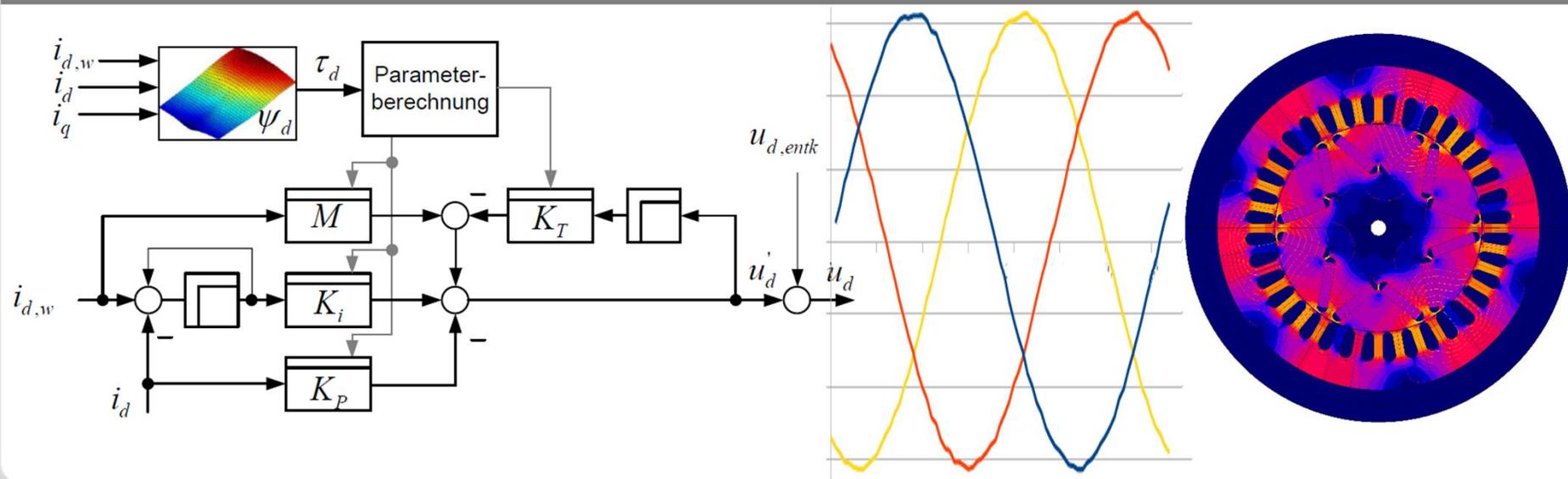


# Übung „Regelung leistungselektronischer Systeme“ SS22

## Übung 5 – Stromeinprägung & Dreiphasensysteme / PMSM

Elektrotechnisches Institut (ETI)  
Leistungselektronische Systeme



# Zeitleiste

10.05.

- Tiefsetzsteller - Stromregelung

17.05.

- Tiefsetzsteller - Spannungsregelung

14.06.

- Modellbildung & Stromregelung der Gleichstrommaschine
- Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine

17.06.

- Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine
- Stromeinprägung / Raumzeiger und Dreiphasendrehsysteme

05.07.

- Stromeinprägung / Raumzeiger und Dreiphasendrehsysteme
- Rotororientierte Regelung der permanentenerregten Synchronmaschine

12.07.

- Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine

XX.07.

- Rotorwinkelidentifikation einer permanentenerregten Synchronmaschine

### 3 Rotororientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine

Für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit sinusförmiger Stromeinprägung, integriertem Resolver und einem Rotor mit aufgeklebten Seltene-Erden-Magneten soll eine feldorientierte Regelung in rotororientierten Koordinaten entworfen werden.

