

# Elektrische Antriebe

## Kapitel 6-7-8: Feldorientierte Vektorregelung

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

# Elektrische Antriebe

## Kapitelübersicht

**Kapitel 1:** Einführung (Brainstorming, Beispiele, Systembetrachtung)  
**2:** Aufbau und Wirkprinzip der Gleichstrommaschine  
**3:** Modellierung und Stromregelung der Gleichstrommaschine

} Einstieg

**Kapitel 4:** Drehfeldwicklung und Raumzeigertransformation  
**5:** Aufbau und Betriebsverhalten der Synchronmaschine  
**6:** Modellbildung und Kriterien für die Regelung der PMSM  
**7:** Feldorientierte Vektorregelung  
**8:** Modulationsverfahren und Feldschwächbetrieb

} Schwerpunkt:  
PMSM

**Kapitel 9:** Leistungselektronische Stellglieder  
**10:** Traktionsantriebe für Elektrostraßenfahrzeuge

— Wahlkapitel 1/2

**Kapitel 11:** Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine  
**12:** Modellbildung und Grundzüge der feldorientierten Regelung  
**13:** Auslegung von elektrischen Maschinen

} ASM  
— Wahlkapitel 3

# Elektrische Antriebe

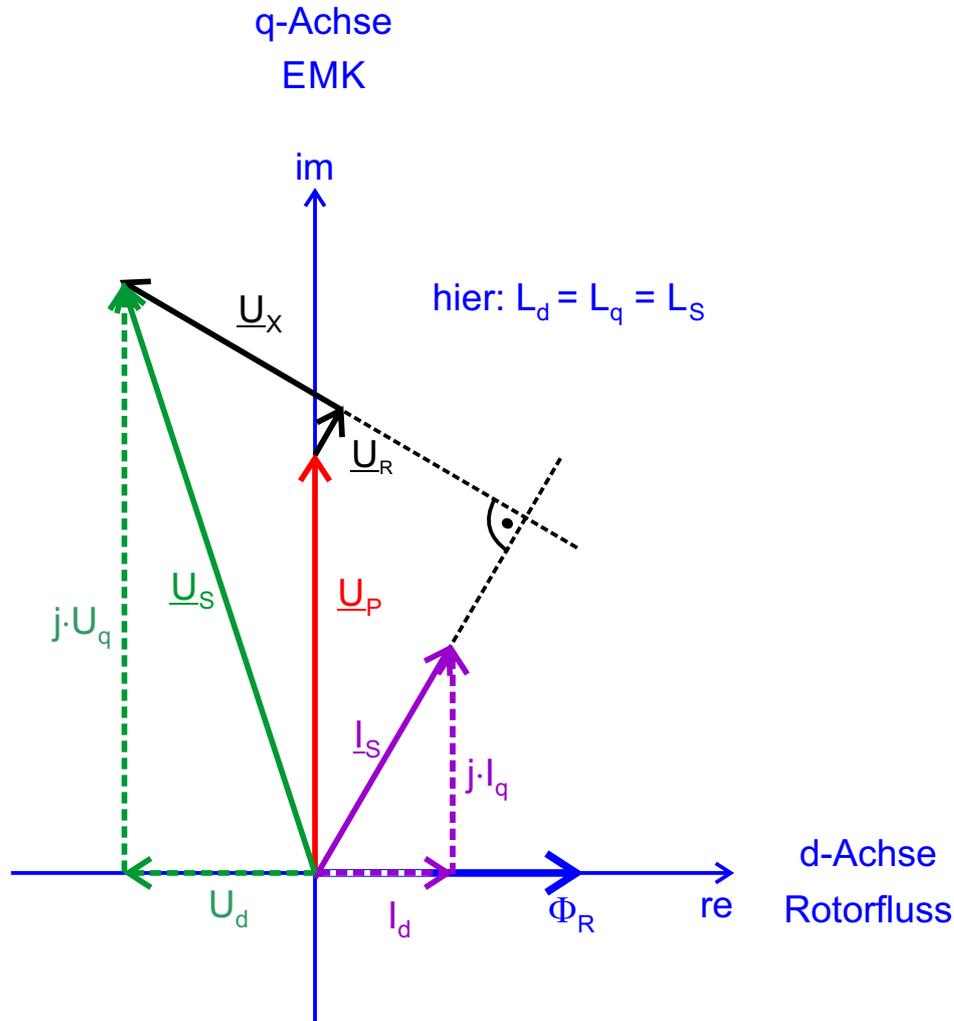
## Auszug aus den Kapiteln 6-7-8 : Feldorientierte Vektorregelung

- 6.1 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm
- 6.2 Messung von Maschinenparametern
- 6.3 Modellbildung im  $\alpha\beta$ - und dq-System
- 6.4 Fazit für die Stromregelung
  
- 7.3 Stromregelung mit Block- und Sinuskommutierung
- 7.4 Prinzipielle Reglerstruktur
- 7.5 Vorsteuerung
- 7.6 KP-Wandler und PWM
- 7.7 Baustellen
- 7.8 Maschinenparameter
  
- 8.5 Feldschwächbereich

## 6.1 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm

Raumzeigerdarstellung für den stationären Betriebszustand, nur Grundwelle

= einfachstes Modell für die Synchronmaschine



**Spannungsgleichung:**

$$\underline{U}_S = \underline{U}_R + \underline{U}_X + \underline{U}_P = R_S \cdot \underline{I}_S + j\omega_{el} \cdot L_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot \underline{U}_P$$

mit  $\underline{U}_S = U_d + j \cdot U_q$

und  $\underline{I}_S = I_d + j \cdot I_q$

**Aufspalten in Real- und Imaginärteil:**

$$\hat{U}_d = R_S \cdot \hat{I}_d - \omega_{el} L_q \cdot \hat{I}_q$$

$$\hat{U}_q = R_S \cdot \hat{I}_q + \omega_{el} L_d \cdot \hat{I}_d + \hat{U}_P$$

hier: Rechnen mit Scheitelwerten  
(Raumzeigerkomponenten)

$$\hat{U}_P = k_{EMK} \cdot f_{el}$$

**Drehmoment:**

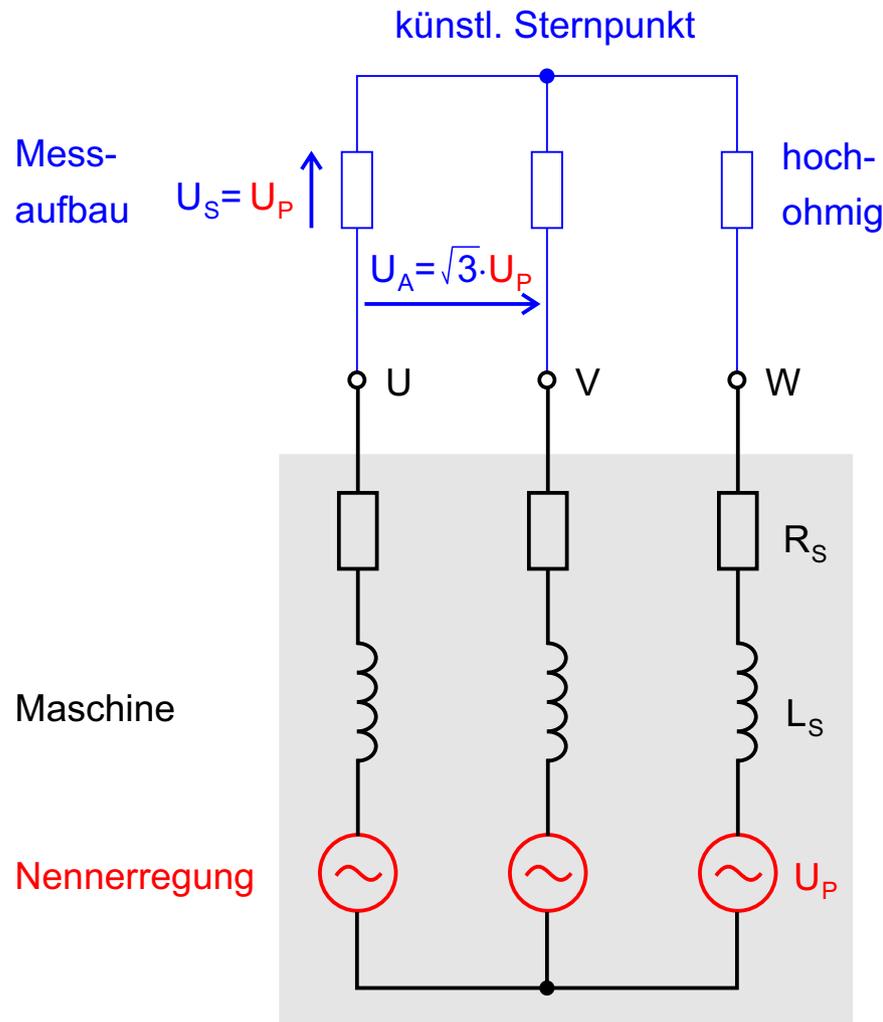
$$P_i = M_i \cdot \omega_{mech} = \frac{3}{2} \hat{U}_P \cdot \hat{I}_q \quad \text{mit } \omega_{el} = p \cdot \omega_{mech}$$

$$M_i = \frac{3p}{2\omega_{el}} \hat{U}_P \cdot \hat{I}_q = \frac{3p}{4\pi} \cdot \underbrace{\frac{\hat{U}_P}{f_{el}}}_{k_{EMK}} \cdot \hat{I}_q = k_M \cdot \hat{I}_q$$

EMK-Konstante  $k_{EMK}$

## 6.2 Messung von Maschinenparametern

### Messung der EMK-Konstante



#### Messvorgang:

- Maschine wird geschleppt, Klemmen offen
- Messung der EMK-Strangspannung (entweder an den Außenleitern oder direkt gegen künstlichen Sternpunkt)
- Messung der Polwechselfrequenz  $f_p = f_{el}$

#### EMK-Konstante:

$$k_{EMK} = \frac{\hat{U}_P}{f_{el}} \text{ [V/Hz]}$$

⚠ In vielen Datenblättern wird hier der Effektivwert der Außenleiterspannung verwendet

#### Drehmomentkonstante:

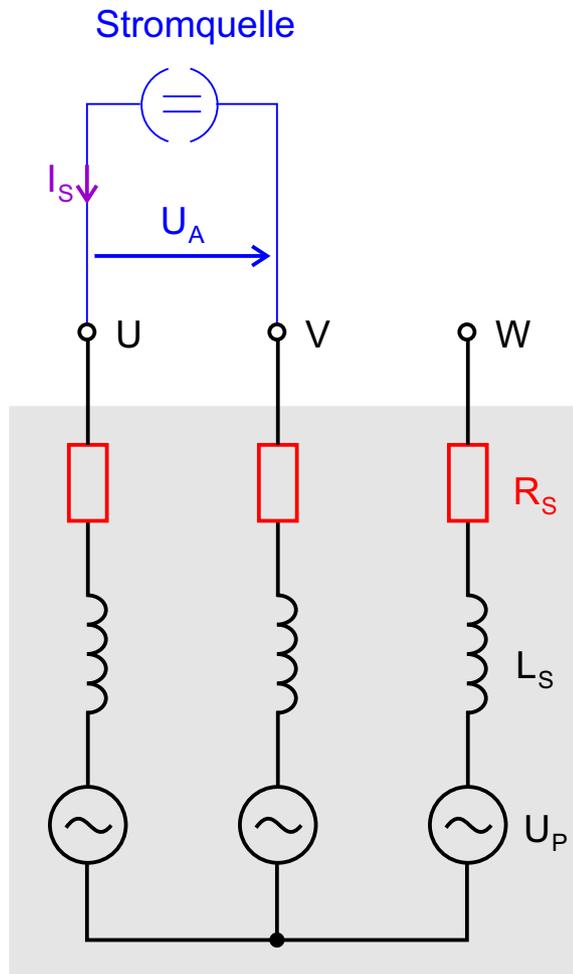
$$k_M = \frac{3p}{4\pi} \cdot k_{EMK} \text{ [Nm/}\hat{A}\text{]}$$

⚠ Wir rechnen hier mit Scheitelwerten (Normierung der Raumzeigerlänge)

## 6.2 Messung von Maschinenparametern

### Messung Strangwiderstand

Mess-  
aufbau



Maschine

#### Messvorgang:

- Maschine steht
- Einprägung eines Gleichstroms
- Sternpunkt berücksichtigen!
- Wicklungstemperatur?

#### Statorwiderstand:

$$R_S = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_A}{I_S}$$

#### Temperaturabhängigkeit:

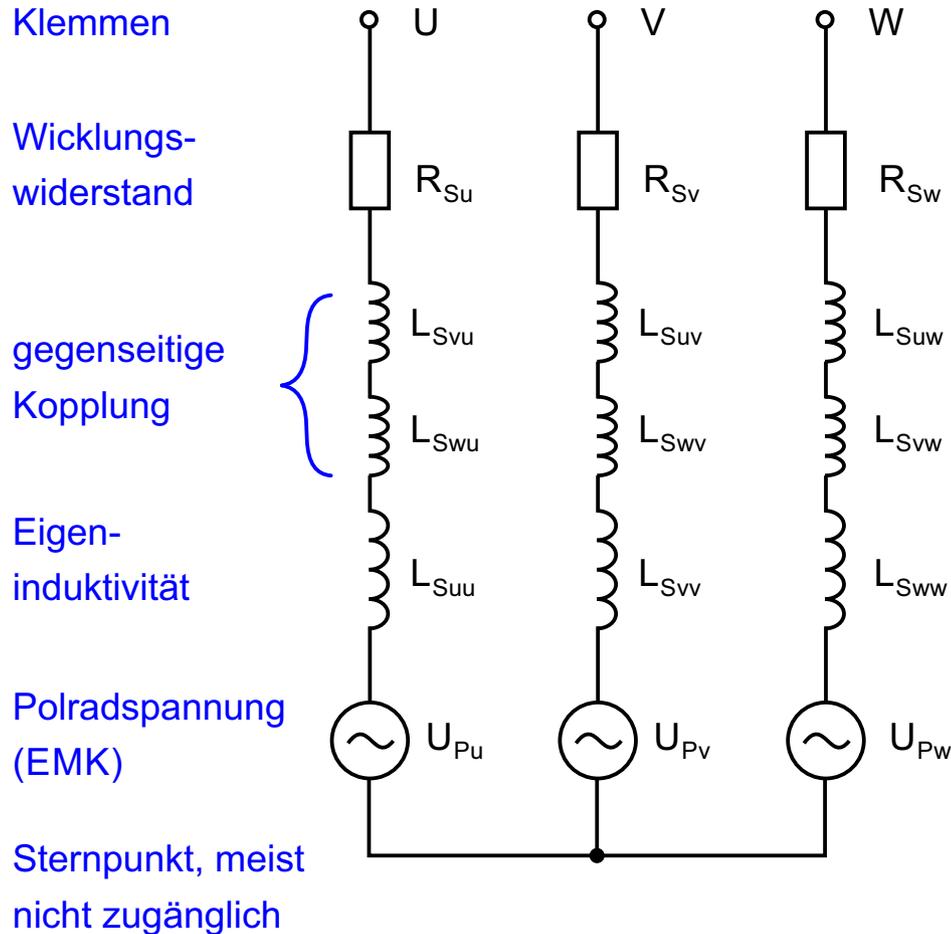
$$R_S(T) = R_{S20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20^\circ\text{C}))$$

$$\text{Kupfer: } \alpha_{20} = 3,92 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

ein  $\Delta T$  von +100K entspricht  
39,2% Widerstandszunahme!

## 6.2 Messung von Maschinenparametern

### 3-strängiges Schaltbild der Statorwicklung



- sinusförmige, symmetrische Speisung

- symmetrischer Wicklungsaufbau

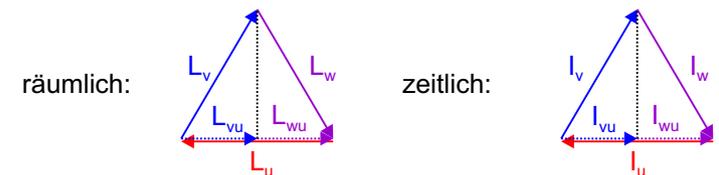
⇒ Eigeninduktivitäten:  $L_{Sii} = L_S'$

⇒ Koppelinduktivitäten:  $L_{Sij} = k \cdot L_S'$   
(Strang:  $i = u, v, w$  Gegenstränge:  $j = u, v, w$ )

- klassische, verteilte Wicklung:  $k \approx 1/2$

⇒  $L_S \approx 3/2 \cdot L_S'$

Erklärung: Projektionen der Induktivitäten/Ströme auf Phase u:



⇒ Phase V und W erhöhen den Fluss in Phase U um je  $1/4$

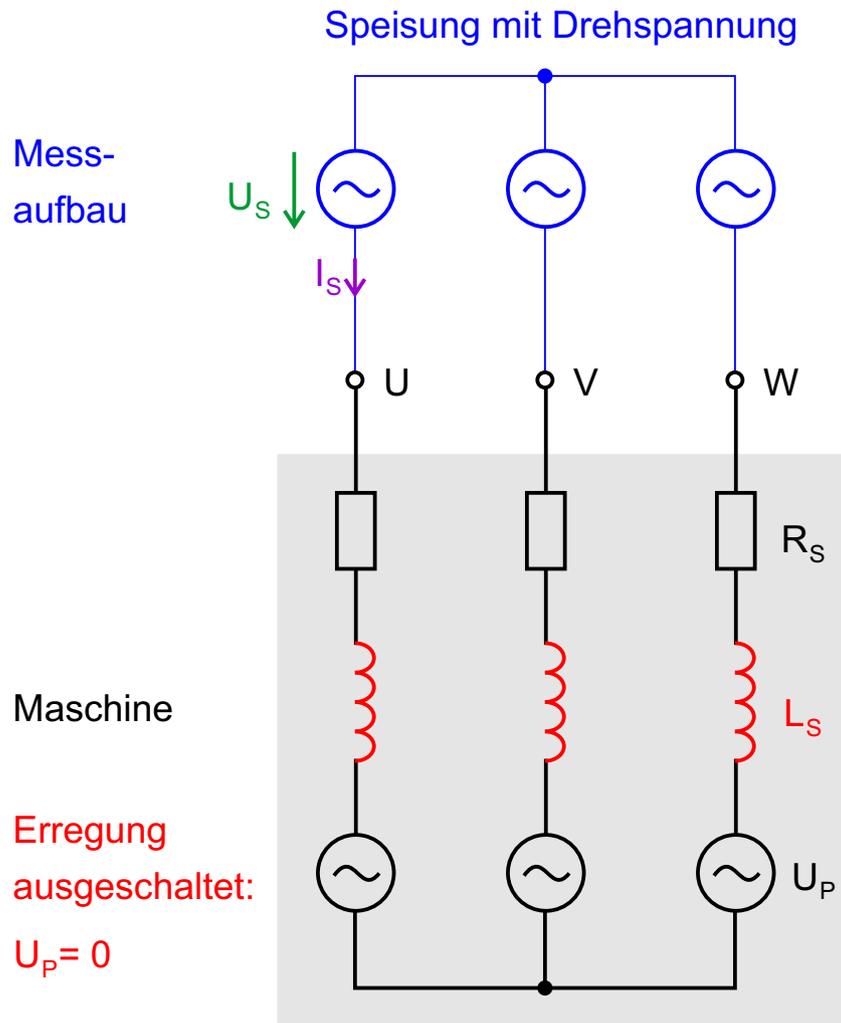
⇒ resultierender Fluss wächst damit auf  $\psi_u = 3/2 L_u \cdot I_u$

