die räumliche und zeitliche Verschiebung der einzelnen Stränge gleich ist



$m = 3$ Stränge:

$$i_U = \hat{i} \cdot \cos(\omega t)$$

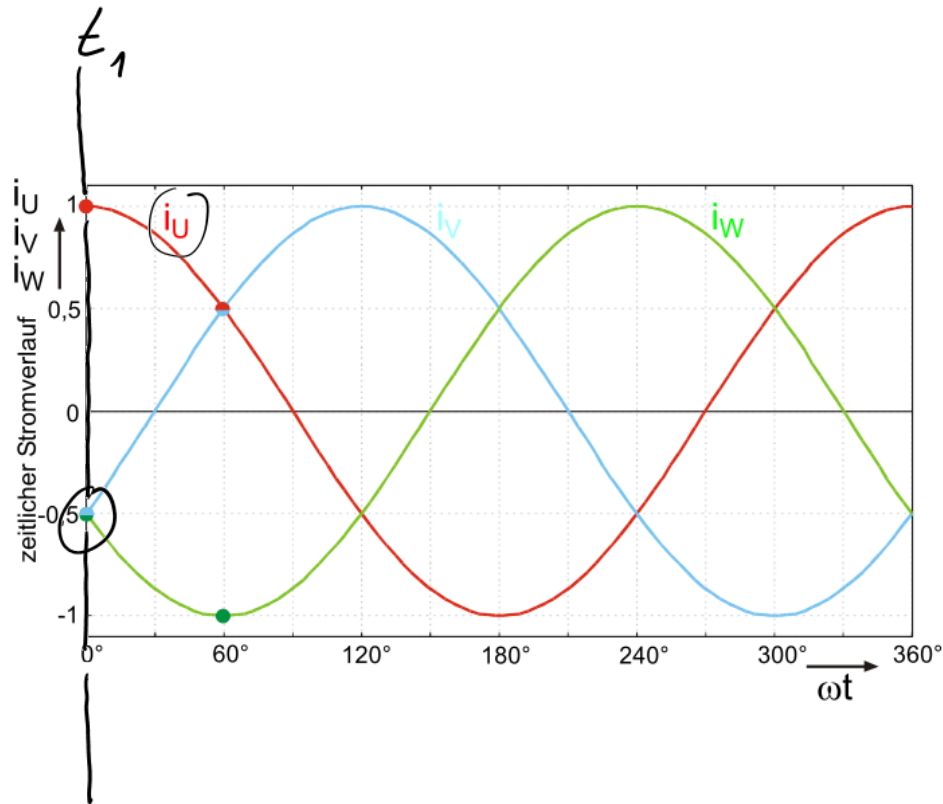
$$i_V = \hat{i} \cdot \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_W = \hat{i} \cdot \cos(\omega t - 240^\circ)$$

+ " Hylete d. Wicklung
- " Rückleiter d. Wicklung

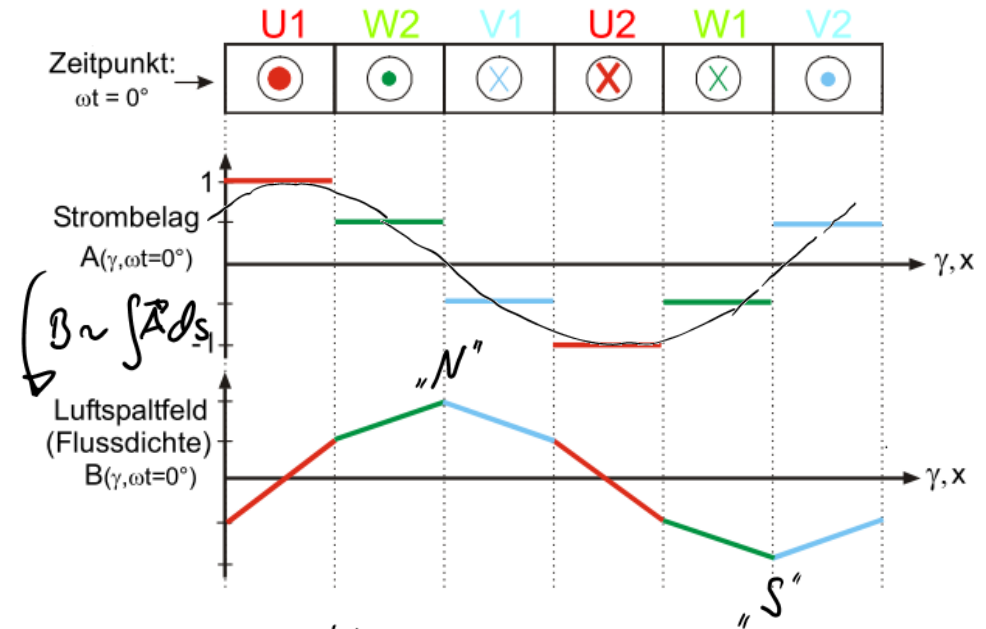
Dreisträngige Drehstromwicklung (p=1)