Als Stellglied dient ein selbstgeführter Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis und Bremssteller, der über eine Diodenbrücke aus dem 400V-Drehspannungsnetz gespeist wird. Die Regelung des Umrichters erfolgt mit einem digitalen Signalprozessor (DSP), welcher periodisch alle  $t_{TR} = 125\mu s$  neue Sollwerte berechnet und diese an den selbstgeführten Wechselrichter ausgibt. Die mittlere Totzeit des Wechselrichters beträgt in dieser Anwendung  $t_{TSG} = \frac{t_{TR}}{2}$ .

$$\text{Nenn Drehzahl} \quad n_N = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (3.1)$$

$$\text{Nennmoment} \quad M_N = 21 \text{ N m} \quad (3.2)$$

$$\text{Nennspannung} \quad U_N = 330 \text{ V} \quad (3.3)$$

$$\text{Nennstrom} \quad I_{SN} = 13.5 \text{ A} \quad (3.4)$$

$$\text{Induktivität} \quad L_d = L_q = 5.94 \text{ mH} \quad (3.5)$$

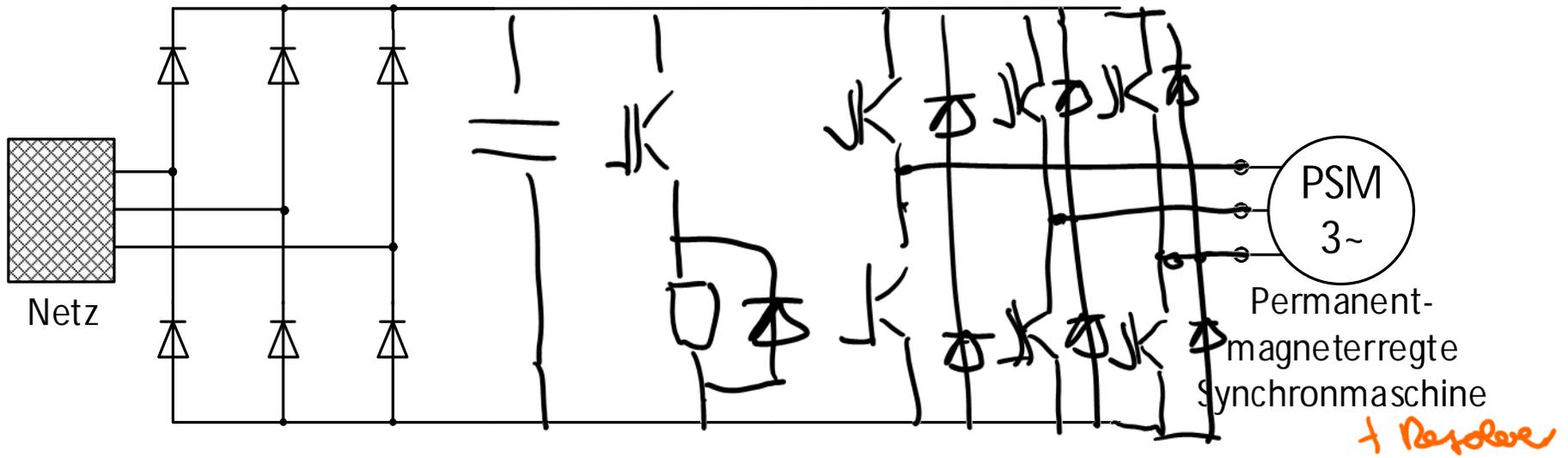
$$\text{Statorwiderstand (bei } 20^\circ\text{C)} \quad R_S = 235 \text{ m}\Omega \quad (3.6)$$

$$\text{Überlastbarkeit} \quad \ddot{u} = 2 \quad (3.7)$$

$$\text{Polpaarzahl} \quad p = 3 \quad (3.8)$$

$$\text{Trägheitsmoment} \quad J = 3.6 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2 \quad (3.9)$$

- Zeichnen Sie das leistungselektronische Schaltbild des Antriebs.
- Zeichnen Sie das regelungstechnische Blockschaltbild des Antriebs.
- Berechnen Sie die Reglerparameter für die nach dem Betragsoptimum auszulegenden Stromregler.
- Berechnen Sie die Reglerparameter für den nach dem symmetrischen Optimum auszulegenden Drehzahlregler.
- Berechnen Sie die Spannungs-, Strom- und Statorflußraumzeiger für die Fälle Leerlauf, Nennbetrieb und maximale Überlastung.