- konzentrierte Wicklungen (MDM):  $k \approx 0$

⇒  $L_S \approx L_S'$

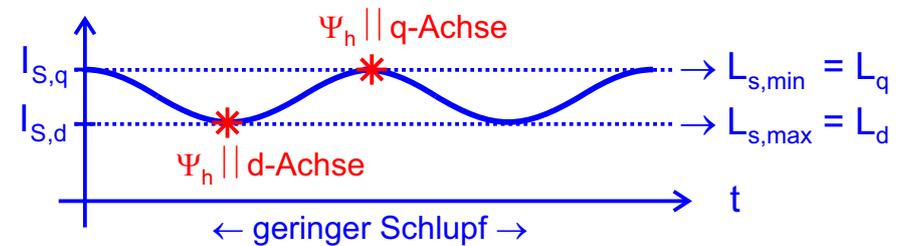
## 6.2 Messung von Maschinenparametern

### Messung Induktivität, SM elektrisch erregt mit Schenkelpolverhalten

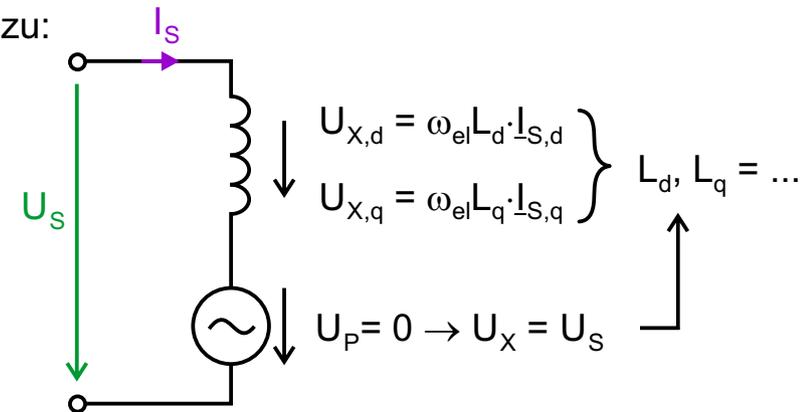


#### Messvorgang:

- Maschine wird mit nahezu Synchrondrehzahl geschleppt, Erregung ausgeschaltet,  $U_s$  und  $I_s$  messen

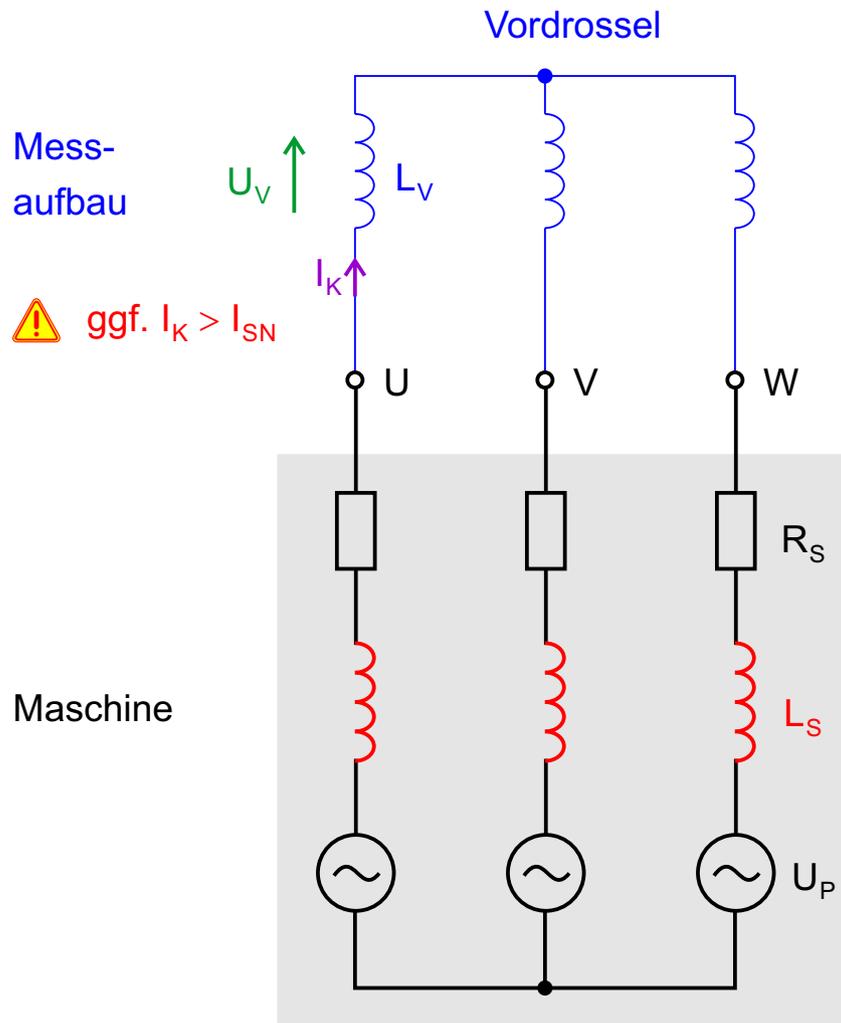


- Bestromung in allen drei Phasen:  $L_s$  direkt bestimmen
- $f_{el}$  groß genug:  $R_s$  vernachlässigbar ( $X_s \gg R_s$ )
- ESB dazu:



## 6.2 Messung von Maschinenparametern

### Messung Induktivität, PMSM

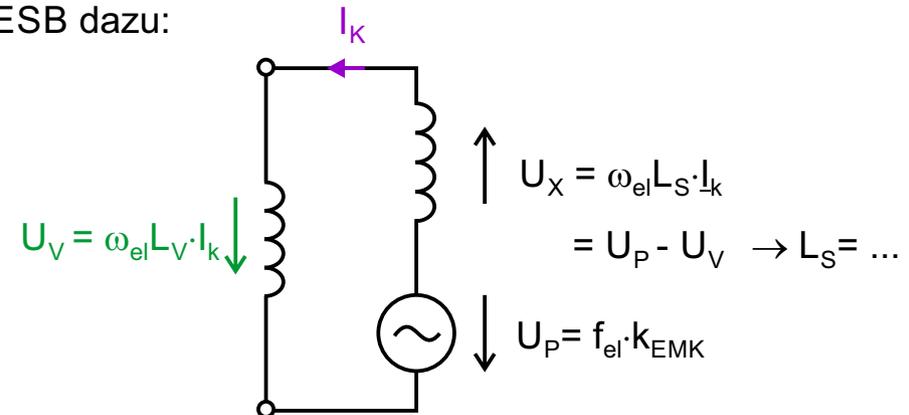


#### Messvorgang:

- Maschine geschleppt und über Vordrossel kurz geschlossen. EMK und  $L_V$  müssen bereits bekannt sein, Messen von  $U_V$ ,  $I_K$  und  $f_{el}$

- $f_{el}$  groß genug:  $R_S$  vernachlässigbar ( $X_S \gg R_S$ )

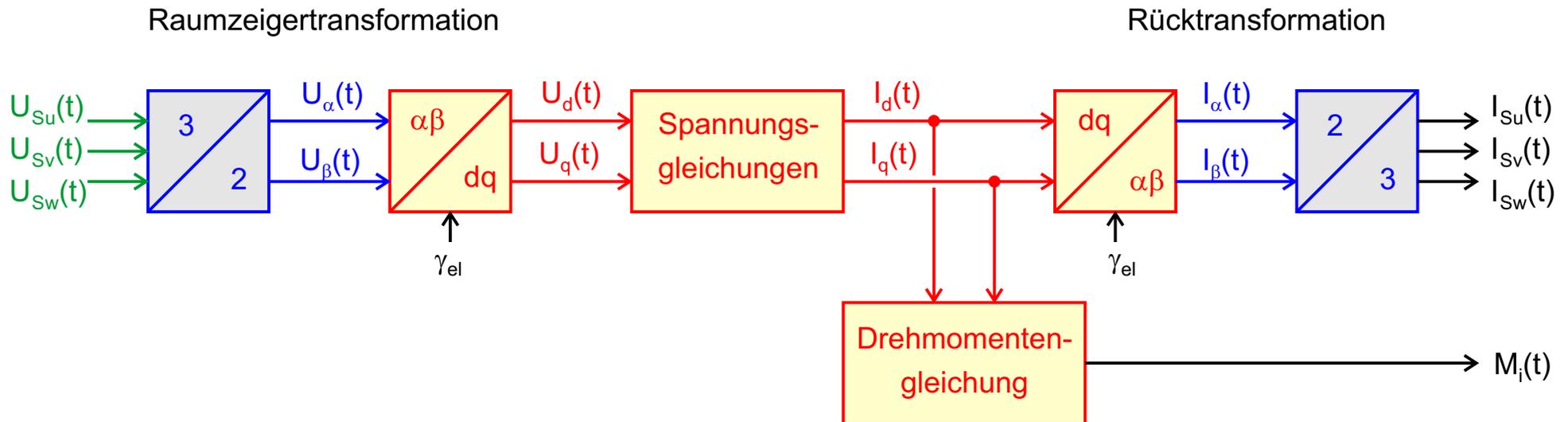
- ESB dazu:



- ! Unterscheidung  $L_d$  und  $L_q$  so nicht möglich
- EMK gibt bei vollem  $I_K$  je nach Eisenkreis um bis zu 20% nach: Arbeitspunkt der Magnete verschiebt sich aufgrund des Statorgegenfeldes

## 6.3 Modellbildung im $\alpha\beta$ - und dq-System

### Grundidee



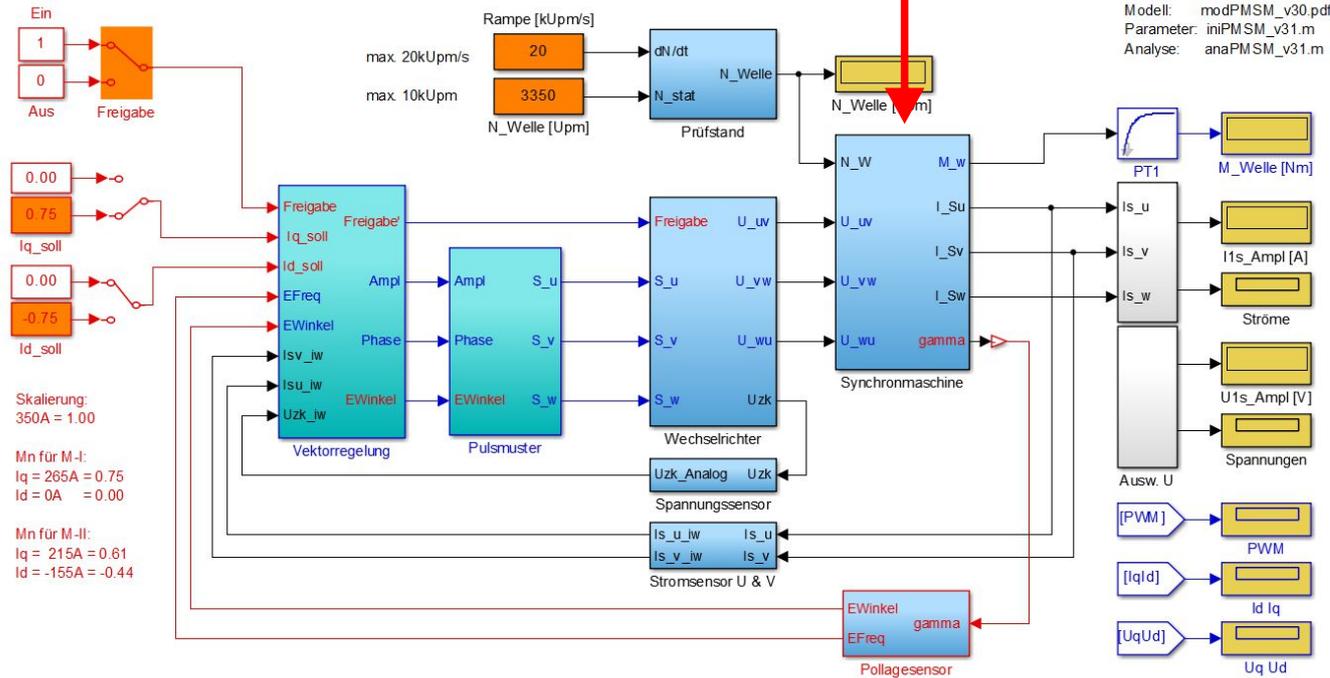
- Orthogonale Ersatzmaschine: Koppelinduktivitäten  $L_{ij}$  verschwinden, pauschal ist dann  $L_S = \frac{3}{2} L_S'$
- Statorspannungsgleichung vereinfacht sich erheblich, anschauliche Drehmomentenbeziehung
- Pollageabhängigkeit der Induktivitäten entspricht der Ausrichtung längs der d- und q-Achse
- Nachteil: lineares Grundwellenmodell (EMK sinusförmig, keine Sättigungseffekte u.a.)

# 6.3 Modellbildung im $\alpha\beta$ - und dq-System

## Motivation

### Maschinenmodell

#### Stromgeregelte Synchronmaschine



Hochschule Landshut  
 Praktikum EA Versuch 4  
 Stand: 12.08.14 / KLM  
 Modell: modPMSM\_v30.pdf  
 Parameter: iniPMSM\_v31.m  
 Analyse: anaPMSM\_v31.m

Einbindung des Maschinenmodells in eine Antriebssimulation zur...

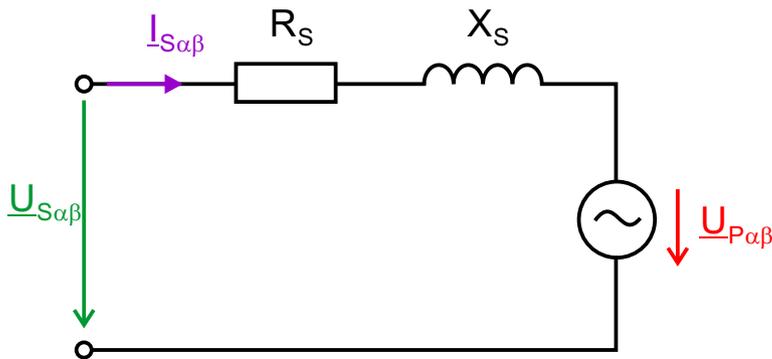
- Reglerentwicklung
- Auslegung/Spezifikation
- Analyse Betriebsverhalten
- HIL-Testsysteme
- Dokumentation
- Lehre, Einarbeitung

Modell: A. Kleimaier / Simulationssoftware: Simulink

## 6.3 Modellbildung im $\alpha\beta$ - und dq-System

### Statorspannungsgleichung im $\alpha\beta$ -System

Raumzeigerersatzschaltbild

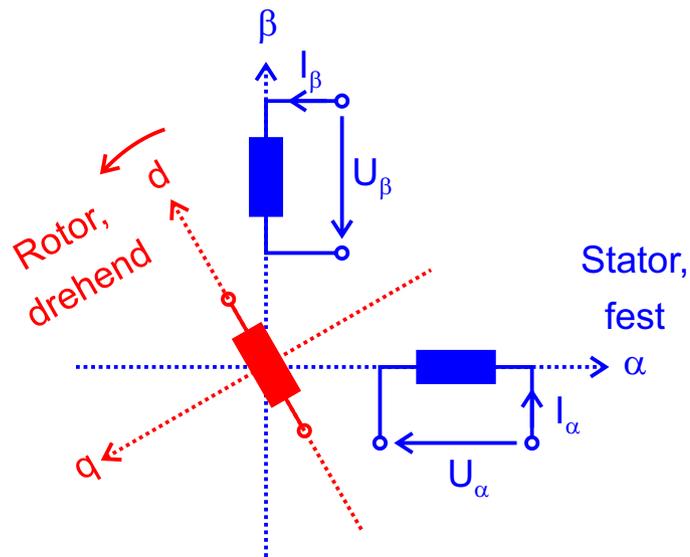


Ansatz: Statorspannungsgleichung  
direkt im  $\alpha\beta$ -System aufstellen

$$\underline{U}_{S\alpha\beta} = R_s \cdot \underline{I}_{S\alpha\beta} + L_s \cdot d\underline{I}_{S\alpha\beta}/dt + \underline{U}_{P\alpha\beta}$$

mit  $\underline{U}_{S\alpha\beta} = U_\alpha + j \cdot U_\beta$

und  $\underline{I}_{S\alpha\beta} = I_\alpha + j \cdot I_\beta$



- Vorteil: Koppelterme mit  $L_{ij}$  entfallen  
(Orthogonale Spulen koppeln nicht)

