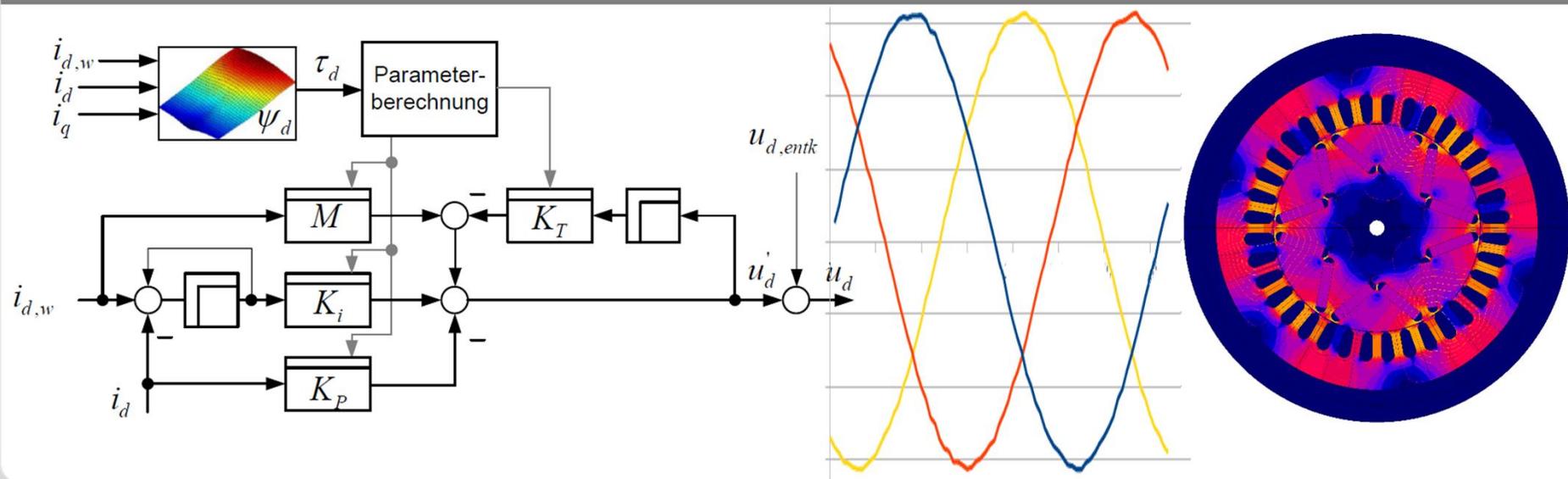


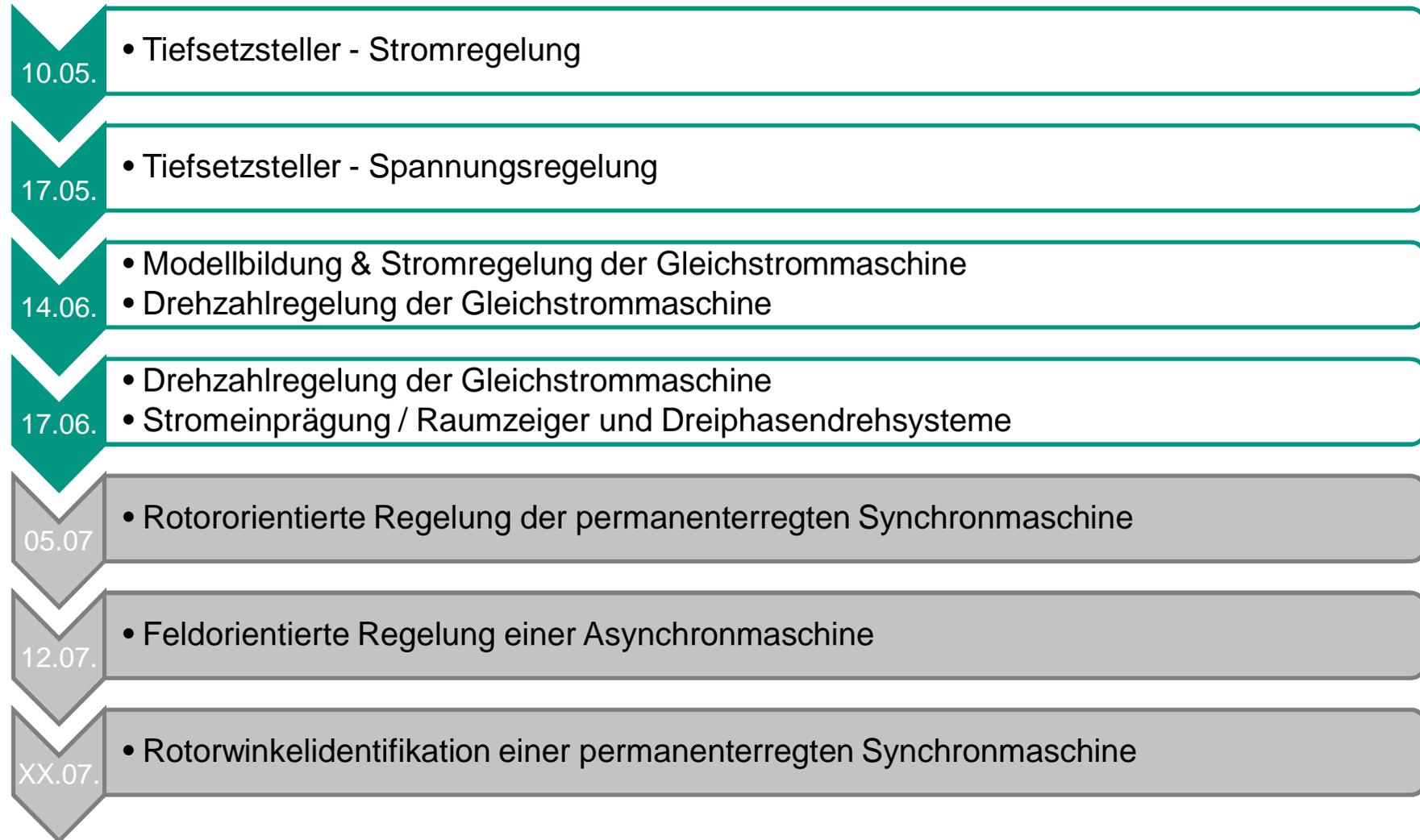
# Übung „Regelung leistungselektronischer Systeme“ SS22

## Übung 4 – Drehzahlregelung der GM / Stromeinprägung & Dreiphasensysteme

Elektrotechnisches Institut (ETI)  
Leistungselektronische Systeme



# Zeitleiste

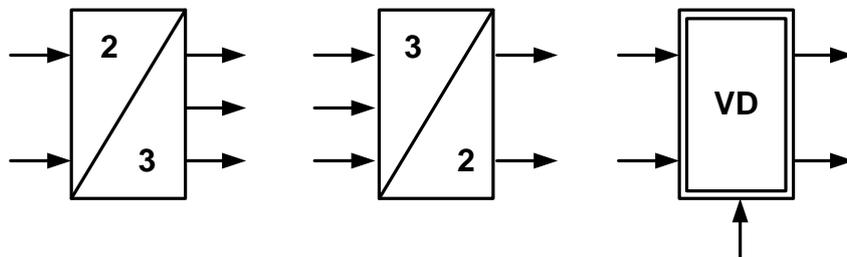


## 2 Stromeinprägung

Mit Hilfe einer gesteuerten Spannungsquelle (z. B. einem Spannungszwischenkreisumrichter) sollen Ströme in ein dreiphasiges symmetrisches Wicklungssystem (z. B. Maschinenstator) eingeprägt werden. Der Sollwert sei als Raumzeiger gegeben. Verzögerungen durch das Stellglied oder der Istwerterfassung können vernachlässigt werden. Die Kopplung der Wicklungen untereinander kann bei der Beschreibung mit Raumzeigern ebenfalls vernachlässigt werden.