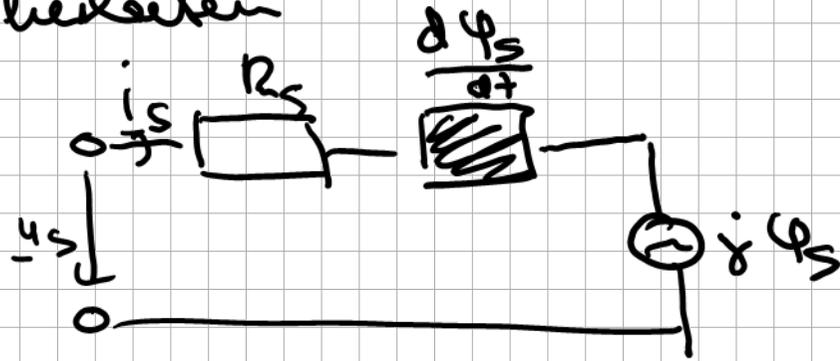
Diodegleich-  
richter

Brück-  
chopper

Selbstgeführte  
DBS

## b) regelungstechnisches FSB

Modellgleichungen des PSM in rotororientierter KOS beschreiben



$$\begin{aligned} \text{Spannungsgleichung: } \underline{u}_s &= R_s \underline{i}_s + j \cdot \dot{\psi}_s + \dot{\psi}_s \\ &= R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \underline{\psi}_s \end{aligned}$$

Aufteilung in Real- und Imaginärteil

$$u_D = R_s \cdot i_D + \dot{\psi}_D - \dot{\psi}_Q$$

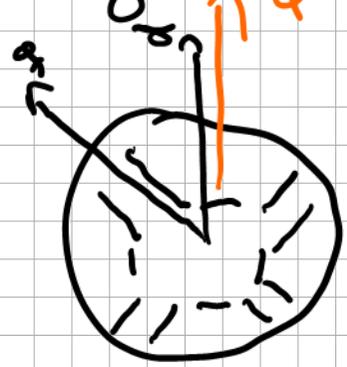
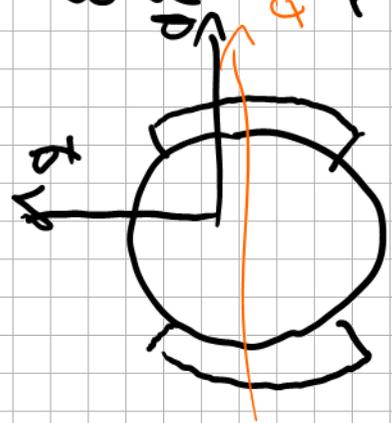
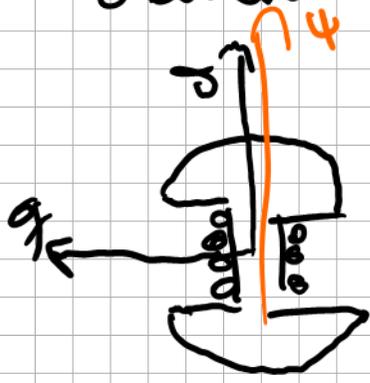
$$u_Q = R_s \cdot i_Q + \dot{\psi}_Q + \dot{\psi}_D$$

ohmscher  
Spannungs-  
anteil

Spannung  
durch  
Flussänderung

Spannung durch  
zeitliche + winkel abhängige Änderung

Bemerkung: Wie d-q-Achse legen?



d-Achse an Hauptfluss orientieren!