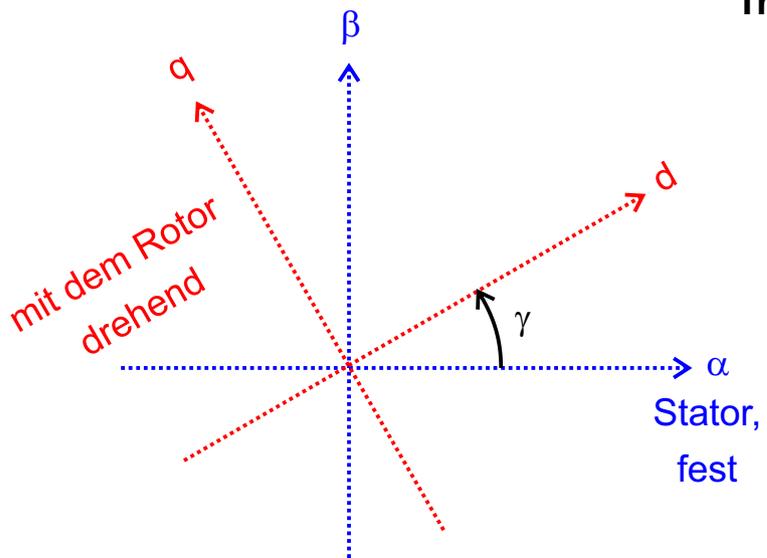
- Nachteil: elektrische Größen im stationären Zustand zeitlich veränderlich

z.B.  $U_\alpha(t) = \hat{U}_\alpha \cdot \cos(\omega t)$  und  $U_\beta(t) = \hat{U}_\beta \cdot \sin(\omega t)$

$I_\alpha(t) = \hat{I}_\alpha \cdot \cos(\omega t - \varphi_i)$  und  $I_\beta(t) = \hat{I}_\beta \cdot \sin(\omega t - \varphi_i)$

## 6.3 Modellbildung im $\alpha\beta$ - und dq-System

### Transformation in das dq-System



$$\text{Pollage- bzw. Drehwinkel } \gamma = \int_0^t \omega_{el}(t) dt = \omega_{el} \cdot t$$

$\omega_{el}(t) = \text{const.}, \text{ d.h. Drehzahl wird als stationär angenommen (!)}$

Durchführung der dq-Transformation (Abschnitt 4.5):

Multiplikation der Statorgrößen aus dem  $\alpha\beta$ -System mit  $e^{-j\gamma}$

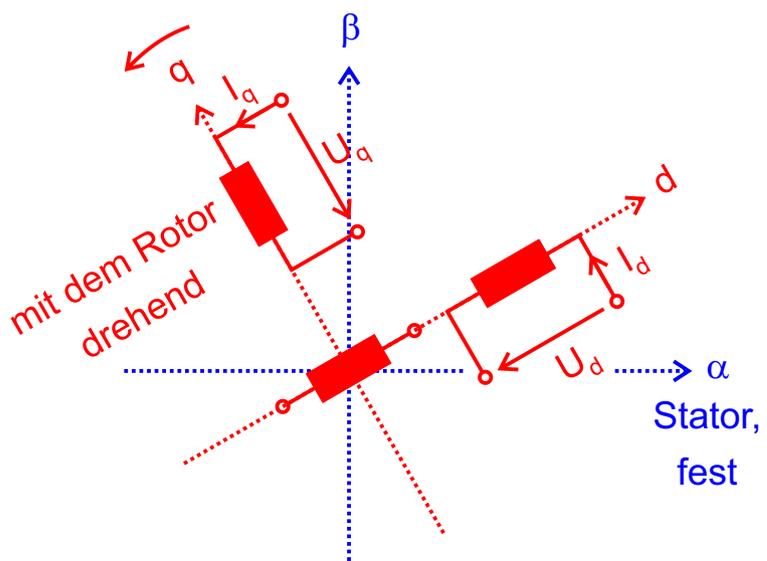
$$\underline{U}_{Sdq} = \underline{U}_{S\alpha\beta} \cdot e^{-j\gamma} \quad (\underline{U}_{S\alpha\beta} = \underline{U}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma}) \quad \text{und} \quad \underline{I}_{Sdq} = \underline{I}_{S\alpha\beta} \cdot e^{-j\gamma} \quad (\underline{I}_{S\alpha\beta} = \underline{I}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma})$$

Einsetzen in die Statorspannungsgleichung:

$$\underline{U}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma} = R_S \cdot \underline{I}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma} + L_S \cdot d(\underline{I}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma})/dt + \underline{U}_{Pdq} \cdot e^{j\gamma}$$

mit

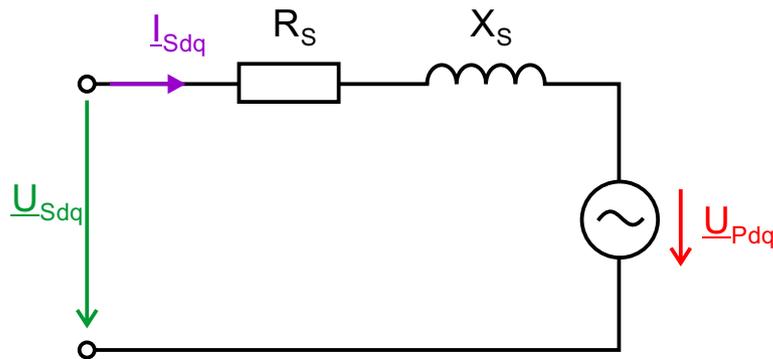
$$\begin{aligned} d(\underline{I}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma})/dt &= d\underline{I}_{Sdq}/dt \cdot e^{j\gamma} + \underline{I}_{Sdq} \cdot d(e^{j\gamma})/dt \\ &= d\underline{I}_{Sdq}/dt \cdot e^{j\gamma} + \underline{I}_{Sdq} \cdot j \cdot d\gamma/dt \cdot e^{j\gamma} \\ &= d\underline{I}_{Sdq}/dt \cdot e^{j\gamma} + j\omega_{el} \cdot \underline{I}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma} \end{aligned}$$



## 6.3 Modellbildung im $\alpha\beta$ - und dq-System

### Transformation in das dq-System

Raumzeigerersatzschaltbild



Ergebnis:

$$\underline{U}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma} = R_S \cdot \underline{I}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma} + L_S \cdot \frac{d\underline{I}_{Sdq}}{dt} \cdot e^{j\gamma} + j\omega_{el} L_S \cdot \underline{I}_{Sdq} \cdot e^{j\gamma} + \underline{U}_{Pdq} \cdot e^{j\gamma}$$

$e^{j\gamma}$  kürzen

$$\underline{U}_{Sdq} = R_S \cdot \underline{I}_{Sdq} + L_S \cdot \frac{d\underline{I}_{Sdq}}{dt} + j\omega_{el} L_S \cdot \underline{I}_{Sdq} + \underline{U}_{Pdq}$$

mit  $\underline{U}_{Sdq} = U_d + j \cdot U_q$ ,  $\underline{U}_{Pdq} = j \cdot U_P$

und  $\underline{I}_{Sdq} = I_d + j \cdot I_q$

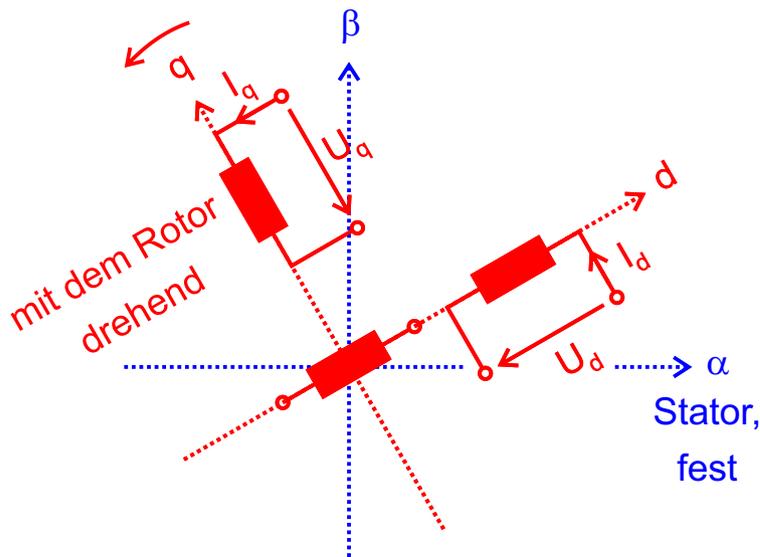
nach Real- und Imaginärteil getrennt, Aufspaltung von  $L_S$  in  $L_d$  und  $L_q$ :

d-Seite:  $U_d = R_S \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - \omega_{el} \cdot L_q \cdot I_q$

q-Seite:  $U_q = R_S \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} + \omega_{el} \cdot L_d \cdot I_d + U_P$

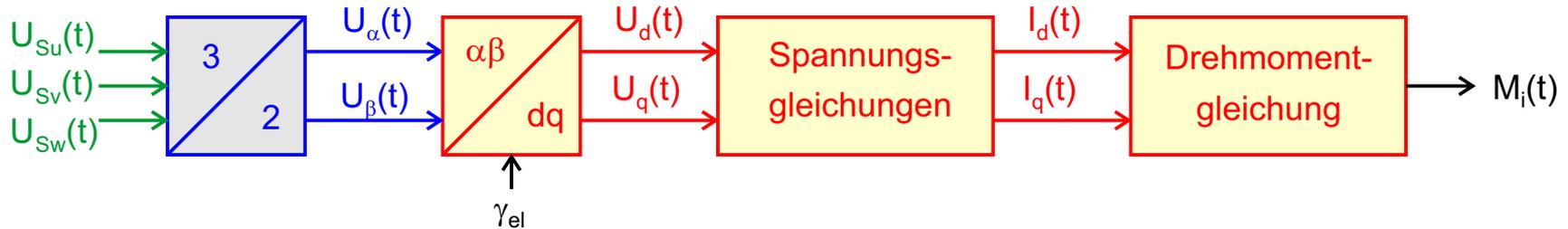
**Vorteile:**

- $\underline{U}_{Sdq}$  und  $\underline{I}_{Sdq}$  sind im stationären Betrieb nun konstante Größen
- Rotorfluss liegt auf der d-Achse, EMK auf der q-Achse



## 6.3 Modellbildung im $\alpha\beta$ - und dq-System

### Zusammenfassung



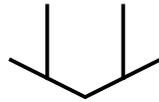
$$\text{d-Achse: } U_d(t) = R_S \cdot I_d(t) + L_d \cdot \dot{I}_d(t) - \omega_{el} L_q \cdot I_q(t)$$

$$\text{q-Achse: } U_q(t) = R_S \cdot I_q(t) + L_q \cdot \dot{I}_q(t) + \omega_{el} L_d \cdot I_d(t) + U_P(t)$$

} Auflösen nach  $\dot{I}_d$  und  $\dot{I}_q$  :  
2 gekoppelte ZDGL

$$\text{mit } U_P = k_{EMK} \cdot f_{el}$$

Spezialfall stationärer Betrieb: Zustandsgrößen sind konstant



$$U_d = R_S \cdot I_d - \omega_{el} L_q \cdot I_q$$

$$U_q = R_S \cdot I_q + \omega_{el} L_d \cdot I_d + U_P$$

## 6.3 Modellbildung im dq-System

### Drehmomentgleichung



$$\text{allgemein: } P_i(t) = \frac{3}{2} \cdot \text{re} \{ \underline{U}_{idq} \cdot \underline{I}_{sdq}^* \} = \frac{3}{2} \cdot (U_{qi} \cdot I_q + U_{di} \cdot I_d) \quad \text{für } \underline{U}_{idq} = U_{di} + jU_{qi} \quad \text{und } \underline{I}_{sdq} = I_d + jI_q$$

am Energieumsatz Stator  $\leftrightarrow$  Rotor beteiligt:

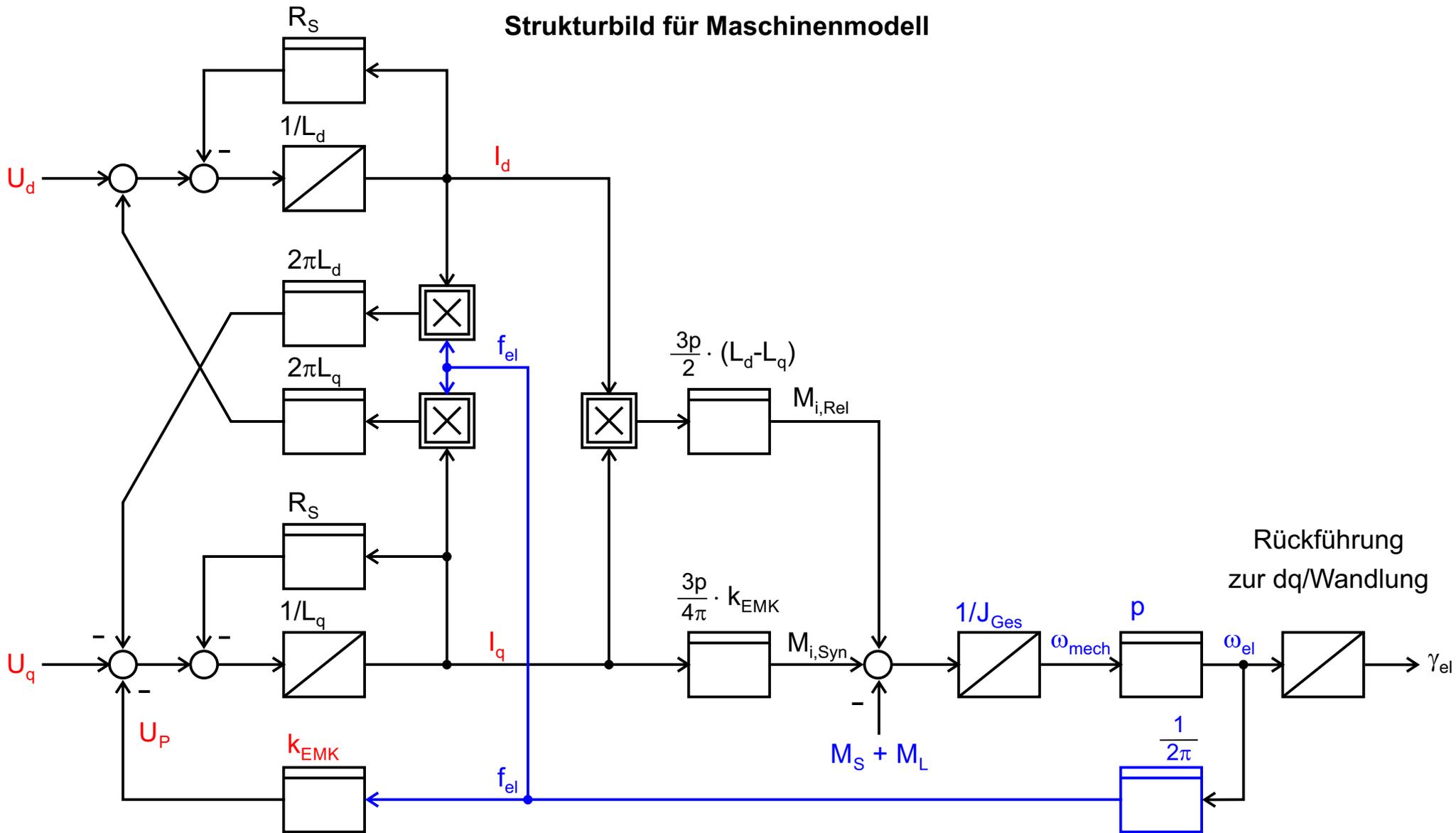
$$\left. \begin{aligned} U_{di} &= -\omega_{el} L_q \cdot I_q \\ U_{qi} &= +\omega_{el} L_d \cdot I_d + k_{EMK} \cdot f_{el} \end{aligned} \right\} \text{Bewegungsinduktion}$$

$\Rightarrow U_{di}$  und  $U_{qi}$  in Gleichung  $P_i$  für einsetzen:

$$M_i(t) = \frac{P_i(t)}{\omega_{mech}} = \frac{p}{\omega_{el}} \cdot P_i(t) = \dots = \underbrace{\frac{3p}{4\pi} \cdot k_{EMK} \cdot I_q(t)}_{\text{Synchronmoment}} + \underbrace{\frac{3p}{2} \cdot (L_d - L_q) \cdot I_q(t) \cdot I_d(t)}_{\text{Reluktanzmoment}}$$

### 6.3 Modellbildung im dq-System

Strukturbild für Maschinenmodell



## 6.4 Fazit für die Stromregelung

Ziel: maximales Drehmoment bei minimalem Statorstrom

$$M_i(t) = \underbrace{\frac{3p}{4\pi} \cdot k_{EMK} \cdot I_q(t)}_{\text{Synchronmoment}} + \underbrace{\frac{3p}{2} \cdot (L_d - L_q) \cdot I_q(t) \cdot I_d(t)}_{\text{Reluktanzmoment}}$$

### Synchronmoment

- $I_q$  ist momentbildende Stromkomponente
- für  $I_s = I_q$ : Strom eilt dem Rotorfluss um  $90^\circ$  vor