Entstehung des Drehfeldes

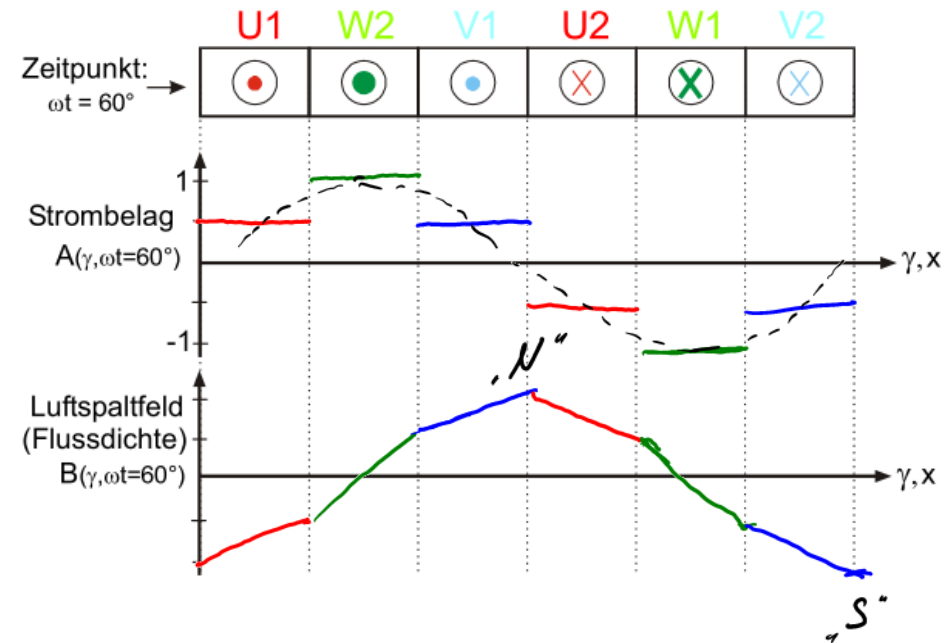
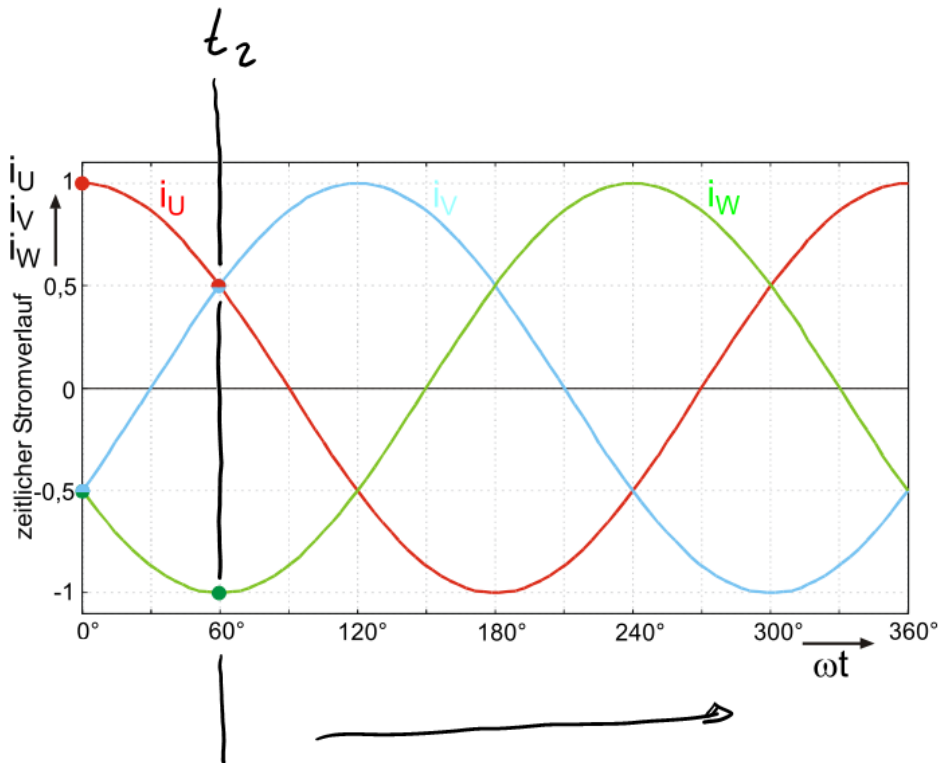


Hinweis

Orientierung der Stromrichtungspfeile erfolgt in dieser Darstellung
↓ aus Sicht der Maschine!