$$\psi_D = L'_{nd} \cdot i_D' + L_D \cdot i_D = \psi_{PM} + L_D \cdot i_D$$

$\swarrow$   
 Permanentmagnetfluss

$$\psi_Q = L_Q \cdot i_Q$$

} lin. Maschine!  
 $\psi_{PM}(i_{D1a}, \gamma, \omega, \theta_{PM})$

einsetzen:

$$\begin{aligned} u_D &= R_S \cdot i_D + L_D \cdot \dot{i}_D - j \cdot L_Q \cdot i_Q \\ u_Q &= R_S \cdot i_Q + L_Q \cdot \dot{i}_Q + j L_D \cdot \dot{i}_D + j \psi_{PM} \end{aligned}$$

Stromregel

Einkopplung

Vorkreuzung  
der Gegenspannung

mechanisch  $\rightarrow$  geringere Drehzahl

Momentengleichung

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \operatorname{Im} \{ i_S \cdot \psi_S^* \}$$

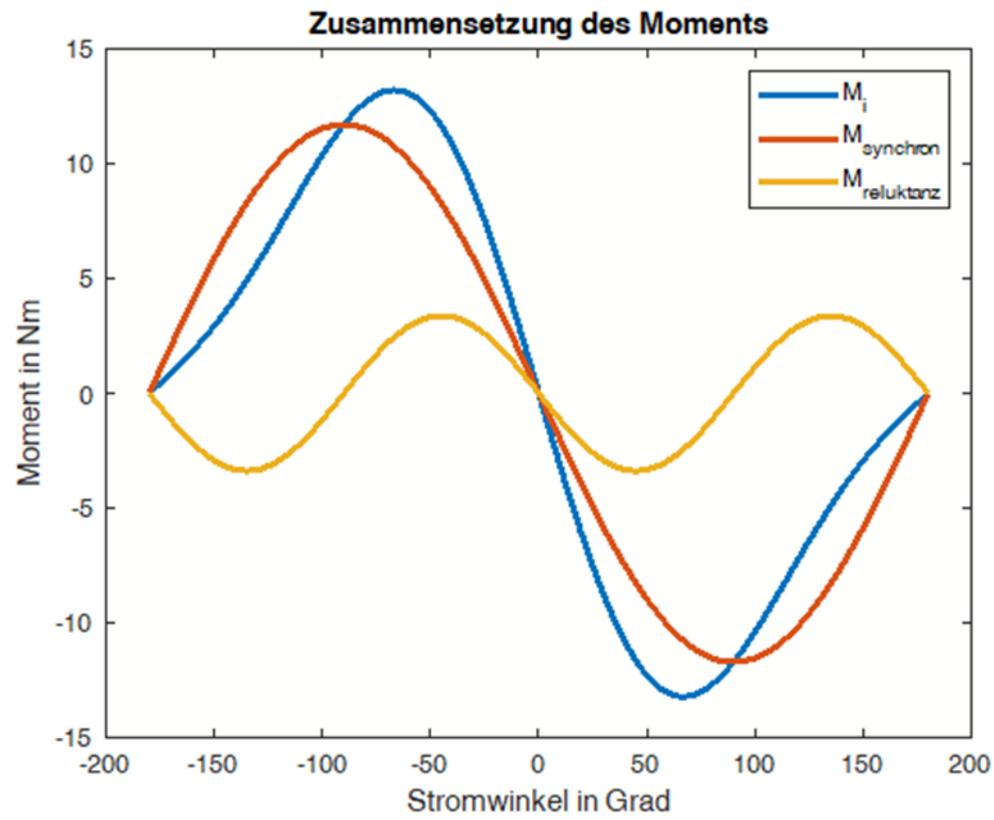
$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \operatorname{Im} \{ (i_D + j i_Q) (\psi_{PM} + L_D \dot{i}_D - j L_Q i_Q) \}$$

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (-L_Q \cdot i_D \cdot i_Q + \psi_{PM} \cdot i_Q + L_D \cdot j i_D \cdot i_Q)$$

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[ \underbrace{\psi_{PM} \cdot i_Q}_{\text{Synchrones Moment}} + \underbrace{(L_D - L_Q) i_D \cdot i_Q}_{\text{Reaktivmoment}} \right]$$