### Reluktanzmoment

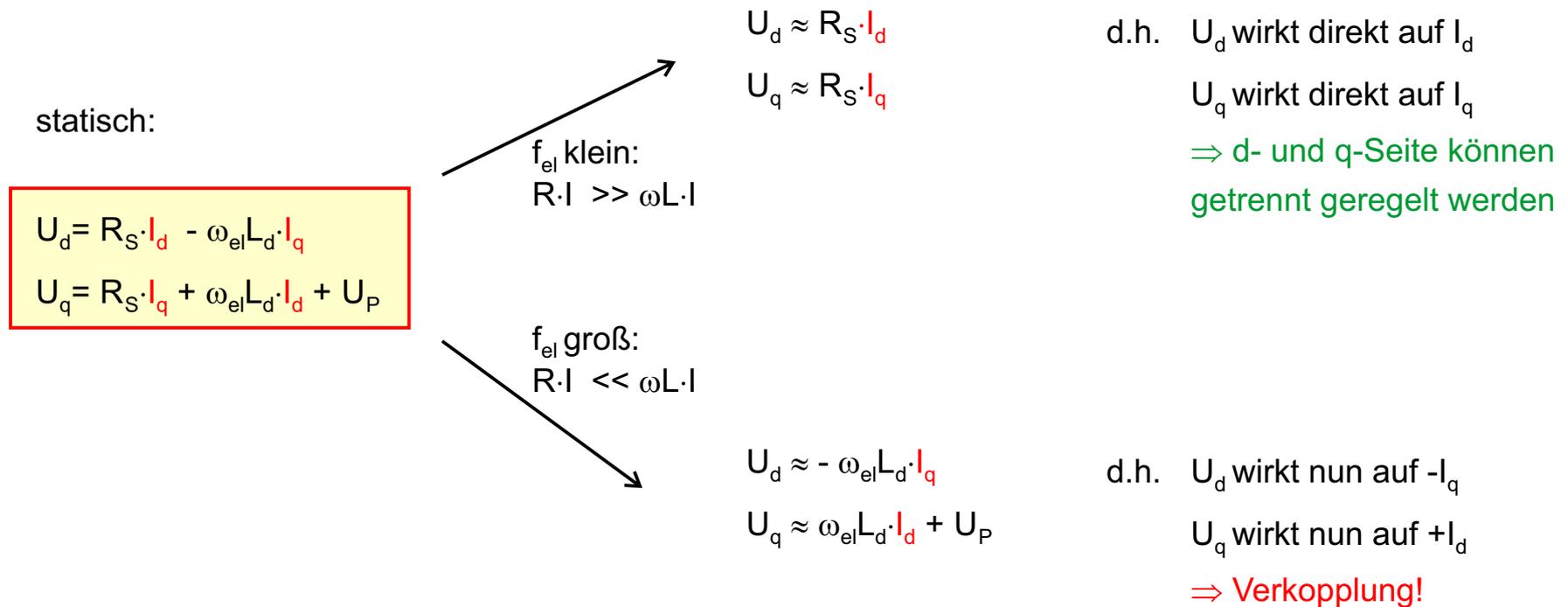
- vergrößerte Momentenausbeute, wenn zusätzlich  $I_d$  eingeprägt wird
  - für  $L_d > L_q$  muss  $I_d$  positiv sein, für  $L_d < L_q$  negativ
  - Optimierungsfrage, denn  $I_s = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}$  ist durch Auslegung begrenzt
  - Reluktanzmoment verschwindet für  $L_d = L_q$  (Vollpolmaschine)
  - Synchronmoment verschwindet für  $k_{EMK} = 0$  (Reluktanzmaschine)
- Optimum dann für  $I_d = \pm I_q$ , so dass  $I_s$  der EMK um  $45^\circ$  vor/nacheilt

### Fazit

- Stromistwerte in das dq-System transformieren
- Sollwertvorgabe bzw. Regelstrategie abhängig von Maschinencharakteristik
- Standardverfahren: Vektorregelung = je ein PI-Regler für d- und q-Komponente

## 6.4 Fazit für die Stromregelung

### Baustelle Vektorregelung: Gegenseitige Kopplung



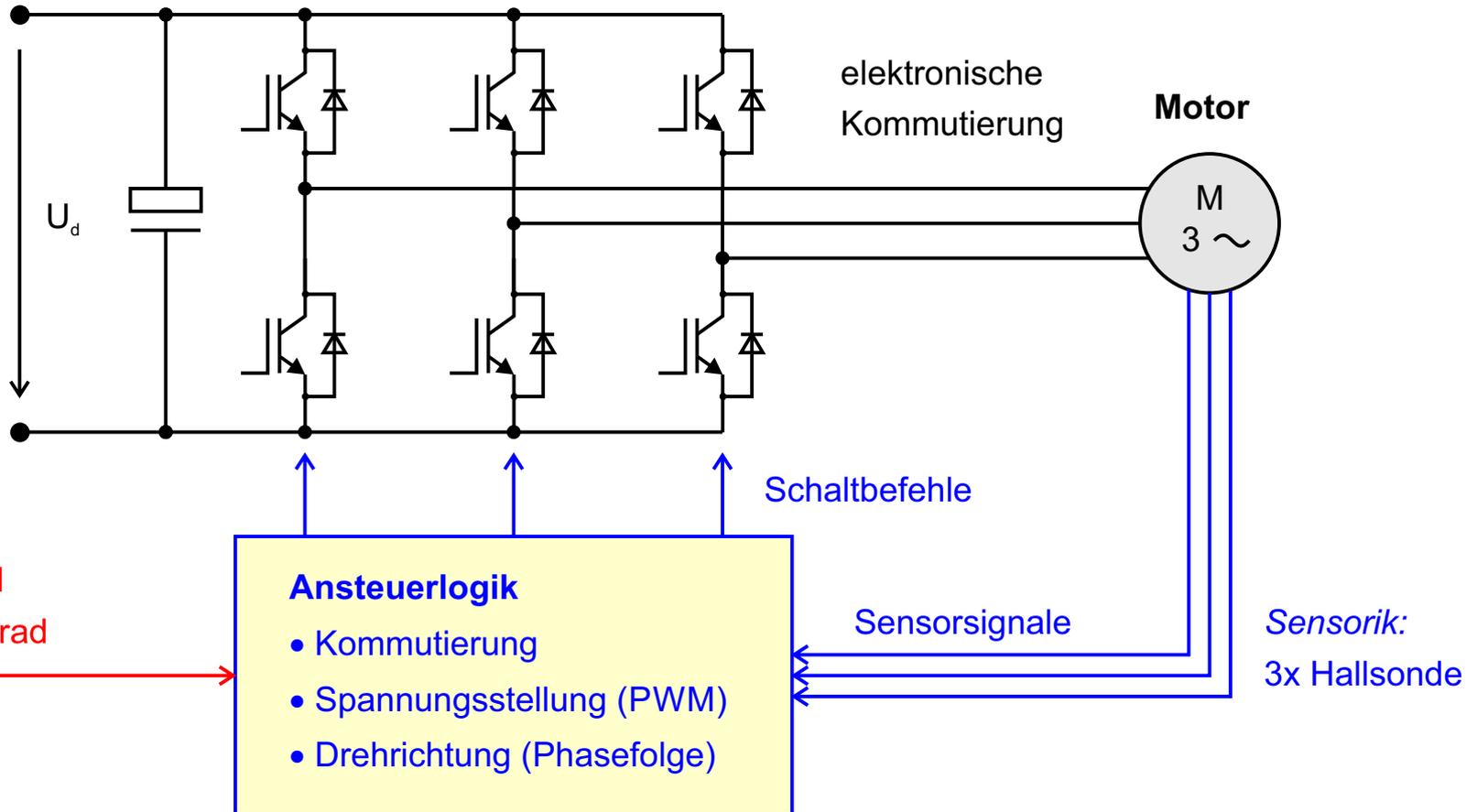
#### Fazit

- Regelung muss ohm'sche und induktive Spannungsabfälle sowie  $U_P$  kompensieren
- mit zunehmender Polwechselfrequenz verkoppeln sich jedoch d- und q- Seite  
 $\Rightarrow$  d- und q- Pfad sollte z.B. durch Vorsteuerung entkoppelt werden!

## 7.3 Stromregelung mit Blockkommutierung

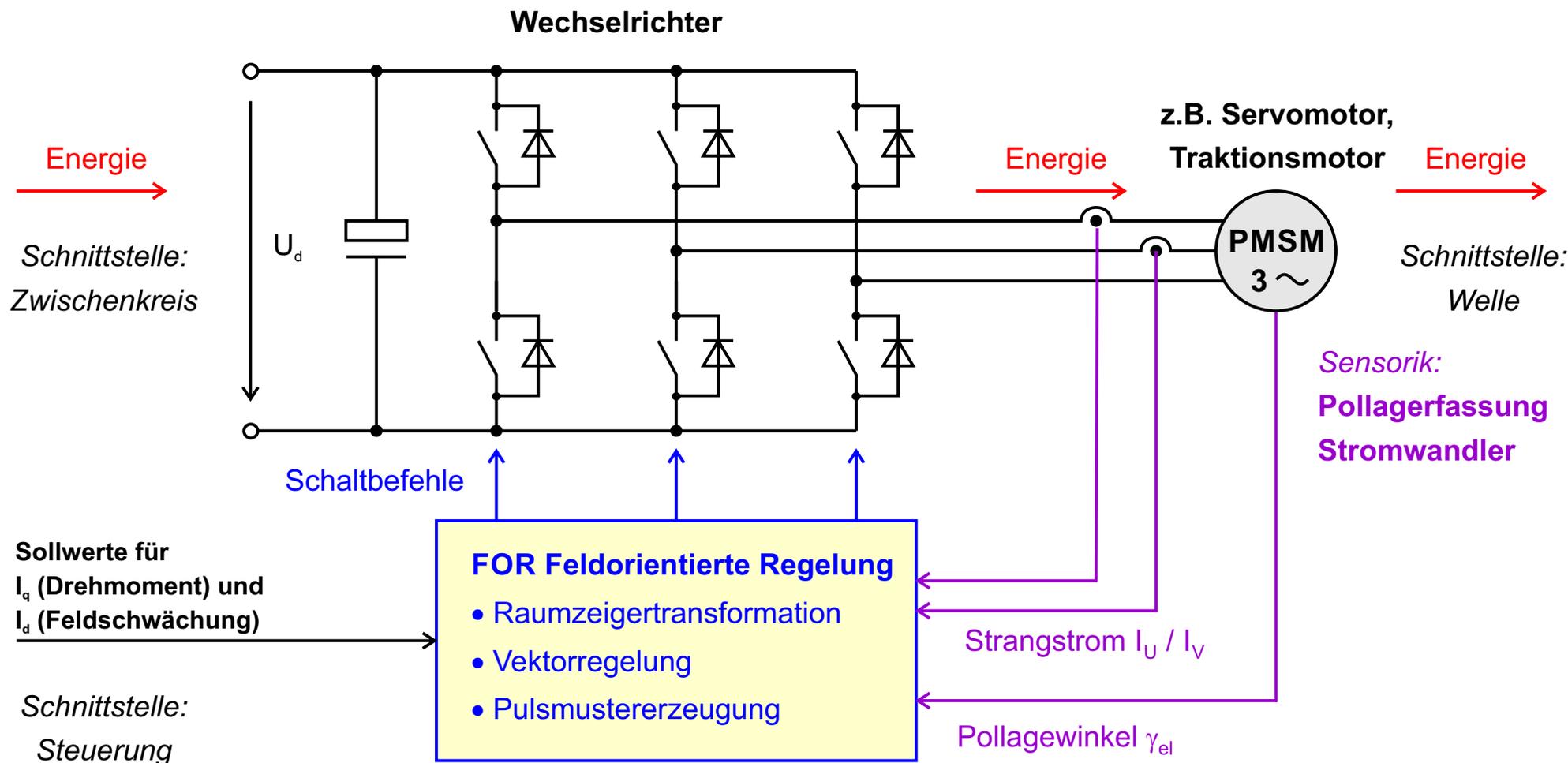
"BLDC-Motor" = "EC-Motor" = PMSM mit Elektronischer Kommutierung

### Wechselrichter



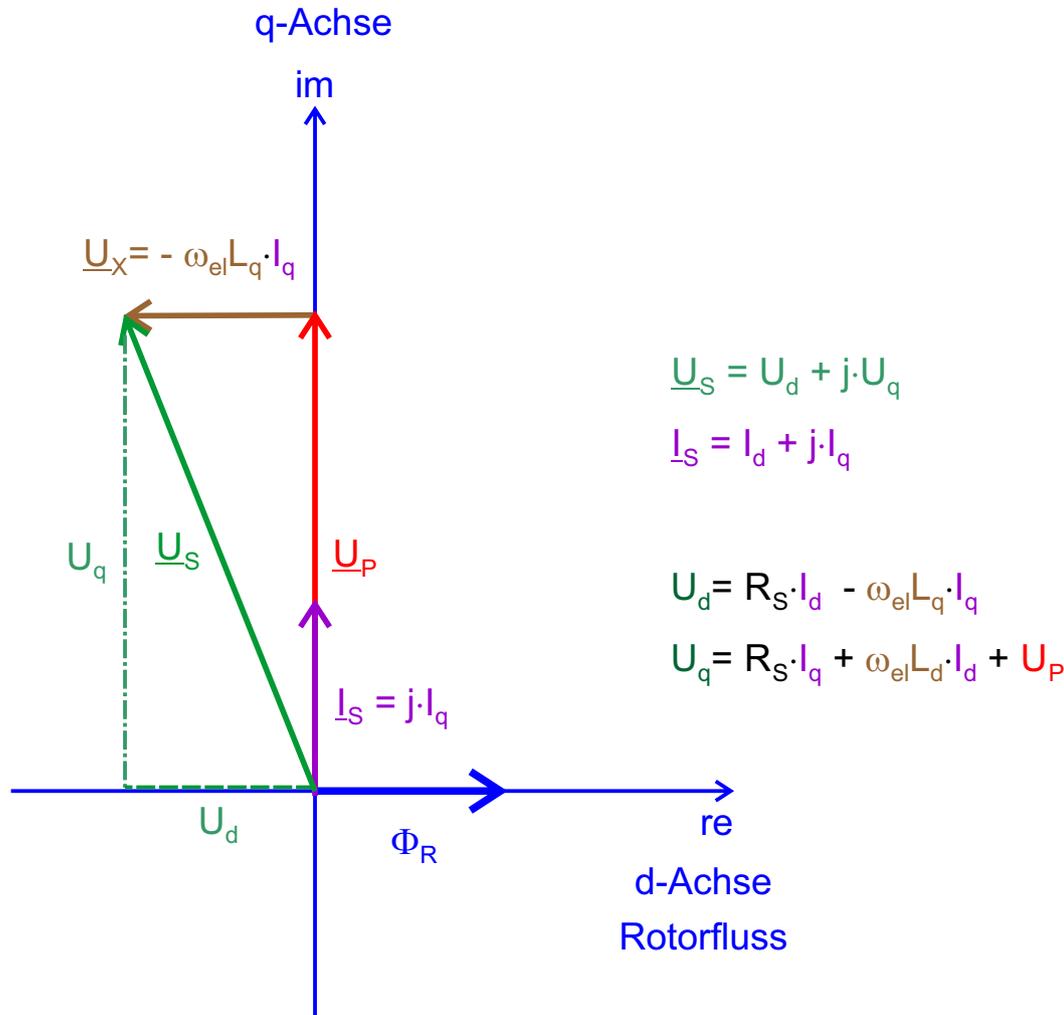
## 7.3 Stromregelung mit Sinuskommutierung

Gesamtsystem (Fortsetzung von GeA, Kapitel 13)

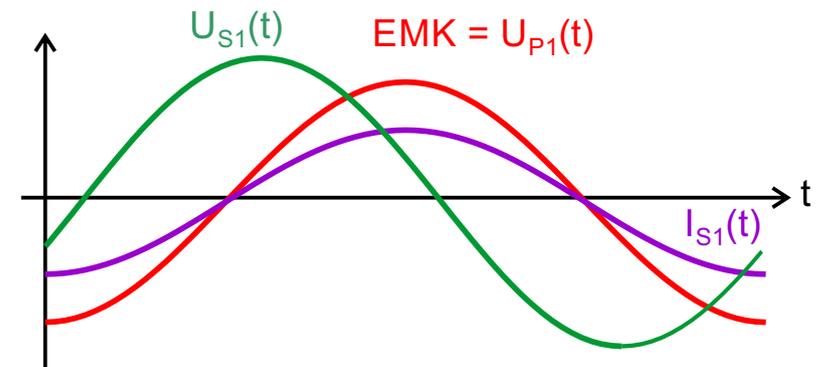


## 7.3 Stromregelung mit Sinuskommütierung

### Aufgabenstellung für Querstromeinprägung

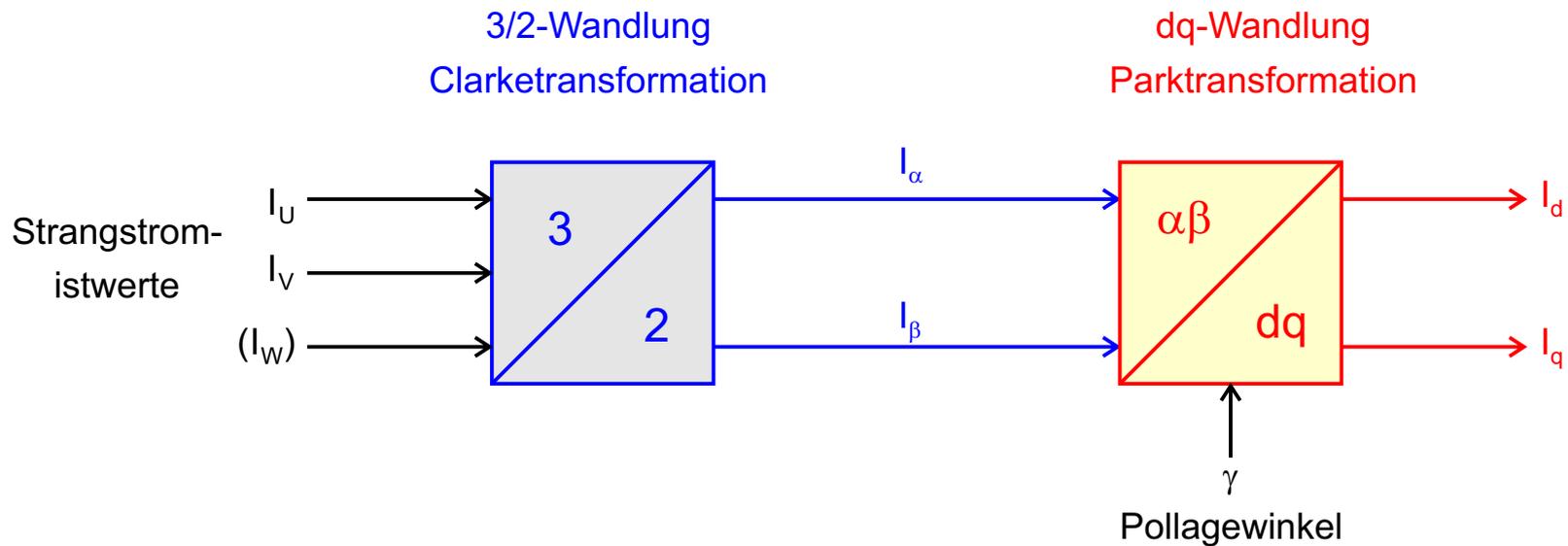


- Spannung  $\underline{U}_S(t)$  so einprägen, dass Statorstrom  $I_S(t)$  in Phase mit EMK fließt
- $U_d$  und  $U_q$  bestimmen: Stromregelung anstelle Kommutierungssteuerung erforderlich!