Entstehung des Drehfeldes

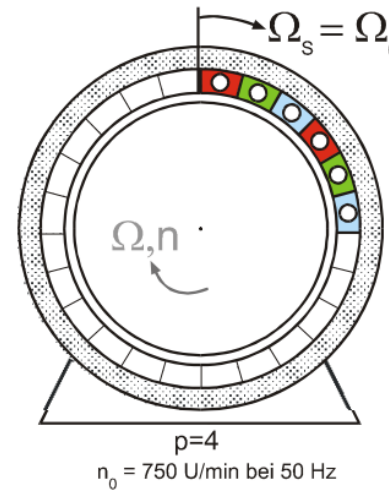
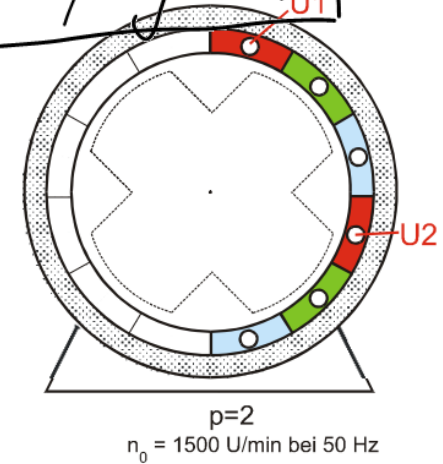
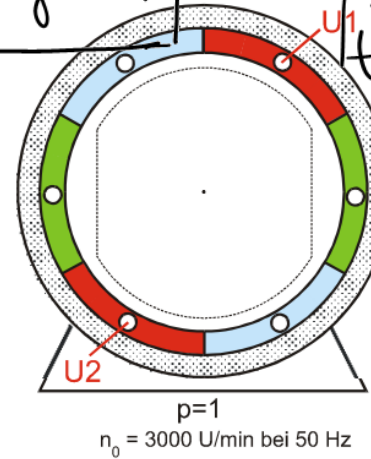
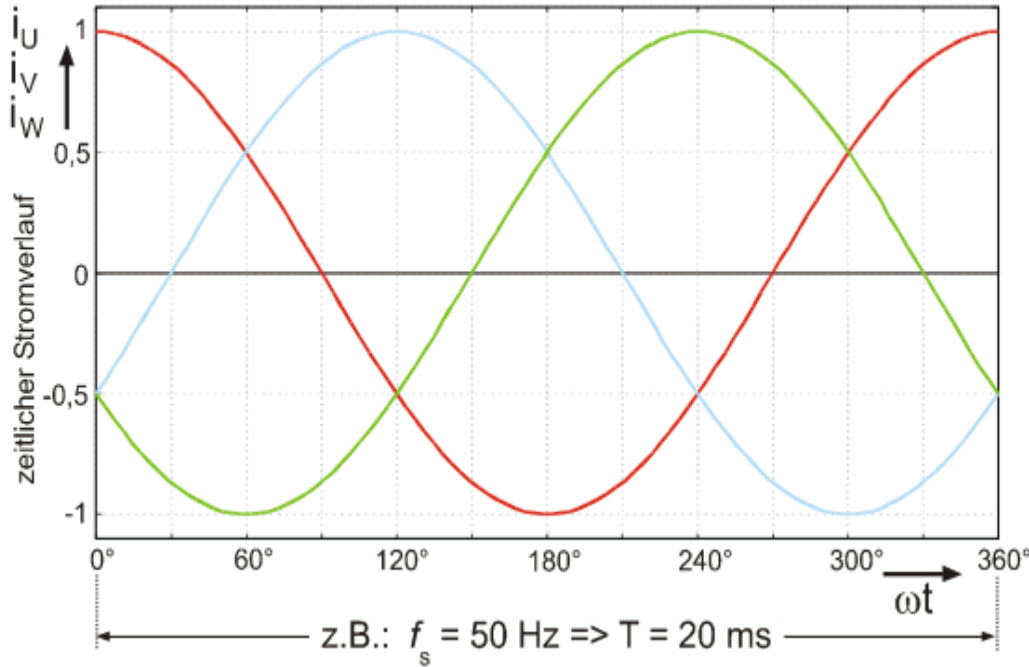


Einfluss der Polpaarzahl

Zusammenhang zwischen elektrischem Winkel γ_{el} und mechanischem Winkel γ_{mech}

$$\gamma_{el} = p \cdot \gamma_{mech}$$

$$f_{el} = p \cdot f_{mech}$$



Stator:

Speise-/Ständerfrequenz: f_s

$$\omega_s = 2\pi \cdot f_s$$

$$\Omega_0 = \frac{\omega_s}{p}$$

Rotor:

Drehzahl: $n = \frac{\Omega}{2\pi}$

"synchron": $n_0 = \frac{\Omega_0}{2\pi} \left[\frac{1}{s} \right]$

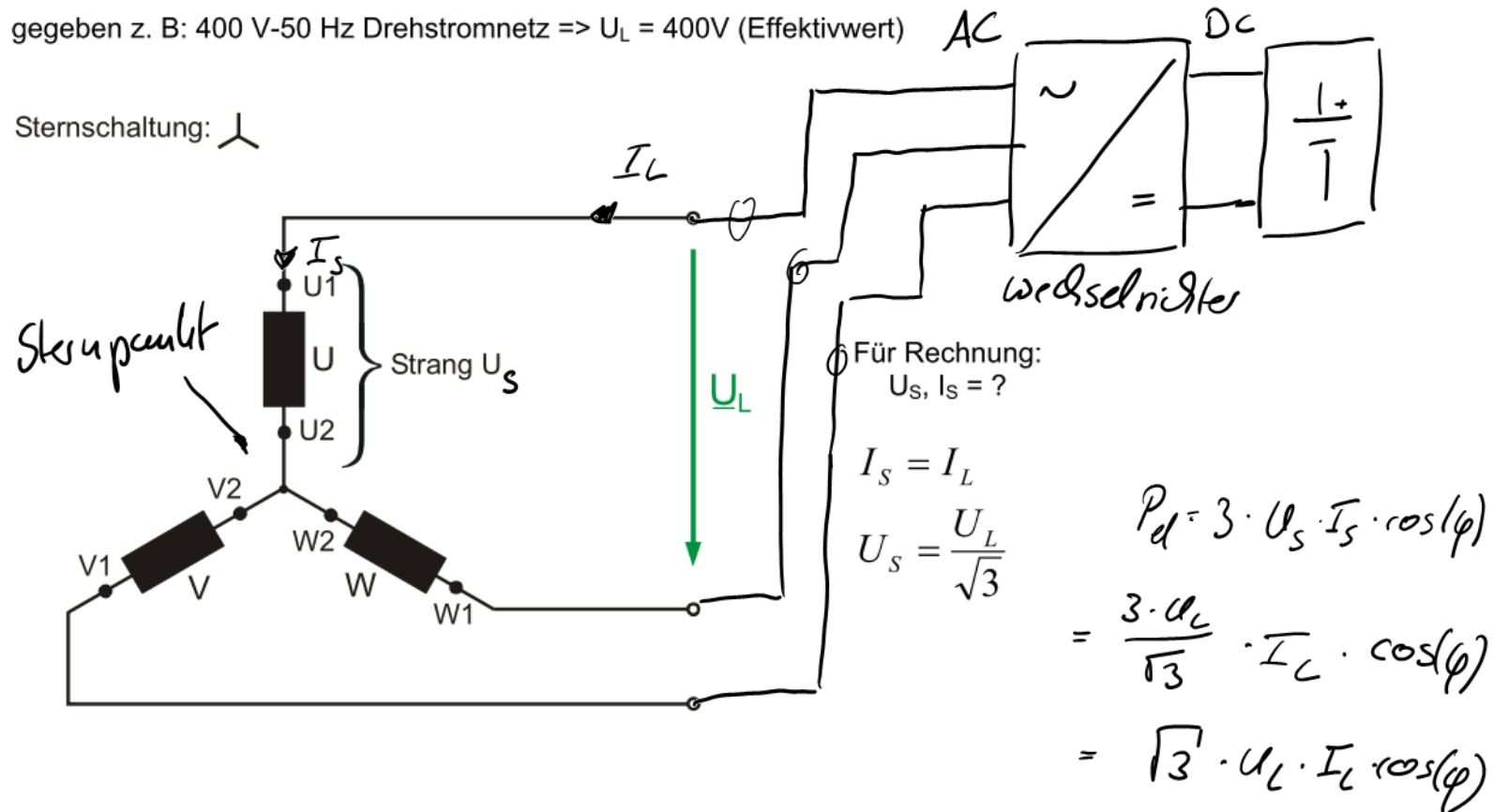
Stern-Dreieckschaltung von Drehstromwicklungen

Index "L" = Zuleitung

Index "s" = Strang (Ständer)

gegeben z. B: 400 V-50 Hz Drehstromnetz => $U_L = 400\text{V}$ (Effektivwert)

Sternschaltung: 



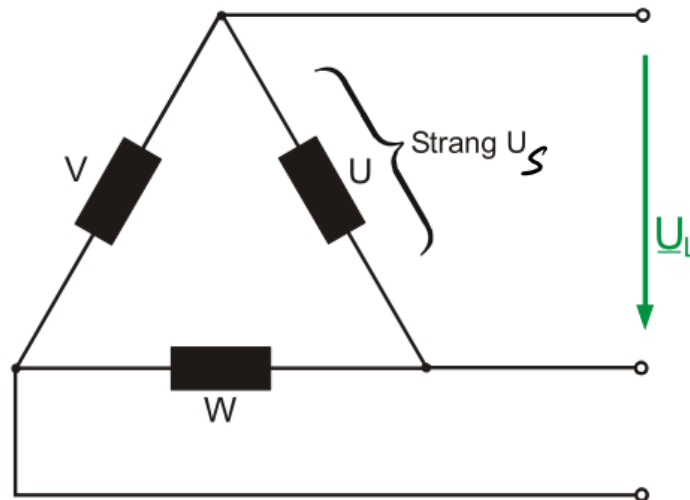
Stern-Dreieckschaltung von Drehstromwicklungen

