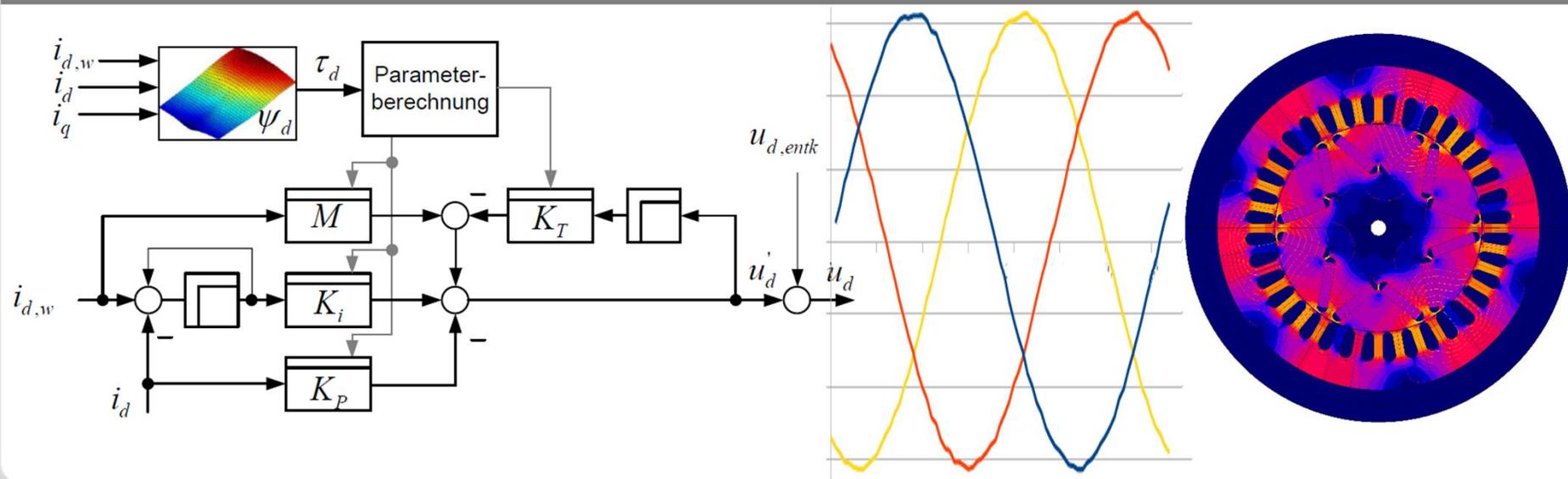


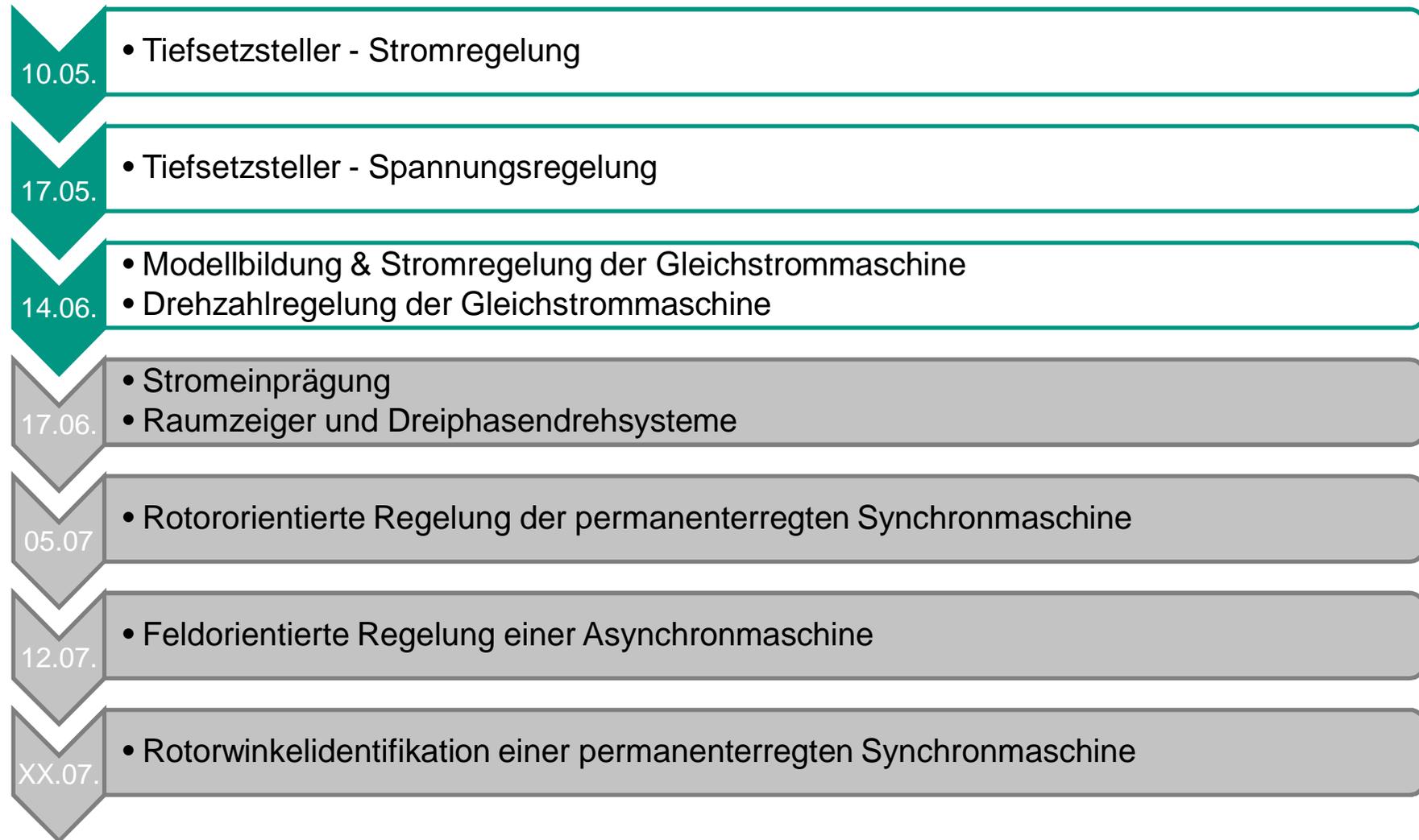
Übung „Regelung leistungselektronischer Systeme“ SS22

Übung 3 – Regelung der Gleichstrommaschine

Elektrotechnisches Institut (ETI)
Leistungselektronische Systeme



Zeitleiste



2 Drehzahlgeregelte Gleichstrommaschine

Eine mit Nennfluß fremderregte Gleichstrommaschine (GM) wird über einen selbstgeführten Stromrichter (Vierquadrantensteller) aus einem Gleichspannungszwischenkreis gespeist, welcher seine Energie über einen netzseitigen selbstgeführten Stromrichter (Active-Front-End) aus dem Drehstromnetz bezieht. Die GM soll in der Drehzahl geregelt werden, wozu eine quasikontinuierlich ausgelegte Kaskadenregelung mit unterlagertem Stromregelkreis benutzt werden soll. Die Regelung des Umrichters erfolgt mit einem digitalen Signalprozessor (DSP), welcher periodisch alle $t_{TR} = 125\mu\text{s}$ neue Sollwerte berechnet und diese an den Vierquadrantensteller ausgibt. Die mittlere Totzeit des Vierquadrantenstellers beträgt $t_{TSG} = \frac{t_{TR}}{2}$.

Die Daten der Maschine sind:

$$\text{Nennspannung} \quad U_{AN} = 250 \text{ V} \quad (2.1)$$

$$\text{Nennstrom} \quad I_{AN} = 50 \text{ A} \quad (2.2)$$

$$\text{Ankerwiderstand} \quad R_A = 750 \text{ m}\Omega \quad (2.3)$$

$$\text{Ankerinduktivität} \quad L_A = 10 \text{ mH} \quad (2.4)$$

$$\text{Trägheitsmoment} \quad J = 0.15 \text{ Ws}^3 \quad (2.5)$$

$$\text{Nennzahl} \quad n_N = 1600 \text{ min}^{-1} \quad (2.6)$$

Entwerfen Sie Strom- und Drehzahlregler für diesen Antrieb.