## 7.3 Stromregelung mit Sinuskommütierung

### Raumzeigertransformation



$$I_\alpha = I_U$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_U + 2 \cdot I_V)$$

statorfest  
(alle DFM)

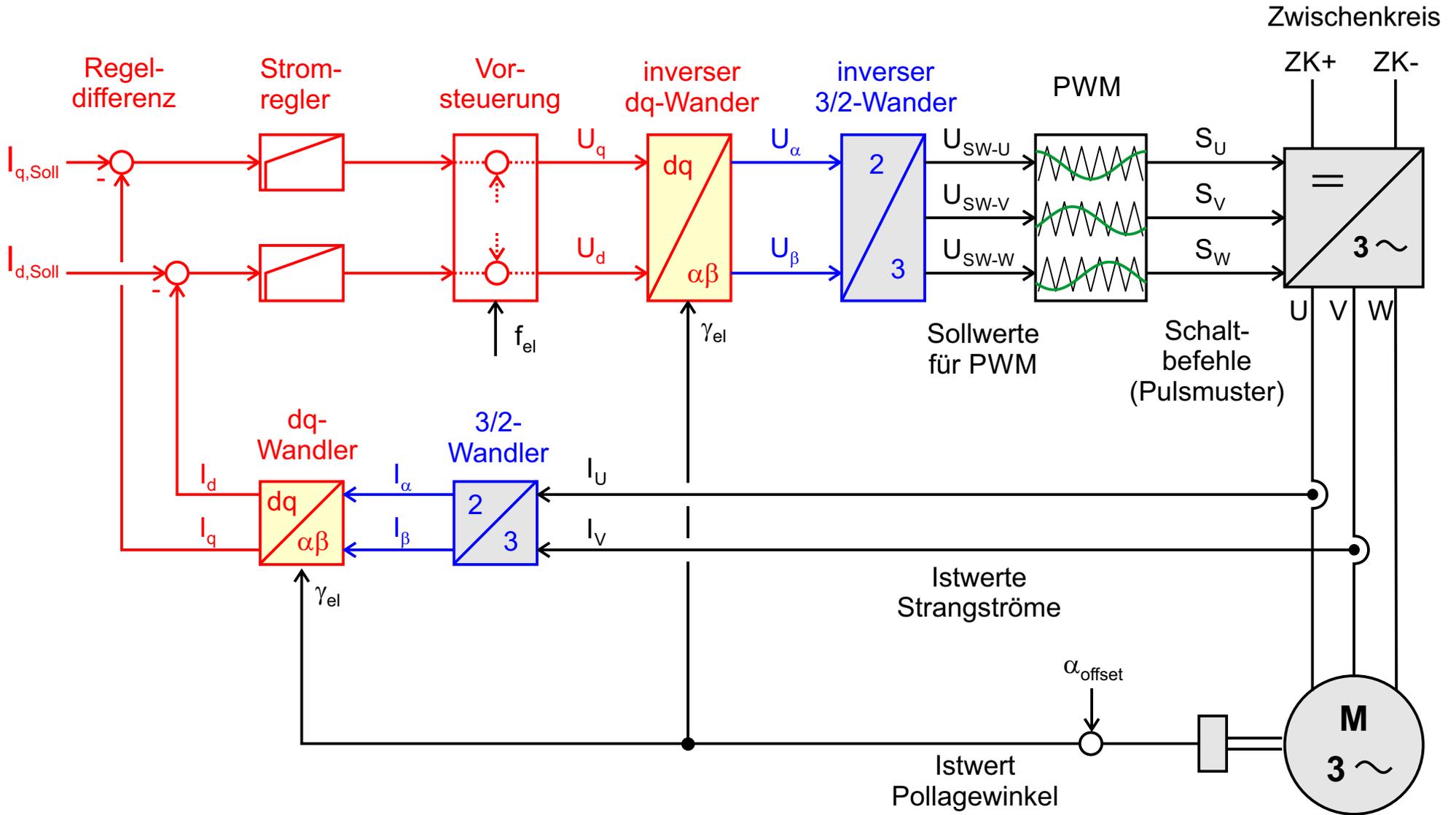
$$I_d = + I_\alpha \cos \gamma + I_\beta \sin \gamma$$

$$I_q = - I_\alpha \sin \gamma + I_\beta \cos \gamma$$

rotorfest (SM, PMSM)  
rotorfeldorientiert (ASM)

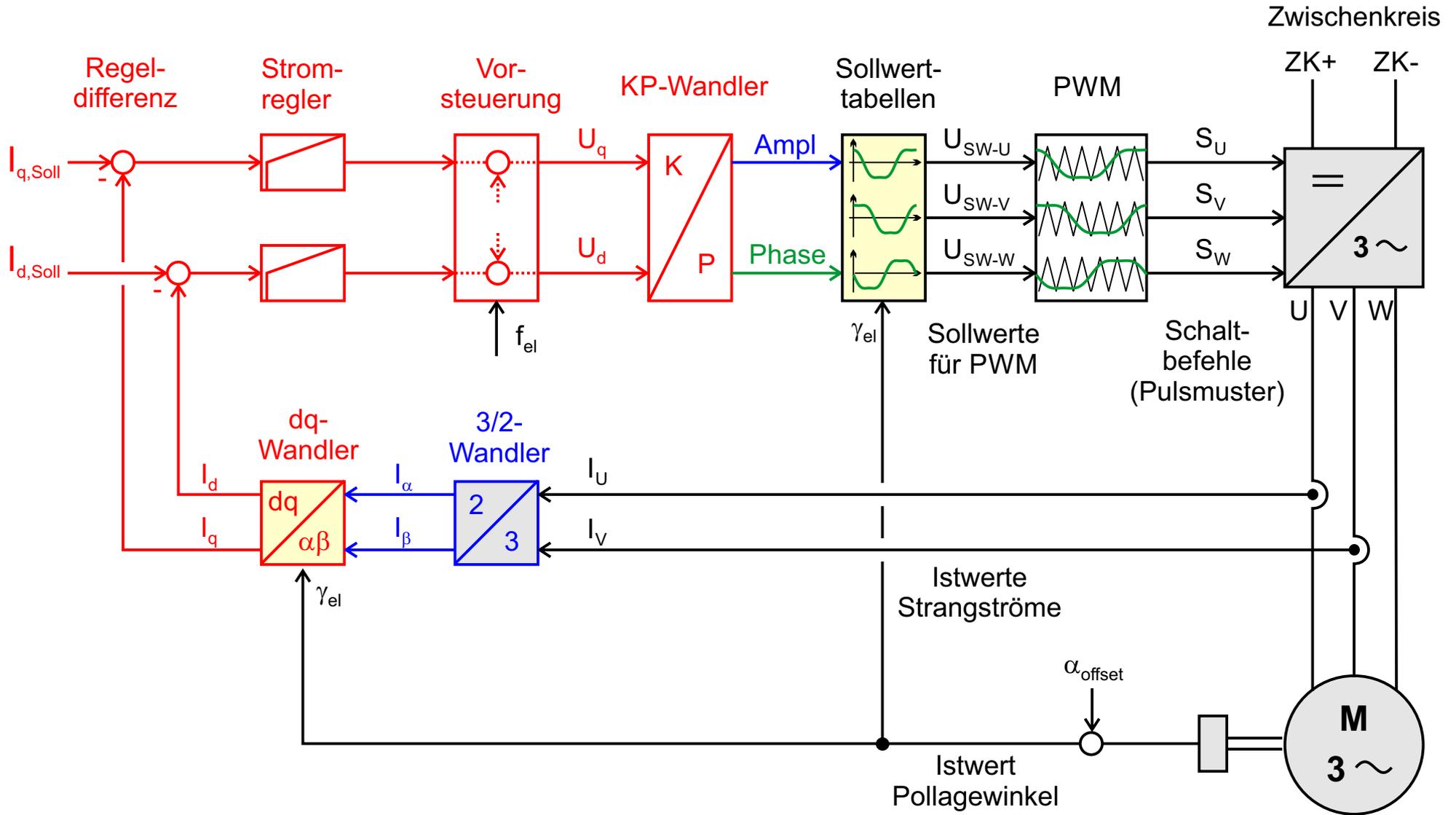
# 7.4 Prinzipielle Reglerstruktur

## Version mit Rücktransformation



# 7.4 Prinzipielle Reglerstruktur

## Version mit KP-Wandler und Sollwerttabellen



## 7.4 Prinzipielle Reglerstruktur

Abgleich Pollagesignal = Einstellen von  $\alpha_{\text{offset}}$

Abgleich von

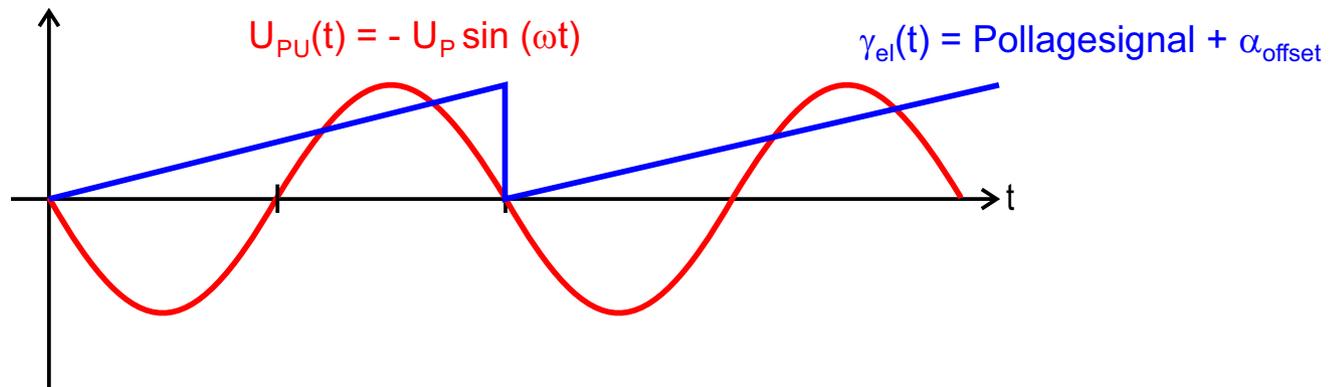
- **Pollagesignal**

mit

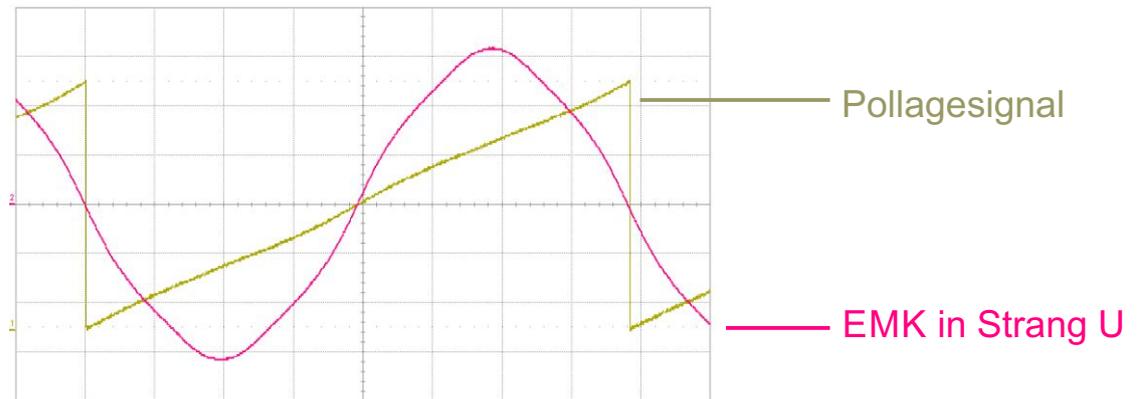
- **EMK in Strang 1, d.h.  $U_{pU}$**

Maschine geschleppt,  
Messung der Strangspannung  
in Strang U gegen Sternpunkt  
bei offenen Klemmen

Beispiel: AxMDM Prototyp 2  
in unserem Labor



Oszilloskop-Screenshot



## 7.5 Vorsteuerung

### Problematik gegenseitige Kopplung

$f_{el}$  groß:  
 $R \cdot I \ll \omega L \cdot I$



$$U_q \approx \omega_{el} L_d \cdot I_d + U_P$$

$$U_d \approx -\omega_{el} L_q \cdot I_q$$

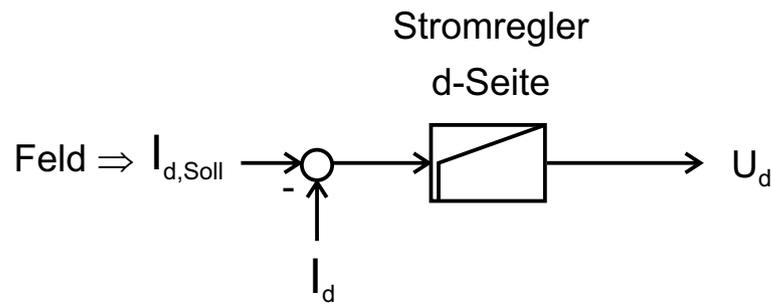
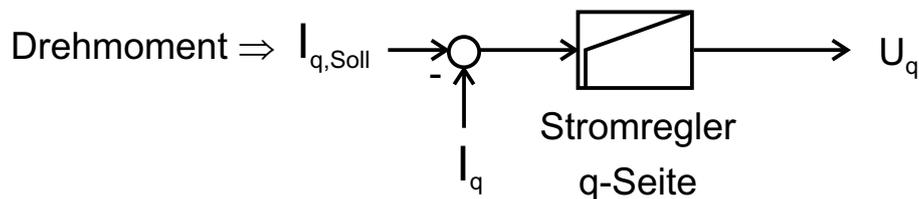
#### Anschauliches Beispiel:

- Sollwert Drehmoment wird angehoben
- q-Regler sieht positive Regeldifferenz  
 $\Rightarrow$  q-Regler hebt  $U_q$  an  $\Rightarrow$  es steigt aber  $I_d$
- d-Regler sieht negative Regeldifferenz  
 $\Rightarrow$  d-Regler senkt  $U_d$  ab  $\Rightarrow$  es steigt  $I_q$
- Regeldifferenz q-Regler nimmt ab

#### Fazit:

$\Rightarrow$  Die Sollwertanhebung wird indirekt über eine Reglerkaskade ausgeregelt

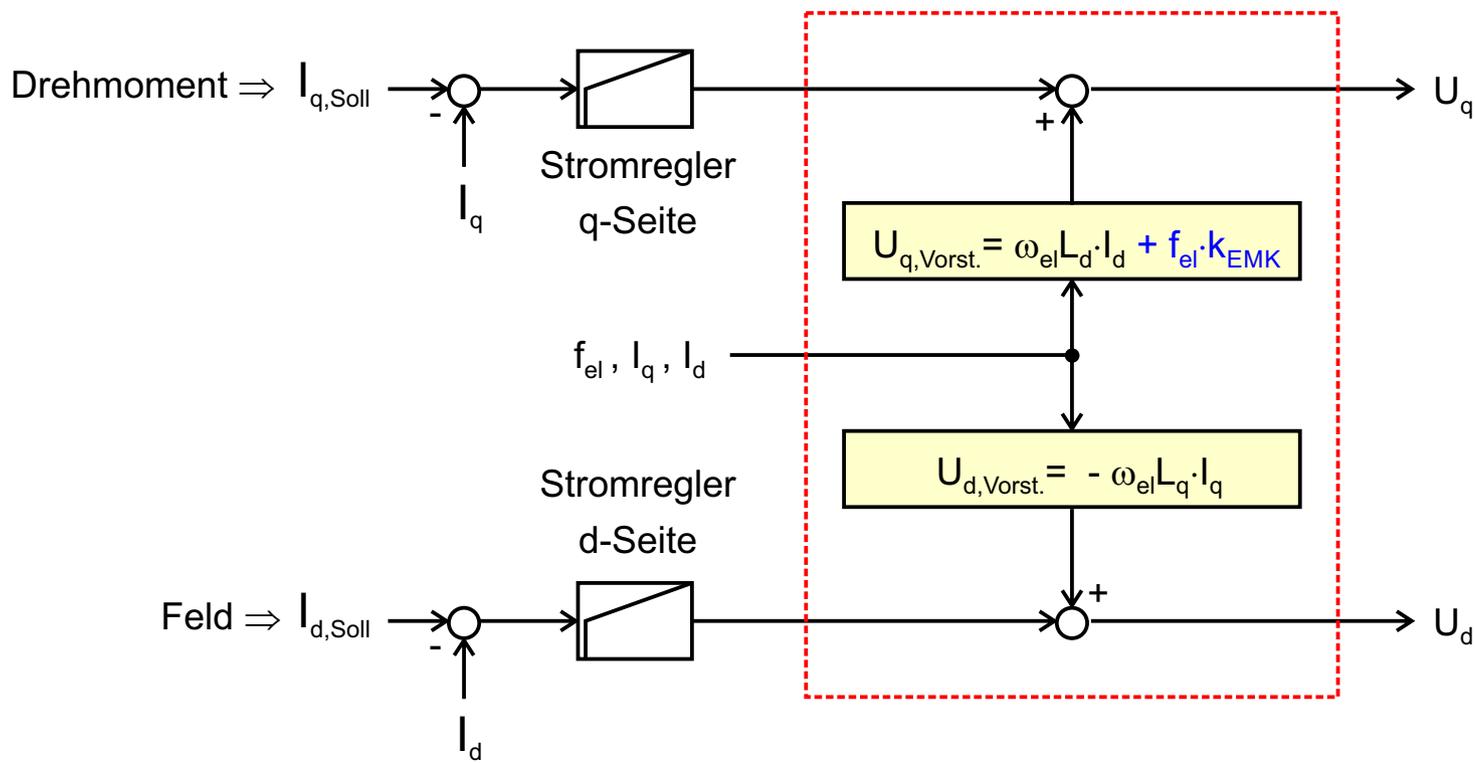
$\Rightarrow$  unsauberes Regelverhalten, hohe P-Verstärkung erforderlich



## 7.5 Vorsteuerung

### Grundprinzip Vorsteuerung

- Vorsteuerung (von Teilen) des statischen Streckenverhaltens
- dadurch Entkopplung der d-q-Verkreuzung durch die Reaktanz
- Regelschleife gleicht statische Fehler der Rechnung aus
- Regelschleife regelt Dynamik aus

