

Elektrische Antriebe

Kapitel 12: Modellbildung und feldorientierte Regelung ASM

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

Kapitel 4: Drehfeldwicklung und Raumzeigertransformation

5: Aufbau und Betriebsverhalten der Synchronmaschine

6: Modellbildung und Kriterien für die Regelung der PMSM

7: Vektorregelung PMSM

8: Modulationsverfahren und Feldschwächbetrieb

Kapitel 9: Leistungselektronische Stellglieder

10: Traktionsantriebe für Elektrostraßenfahrzeuge

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

12: Modellbildung und feldorientierte Regelung der ASM

13: Auslegung von elektrischen Maschinen

Elektrische Antriebe

Inhalt Kapitel 12: Modellbildung und Grundzüge der feldorientierten Regelung der ASM

12.1 Modellbildung

12.2 Systemgleichungen im $\alpha\beta$ -System

12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

12.4 Drehzahlregelung mit U/f-Kennlinie

12.5 Systemgleichungen im dq-System

12.6 Feldorientierte Stromregelung "FOR"

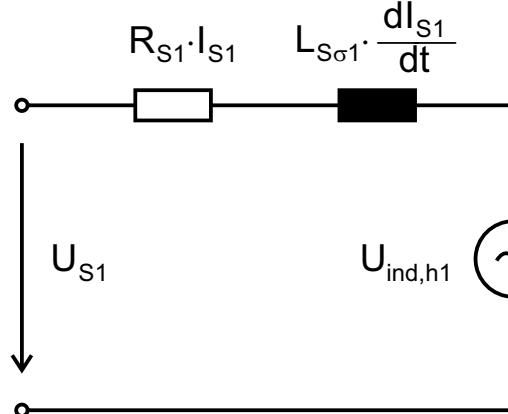
12.7 Anmerkungen zur Drehmomentberechnung

12.8 Kennfeld und Betriebsführung eines Traktionsmotors

12.1 Modellbildung

Spannungsgleichungen im uvw-System

Ersatzschaltbild Stator,
hier nur für Phase 1



Stator-system

$$M_{S11} \cdot \frac{dI_{S1}}{dt}$$
$$M_{S21} \cdot \frac{dI_{S2}}{dt}$$
$$M_{S31} \cdot \frac{dI_{S3}}{dt}$$

Rotor-system

$$M_{RS11} \cdot \frac{dI_{R1}}{dt}$$
$$M_{RS21} \cdot \frac{dI_{R2}}{dt}$$
$$M_{RS31} \cdot \frac{dI_{R3}}{dt}$$

vgl. einphasiges
Ersatzschaltbild:

Hauptinduktivität und
Magnetisierungsstrom
(Luftspaltfeld)

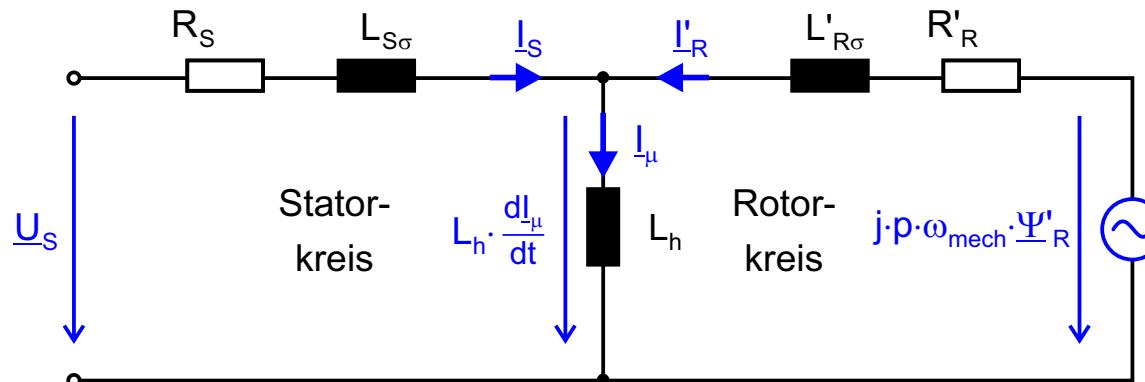
⇒ $\alpha\beta$ -System verwenden,
um Koppelterme zu
eliminieren!

Unterschied zur PMSM: jetzt gibt es auch auf der
Rotorseite 3 Ströme, die über das Luftspaltfeld
mit dem Statorsystem gekoppelt sind

12.2 Systemgleichungen im $\alpha\beta$ -System

Raumzeigerersatzschaltbild \Rightarrow Spannungsgleichungen im $\alpha\beta$ -System

Raumzeiger beschreiben den stationären und dynamischen Zustand eines Drehstromsystems. Transformation siehe Abschnitt 4.5. Vorgehensweise bei der SM war identisch, siehe Abschnitt 6.3 Seite 15.



Rotorfluss:

$$\Psi'_{\text{R}} = L'_{\text{R}\sigma} \cdot I'_{\text{R}} + L_{\text{h}} \cdot I_{\mu}$$

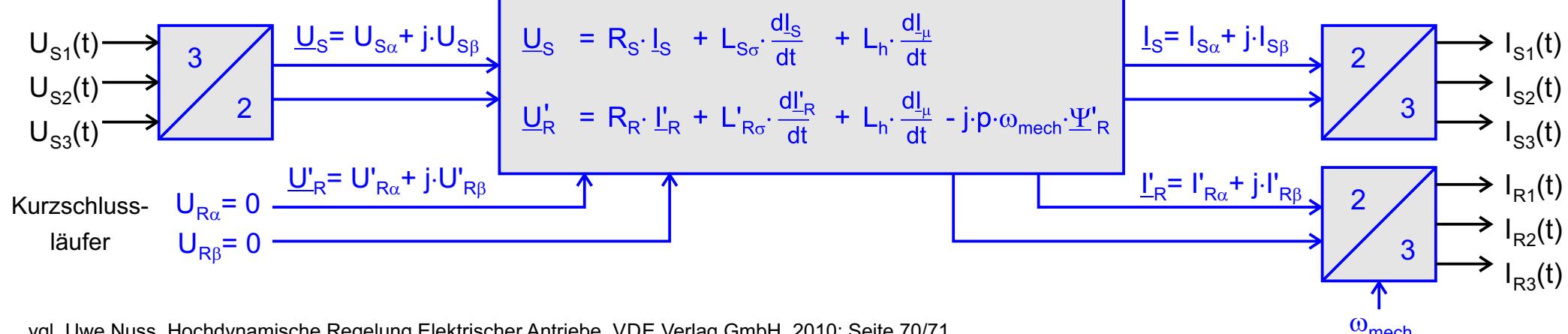
Magnetisierungsstrom:

$$I_{\mu} = I_S + I'_R$$

Transformation
in das $\alpha\beta$ -System

Komplexe Schreibweise für Stator und Rotor
(Komponentenschreibweise: 4 Gleichungen)

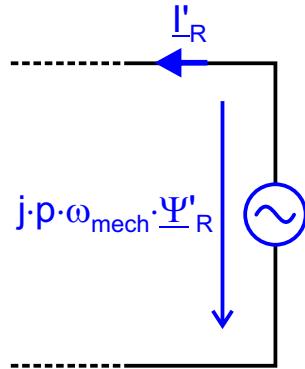
Rücktransformation
in das 3-Phasensystem



vgl. Uwe Nuss, Hochdynamische Regelung Elektrischer Antriebe, VDE Verlag GmbH, 2010; Seite 70/71

12.2 Systemgleichungen im $\alpha\beta$ -System

Herleitung einer Beziehung für das Drehmoment



Rotorkreis-Querzweig aus dem Raumzeiger-ESB:

Spannungsquelle Bewegungsinduktion \Rightarrow elektromechanische Energiewandlung

Wirkleistungsberechnung mit Raumzeigern, allgemein: $P = \frac{3}{2} \cdot \operatorname{re} \{ \underline{U} \cdot \underline{I}^* \}$

$$\text{innere Leistung: } P_i = \frac{3}{2} \cdot \operatorname{re} \{ j \cdot p \cdot \omega_{\text{mech}} \cdot \Psi' R \cdot - \underline{I}' R^* \}$$

\underline{I} konjugiert komplex:
Vorzeichenwechsel
für den Imaginärteil

$$\downarrow \\ P = M \cdot \omega_{\text{mech}}$$

$$\text{inneres Drehmoment: } M_i = \frac{3}{2} p \cdot \operatorname{re} \{ j \cdot \Psi' R \cdot - \underline{I}' R^* \} = \frac{3}{2} p \cdot \operatorname{im} \{ \Psi' R \cdot \underline{I}' R^* \}$$

$$\downarrow \\ \underline{I}_\mu = \underline{I}_S + \underline{I}' R \text{ und } \Psi' R = L'_{R\sigma} \cdot \underline{I}' R + L_h \cdot \underline{I}_\mu \Rightarrow \underline{I}' R = \frac{1}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \Psi' R - \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \underline{I}_S$$

$$\text{mit } \underline{I}_S \text{ anstelle } \underline{I}' R: \quad M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \operatorname{im} \{ -\Psi' R \cdot \underline{I}_S^* \} = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot (\Psi'_{R\alpha} \cdot I_{S\beta} - \Psi'_{R\beta} \cdot I_{S\alpha})$$

$$\uparrow \\ \Psi' R = \Psi'_{R\alpha} + j \cdot \Psi'_{R\beta} \text{ und } \underline{I}_S^* = I_{S\alpha} - j \cdot I_{S\beta}$$

vgl. Uwe Nuss, Hochdynamische Regelung Elektrischer Antriebe, VDE Verlag GmbH, 2010; Seite 73 und 76/77

12.2 Systemgleichungen im $\alpha\beta$ -System

Fazit für das Drehmoment

Inneres Drehmoment:

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot (\Psi'_{R\alpha} \cdot I_{S\beta} - \Psi'_{R\beta} \cdot I_{S\alpha})$$

$$I_s = I_{S\alpha} + j \cdot I_{S\beta}$$

$$\Psi'_R = \Psi'_{R\alpha} + j \cdot \Psi'_{R\beta}$$

Statorfrequenz:

ω_s wird eingeprägt

Bewegungsgleichung:

$$M_i = M_L + M_S + J_{Ges} \cdot \dot{\omega}_{mech}(t)$$

Rotorfrequenz:

$$\omega_R = \omega_s - p \cdot \omega_{mech}$$

Fazit:

- Mit den 2 komplexen Spannungsgleichungen ergeben sich 4 Zustandsdifferentialgleichungen für Stator- und Rotorstrom
- Zustandsvariablen sind $I_s = I_{S\alpha} + j \cdot I_{S\beta}$ und $I'_R = I'_{R\alpha} + j \cdot I'_{R\beta}$
- Hilfsvariablen: $I_\mu = I_{\mu\alpha} + j \cdot I_{\mu\beta}$ und $\Psi'_R = \Psi'_{R\alpha} + j \cdot \Psi'_{R\beta} = L'_{R\sigma} \cdot I'_R + L_h \cdot I_\mu$
- Rotorfluss und Magnetisierungsstrom sind aus den Zustandsvariablen abgeleitete Hilfsvariablen