Synchrones  
Moment

Reaktivmoment

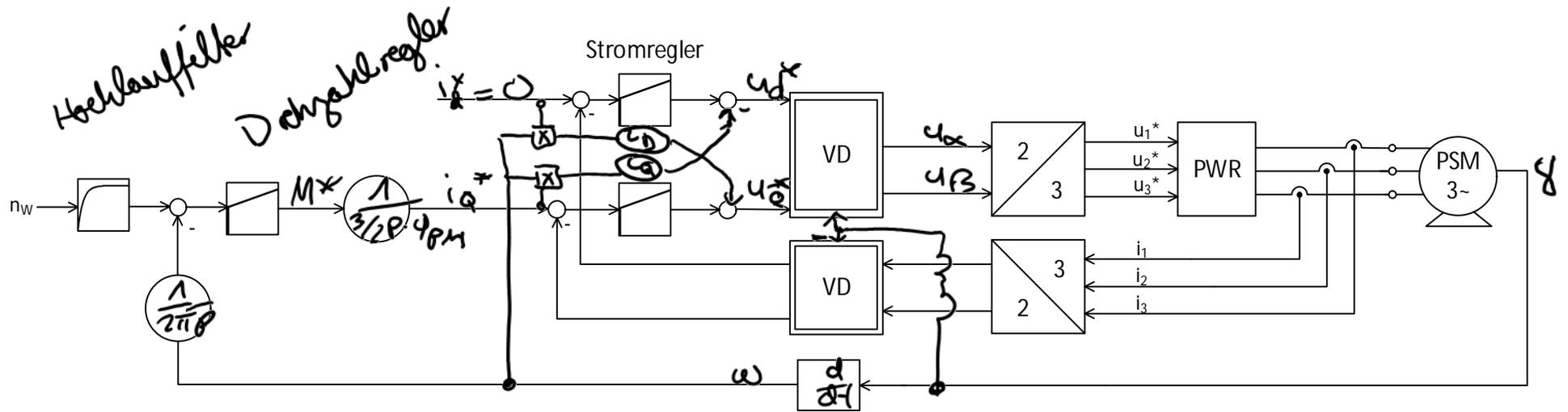


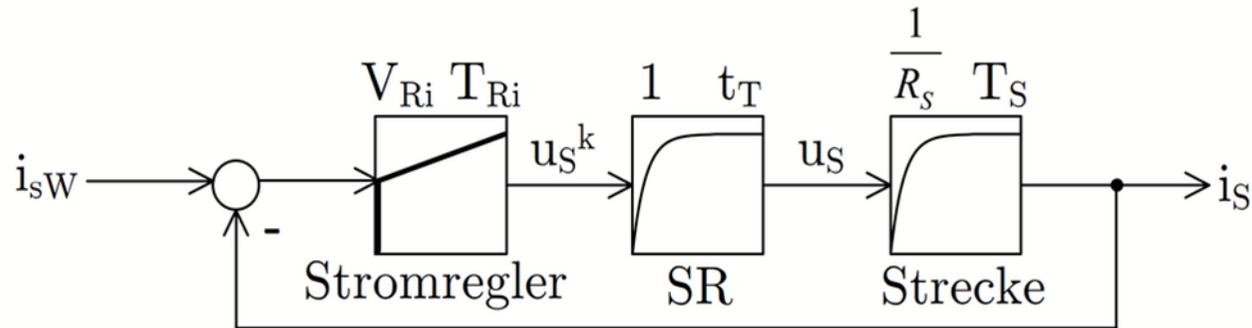
Hier  $L_D = L_Q$  (Oberflächenmagnete)  $\rightarrow i_D = 0$

$$i_Q = \sqrt{2} i_{SN}$$

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot \rho \cdot \Psi_{PM} \cdot i_Q$$