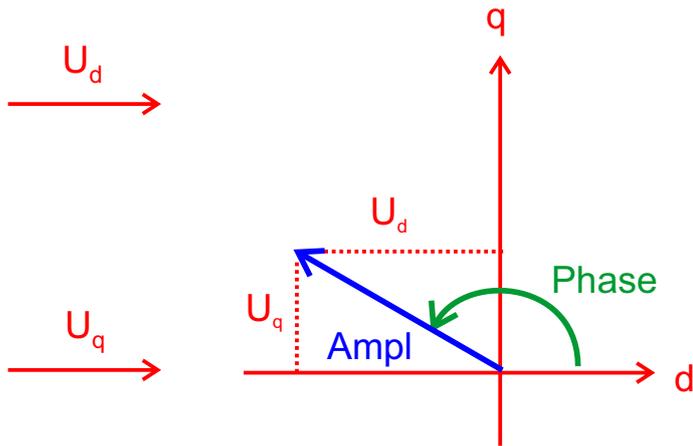


- ohm'sches Glied kann vernachlässigt werden
- EMK muss nur bei hoher Dynamik bzw. kleinem I-Anteil kompensiert werden

# 7.6 KP-Wandler und PWM

## Umsetzung im µC

KP-Wandler (Code im Reglerinterrupt)



Ampl →

Phase →



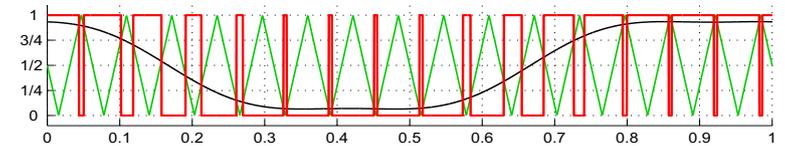
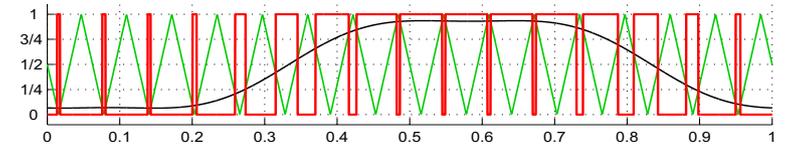
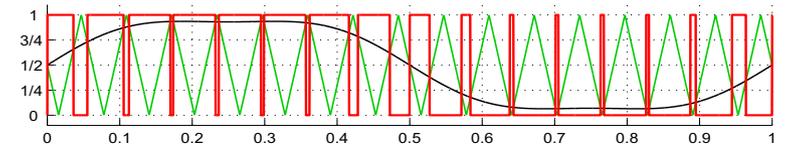
$\varphi_{Tab}$

$\gamma_{el}$

Pollagewinkel



Sinus-Dreieckmodulation (Timer-Register)



**Amplitude:**  $Ampl = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$

Phase	Quadrant
Phase = $\text{atan}(U_q / U_d)$	$U_d > 0, U_q > 0$
Phase = $\text{atan}(U_q / U_d) + \pi$	$U_d < 0, U_q > 0$
Phase = $\text{atan}(U_q / U_d) + \pi$	$U_d < 0, U_q < 0$
Phase = $\text{atan}(U_q / U_d) + 2\pi$	$U_d > 0, U_q < 0$

Sollwertverläufe aus Tabelle, z.B.

- $U_{U,Soll} = Ampl \cdot \left( \cos(\varphi_{Tab} - 0^\circ) + \frac{1}{6} \cdot \sin(3 \cdot \varphi_{Tab}) \right)$
- $U_{V,Soll} = Ampl \cdot \left( \cos(\varphi_{Tab} - 120^\circ) + \frac{1}{6} \cdot \sin(3 \cdot \varphi_{Tab}) \right)$
- $U_{W,Soll} = Ampl \cdot \left( \cos(\varphi_{Tab} - 240^\circ) + \frac{1}{6} \cdot \sin(3 \cdot \varphi_{Tab}) \right)$

## 7.7 Baustellen

### Typische Arbeitspakete bei der Reglerentwicklung

#### Baustellen

- Reglerentwurf
- Umsetzung der Reglerstruktur
- Reglerparametrierung / Einstellung
- Parameteridentifikation und -Nachführung
  
- Modulationsverfahren, maximale Spannung
- Regelstrategie für Feldschwächbetrieb
- opt. Betrieb bei Reluktanzmoment / el. Erregung
  
- Unsauberes Winkelsignal
- (Wieder-) Einschalten auf drehende Maschine
  
- Sensorlose Regelung bei höheren Drehzahlen
- Sensorlose Regelung ab Stillstand
- Regelstrategie im Fehlerfall

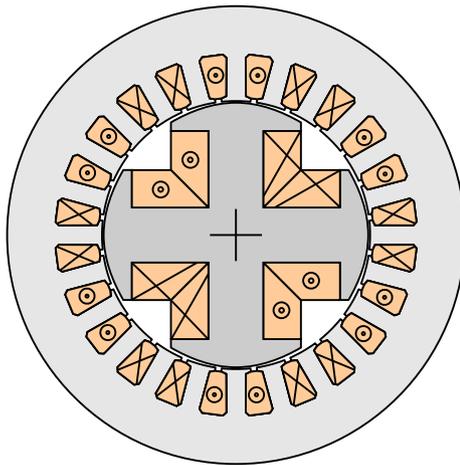
#### Arbeitsgebiete

- Simulation, HIL-Prüfstand
- Codierung von Hand / Codegenerierung aus Modell
- Empirisch durch Probieren / Analytisch
- Maschinenmodell, Beobachter, neuronales Netz
  
- Kapitel 8
- Kapitel 8
- z.B. MTPA-Regelung "Maximum Torque per Ampere"
  
- Glättung mit PLL
- Vorsteuerung / Integrationsstellen vorladen
  
- EMK-basierte Winkelbestimmung
- z.B. Nutzung von Anisotropien im Magnetkern
- Vorbeugung, z.B. mit Abregelfunktionen, schnelles Wiedereinschalten nach Fehler

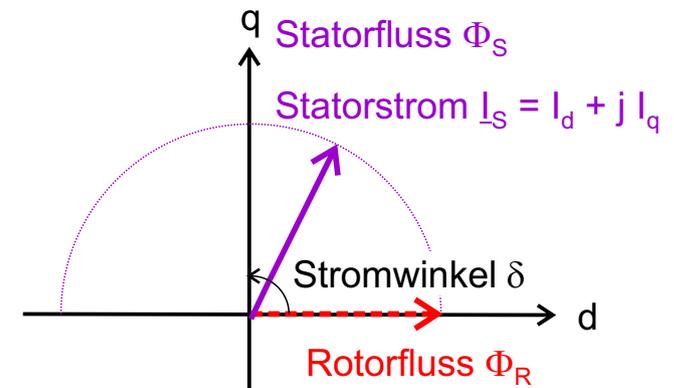
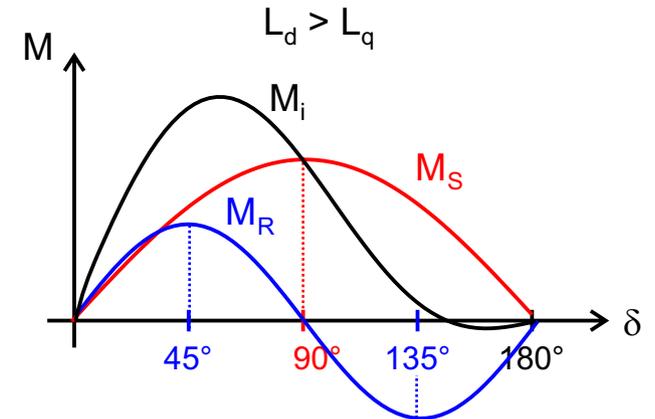
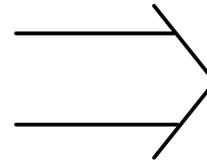
## 7.7 Baustellen

### Maschinen mit Reluktanzmoment und elektrischer Erregung

$$M_i = \underbrace{\frac{3p}{4\pi} \cdot k_{EMK} \cdot I_q}_{\text{Synchronmoment } M_S} + \underbrace{\frac{3p}{2} \cdot (L_d - L_q) \cdot I_q \cdot I_d}_{\text{Reluktanzmoment } M_R}$$



hier: Schenkelpollläufer  
mit  $L_d > L_q$  (FSM)



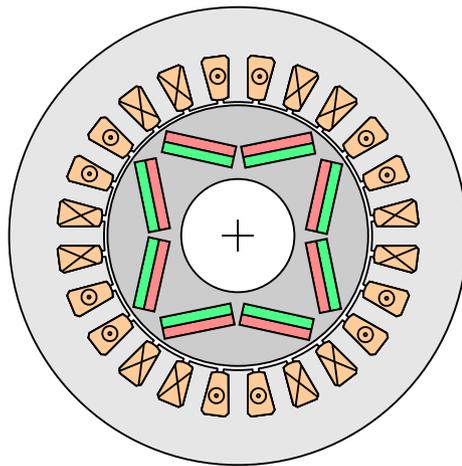
Feld- und Statorstrom so einstellen, dass  
Drehmoment bzw. Wirkungsgrad maximal wird

Nebenbedingungen: Zeigerlänge  $I_S \leq I_{SN}$  und  $I_F \leq I_{FN}$

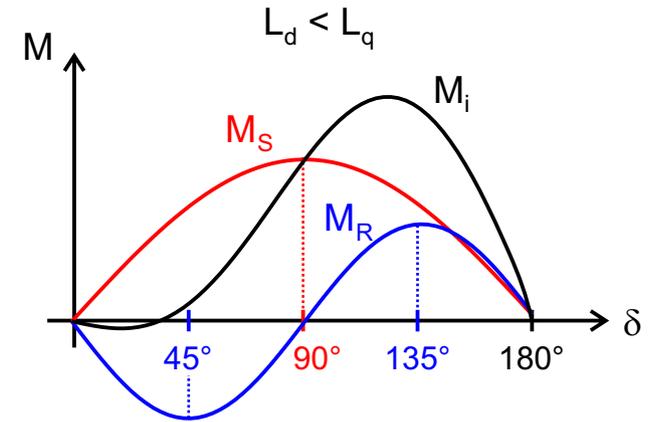
## 7.7 Baustellen

### Maschinen mit Reluktanzmoment

$$M_i = \underbrace{\frac{3p}{4\pi} \cdot k_{EMK} \cdot I_q}_{\text{Synchronmoment } M_S} + \underbrace{\frac{3p}{2} \cdot (L_d - L_q) \cdot I_q \cdot I_d}_{\text{Reluktanzmoment } M_R}$$

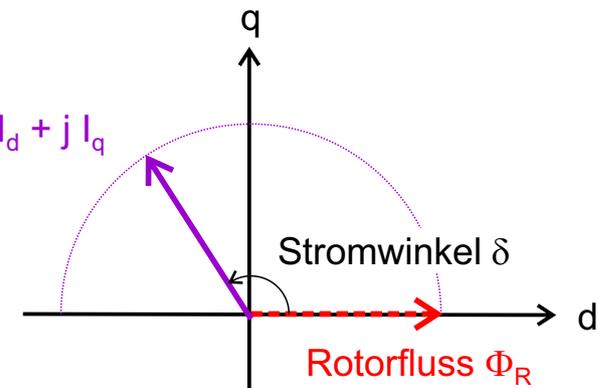


hier: vergrabene Magnete in V-Anordnung  
mit  $L_d < L_q$  (IPMSM)



Statorfluss  $\Phi_S$

Statorstrom  $I_S = I_d + j I_q$

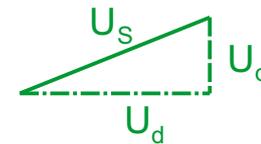
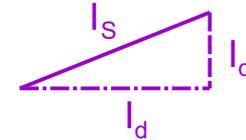


MTPA: Statorstrom so vordrehen, dass  
die Drehmomentausbeute maximal wird  
Nebenbedingung: Zeigerlänge  $I_S \leq I_{SN}$

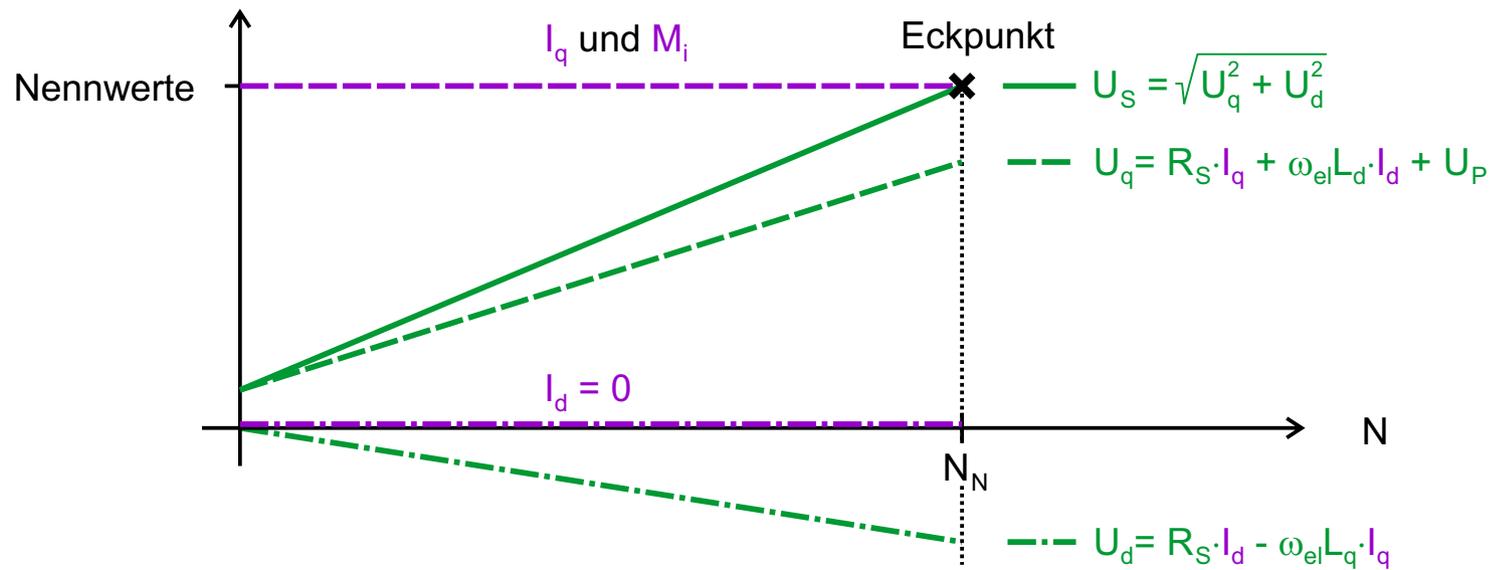
## 7.8 Maschinenparameter

### Grunddrehzahlbereich und Eckpunkt

- Stromgrenze Dauerbetrieb:  $I_S = I_{SN}$
- Spannungsgrenze Eckpunkt:  $U_S = U_{SN}$
- Drehzahlgrenze = Eckpunkt mit  $N = N_N$  und  $M_i = M_N$

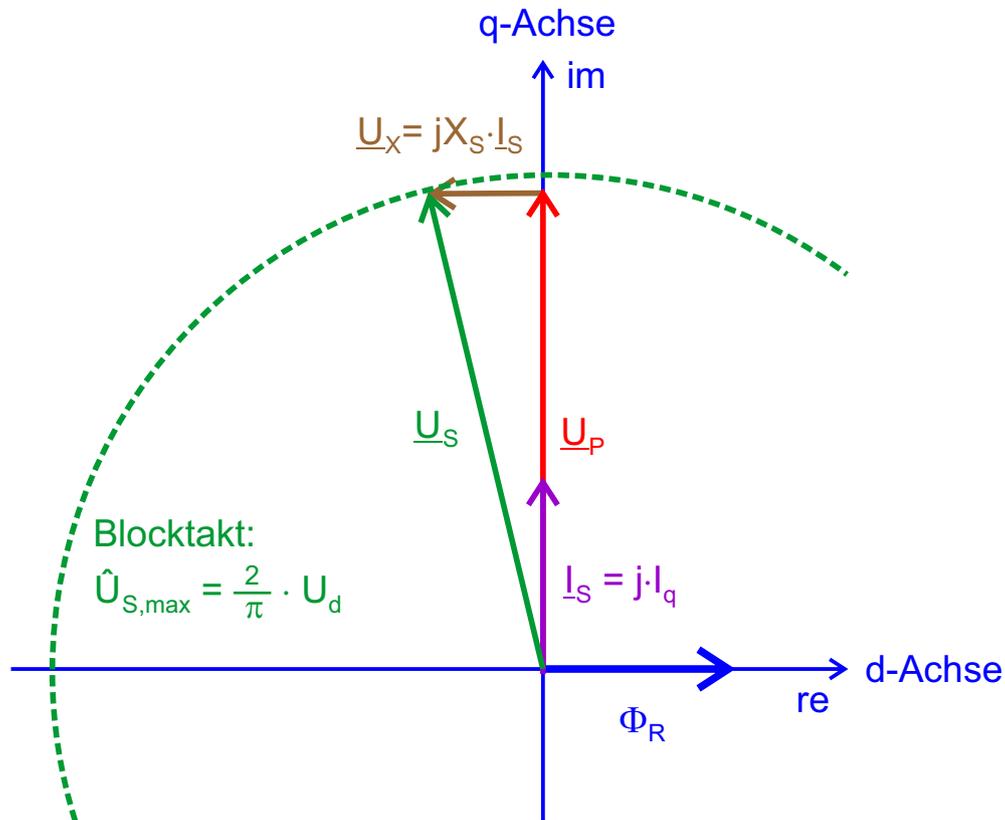


Verhalten bei maximaler Drehmomentvorgabe und  $I_S = j \cdot I_q$



## 7.8 Maschinenparameter

### PMSM im Eckpunkt, nur Synchronmoment – Variante 1



**Kreis:** Spannungsgrenze des Wechselrichters

$$U_S = \sqrt{U_q^2 + U_d^2}$$

**PMSM nicht feldschwächbar** (z.B. Servomotor)

- $L_d$  relativ klein, z.B. SPMSM
- $U_x$  klein,  $U_S \approx U_p$
- geringer Blindleistungsbedarf