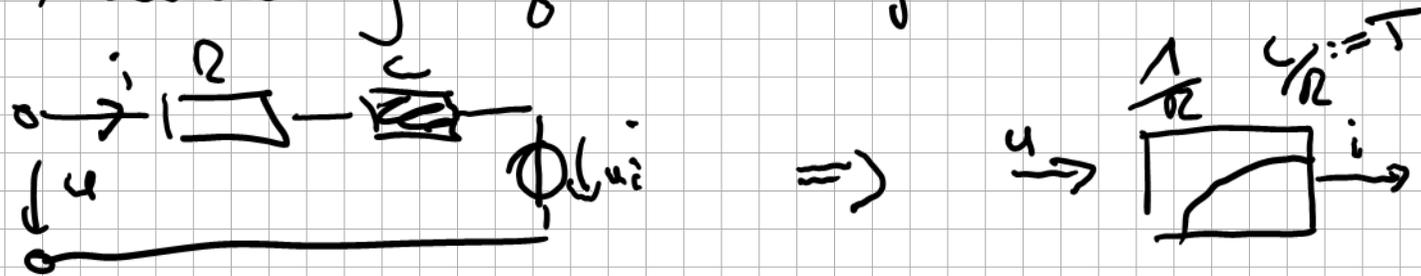
- Entwerfen Sie einen PI-Regler für eine einzelne Wicklung mit  $L = 1.9 \text{ mH}$  und  $R = 170 \text{ m}\Omega$  in der Art, dass die geregelte Strecke einem Sollwertsprung zehn Mal so schnell folgt, wie die unregelte Strecke einem Stellgrößensprung.
- Erweitern Sie die Anordnung um weitere zwei Wicklungen und verwenden Sie als Sollgröße einen Stromraumzeiger. Reduzieren Sie die Anzahl der Regler auf zwei: Einen für den Real- und einen für den Imaginärteil des Stromraumzeigers.
- Im Wicklungssystem soll jetzt ein Drehfeld erzeugt werden. Bei der Vorgabe eines rotierenden Stromsollraumzeigers weichen Amplitude und Phase der erzeugten Ströme auch nach längerer Zeit vom Sollwert ab. Dieses Problem soll gelöst werden, indem die Regler in einem rotierenden Koordinatensystem arbeiten. Ergänzen Sie dafür die Struktur.
- Der entstandene Regelkreis verhält sich möglicherweise schwerfälliger als erwartet. Korrigieren Sie die Struktur, um mit den gegebenen Reglern schnellstes Verhalten zu erreichen.

Hinweis: Benutzen Sie für die Strukturbilder  $2 \rightarrow 3$ -Wandler,  $3 \rightarrow 2$ -Wandler und Vektordreher.



a) PI-Regler für eine Wiedlung

1) Modellierung einzelner Strang



$$\text{PI-Regler: } F_R(s) = V_R \frac{T_R \cdot s + 1}{T_R \cdot s}$$

$$\begin{aligned} \text{Offener RK: } F_0(s) &= V_R \frac{T_R \cdot s + 1}{T_R \cdot s} \cdot \frac{1}{R} \frac{1}{1 + T \cdot s} \quad \text{mit } T_R = T \\ &= \frac{V_R}{T_R \cdot s} \cdot \frac{1}{R} \end{aligned}$$

Regelkreis schließen:

$$F_G(s) = \frac{1}{1 + F_0(s)} = \frac{1}{1 + \frac{T_R \cdot R}{V_R} \cdot s}$$

$\underbrace{\frac{T_R \cdot R}{V_R}}_{\text{Zeitkonstante } T_G}$

$$T_u \stackrel{!}{=} 1/10 \cdot T \quad \leadsto \quad \frac{T}{V_R \frac{1}{R}} = 1/10 \cdot T$$