Index "L" = Zuleitung

Index "s" = Strang (Ständer)

gegeben z. B: 400 V-50 Hz Drehstromnetz => $U_L = 400\text{V}$ (Effektivwert)

Dreieckschaltung: \triangle



Für Rechnung:
 $U_s, I_s = ?$

$$U_s = U_L$$

$$I_s = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

Gliederung

- Drehfelder
- **Synchronmaschine**

Vollpolsynchronmaschine

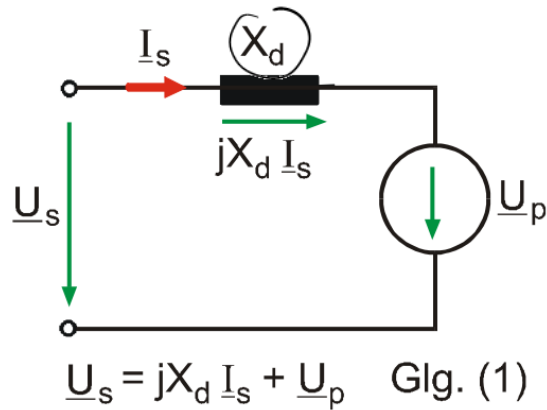
Eine zweipolige Vollpol-Synchronmaschine wird in Dreieckschaltung an einem 400V-50Hz-Drehstromnetz betrieben. Bei einem Nennerregerstrom von $I_{f,N} = 2 \text{ A}$ beträgt die Polradspannung $U_{p,N} = 393,5 \text{ V}$. Für die Synchronreaktanzen X_d wurde durch eine Kurzschlussmessung der Wert $X_d = 1,13 \text{ } \Omega$ ermittelt.

Verluste können vernachlässigt werden ($R_s = 0$).

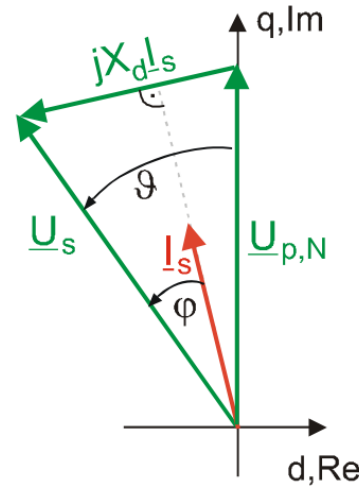
- 2.1 Berechnen Sie für Nennerregung und einem Lastmoment von $M_L = 170 \text{ Nm}$ den Polradwinkel ϑ , den Strangstrom I_s und den Phasenwinkel φ zwischen Strangspannung und Strangstrom.
- 2.2 Welcher Erregerstrom I_f^* muss eingestellt werden, damit die Maschine zur Blindleistungskompensation bei gleicher Wirkleistung wie im Aufgabenteil 2.1 und mit betragsmäßig gleichem Phasenwinkel *übererregt* betrieben wird (Hilfe: Stromortskurve)?
- 2.3 Mit welchem Moment muss die Maschine angetrieben werden, damit bei unveränderter Erregung gegenüber 2.2 im Generatorbetrieb reine Wirkleistung ins Netz eingespeist wird?

Ersatzschaltbild

ESB ($R_s = 0$)

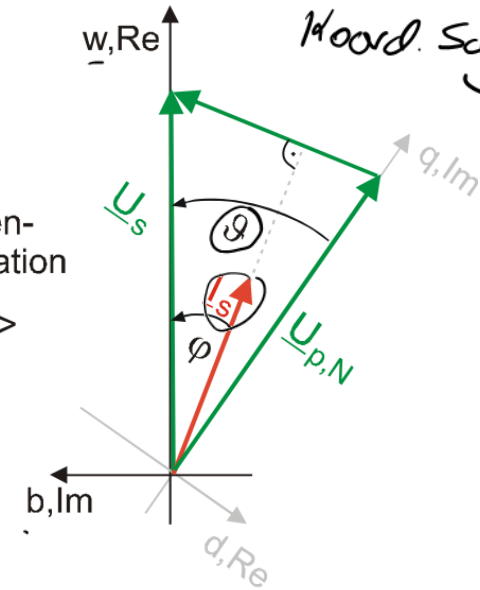


rotorfestes Koord. syst.
rotatorientiert



rotierendes, an der
Statorspannung orientiertes
Koord. Syst.