**Beispieldaten Maschine für  $U_d = 400V$**

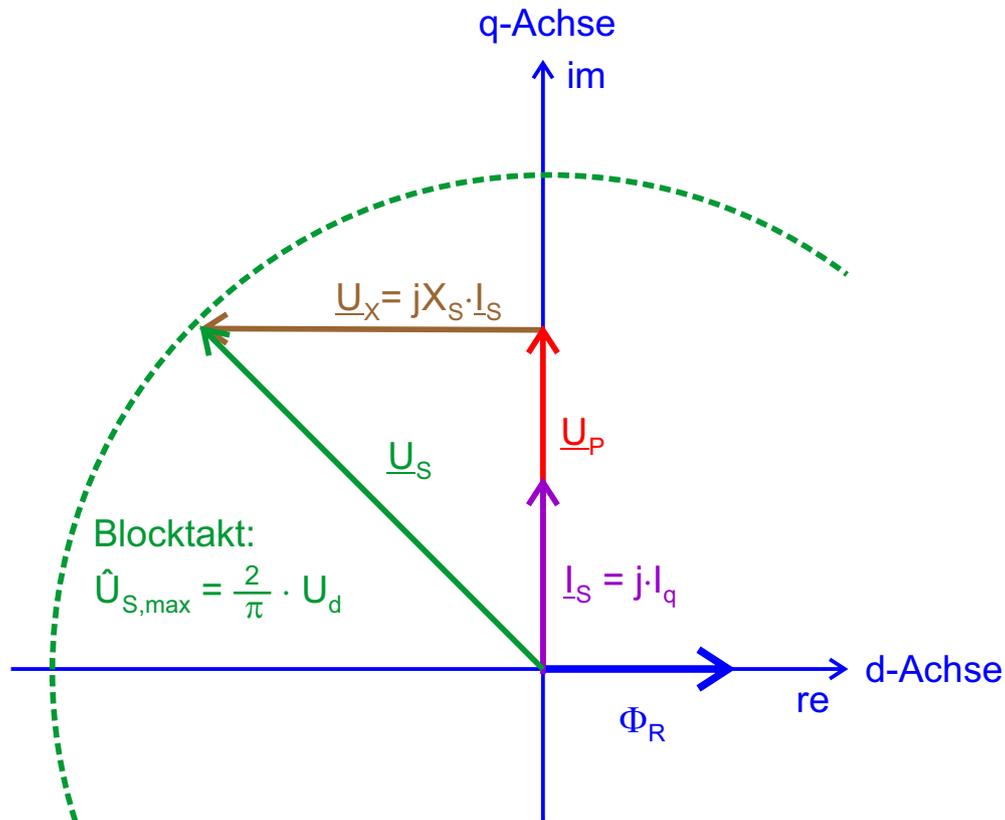
- $P_N = 70kW$ ,  $N_N = 3350Upm$
- $p = 10$ ,  $k_{EMK} = 0.430V/Hz$
- $L_d = 100\mu H$ ,  $R_S = 20m\Omega$
- $M_N = 200Nm$
- $k_M = 1.02Nm/A$  und  $I_{SN} = 195A$  Scheitel
- $U_p = 240V$ ,  $U_R = 4V$  und  $U_x = 68V$

daraus  $U_S = 253V$  Scheitel

$S_N = 74kVA$  und  $\cos \varphi_N = 0.95$

## 7.8 Maschinenparameter

### PMSM im Eckpunkt, nur Synchronmoment – Variante 2



**Kreis:** Spannungsgrenze des Wechselrichters

$$U_S = \sqrt{U_q^2 + U_d^2}$$

**PMSM feldschwächbar** (z.B. Traktionsmotor)

- $L_d$  relativ groß, z.B. IPMSM
- $U_x$  groß, hoher Blindleistungsbedarf
- reduzierter Kurzschlussstrom

**Beispieldaten Maschine für  $U_d = 400V$**

- $P_N = 70kW$ ,  $N_N = 3350Upm$
- $p = 10$ ,  $k_{EMK} = 0.316V/Hz$
- $L_d = 190\mu H$ ,  $R_S = 20m\Omega$
- $M_N = 200Nm$
- $k_M = 0.75Nm/A$  und  $I_{SN} = 265A$  Scheitel
- $U_p = 176V$ ,  $U_R = 5V$  und  $U_x = 177V$

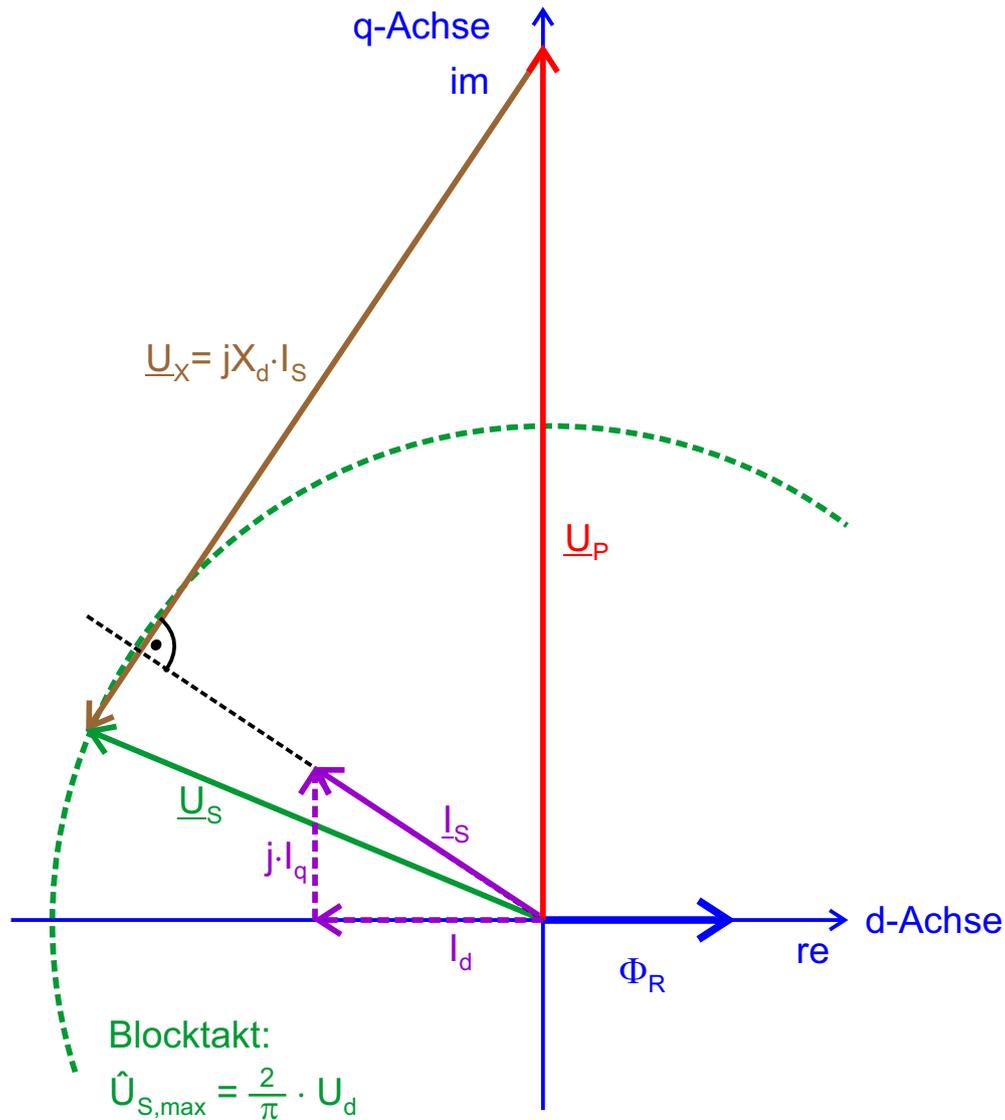
daraus  $U_S = 253V$  Scheitel

$S_N = 100kVA$  und  $\cos \varphi_N = 0.70$



## 8.5 Feldschwächbereich

### Grundsätzliche Idee



### Limitierung:

- $\underline{U}_S$  betragsmäßig an der Stellgrenze, verbleibende Stellmöglichkeit = Spannungszeiger vordrehen

### Strategie:

- Stromkomponente  $I_d < 0$  einprägen
- der Spannungsfall  $\underline{U}_X$  wird dazu genutzt, um  $\underline{U}_S$  im Stellbereich zu halten
- $I_d$  ist dem Rotorfluss  $\Phi_R$  entgegengesetzt, d.h. er schwächt das Rotorfeld im Statoreisenkreis

### Randbedingung:

- $I_d$  nähert sich mit zunehmender Drehzahl dem Kurzschlussstrom  $I_K$  an
- ⇒ Maschine auf kleines  $I_K$  hin auslegen  
 ⇒ Preis dafür: höherer Blindleistungsbedarf  
 = größerer Wechselrichter

## 8.5 Feldschwächbereich

### Strombedarf einer Standard-PMSM mit $I_K \gg I_{SN}$

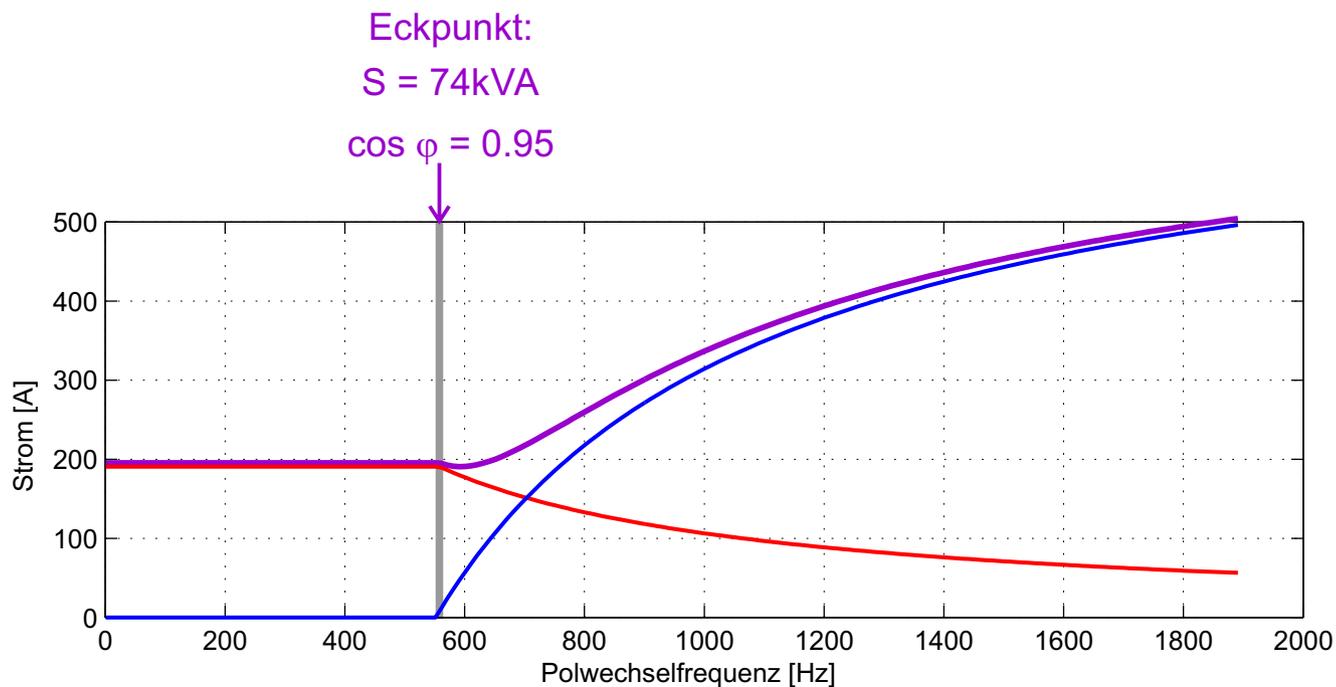
Auslegungsdaten:

$$p = 10, U_{SN} = 253V_{\text{Scheitel}}, I_{SN} = 195\hat{A}, I_K = 685\hat{A}$$

$$M_N = 200\text{Nm}, P_N = 70\text{kW}, k = 1.02 \text{ Nm}/\hat{A}$$

Variante 1

Kap. 7.8



Legende:

—  $I_s$ : Strangstrom (Betrag)

—  $I_q$ : Drehmoment

—  $-I_d$ : Feldschwächung

$$I_s = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}$$

- Fazit:**
- Betrieb nur bis zum Eckpunkt sinnvoll
  - sonst: Auslegung auf über 500 $\hat{A}$  Nennstrom!

## 8.5 Feldschwächbereich

Strombedarf bei spezieller Auslegung mit  $I_K = I_{SN}$

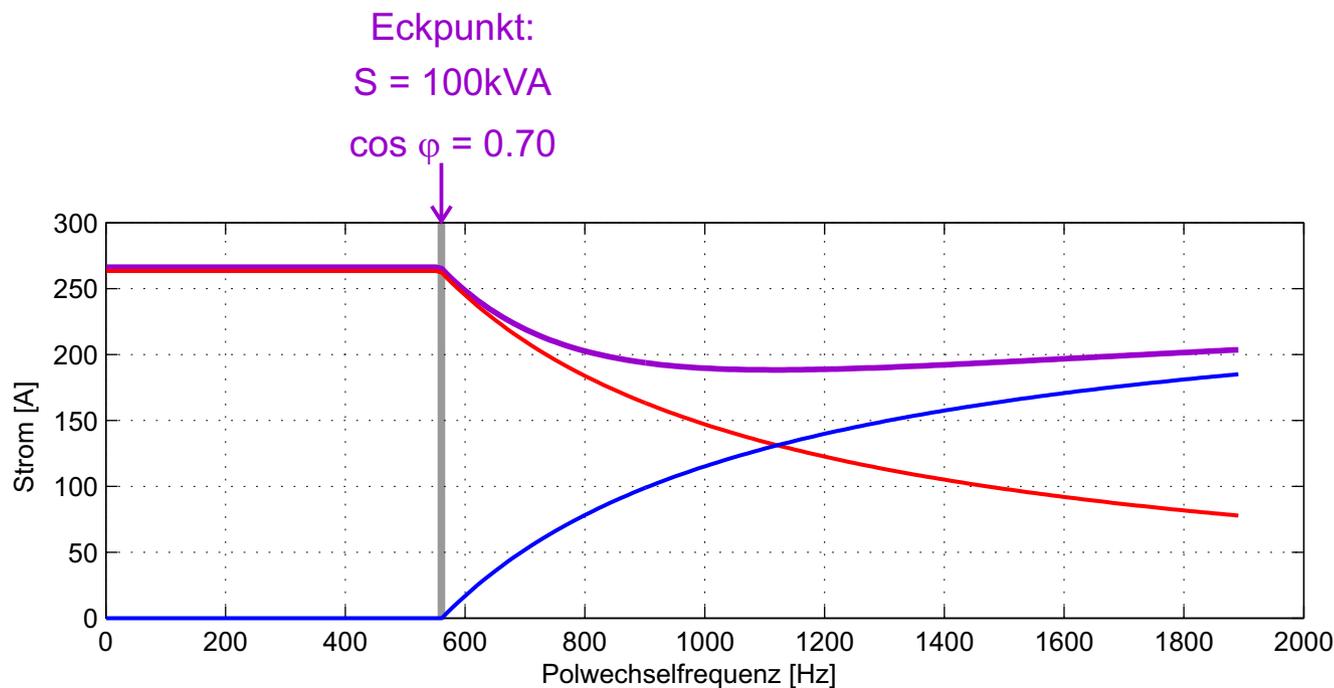
Auslegungsdaten:

$$p = 10, U_{SN} = 253V_{\text{Scheitel}}, I_{SN} = 265\hat{A}, I_K = 265\hat{A}$$

$$M_N = 200Nm, P_N = 70kW, k = 0.75 \text{ Nm}/\hat{A}$$

Variante 2

Kap. 7.8



Legende:

—  $I_s$ : Strangstrom (Betrag)

—  $I_q$ : Drehmoment

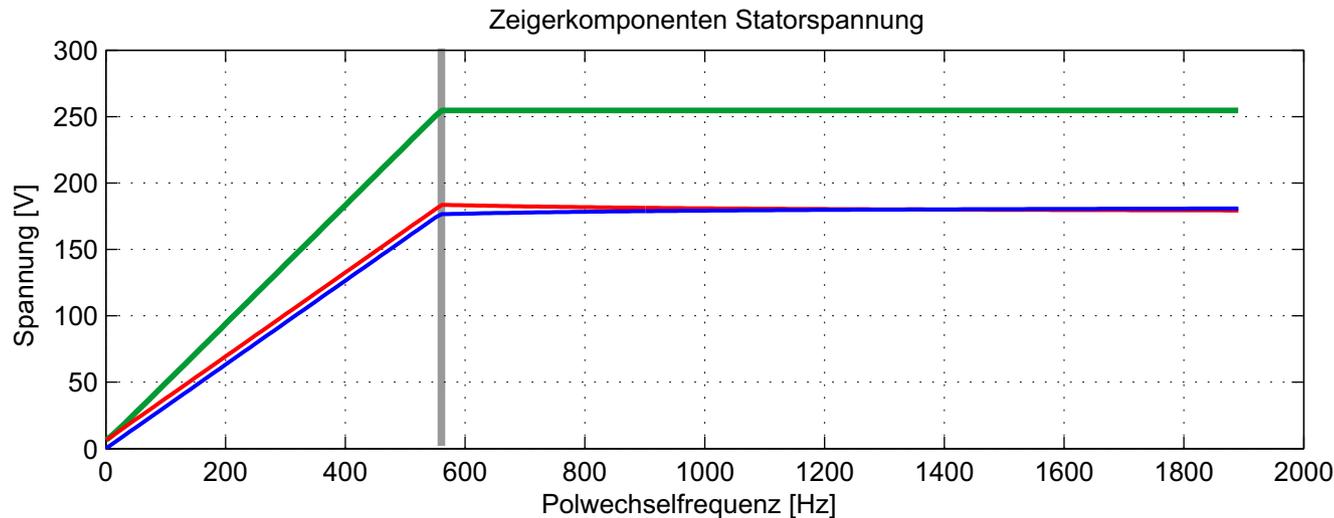
—  $-I_d$ : Feldschwächung

$$I_s = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}$$

- Fazit:**
- Feldschwächung unbegrenzt möglich, Drehzahllimit mechanisch bedingt
  - Kurzschlussbetrieb als Fail-Save mit Nennstrom möglich