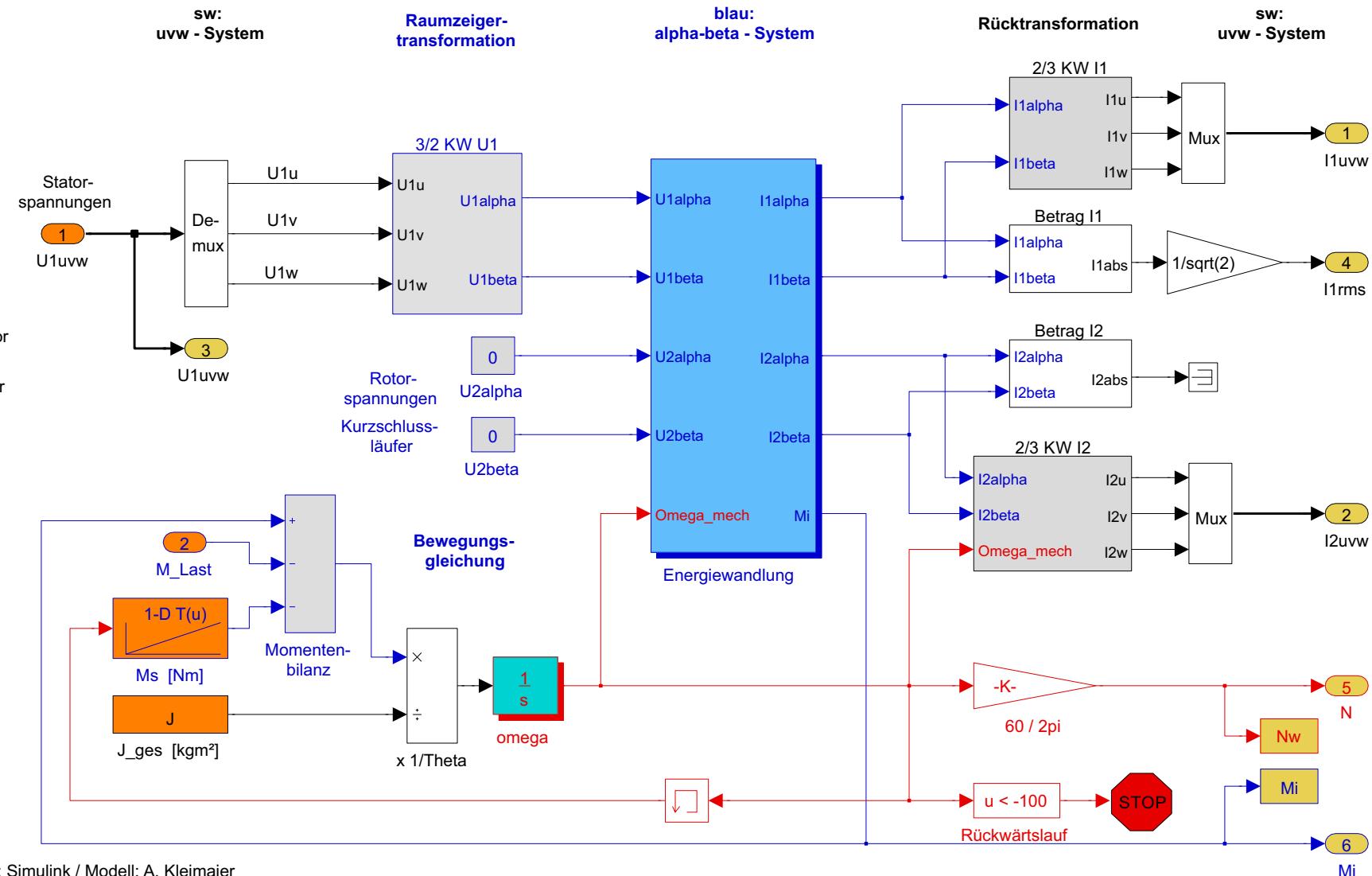
- Zusammen mit der Beziehung für das Innere Moment und einer Bewegungsgleichung ist das System vollständig beschrieben



Hinweis: Häufig werden Stator- und Rotorfluss als Zustandsvariablen benutzt. Die Systembeschreibung wird dadurch eleganter, ggf. aber schwerer lesbar. Beispiel dazu siehe Dierk Schröder, Grundlagen Elektrische Antriebe, Springer

12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

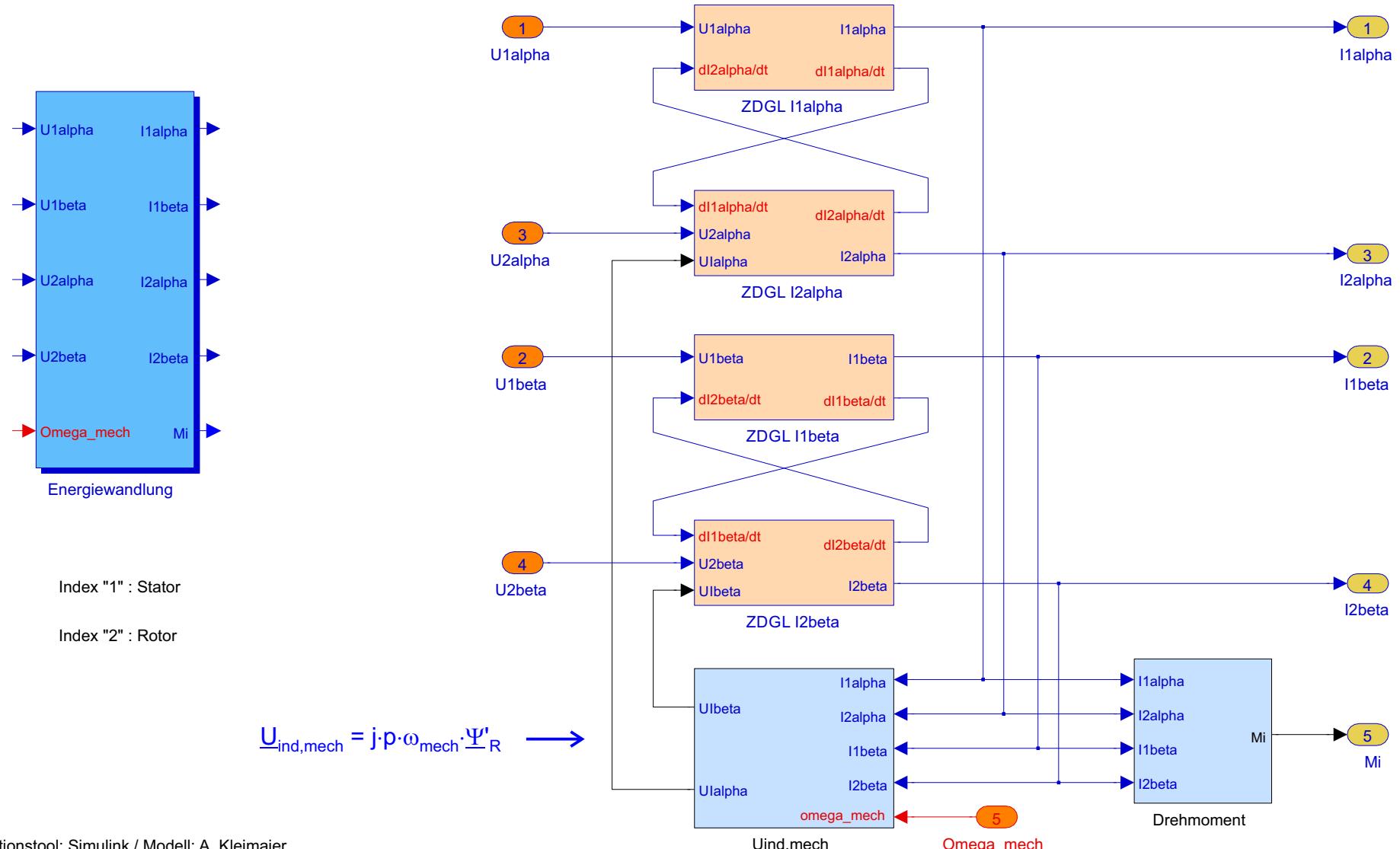
Umsetzung als Simulinkmodell (siehe Praktikumsversuch)



Simulationstool: Simulink / Modell: A. Kleimaier

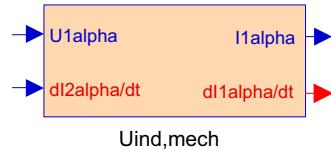
12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

Simulinkmodell – Subsystem "Elektrischer Teil"

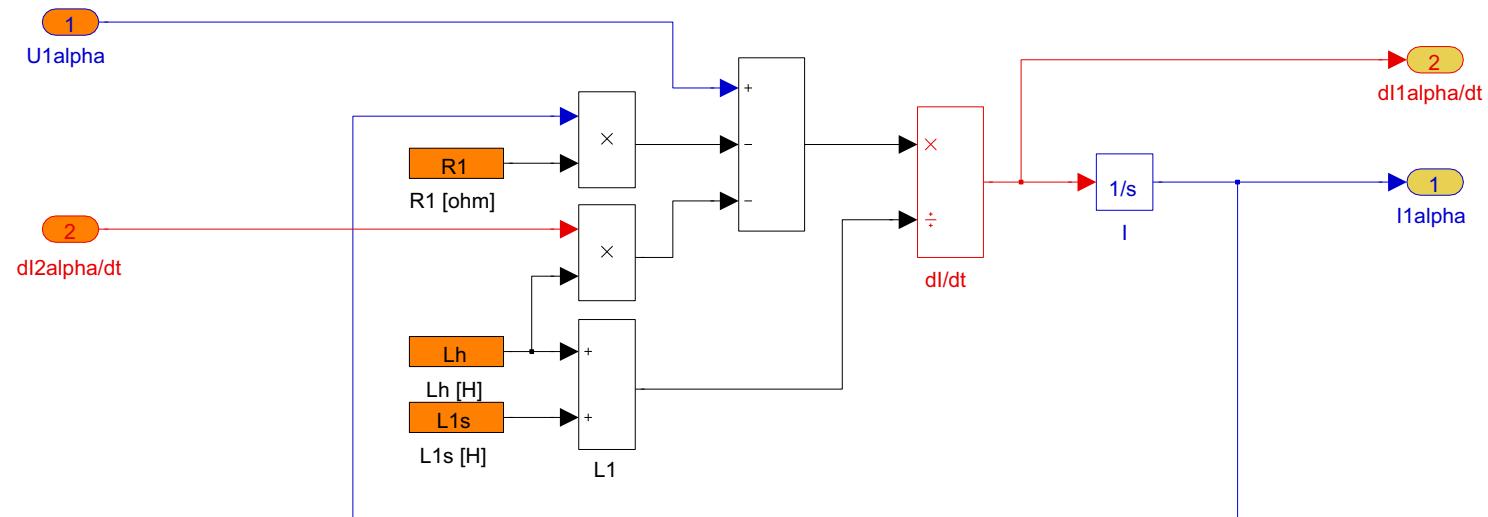


12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

Simulinkmodell – Subsystem "Elektrischer Teil" – Subsysteme ...