Koordinaten-
Transformation
 $\cdot (-j e^{-j\theta}) \Rightarrow$

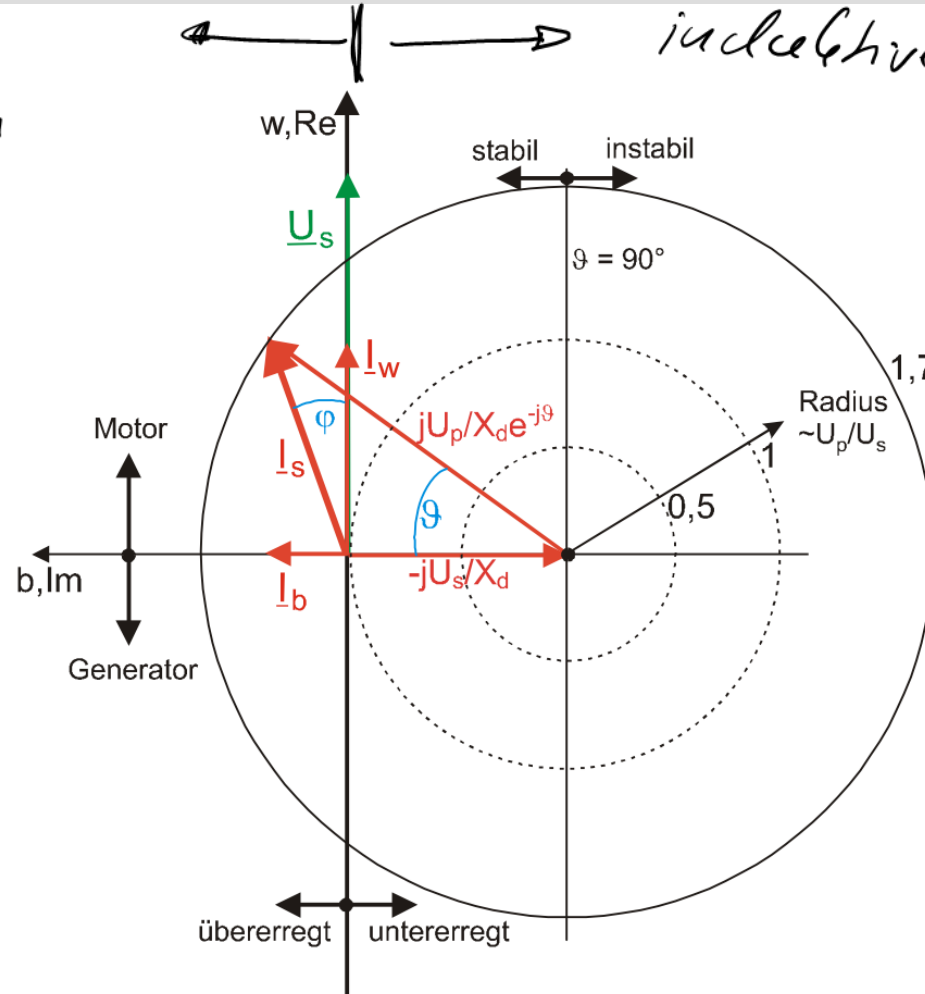


Stromortskurve

kapazitives Verhalten



induktives Verhalten



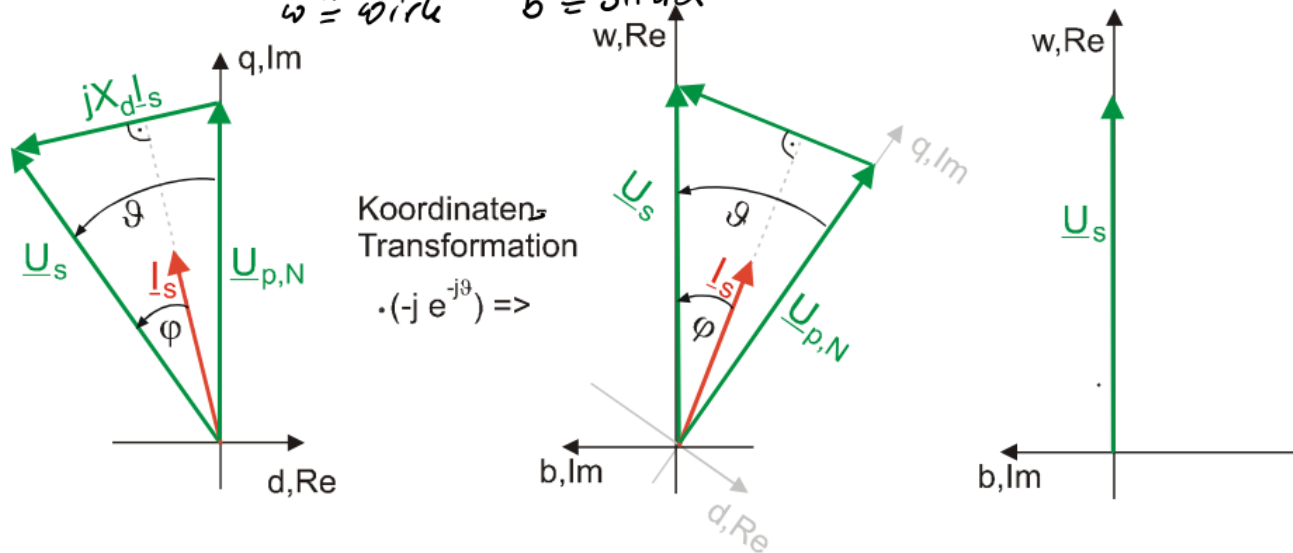
Aufgabe 2.1

zu 2.1: ϑ , I_s und φ bei Nennerregung und Belastung mit $M_L = 170 \text{ Nm}$?

Skript: $\underline{I}_{s(d,q)} = I_d + jI_q$ mit $I_d = \frac{U_s \cdot \cos \vartheta - U_p}{X_d}$ und $I_q = \frac{U_s \cdot \sin \vartheta}{X_d}$ $\leftarrow d-q\text{-Koordinaten}$

oder: $\underline{I}_{s(w,b)} = I_w + jI_b$ mit $I_w = \frac{U_p \cdot \sin \vartheta}{X_d}$ und $I_b = \frac{U_p \cdot \cos \vartheta - U_s}{X_d}$ $\leftarrow \text{Statororientiertes Koordinatensystem}$

$w \stackrel{!}{=} \text{wirk}$ $b \stackrel{!}{=} \text{blind}$



Aufgabe 2.1

Annahme: $R_s = 0$

$$P_{el} = P_{mech} = m_s \cdot U_s \cdot \frac{U_p \cdot \sin(\vartheta)}{x_d}$$

$$P_{mech} = M \cdot \Omega$$

$$\Omega = \frac{\omega_s}{p}$$