$$\rightarrow \Psi_{PM} = \frac{2 \cdot M_N}{3 \cdot \rho \cdot \sqrt{2} \cdot i_{SN}} = 0,244 \text{ Vs}$$





c) Auslegung Stromregler

Näherung Totzeit Stromrichter  $G_T(s) = \frac{1}{1 + T_e \cdot s}$

$$\text{mit } T_e = 1,5 \cdot t_{TD} = 187,5 \mu\text{s}$$

$$\text{Strecke: } G_S(s) = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + T_s \cdot s}$$

$$\text{mit } T_s = \frac{L_D}{R_s} = \frac{L_S}{R_s} = \frac{5,94 \text{ mH}}{235 \text{ m}\Omega}$$

$$\text{PI-Regler: } G_R(s) = V_{Ri} \frac{1 + T_{ei} \cdot s}{T_{Ri} \cdot s}$$

$$= 25,78 \text{ ms}$$

offener PK:

$$F_0 = G_R(s) \cdot G_T(s) \cdot G_S(s)$$
$$= V_{Ri} \frac{\cancel{1 + T_{Ri} \cdot s}}{T_{Ri} \cdot s} \cdot \frac{1}{R_s} \frac{1}{\cancel{1 + T_s \cdot s}} \cdot \frac{1}{1 + t_T \cdot s}$$

mit  $T_{Ri} = T_s$

$$F_0(s) = V_{Ri} \cdot \frac{1}{T_{Ri} \cdot s} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + t_T \cdot s}$$

Verstärkung  $V_{Ri}$  so wählen, dass der geschlossene PK  $F_G(s)$  Dämpfung  $1/\sqrt{2}$  erhält

$$F_G(s) = \frac{1}{1 + F_0(s)} = \frac{1}{1 + \frac{T_{Ri} \cdot R_s}{V_{Ri}} \cdot s + \frac{T_{Ri} \cdot R_s \cdot t_T}{V_{Ri}} \cdot s^2}$$

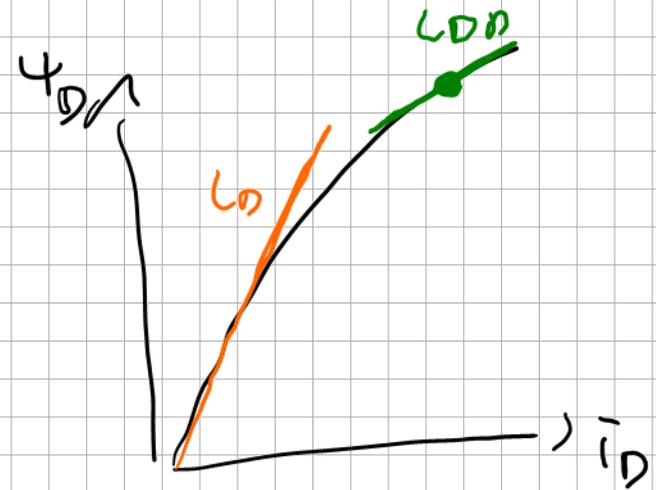
$$\stackrel{!}{=} \frac{1}{1 + \frac{2d}{\omega_0} \cdot s + \frac{1}{\omega_0^2} \cdot s^2}$$