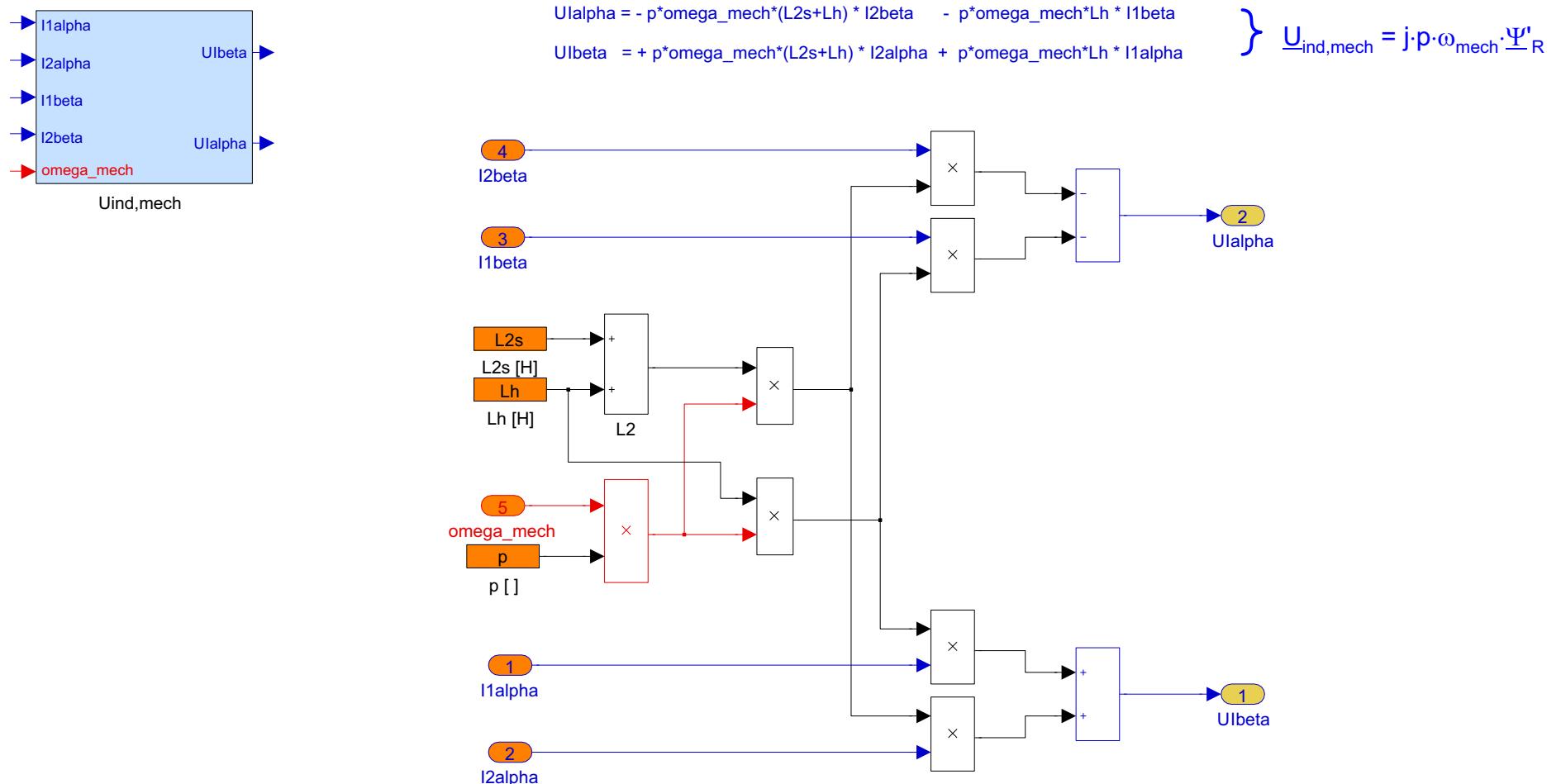


$$dI1alpha/dt = 1/(L1s+Lh) * (U1alpha - R1 * I1alpha - Lh * dI2alpha/dt)$$



12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

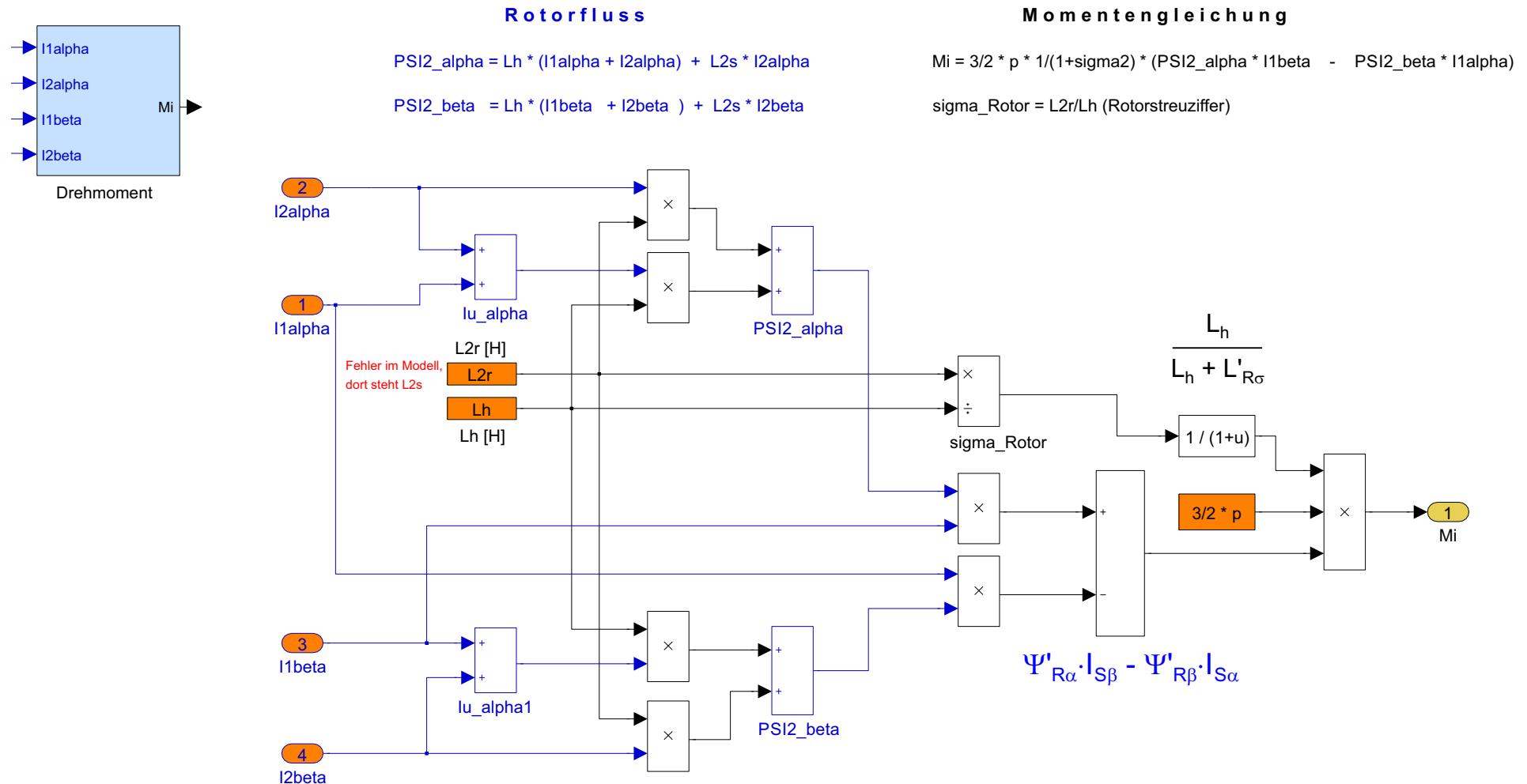
Simulinkmodell – Subsystem "Elektrischer Teil" – Subsysteme ...



Simulationstool: Simulink / Modell: A. Kleimaier

12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

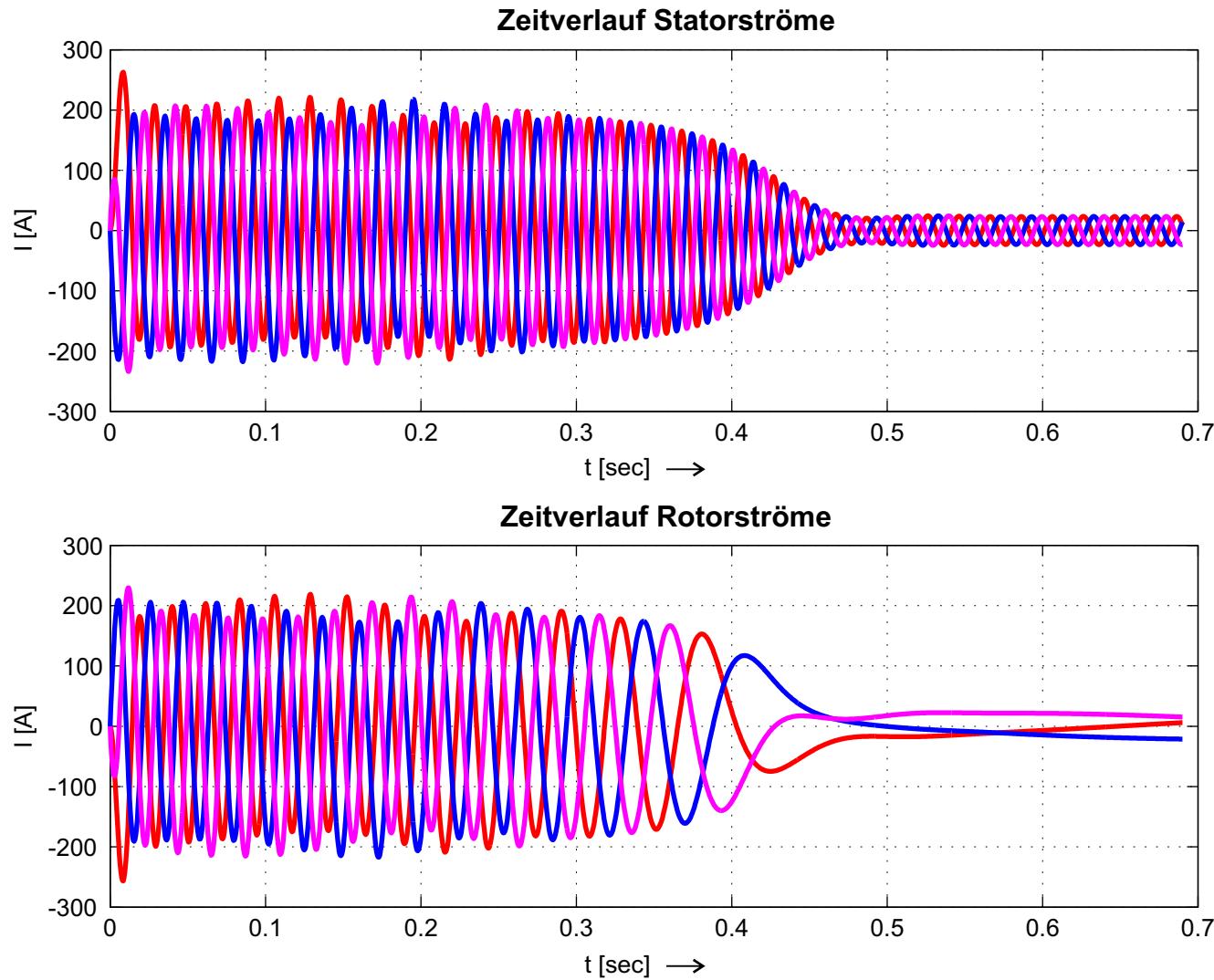
Simulinkmodell – Subsystem "Elektrischer Teil" – Subsysteme ...



Simulationstool: Simulink / Modell: A. Kleimaier

12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

Hochlaufvorgang am starren Netz mit $f_s = 50 \text{ Hz}$



Vorgaben

$$U_s = 230 \text{ V}_{\text{eff}}$$

$$f_s = 50 \text{ Hz}$$

$$M_{\text{Last}} = 65 \text{ Nm}$$

$$J_{\text{ges}} = 0.25 \text{ kgm}^2$$

Hochlauf

$$I_{s,\text{Anlauf}} = 140 \text{ A}_{\text{eff}} = 7,8 \cdot I_{sN}$$

Endzustand

$$I_s = I_{sN} = 18 \text{ A}_{\text{eff}}$$

$$S_s = 12,4 \text{ kVA}$$

↔ Plausibilität?