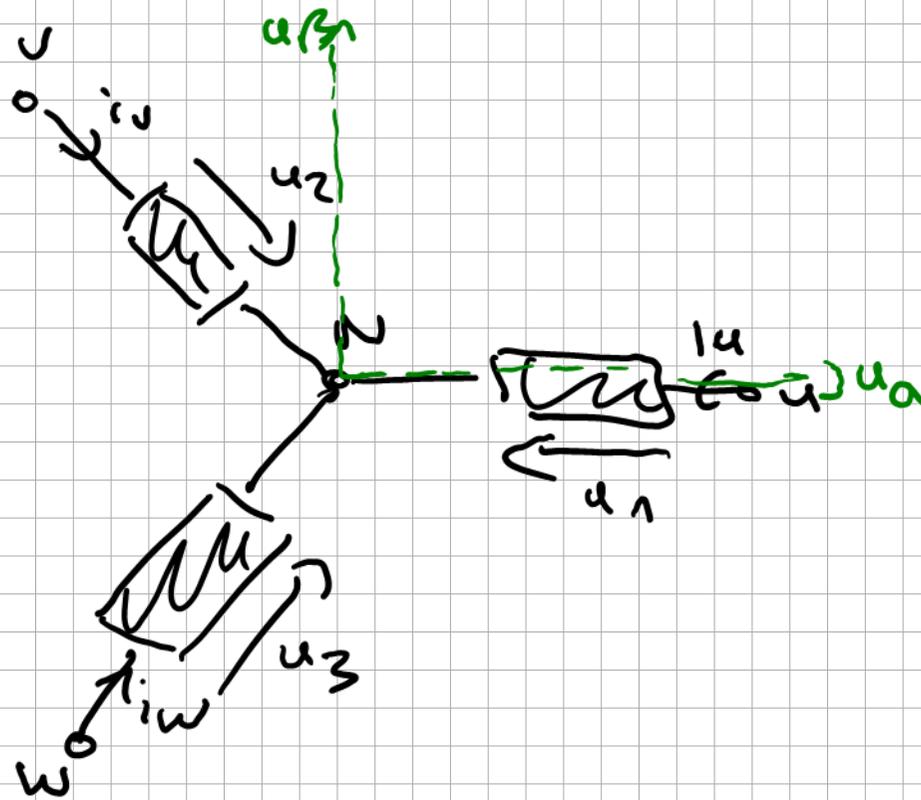
$$\rightarrow V_R = 10 \cdot R = 10 \cdot 0,17 = 1,7 \frac{V}{A}$$

a) Regelung mit 3. Strängen

Bei Stenverschalteten Maschinen:

$$\dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3 = 0$$

$\Rightarrow$  3 Ströme nicht unabh. voneinander  
 $\rightarrow$  nur zwei Regler erforderlich



$$u_1 = \hat{u} \cdot \cos(\omega t) = \hat{u} \cdot e^{j0}$$

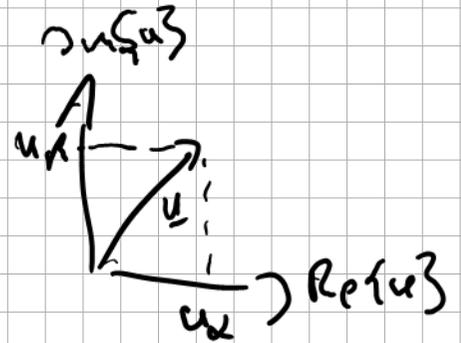
$$u_2 = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = \hat{u} e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$u_3 = \hat{u} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = \hat{u} e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

Rechnungsgang  $\underline{u} = \frac{2}{3} \left( u_1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} u_2 + e^{j\frac{4\pi}{3}} u_3 \right)$  mit  $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