## 8.5 Feldschwächbereich

Weitere Daten zum Beispiel  $I_k = I_{SN}$

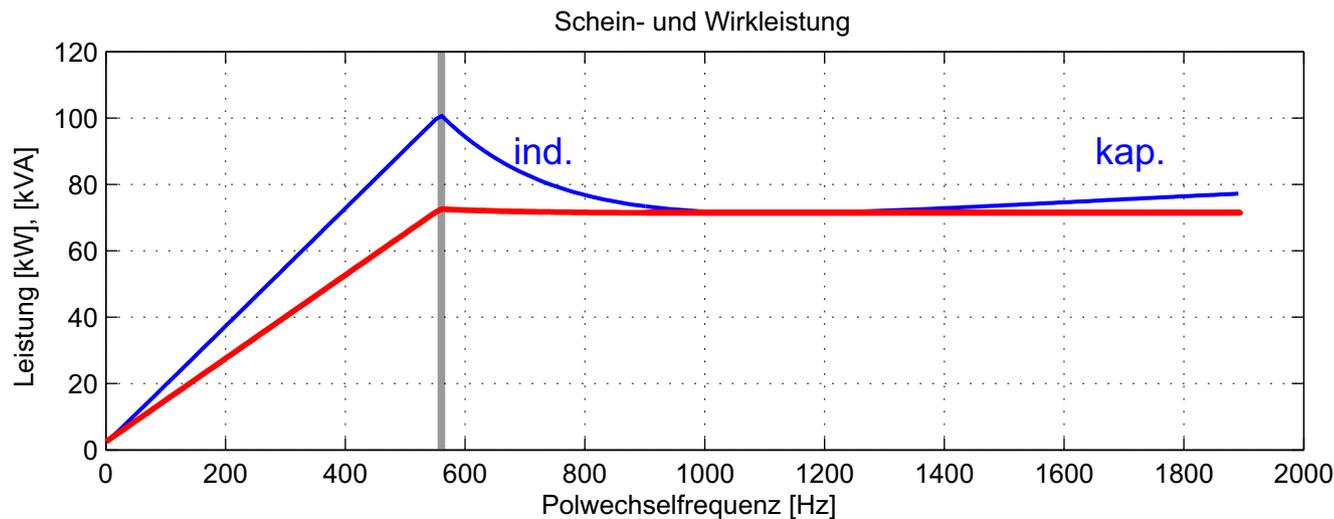


Legende:

—  $U_s$ : Strangspannung (Betrag)

—  $U_q$ : q-Komponente

—  $-U_d$ : d-Komponente



Legende:

— Scheinleistung

— Wirkleistung

ind: untererregt, WR liefert  $Q_x$

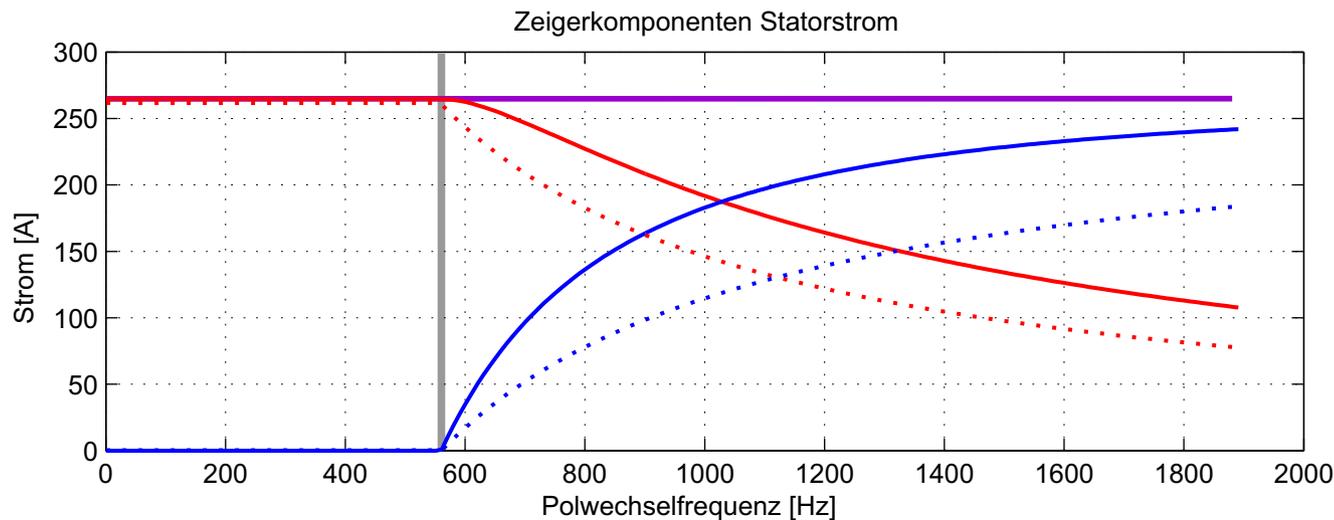
kap: übererregt,  $\frac{3}{2} U_p \cdot \hat{I}_d$  liefert  $Q_x$

$$Q_x = \frac{3}{2} X_d \cdot \hat{I}_s^2$$

## 8.5 Feldschwächbereich

### Steuerstrategie für maximale Leistung (Maschine $I_k = I_{SN}$ )

- Maschine soll voll ausgenutzt werden, so dass bei Vollast immer der Nennstrom fließt  
⇒  $I_q$  und  $I_d$  werden so eingestellt, dass die Maschine maximales Drehmoment erzeugt  
⇒ damit kann oberhalb des Eckpunktes deutlich mehr Leistung als bei klassischem Feldschwächbetrieb umgesetzt werden.



Legende:

—  $I_s$ : Strangstrom (Betrag)

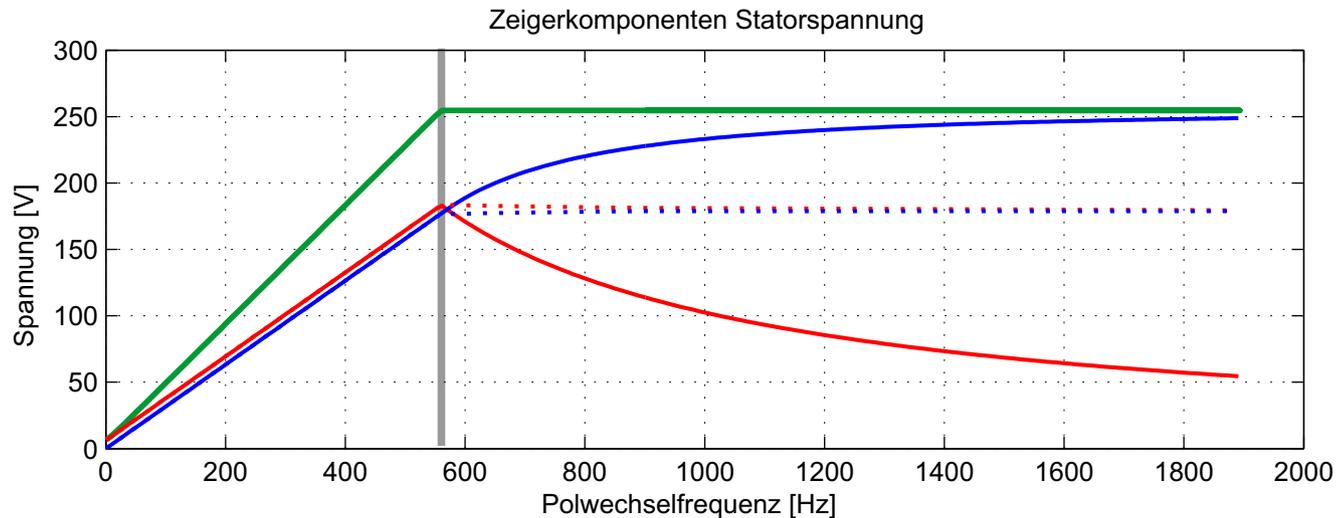
—  $I_q$ : Drehmoment

—  $-I_d$ : Feldschwächung

$$I_s = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}$$

## 8.5 Feldschwächbereich

Steuerstrategie für maximale Leistung (Maschine  $I_k = I_{SN}$ )

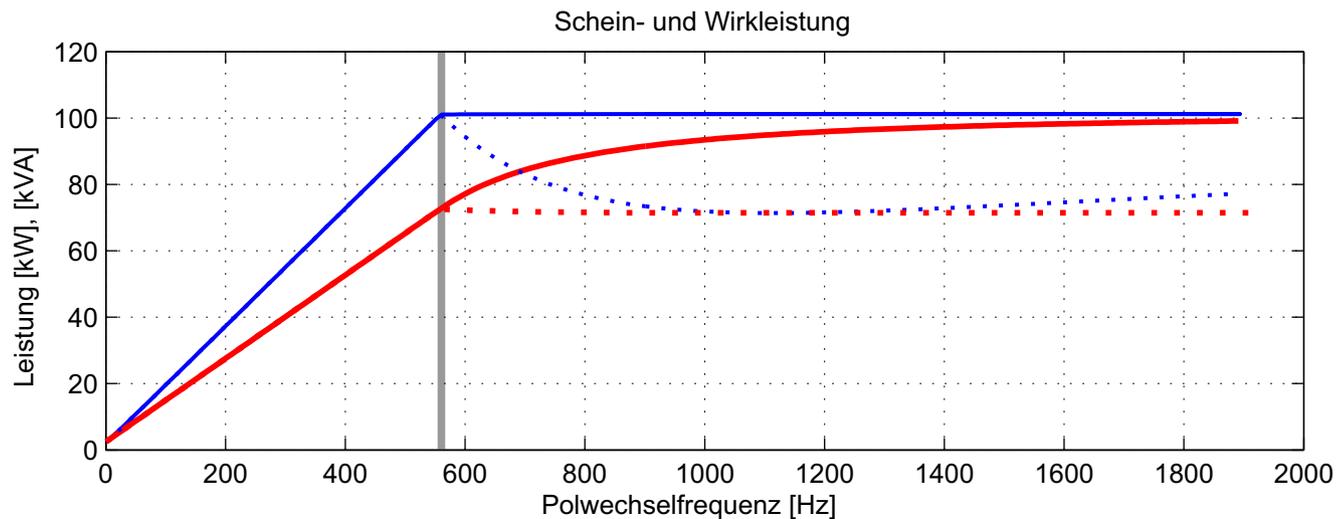


Legende:

—  $U_s$ : Strangspannung (Betrag)

—  $U_q$ : q-Komponente

—  $-U_d$ : d-Komponente



— Scheinleistung

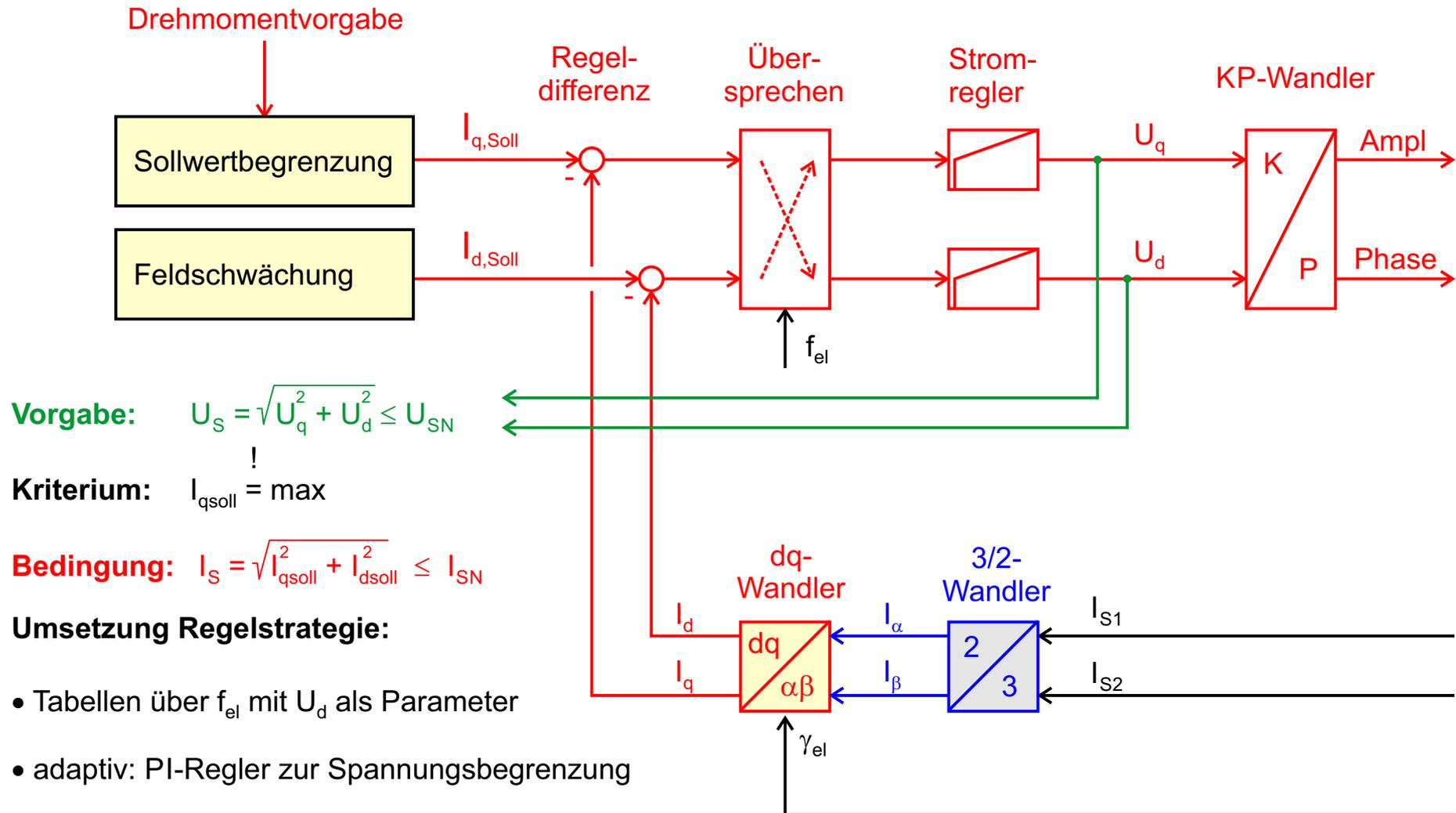
— Wirkleistung

**Ergebnis:**

Im FB ist Betrieb bei  
Nennscheinleistung  
mit  $\cos \varphi \rightarrow 1$  möglich!

## 8.5 Feldschwächbereich

### Erweiterte Reglerstruktur

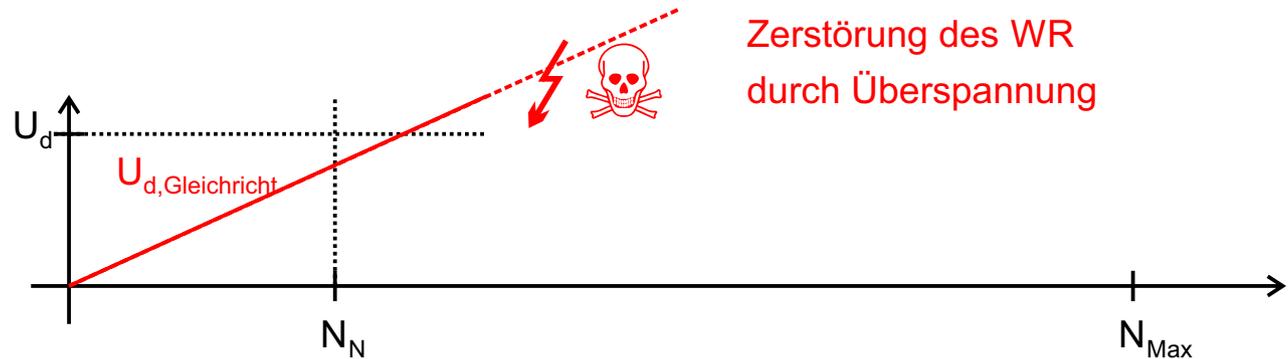


## 8.5 Feldschwächbereich

### Fail-Save-Strategie bei abgeschaltetem Wechselrichter / Fehlerzustand

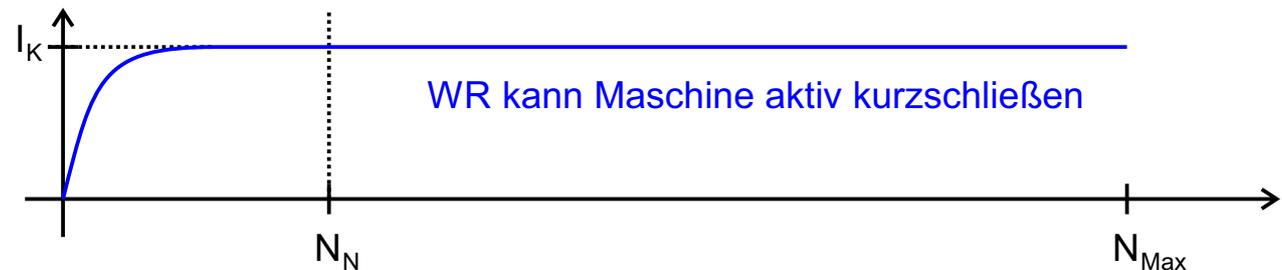
#### Klemmen offen

Freilaufdioden des WR  
= Gleichrichter



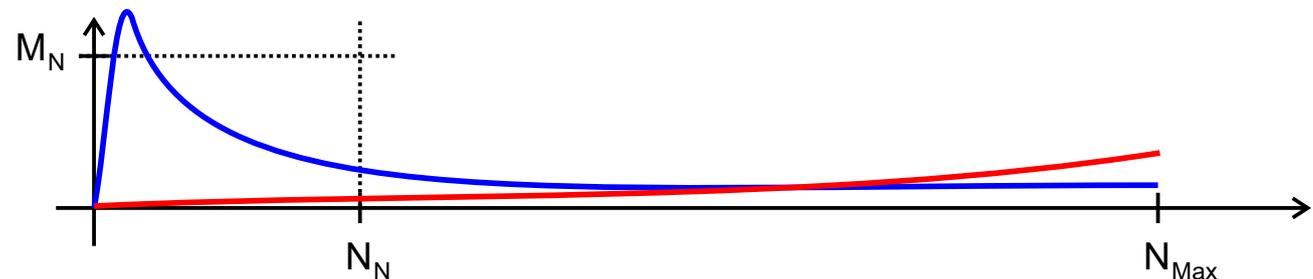
#### Klemmen kurzgeschlossen

Strangstrom der Maschine



#### Schleppmoment bei Kurzschluss

Schleppmoment Klemmen offen



#### Strategie