- Zeichnen sie das Schaltbild des Antriebssystems
- Ermitteln Sie aus den Modellgleichungen der Gleichstrommaschine das Strukturmodell und die Übertragungsfunktion des Ankerstroms $\frac{i_A}{u_A}(s)$. Berechnen Sie die Ankerkreiszeitkonstante T_A und die elektromechanische Zeitkonstante T_M , die sich aus der Übertragungsfunktion ablesen lassen. Ermitteln Sie eine vereinfachte Übertragungsfunktion, in der Sie die induzierte Spannung als Störgröße auffassen, und vergleichen Sie sie mit der zuerst ermittelten Übertragungsfunktion.
- Wählen Sie einen geeigneten Stromregler für die vereinfachte Strecke unter Beachtung der Totzeiten von Umrichter und Signalverarbeitung. Berechnen Sie die Reglerparameter für eine Dämpfung von $d = \frac{1}{\sqrt{2}}$ des geschlossenen Regelkreises. Wie groß ist die Ersatzzeitkonstante für eine Näherung des geschlossenen Regelkreises durch ein PT_1 -Glied?
- Untersuchen Sie die Vernachlässigung der induzierten Spannung auf den Reglerentwurf. Ist der entstandene geschlossene Regelkreis stationär genau?
- Entwerfen sie den Drehzahlregelkreis nach dem symmetrischen Optimum. Wie können sie das Überschwingen bei einem Sollwertsprung dämpfen?

- f) Zur Verhinderung von Regler-Windup und zur sicheren Inbetriebnahme des Systems sollen geeignete Begrenzungen für das elektrische Moment $M_{i,max}$, dem maximalen Ankerstrom $I_{A,max}$ und der maximalen Ankerspannung $U_{A,max}$ ergänzt werden. Vervollständigen sie dazu das Strukturbild aus dem vorherigen Aufgabenteil.