$$= \frac{2}{3} (u_1 + \underline{a} u_2 + \underline{a}^2 u_3)$$

$$= u_\alpha + j u_\beta$$



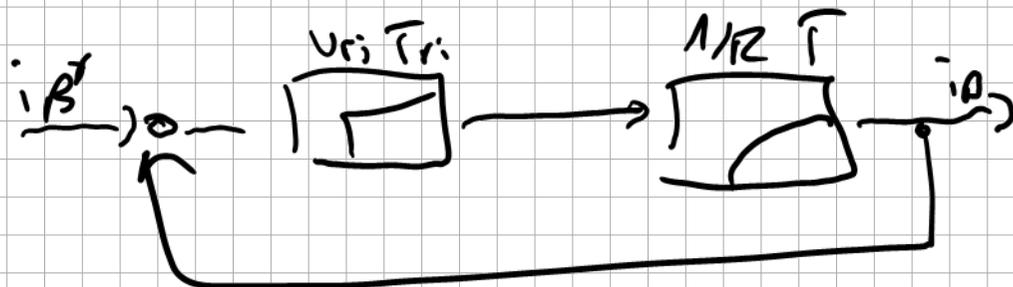
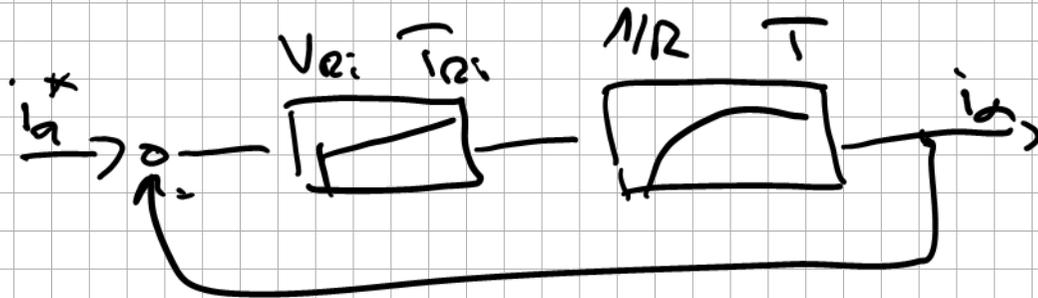
Ansatz für Strecke

$$u_x = L \frac{di_x}{dt} + R \cdot i_x \quad \text{mit } x=1,2,3$$

$$\underline{u} = \frac{2}{3} (u_1 + \underline{a} u_2 + \underline{a}^2 u_3) = u_\alpha + j u_\beta$$

$$= L \cdot \frac{di_\alpha}{dt} + R \cdot i_\alpha + j \left( L \frac{di_\beta}{dt} + R \cdot i_\beta \right)$$

=> gleiche Streckenparameter => gleiche Regler!



## Ableitung der Amplitude

Übertragungsfunktion des geschlossenen RLK ein Tiefpass:

$$F_G = \frac{1}{1 + \frac{T_{ei} \cdot R}{V_{ri}} \cdot s} \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{10} \cdot s}$$

Im eingeschwenkten Zustand darf  $s = j\omega$  gesetzt werden:

$$\text{Amplitude } |F_G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{10}\right)^2 \omega^2}} = 0,943 \neq 1$$

$\omega = 20 \cdot 30 \text{ Hz}$

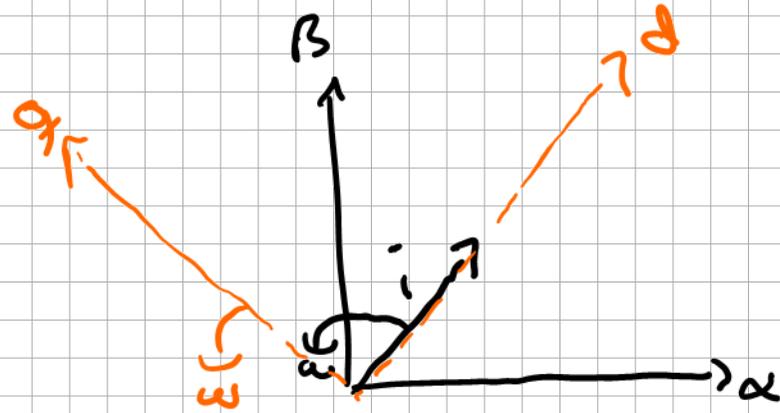
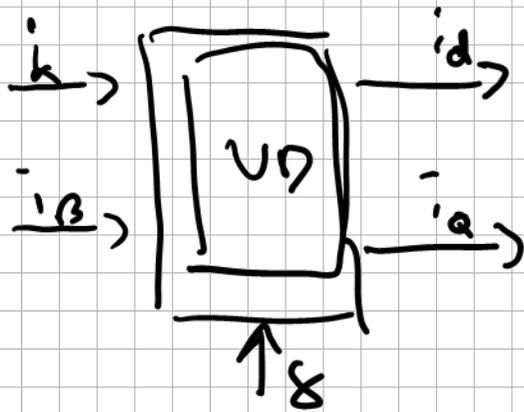
$$\text{Phase } \angle F_G(j\omega) = -\arctan\left(\omega \cdot \frac{1}{10}\right) = 0,338 \text{ rad} = \omega \cdot \Delta t$$
$$= 19,4^\circ$$

$$\Rightarrow \Delta t = 1,1 \text{ ms}$$

Fazit: Tiefpassverhalten sorgt für unvermeidliche Ableitungen

→ Vermeidung von Wechselgrößen durch Regelung  
in einem rotierenden VOS!