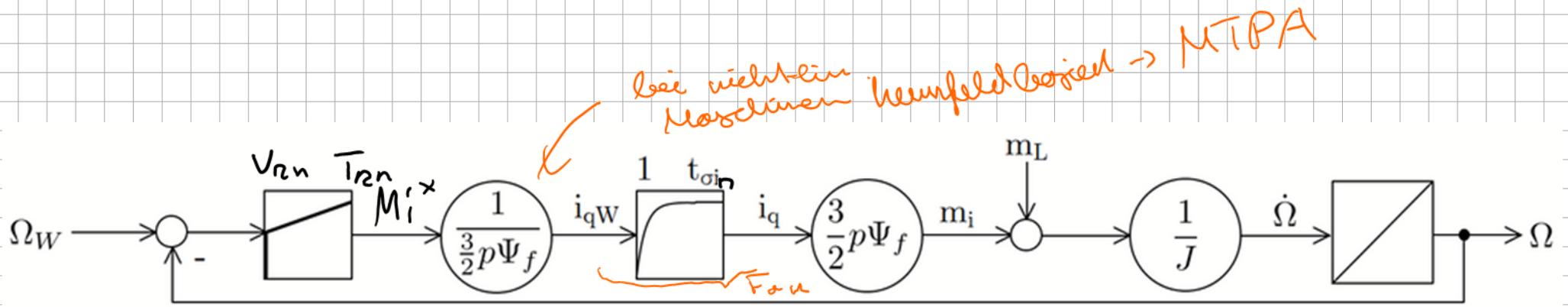
$$\Rightarrow d = \sqrt{\frac{R_s \cdot T_{Ri}}{V_{Ri} \cdot t_T}}$$

$$V_{Ri} = R_s \cdot \frac{I_s}{2T_f} = \frac{L_D}{2T_f} = \frac{235 \text{ m}\Omega \cdot 25,28 \text{ ms}}{2 \cdot 157,5 \mu\text{s}} = 15,84 \text{ V/A}$$

Ersatzzeitkonstante für Drehzahlregel -  
harris

$$T_{on} = 2 \cdot T_f = 375 \mu\text{s}$$





Strecke:  $G_S(s) = \frac{1}{J_M} \cdot \frac{1}{s}$

Stellglied:  $F_{oi}(s) = \frac{1}{1 + T_{oi} \cdot s}$  (PT2 - Glied der Stromregelstrecke gegenüber)

PI-Regler  $F_{Rn}(s) = \frac{1 + T_{Rn} \cdot s}{T_{Rn} \cdot s} \cdot V_{Rn}$

offener RK:  $F_0(s) = \frac{V_{Rn}}{T_{Rn}} \cdot \frac{1}{J_M} \cdot \frac{1 + T_{Rn} \cdot s}{1 + T_{oi} \cdot s} \cdot \frac{1}{s^2}$

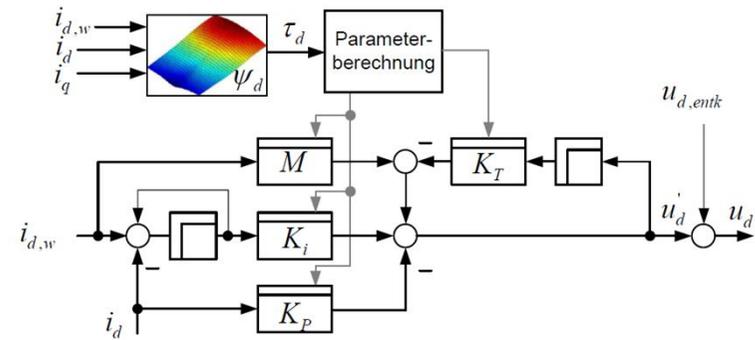
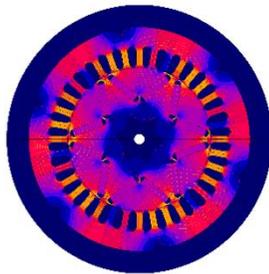
Einstellregeln für symmetrisches Optimum:

$V_{Rn} = \frac{3M}{T_{oi} \cdot a}$   $a = 2$  als Startwert für Optimierung

$= \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}}{375 \mu\text{s} \cdot 2} = 4,8 \frac{\text{Nm}}{\text{s}^{-1}}$

$$T_{2n} = a^2 T_{0n} = 4 \cdot 375 \mu s = 1,5 ms$$

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Benedikt Schmitz-Rode

0721 608-46251  
schmitz-ode@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Elektrotechnisches Institut (ETI)

KIT Campus Süd  
Geb. 11.10  
Engelbert-Arnold-Str. 5  
D-76131 Karlsruhe