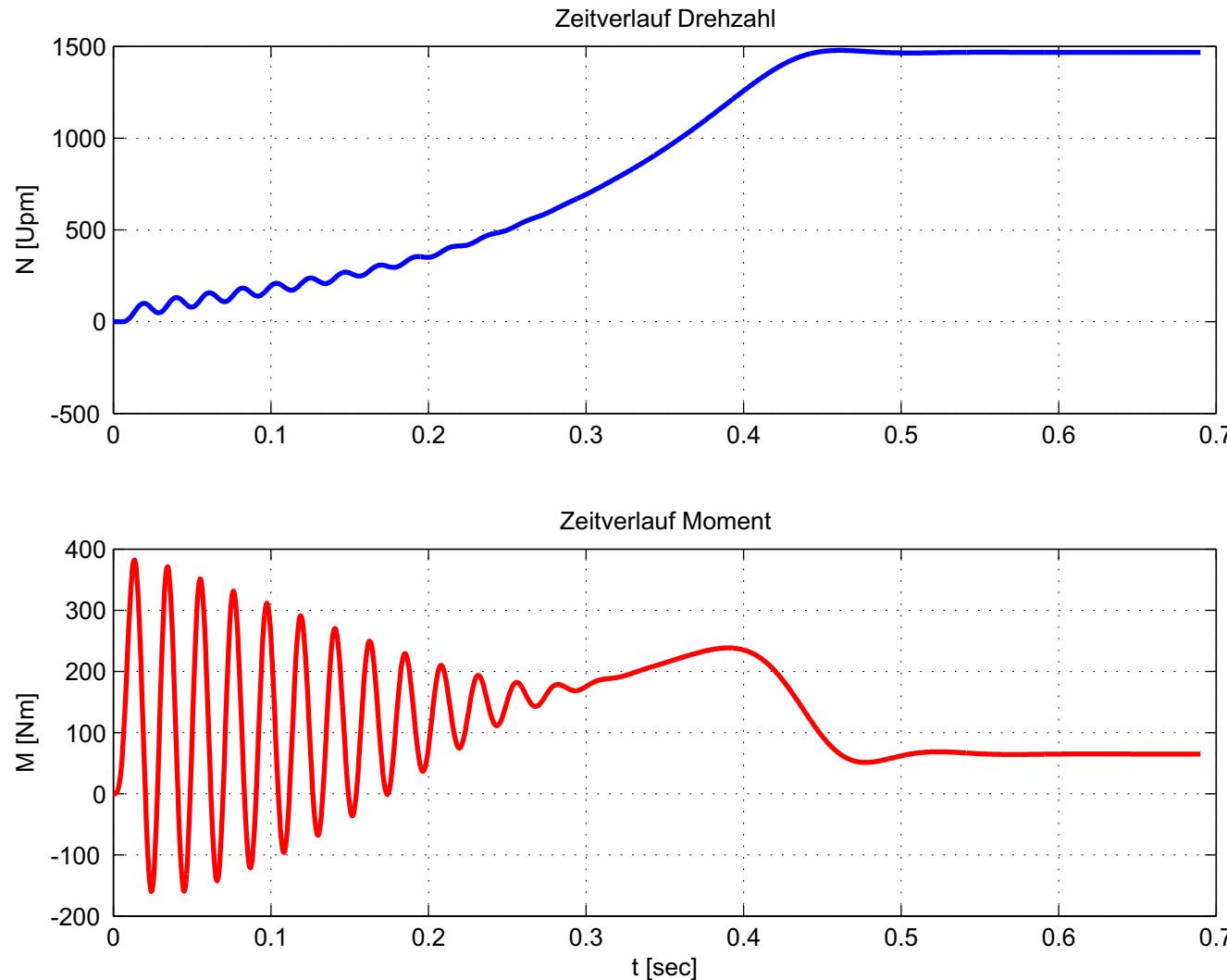
$$P_{\text{mech}} = 10,0 \text{ kW}$$

$$N_{\text{mech}} = 1468 \text{ Upm}$$

$$f_R = 1,07 \text{ Hz}$$

12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

Hochlaufvorgang am starren Netz mit $f_s = 50$ Hz

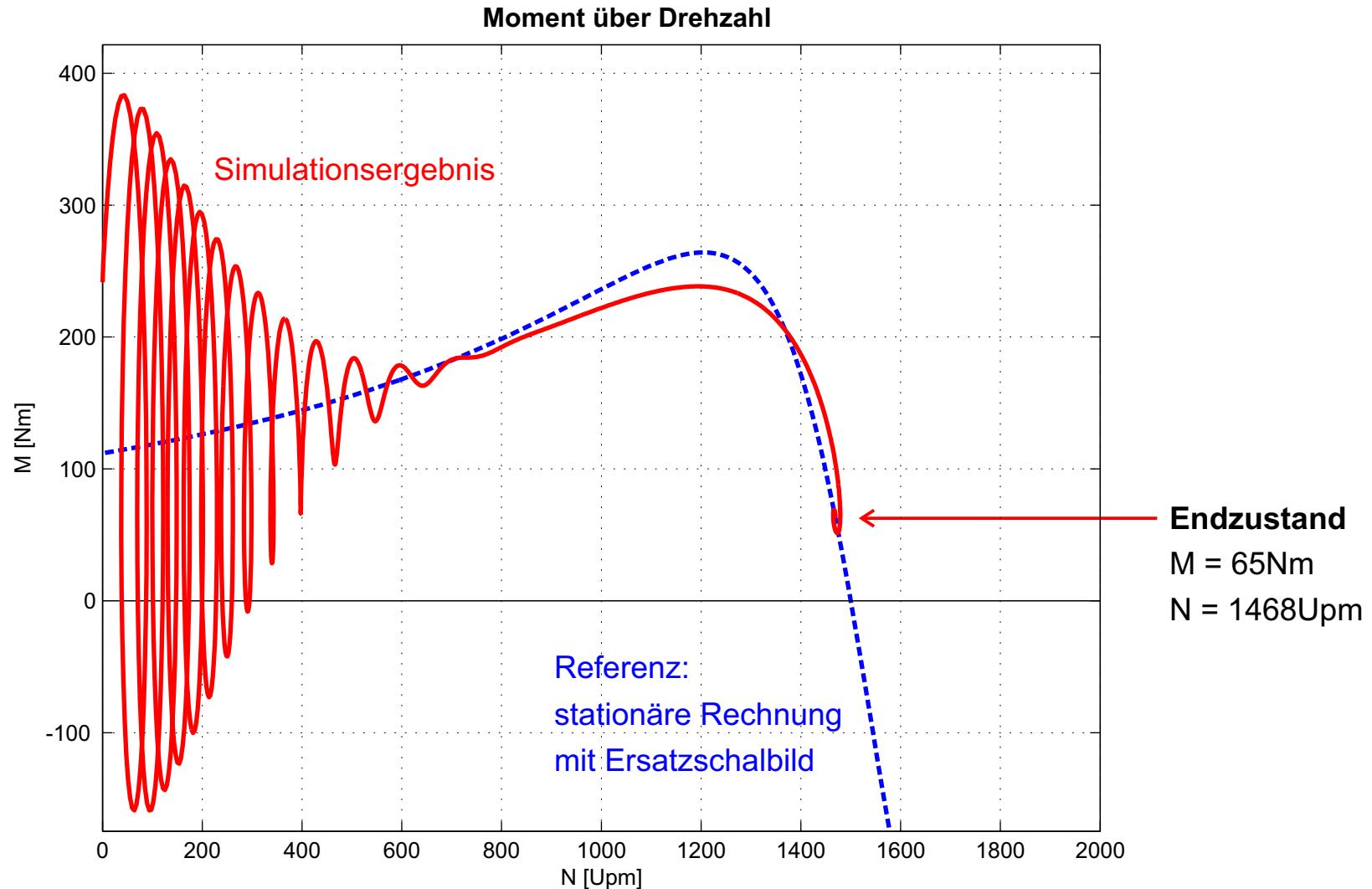


**Anfangswertproblem
beim Einschalten:**

- Gleichanteile in den Strangströmen
- Unsymmetrie verursacht Momentenschwingung
- Drehzahlverlauf: Glättung durch Integrator für ω_{mech}

12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

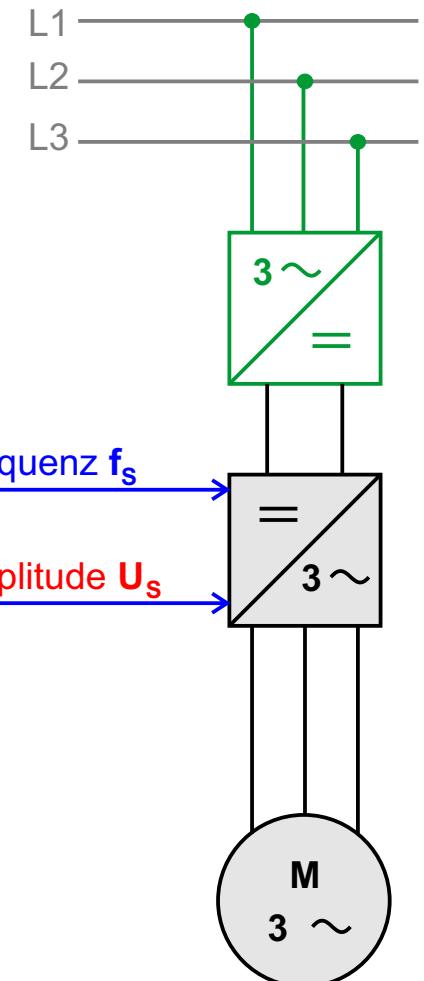
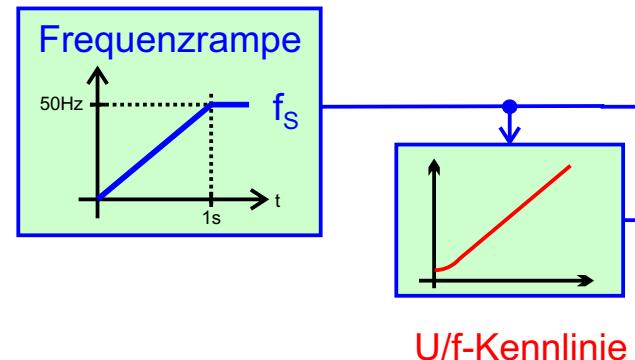
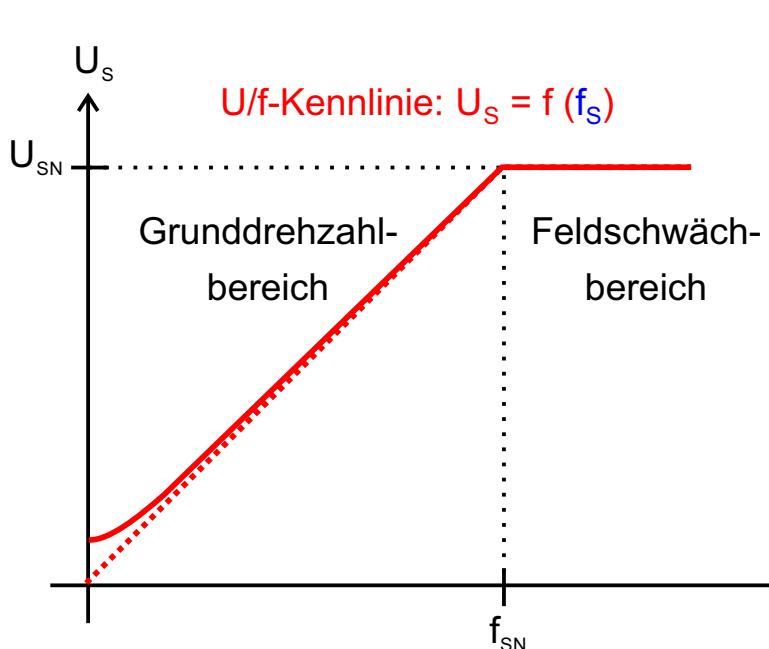
Hochlaufvorgang am starren Netz mit $f_s = 50 \text{ Hz}$



12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

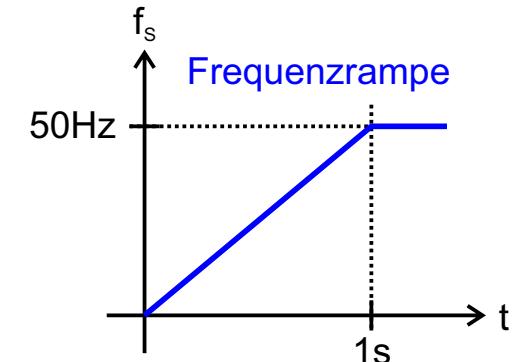
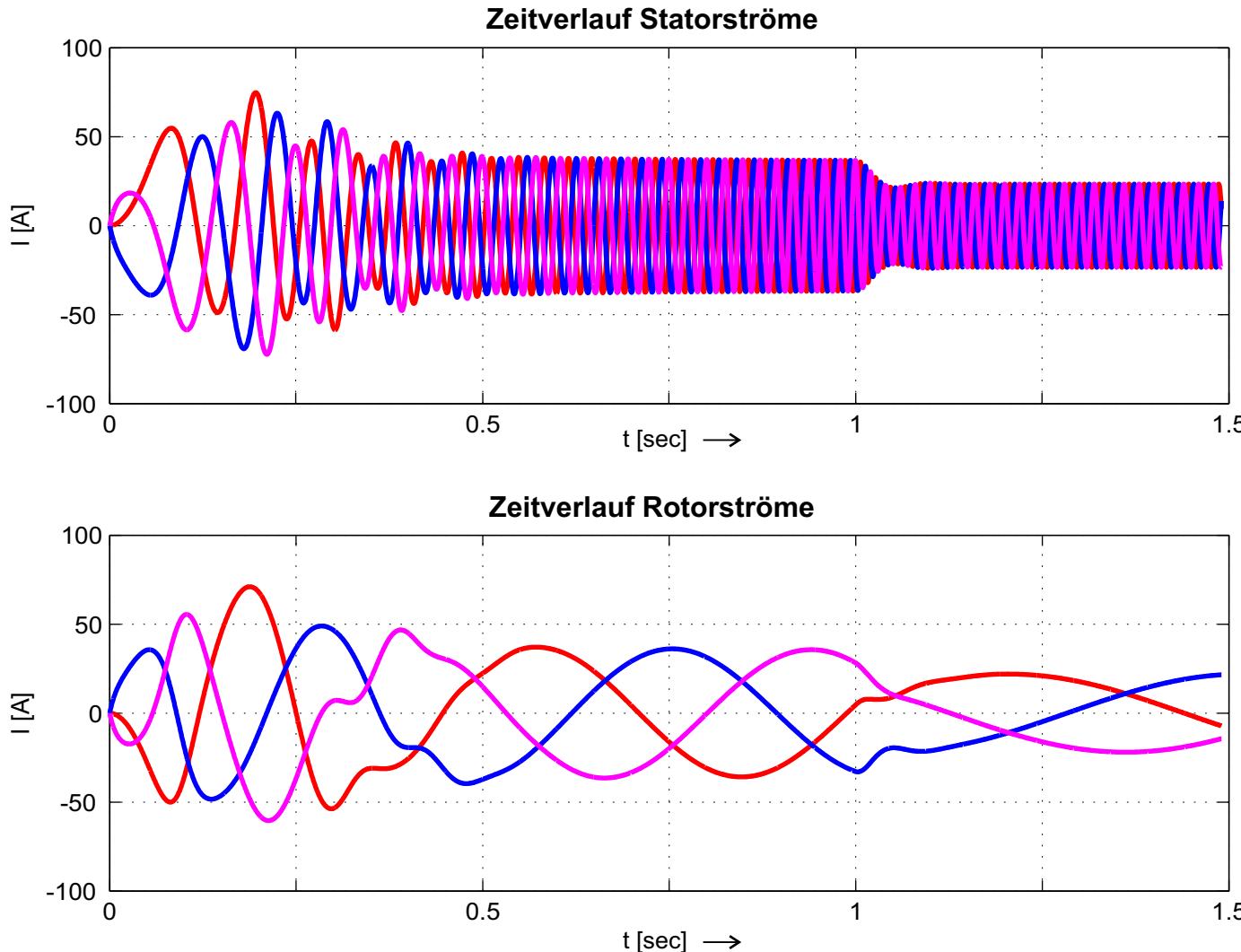
Hochlaufvorgang mit Frequenzrampe und U/f-Kennliniensteuerung