$$\underline{i} = i_\alpha + j i_\beta = i_{\alpha\beta} e^{-j\gamma}$$



d) Ausgangspunkt: Strecke im alpha-beta-System

$$U_{\alpha\beta} = L \frac{d i_{\alpha\beta}}{dt} + R i_{\alpha\beta}$$

unterer Vektorchiefer (Rücktrafo)

$$\underline{i}_{dq} = \underline{i}_{\alpha\beta} e^{-j\gamma} \quad \rightarrow \quad \underline{i}_{\alpha\beta} = \underline{i}_{dq} e^{j\gamma}$$

$$\underline{u}_{\alpha\beta} = L \cdot \frac{d}{dt} (\underline{i}_{0a} e^{j\gamma}) + R \cdot (\underline{i}_{0a} \cdot e^{j\gamma})$$

$$= \underbrace{\left( L \cdot \frac{d}{dt} \underline{i}_{0a} + R \underline{i}_{0a} \right)}_{\text{Spannungsteil durch Stromänderung}} e^{j\gamma} + \underbrace{j \left( L \cdot \underline{i}_{0a} \cdot \dot{\gamma} \cdot e^{j\gamma} \right)}_{\text{Spannungsteil durch Winkeländerung}}$$

Spannungsteil  
durch  $\dot{I}$  Änderung

Spannungsteil durch  
Winkeländerung

Oberer Vektorblocker („Hin-Trafo“) für Regler

$$\underline{u}_{0e} = \underline{u}_{\alpha\beta} \cdot e^{-j\gamma}$$

$$= \underbrace{\left( L \cdot \frac{d}{dt} \underline{i}_{0a} + R \cdot \underline{i}_{0a} \right)}_{\text{erwartete Strecke}} + \underbrace{j \cdot L \cdot \underline{i}_{0a} \cdot \dot{\gamma}}_{\text{zu homogenisierender Teil}}$$

erwartete Strecke

zu homogenisierender Teil

Zerlegung in Real- und Imaginärteil

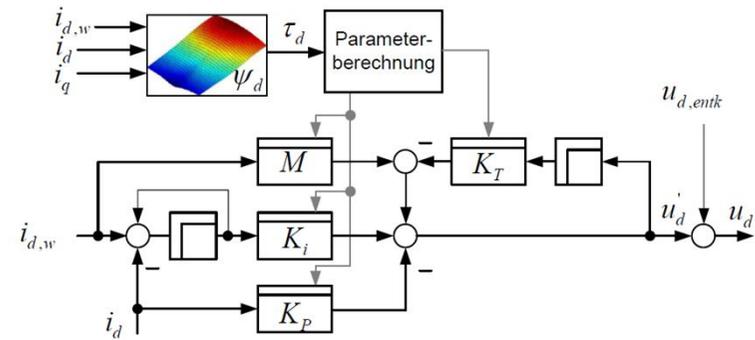
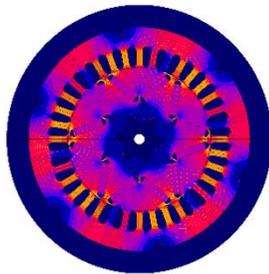
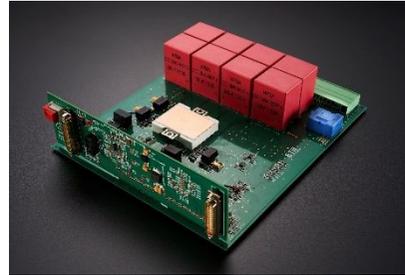
$$u_D = L \cdot \frac{d}{dt} i_D + R \cdot i_D - L \cdot i_Q \cdot \dot{\gamma}$$

$$u_Q = L \cdot \frac{d}{dt} i_Q + R \cdot i_Q + L \cdot i_D \cdot \dot{\gamma}$$

bekannte Struktur

Entkopplung!

# 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