Polradwinkel $M \cdot \frac{\omega_s}{p} = m_s \cdot U_s \cdot \frac{U_p \cdot \sin(\vartheta)}{x_d}$

$$\Leftrightarrow \sin(\vartheta) = \frac{M \cdot \frac{\omega_s}{p} \cdot x_d}{m_s \cdot U_s \cdot U_p} = \frac{170 \text{ Nm} \cdot \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{1} \cdot 1,13 \Omega}{3 \cdot 400 \text{ V} \cdot 393,5 \text{ V}}$$

$$\Rightarrow \vartheta = 7,34^\circ \text{ el.}$$

Aufgabe 2.1

Wirkstrom
↓

Blindstrom
↙

Strangstrom $I_S = \sqrt{I_w^2 + I_b^2}$

$$I_w = \frac{U_p \cdot \sin(\varphi)}{X_d} = \frac{393,5 \text{ V} \cdot \sin(7,34^\circ)}{1,13 \, \Omega} = \underline{\underline{44,49 \text{ A}}}$$

$$I_b = \frac{U_p \cdot \cos(\varphi) - U_s}{X_d} = \frac{393,5 \text{ V} \cdot \cos(7,34^\circ) - 400 \text{ V}}{1,13 \, \Omega} = -8,6 \text{ A}$$

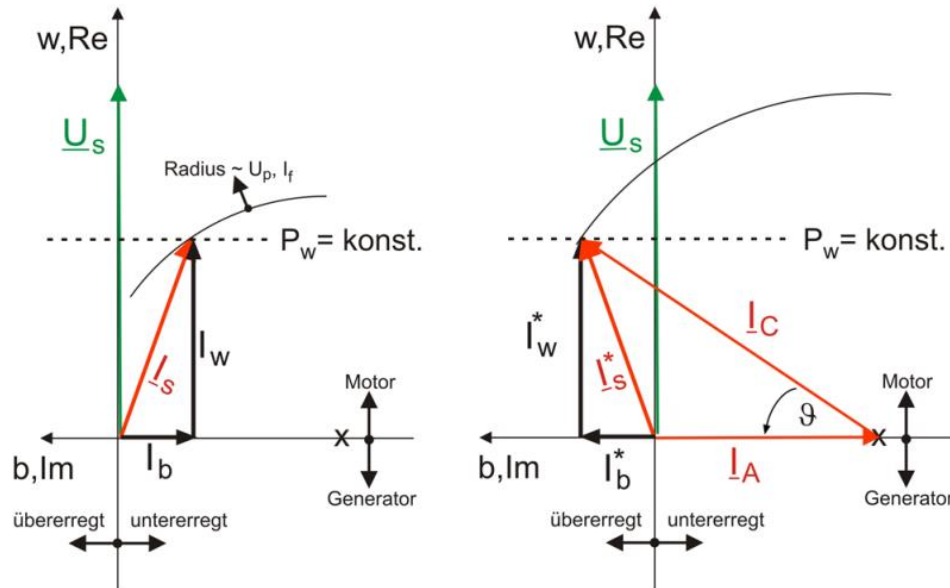
$$I_S = \sqrt{(44,49 \text{ A})^2 + (-8,6 \text{ A})^2} = \underline{\underline{45,31 \text{ A}}}$$