- Drehzahl wird mit der Statorfrequenz verstellt
- Frequenzrampe zu Hochlauf auf 50 Hz (Nenndrehzahl)
- Betrieb wie am Netz, aber mit variablem f_s
- Schlupf stellt sich lastabhängig ein



12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

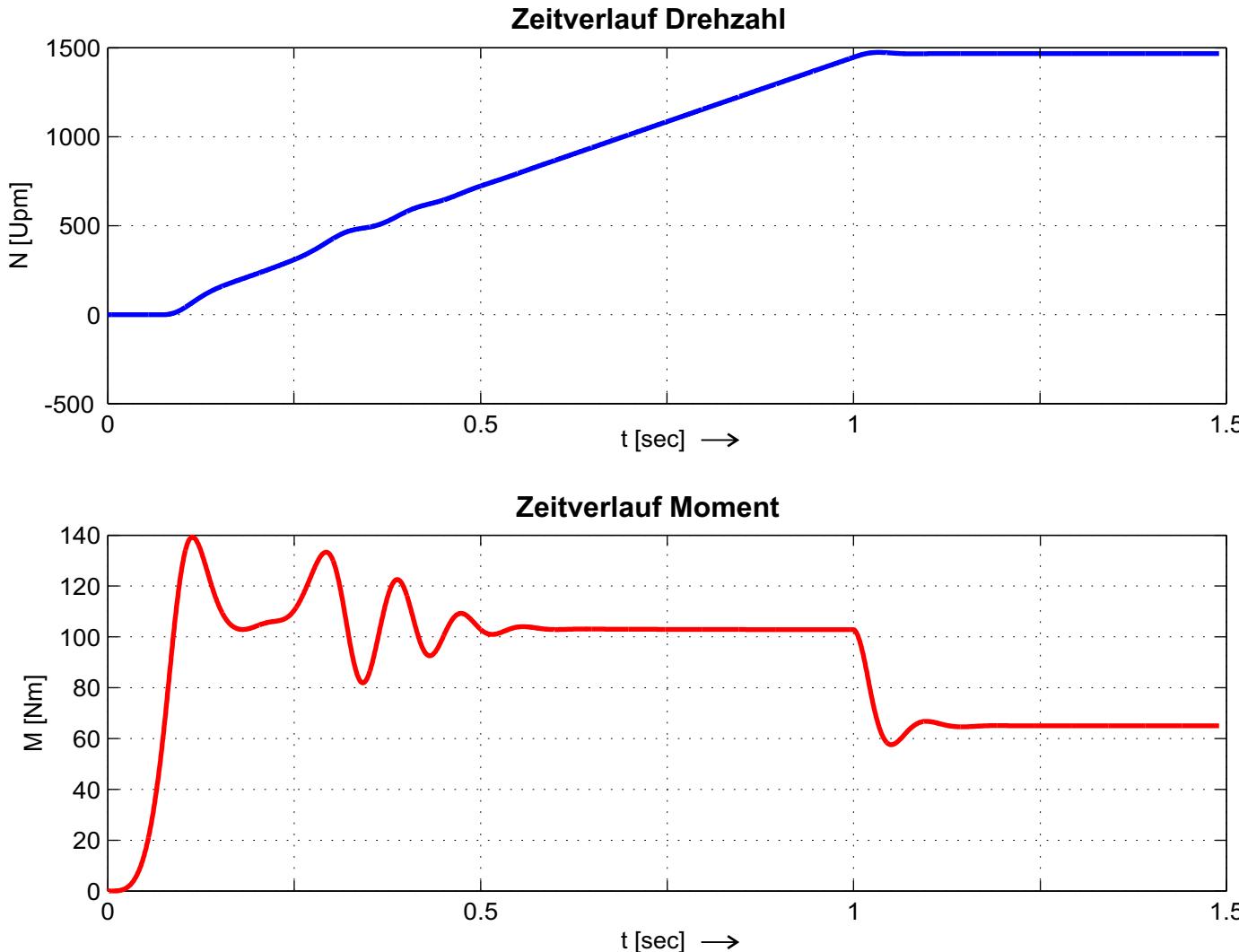
Hochlaufvorgang mit Frequenzrampe und U/f-Kennliniensteuerung



- Einschwingvorgang beim Aufschalten der Spannung
- Resonanz der ASM im unteren Drehzahlbereich (mech. \leftrightarrow magn.)

12.3 Simulation dynamisches Verhalten beim Hochlauf

Hochlaufvorgang mit Frequenzrampe und U/f-Kennliniensteuerung



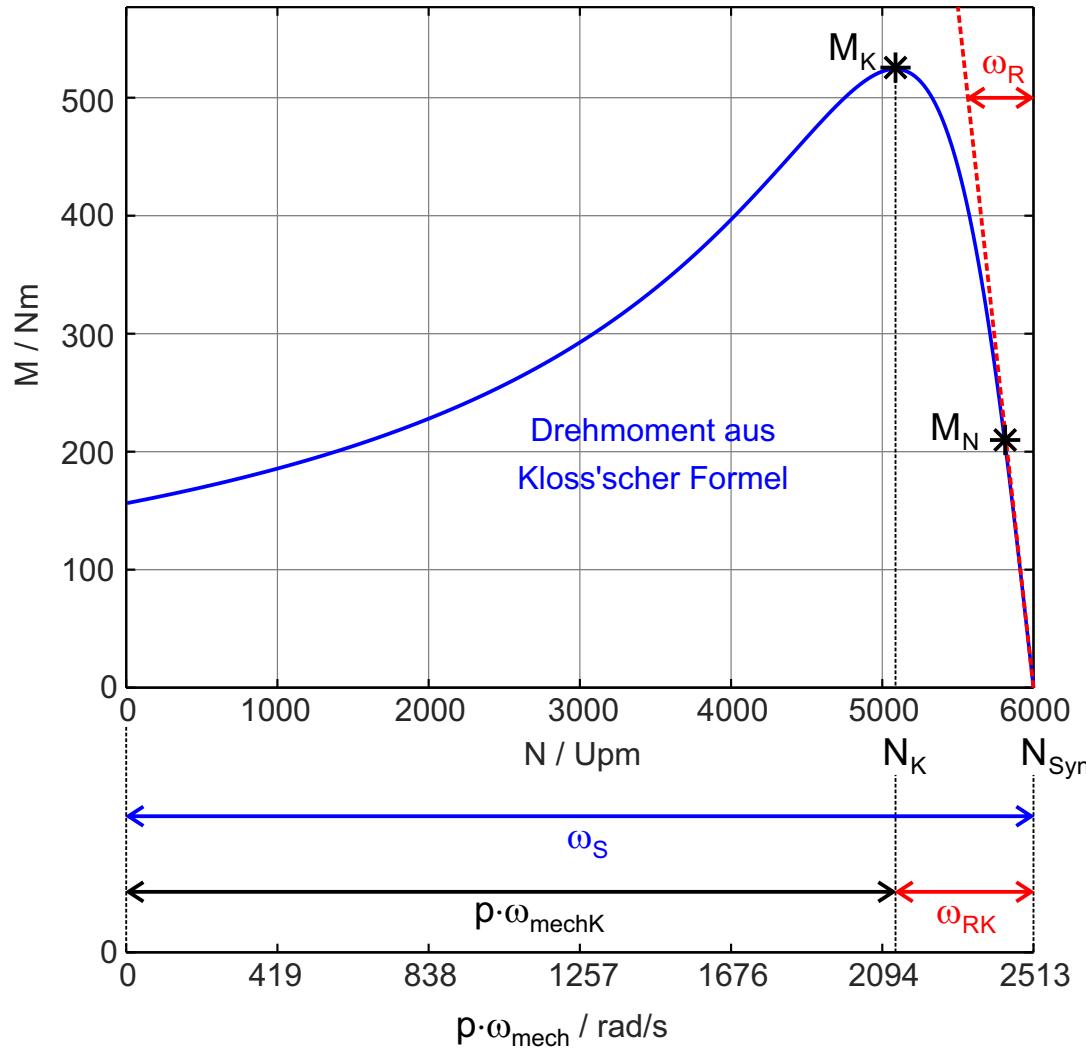
Fazit für U/f-Steuerung:

- kein massiver Überstrom, geringe therm. Überlastung
(bei 50 Hz war $I_{S,Anlauf} = 7,8 \cdot I_{SN}$)
- Hochlaufdauer 1 s anstatt 0,45 s, schont den Antriebstrang
- aber: Resonanz im unteren Drehzahlbereich. Das Drehmoment ist "nicht unter Kontrolle"
- nicht zu verwechseln mit Sanftanlauf durch elektronischen Starter: hier würde nur die Statorspannung reduziert

12.4 Drehzahlregelung mit U/f-Kennlinie

Vorüberlegungen für (quasi-) stationären Betrieb

Schlupfkennlinie einer 125 kW ASM ($p = 4$) für $f_s = 400$ Hz



mech. Winkelgeschw. ω_{mech} / rad/s = $\frac{\pi}{30}$ N / Upm

Rotorfrequenz: $\omega_R = s \cdot \omega_S = \omega_S - p \cdot \omega_{mech}$
(Winkelgeschw.)

Drehmoment: $M = 2 \cdot M_K \cdot \frac{1}{\frac{\omega_R}{\omega_{RK}} + \frac{\omega_{RK}}{\omega_R}}$

Tangente $N = N_{Syn}$: $M = 2 \cdot \frac{M_K}{\omega_{RK}} \cdot \omega_R$

im Arbeitsbereich: $M \sim \omega_R$ bzw. $M \sim f_R$

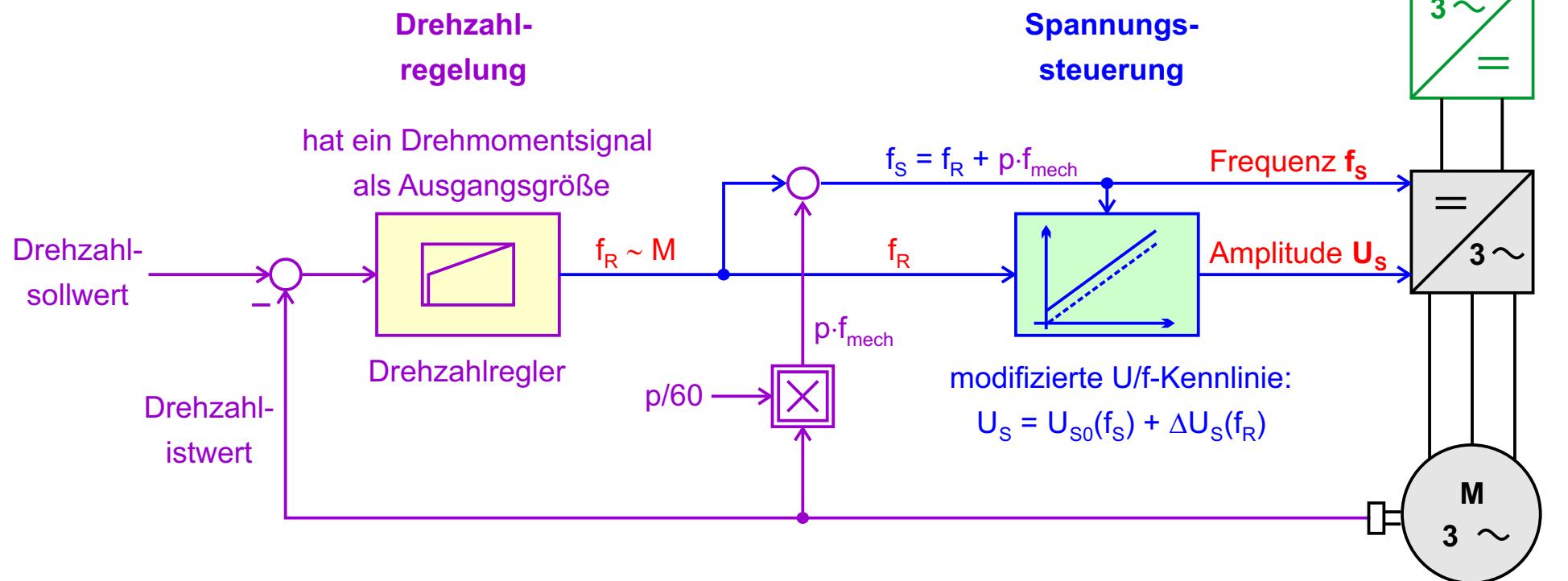
Fazit: Im (quasi-) stationären Betrieb kann das Drehmoment durch f_R gesteuert werden

12.4 Drehzahlregelung mit U/f-Kennlinie

Umsetzung

U/f-Steuerung mit Drehzahlregelung:

- unterdrückt Resonanzen wie beim rampengeführten Hochlauf in 12.3
- einsetzbar für Antriebe mit geringen dynamischen Anforderungen
(Pumpen, Lüfter, ...)
- nicht für hochdynamischen Betrieb mit Drehmomenteinprägung geeignet
(Asynchronservomotor, Prüfstands- und Traktionsantriebe, ...)