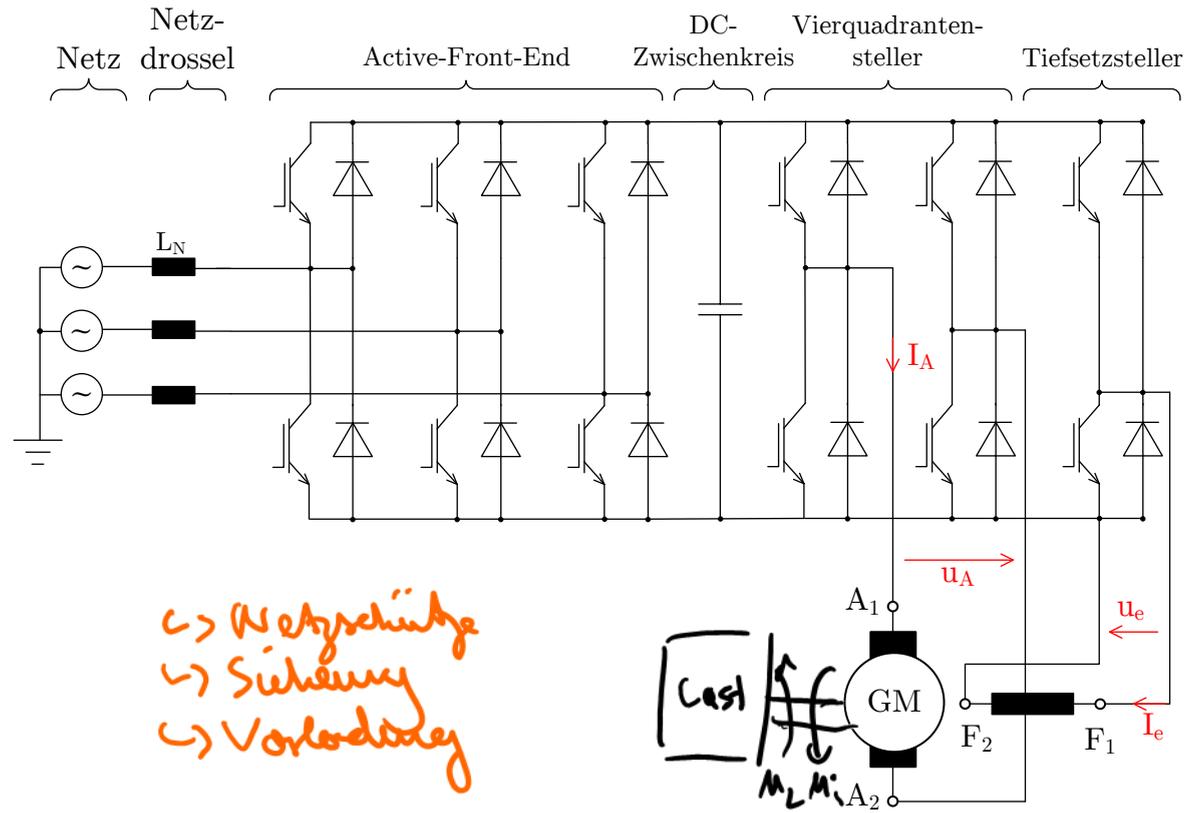
Literatur

Föllinger, „Regelungstechnik, Einführung in ihre Methoden und ihre Anwendung

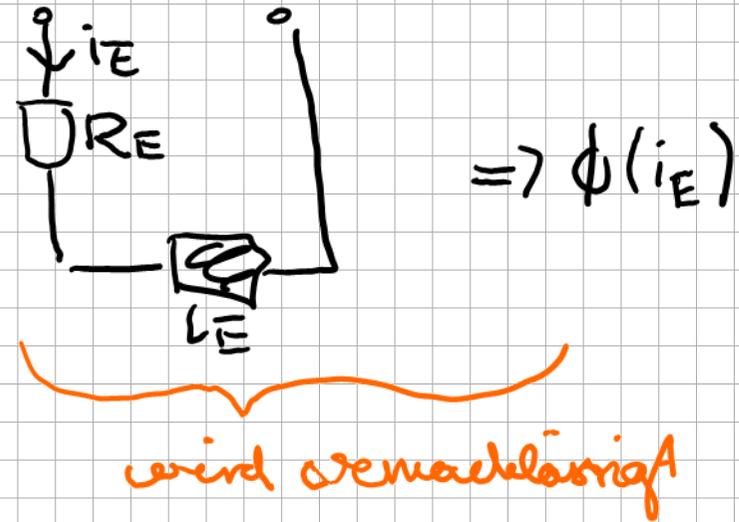
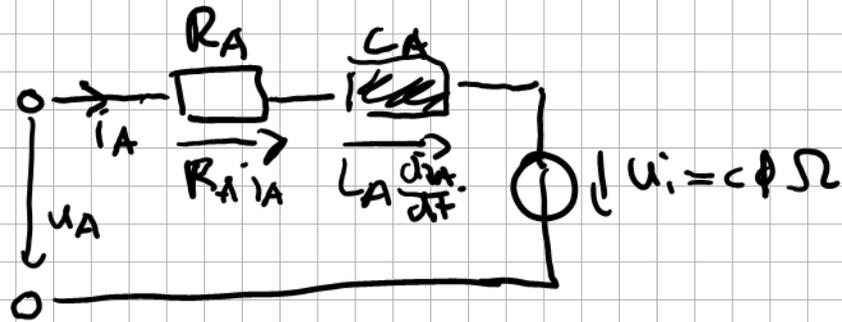
Schröder, „Elektrische Antriebe Regelung von Antriebssystemen

Kiencke, Jäkel, „Signale und Systeme

a)