Phasenwinkel

$$\cos(\varphi) = \frac{I_w}{I_S} = 0,982 \Rightarrow \underline{\underline{\varphi = 10,89^\circ}}$$

Aufgabe 2.2

zu 2.2: $I_f^* = ?$ damit übererregt bei gleicher Wirkleistung



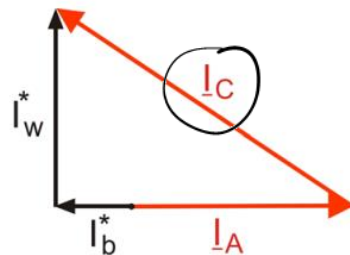
konstante Wirkleistung, aber übererregt:

$$\Rightarrow \underline{I}_w^* = \underline{I}_w \quad \underline{I}_b^* = -\underline{I}_b$$

Stromortskurve (siehe Skript):

$$\underline{I}_A = -j \frac{\underline{U}_s}{X_d} \Rightarrow |\underline{I}_A| = I_A = \frac{U_s}{X_d}$$

$$\underline{I}_C = +j \frac{U_p}{X_d} \cdot e^{-j\theta} \Rightarrow |\underline{I}_C| = I_C = \frac{U_p}{X_d}$$



Aufgabe 2.2

$$U_p \sim I_f \Rightarrow \frac{U_p^*}{U_p} = \frac{I_f^*}{I_f} \Rightarrow I_f^* = I_f \cdot \frac{U_p^*}{U_p}$$

$$U_p^* = I_c \cdot X_d \quad I_c = \sqrt{I_w^2 + (I_b^* + I_A)^2}$$

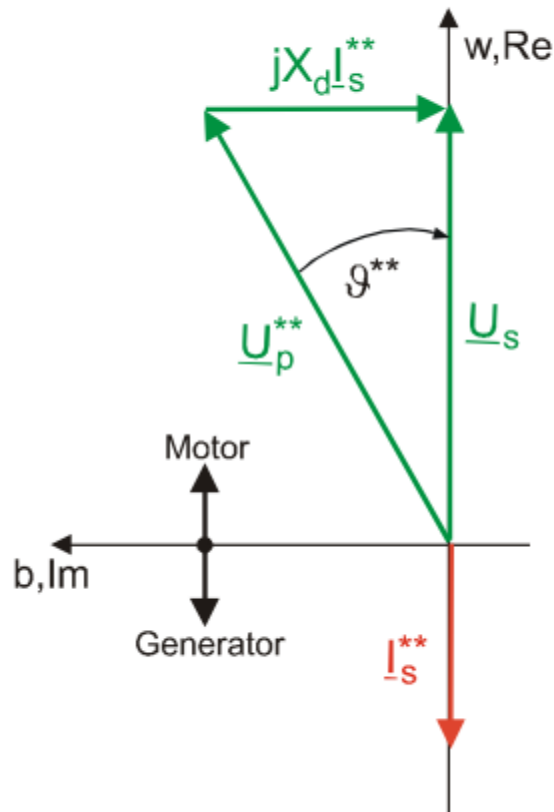
$$\Rightarrow U_p^* = \sqrt{I_w^2 + (I_b^* + I_A)^2} \cdot X_d \quad I_A = \frac{U_s}{X_d}$$

$$= \sqrt{(44,49 \text{ A})^2 + \left(8,6 \text{ A} + \frac{400 \text{ V}}{1193 \Omega}\right)^2} \cdot 1,13 \Omega = \underline{\underline{412,7 \text{ V}}}$$

$$I_f^* = I_f \cdot \frac{U_p^*}{U_p} = 2 \text{ A} \cdot \frac{412,7 \text{ V}}{393,5 \text{ V}} = \underline{\underline{2,1 \text{ A}}}$$

Aufgabe 2.3

zu 2.3: $M^{**} = ?$ damit generatorisch reine Wirkleistungsabgabe ($I_f^{**} = I_f^*$)



$$L \rightarrow T_b \stackrel{!}{=} 0 = \frac{U_p \cdot \cos(\vartheta) - U_s}{X_d}$$

$$\cos \vartheta = \frac{U_s}{U_p^*} = \frac{400V}{412,7V} = 0,969$$

$$\Rightarrow \vartheta = 14,25^\circ$$

$$P_{mech} = m_s \cdot \frac{U_s \cdot U_p^*}{X_d} \cdot \sin(\vartheta) = 107,886W$$

$$M^{**} = \frac{P_{mech}}{\Omega_1} = \frac{107,886W}{\frac{2\pi \cdot 5042}{1}} = \underline{\underline{343 \text{ Nm}}}$$

Polpaarzahl \rightarrow