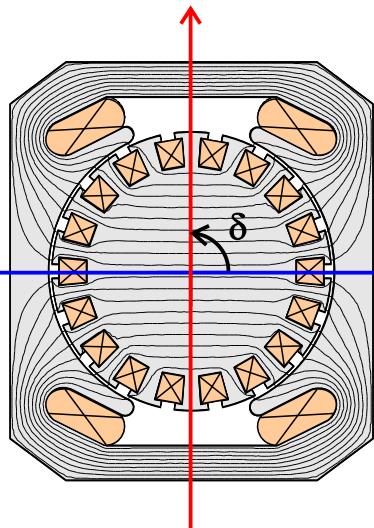
12.5 Systemgleichungen im dq-System

Vorüberlegung zur Drehmomenteinprägung bei el. Maschinen

Darstellung der Feldlinien für das Erregerfeld und Stromwinkel δ für max. Drehmoment

Gleichstrommaschine

Ankerfeld \Rightarrow Drehmoment



Anker im Läufer,
Erregung im Ständer

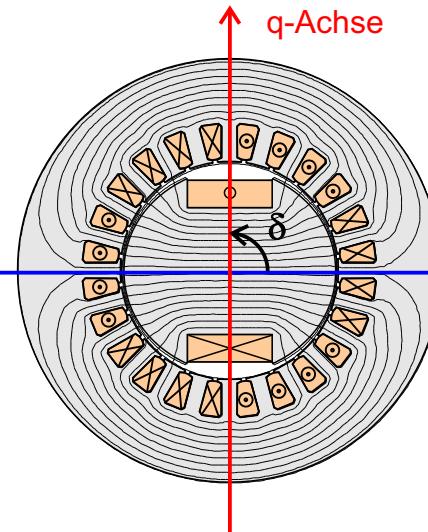
Drehmoment: I_A

Magnetisierung: I_F bzw. Φ_{Mag}

Kommutierung:
mechanischer Kommutator

Synchronmaschine

Querkomponente des Statorfeldes



Anker im Stator
Erregung durch das Polrad

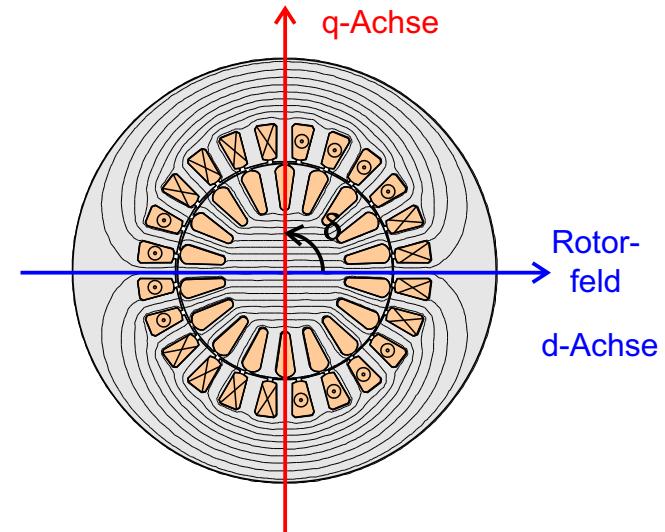
Synchronmoment: I_q

Magnetisierung: I_F bzw. Φ_{Mag}

Kommutierung:
Vektorregelung mit Wechselrichter

Asynchronmaschine

Querkomponente des Statorfeldes



Stator erzeugt Magnetisierung und Querfeld
Erregung durch den Magnetisierungsstrom

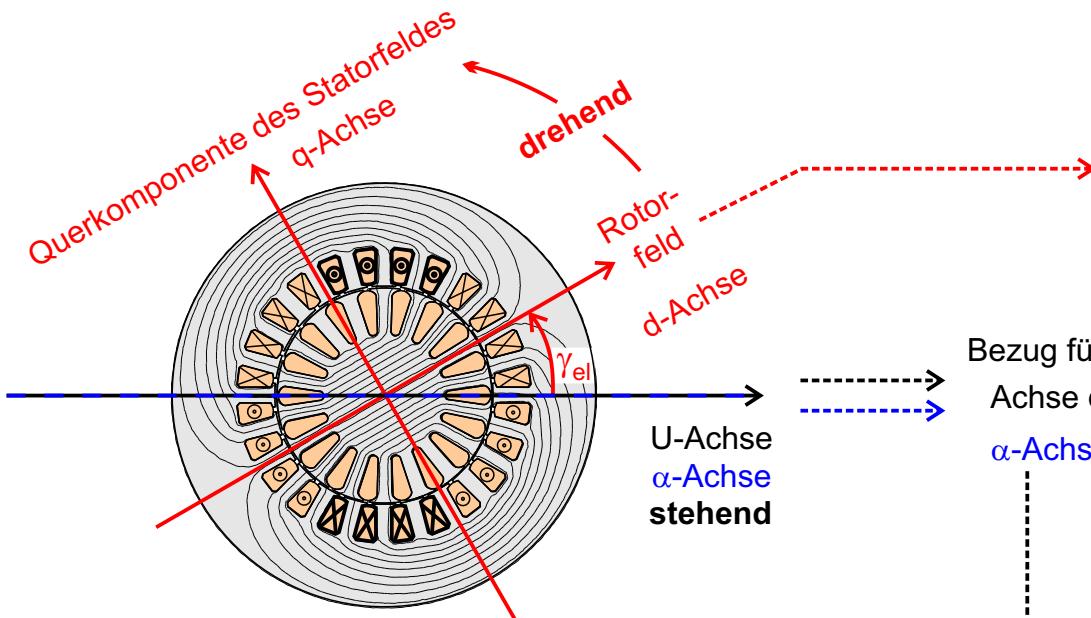
Drehmoment: I_q

Magnetisierung: $I_d \Rightarrow I_\mu$

Kommutierung:
Vektorregelung mit Wechselrichter

12.5 Systemgleichungen im dq-System

Wahl des Koordinatensystems für die d-Achse



Das Rotorfeld läuft mit ω_R über den Rotor hinweg, der sich im elektrischen System mit $p \cdot \omega_{R\text{mech}}$ dreht:

$$\text{somit ist } \omega_{\text{Rotorfeld}} = p \cdot \omega_{R\text{mech}} + \omega_R = \omega_S$$

Das Rotorfeld läuft synchron mit dem Statorfeld um!

Im Luftspalt herrschen also die gleichen magnetischen Verhältnisse wie bei der SM

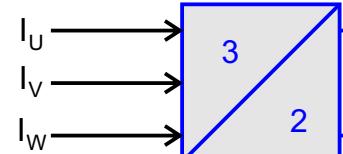
⇒ Vektorregelung wie in Kapitel 7. Aber:

Bezug für das dq-System: d-Achse = Nordpol des Rotorfeldes

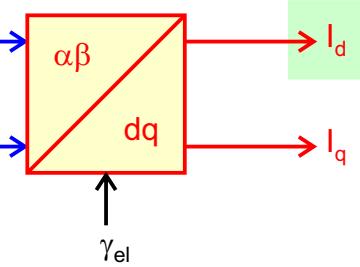
$$\text{Rotorflusswinkel } \gamma_{el} = \int_0^t \omega_S dt = \int_0^t (p \cdot \omega_{\text{mech}} + \omega_R) dt$$

Bezug für die Koordinatentransformation:
Achse der Wicklung für Strang U bzw.
 α -Achse des statorfesten $\alpha\beta$ -Systems

3/2-Wandlung
Clarketransformation



dq-Wandlung
Parktransformation



Im Gegensatz zur Synchronmaschine kann γ_{el} nicht direkt mit einem Pollagesensor gemessen werden.

12.5 Systemgleichungen im dq-System

Herleitung einer Beziehung für das Drehmoment

im $\alpha\beta$ -System war (Seite 6 unten): $M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \text{im} \{ -\underline{\Psi}'_{R,\alpha\beta} \cdot \underline{I}_{S,\alpha\beta}^* \} = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \text{im} \{ \underline{\Psi}'_{R,\alpha\beta}^* \cdot \underline{I}_{S,\alpha\beta} \}$

Anwendung der dq-Transformation:

dann ergibt sich im dq-System:

$$\text{im} \{ -\underline{a}\cdot\underline{b}^* \} = -\text{im} \{ \underline{a}\cdot\underline{b}^* \} = \text{im} \{ \underline{a}^*\cdot\underline{b} \}, \text{ sonst VZ-Fehler für } M_i$$

$$\underline{\Psi}'_{R,\alpha\beta}^* = \underline{\Psi}'_{R,dq} \cdot e^{-j\gamma_{el}} \quad \text{und} \quad \underline{I}_{S,\alpha\beta} = \underline{I}_{S,dq} \cdot e^{j\gamma_{el}}$$

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \text{im} \{ \underline{\Psi}'_{R,dq} \cdot e^{-j\gamma_{el}} \cdot \underline{I}_{S,dq} \cdot e^{j\gamma_{el}} \} \quad \text{Drehoperatoren kürzen sich heraus}$$

$$\underline{\Psi}'_{R,dq} = \underline{\Psi}'_{Rd} \quad \text{und} \quad \underline{I}_{S,dq} = \underline{I}_{Sd} + j \cdot \underline{I}_{Sq} \quad \text{durch Bezugssystemwahl ist } \underline{\Psi}'_{Rq} = 0$$

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \underline{\Psi}'_{Rd} \cdot \underline{I}_{Sq}$$

$$\underline{\Psi}'_{Rd} = L_h \cdot I_{\mu d} \quad \text{Rotorfluss} = \text{Hauptinduktivität} \cdot d\text{-Komponente Magnetisierungsstrom}$$

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h^2}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot I_{\mu d} \cdot I_{Sq}$$

vgl. Uwe Nuss, Hochdynamische Regelung Elektrischer Antriebe, VDE Verlag GmbH, 2010; Seite 80

12.5 Systemgleichungen im dq-System

Zusammenfassung für Rotorfrequenz, Magnetisierungsstrom und Drehmoment

Rotorfluss im dq-System:

$$\underline{\Psi}'_R = \underline{\Psi}'_{Rd}$$

$\underline{\Psi}'_{Rq} = 0$ per Definition, da $\underline{\Psi}'_R$ genau auf der d-Achse liegt

Innenes Moment:

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \underline{\Psi}'_{Rd} \cdot I_{Sq}$$

bzw.

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h^2}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot I'_{\mu Rd} \cdot I_{Sq}$$

damit ist:

$$\underline{\Psi}'_{Rd} = L_h \cdot I'_{\mu Rd}$$

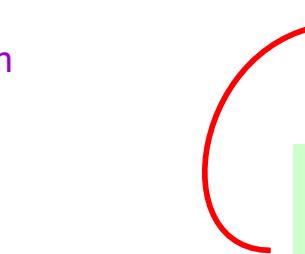
$I'_{\mu Rd}$: rotorflussbezogener Magnetisierungsstrom

Weitere Beziehungen:

$$\text{Magnetisierungsstrom: } I'_{\mu Rd} = I_{Sd} - \tau_R \cdot \frac{dI'_{\mu Rd}}{dt}$$

$$\text{Rotorfrequenz: } \omega_R = \frac{I_{Sq}}{\tau_R \cdot I'_{\mu Rd}}$$

$$\text{Rotorzeitkonstante: } \tau_R = \frac{L_h + L'_{R\sigma}}{R'_R}$$



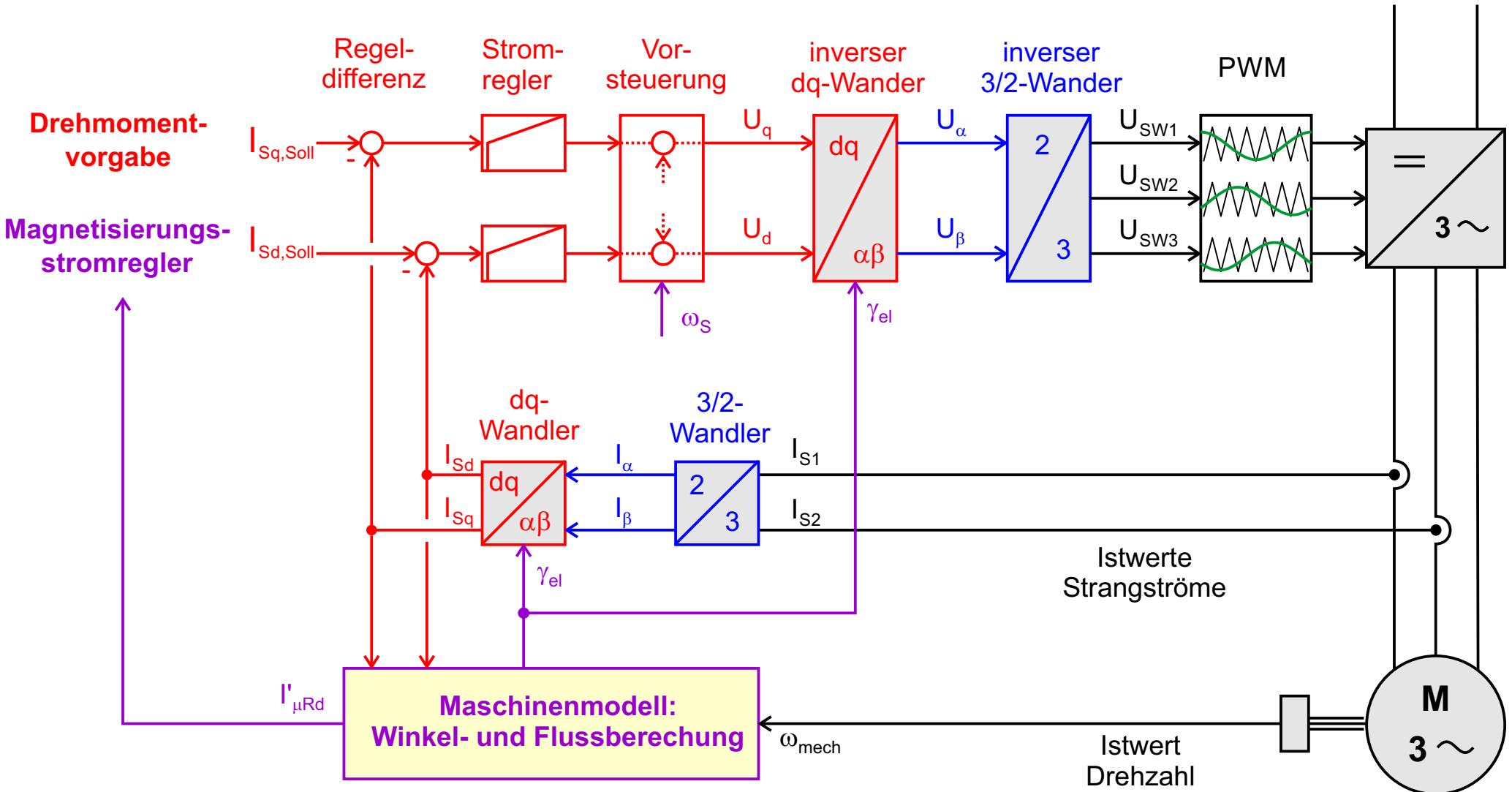
Fazit für die Regelung der ASM

- durch I_{Sq} kann M_i direkt eingestellt werden
- durch I_{Sd} kann über ein PT1-Glied mit τ_R der Magnetisierungsstrom $I'_{\mu Rd}$ eingestellt werden, ggf. mit einem Magnetisierungsstromregler
- aus I_{Sq} und $I'_{\mu Rd}$ kann die Rotorfrequenz ω_R bestimmt werden. Wird ω_{mech} gemessen, kann man γ_{el} für die dq-Wandlung berechnen

vgl. Uwe Nuss, Hochdynamische Regelung Elektrischer Antriebe, VDE Verlag GmbH, 2010; Seite 80/81

12.6 Feldorientierte Stromregelung "FOR"

Grundsätzliches Strukturbild



12.6 Feldorientierte Stromregelung "FOR"

Bestimmung Rotorfeldwinkel γ_{el} und Magnetisierungsstrom $I'_{\mu Rd}$ mit dem "Strommodell"

Beziehungen:

$$\gamma_{el} = \int_0^t \omega_s dt$$

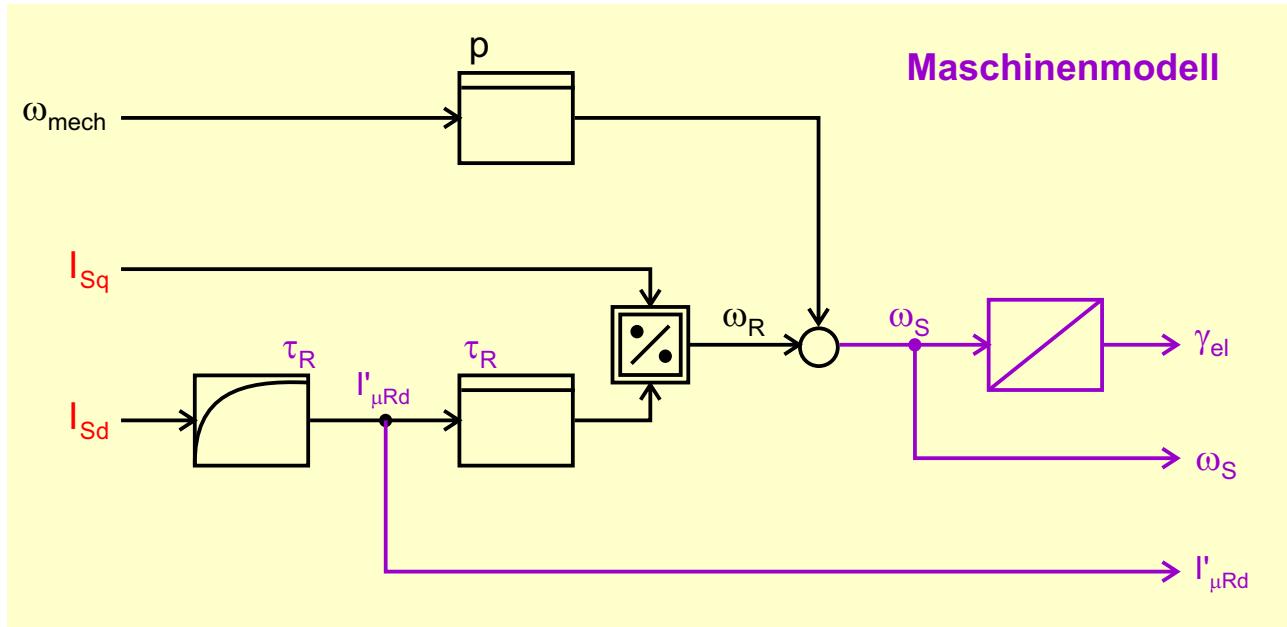
$$\omega_s = p \cdot \omega_{mech} + \omega_R$$

ω_{mech} gemessen

$$\omega_R = \frac{I_{sq}}{\tau_R \cdot I'_{\mu Rd}}$$

$$I'_{\mu Rd} = I_{sd} - \tau_R \cdot \frac{dI'_{\mu Rd}}{dt}$$

$$\tau_R = \frac{L_h + L'_{R\sigma}}{R'_R}$$



Baustellen:

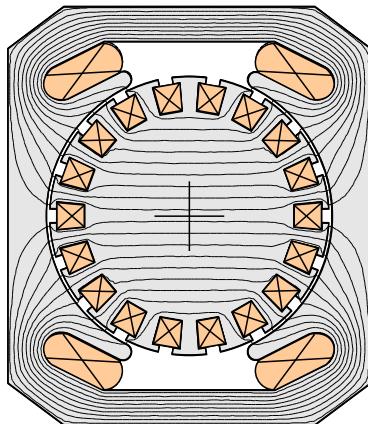
- Eingangsgrößen I_{sq} und I_{sd} = Ergebnis der dq-Wandlung mit γ_{el}
⇒ Die Kuh säuft scheinbar ihre eigene Milch, System ist jedoch eindeutig bestimmt
- Rotorzeitkonstante τ_R : ist leider abhängig von L_h (Sättigungseffekte Eisenkreis) und vom Rotorwiderstand R'_R (Temperatur, Stromverdrängung)
⇒ ggf. adaptive Regelverfahren zur Parameternachführung erforderlich

vgl. Uwe Nuss, Hochdynamische Regelung Elektrischer Antriebe, VDE Verlag GmbH, 2010; Seite 92/93

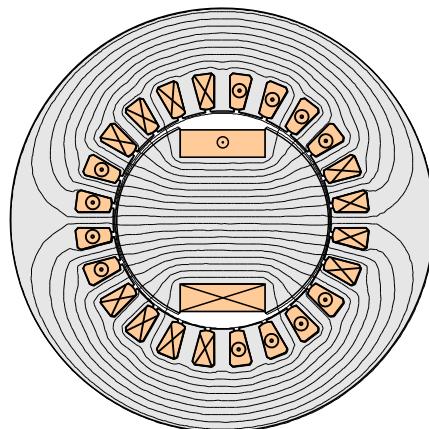
12.7 Anmerkungen zur Drehmomentberechnung

Vergleich der Drehmomentbeziehungen für GM, SM und ASM

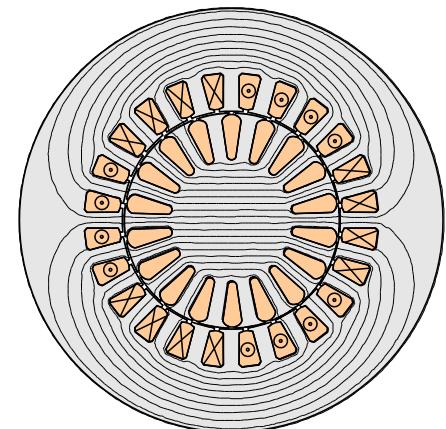
Gleichstrommaschine



Synchronmaschine



Asynchronmaschine



physikalisch messbare Größen

$$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A$$

↑
I_F bzw. B_{R,Mag.}

Raumzeigertrafo \Rightarrow dq-System

$$M_i = \frac{3p}{4\pi} k_{EMK} \cdot I_q + \frac{3p}{2} (L_d - L_q) \cdot I_q \cdot I_d$$

↑
I_F bzw. B_{R,Mag.}

Raumzeigerkomponenten = Scheitelwerte

Raumzeigertrafo \Rightarrow dq-System

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_h}{L_h + L'_{R\sigma}} \cdot \Psi'_{Rd} \cdot I_{Sq}$$

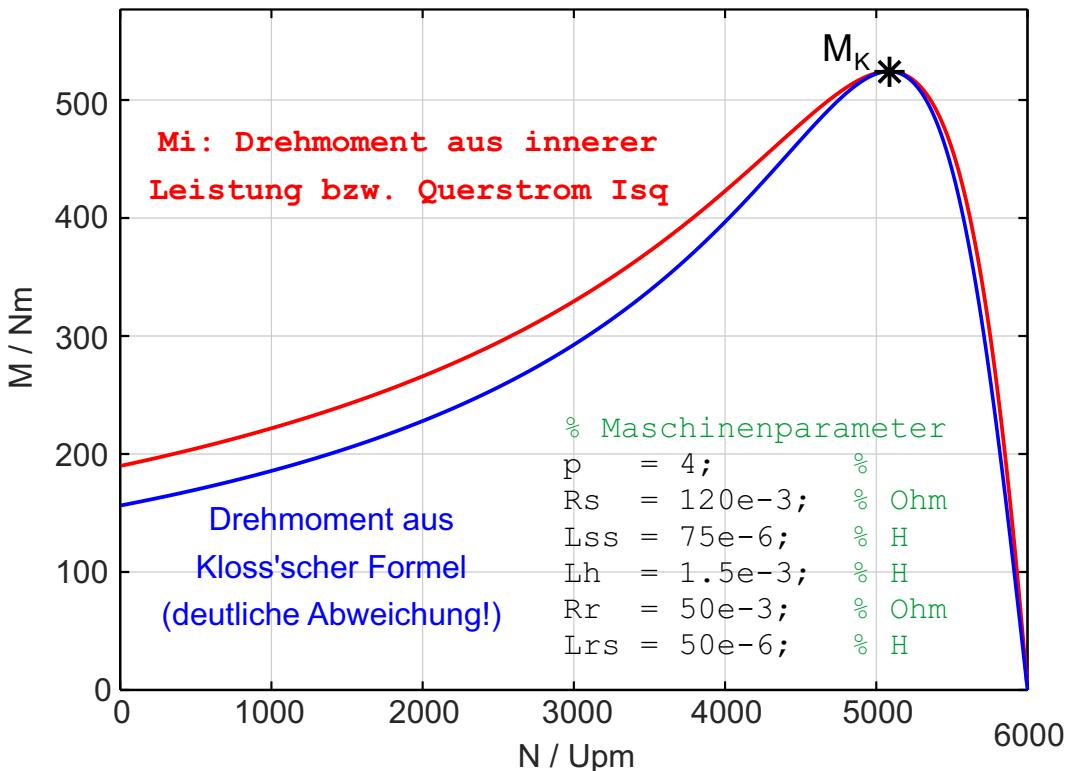
↑
I_{Sd}

Bewegungsgleichung für alle Maschinen: $M_i = M_w + M_s + J_{Ges} \cdot d\omega/dt$

12.7 Anmerkungen zur Drehmomentberechnung

Zur Berechnung der statischen Drehmomentkurve mit dem Zeitzeiger-ESB

Schlupfkennlinie einer 125 kW ASM



Bezugsgröße ist hier der Hauptfluss $L_h \cdot I_\mu$
(nicht der Rotorfluss $L_h \cdot I_{\mu R}$ im dq-System)



Matlabskript zur Kennlinienberechnung

```
% Spannung und Frequenz
Usn = 325; % V rms (Ud = 800 V)
fsn = 400; % Hz

% Drehzahl und Schlupf
N = 5:5:60*(fsn/p); % Upm Drehzahlvektor
s = (fsn-N/60*p)/fsn; % Schlupfvektor

% Stator-, Rotor und Hauptimpedanz
Zs = Rs + j*2*pi*fsn*Lss;
Zr = Rr + j*2*pi*fsn*Lrs + (1-s)./s*Rr;
Zh = j*2*pi*fsn*Lh;

% Gesamtimpedanz
Zges = Zs + (Zr.*Zh)./(Zr+Zh);

% Stator-, Rotor- und Magnetisierungsstrom
Is = Usn./Zges;
Ir = - (Usn - Is.* Zs)./Zr;
Iu = (Usn - Is.* Zs)./Zh;

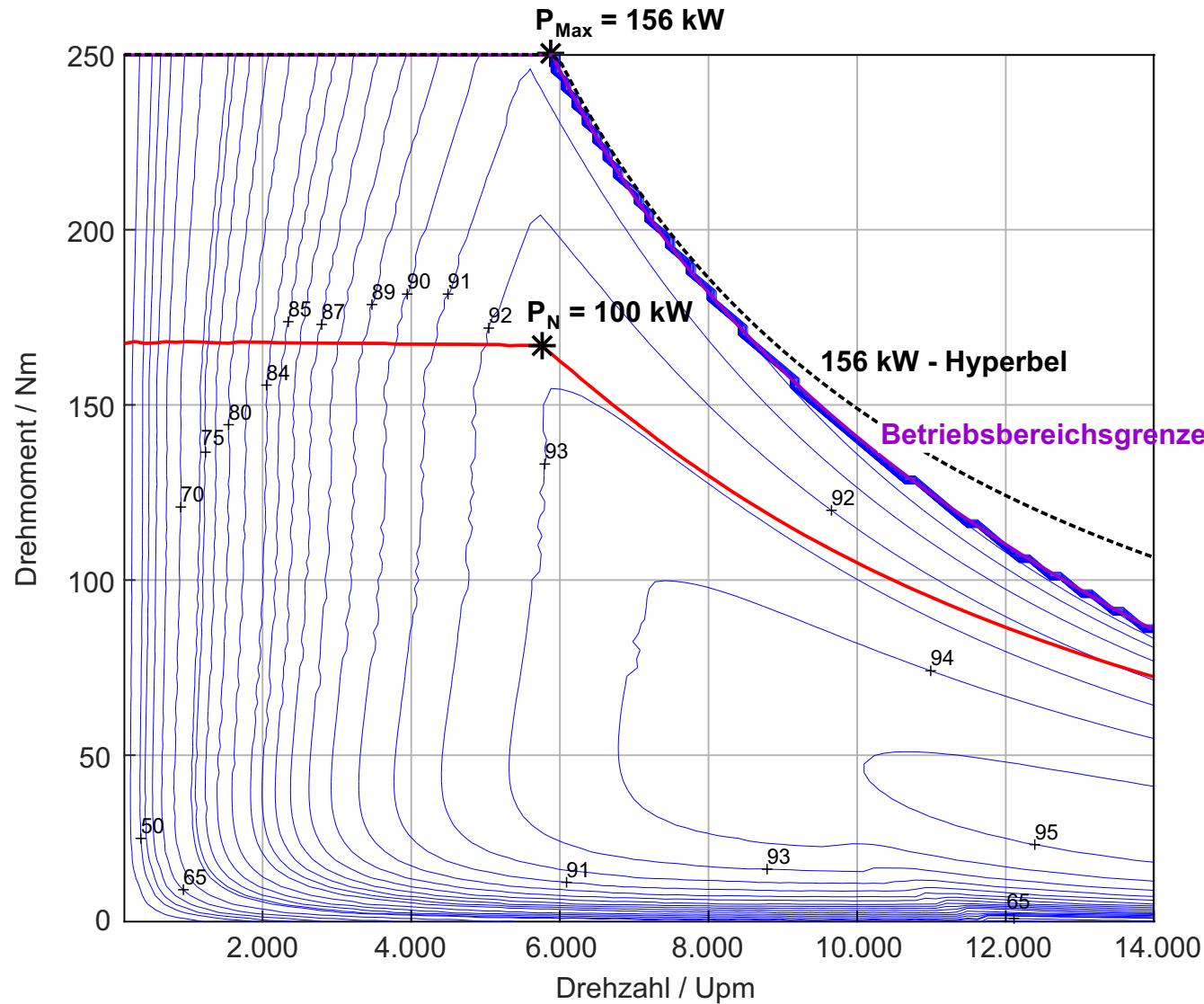
% innere Leistung und Drehmoment
Pi = 3*abs(Ir).^2 .* (1-s)./s*Rr;
Mi = Pi./N * 30/pi;

% Alternativrechnung Hauptfluss x Querstrom
delta = angle(Is) - angle(Iu); % Stromwinkel
Isq = abs(Is) .* sin(delta); % "Querstrom"
Mi = 3 * p * Lh * abs(Iu) .* Isq;
```

12.8 Kennfeld und Betriebsführung eines Traktionsmotors

Typisches Wirkungsgradkennfeld einer ASM 100 kW / 156 kW

Das max. Dauer-drehmoment wird hier vom Statorstrom I_{SN} bestimmt



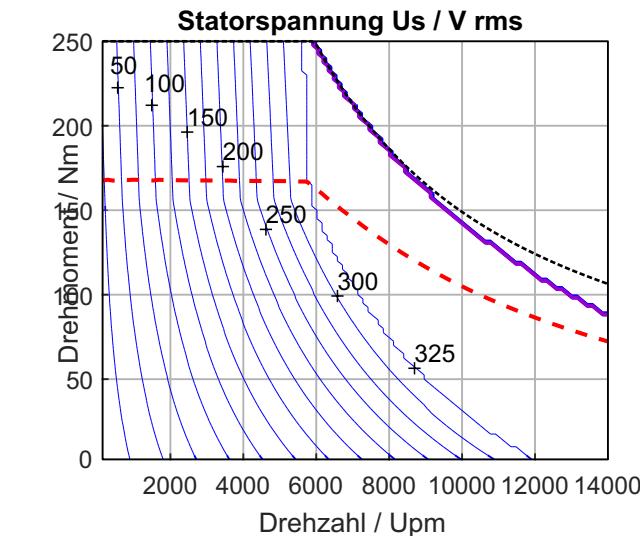
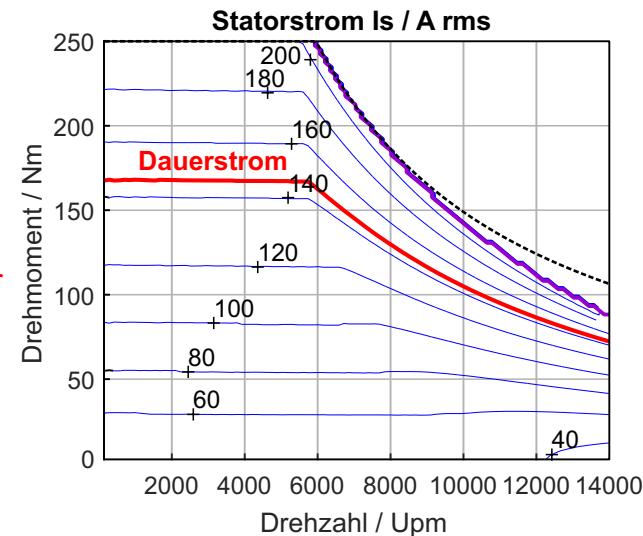
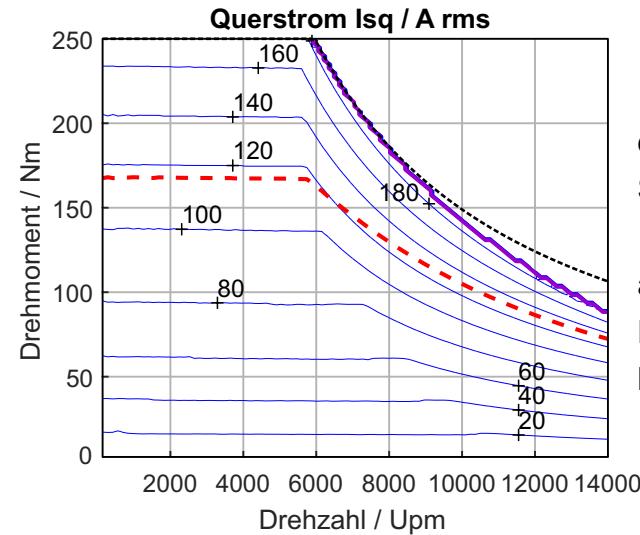
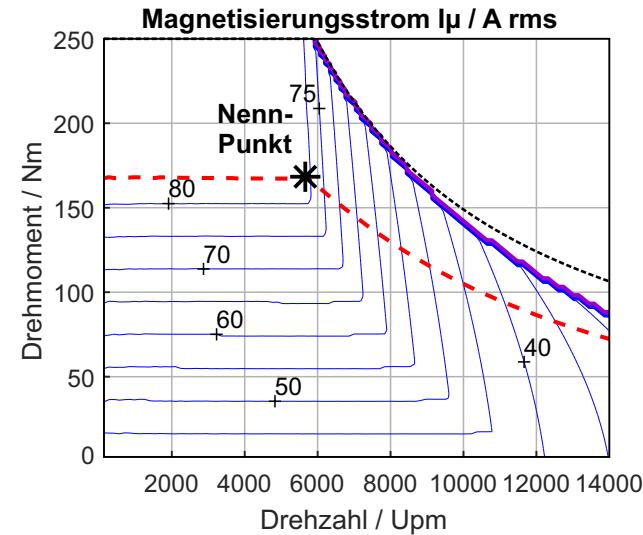
Das max. Drehmoment fällt bei der ASM stärker ab als mit der Leistungs-hyperbel: Der Kippschlupf limitiert den Betrieb hier.

12.8 Kennfeld und Betriebsführung eines Traktionsmotors

Variablen der Regelung der ASM 100 kW / 156 kW

Feldschwächung
oberhalb des
Nennpunktes

I_μ wird auch im Teillast-
bereich reduziert,
um den Wirkungsgrad
zu verbessern



Der max. zulässige
Dauerstrom wird durch
die Wicklungstemperatur
bzw. die Entwärmung
bestimmt

drehmomentbildende
Stromkomponente

abweichend von der
Raumzeigernormierung
hier Effektivwerte

Für die Kennfeld-
erzeugung wurde mit
einem stationären
Modell gerechnet,
siehe Seite 28:

$$M = 3 \cdot p \cdot L_h \cdot I_\mu \cdot I_{sq}$$