2) Modellbildung GM



$$U_A = R_A i_A + L_A \cdot \dot{i}_A + U_i$$

$$= R_A i_A + L_A \dot{i}_A + c \phi \Omega$$

} *elektr.*

$$M_i = c \phi i_A$$

$$M_i - M_L = J_M \cdot \dot{\Omega}$$

} *elektromech. Gleichung*

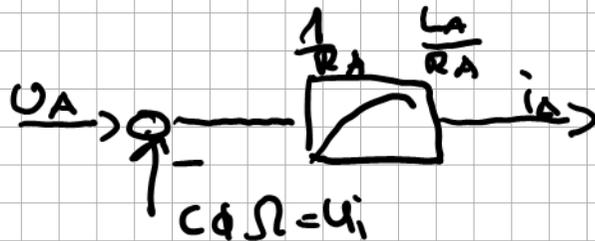
Übertragungsfunktion aufstellen

$$(I) \rightarrow \mathcal{L}(s) : s \cdot i_A = \frac{U_A}{L_A} - \frac{R_A}{L_A} i_A - \frac{c\phi}{L_A} \Omega$$

$$(II) \rightarrow \mathcal{L}(s) : s \cdot \Omega = \frac{c\phi}{J_M} \cdot i_A - \frac{1}{J_M} M_c$$

$$\rightarrow \Omega = \frac{1}{s} \left(\frac{c\phi}{J_M} \cdot i_A - \frac{1}{J_M} \cdot M_c \right) \quad (III)$$

→ Bleib in Strichbild → PTA



$$\text{Def. } T_A = \frac{L_A}{R_A}$$

$$s \cdot i_A = \frac{1}{L_A} \cdot U_A - \frac{1}{T_A} i_A - \frac{c\phi}{L_A} \cdot \Omega \quad (IV)$$

$$\text{III} \wedge \text{IV} \quad s \cdot i_A = \frac{1}{L_A} u_A - \frac{1}{T_A} i_A - \frac{1}{s} \frac{(c\phi)^2}{3M L_A} i_A - \frac{1}{s} \frac{c\phi}{L_A} 3M \cdot M_L$$

auflösen und auf H-N bringen:

$$i_A = \frac{\frac{1}{s} \frac{c\phi}{L_A} \cdot \frac{1}{3M} \cdot M_L + \frac{1}{L_A} \cdot u_A}{s + \frac{1}{T_A} + \frac{1}{s} \frac{(c\phi)^2}{3M L_A}}$$

$$L_A = R_A T_A$$

$$\Leftrightarrow i_A = \frac{\frac{1}{s} \frac{c\phi}{R_A T_A} 3M \cdot M_L + \frac{1}{R_A T_A} \cdot u_A}{s + \frac{1}{T_A} + \frac{1}{s} \frac{(c\phi)^2}{3M R_A T_A}}$$

$$\Leftrightarrow i_A = \frac{\frac{M_L}{c\phi} + s \cdot \frac{3M}{(c\phi)^2} \cdot u_A}{s^2 \frac{3M R_A T_A}{(c\phi)^2} + s \cdot \frac{3M R_A}{(c\phi)^2} + 1}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{:= T_M}$ elektromechanische Zeitkonstante

$$i_A = \frac{\frac{T_M}{R_A} \cdot s \cdot U_A}{T_M T_A s^2 + T_M s + 1} + \frac{\frac{M_C}{c t}}{T_M T_A s^2 + T_M s + 1}$$

Übertragungsfunktion

S Störverhalten → Modellierung
Rechenwirkung Last auf Anlenkstrom

$$G(s) = \frac{i_A}{U_A} = \frac{T_M}{R_A} \frac{s}{T_M T_A s^2 + T_M s + 1} \quad | T_M, s \text{ kürzen}$$

$$= \frac{1}{R_A} \cdot \frac{1}{T_A s + 1 + \frac{1}{T_M s}} \quad T_M \gg T_A$$

$$\approx \frac{1}{R_A} \frac{1}{T_A s + 1}$$

↖ Rechenwirkung Drehzahländerung

Zellenergie berechnen:

$$\text{Ankerkreiszeitkonstante: } T_A = \frac{L_A}{R_A} = \frac{10 \text{ mH}}{750 \text{ m}\Omega} = 13,3 \text{ ms}$$

$$\text{Elektromech. Zeitkonstante: } T_M = \frac{3 \mu R_A}{(c\phi)^2}$$

$$c\phi_N = \frac{U_{AN} - R_A I_{AN}}{\Omega_N} = \frac{250 \text{ V} - 750 \text{ m}\Omega \cdot 50 \text{ A}}{1600 \frac{\text{A}}{\text{min}} \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}} = 1,27 \text{ Vs}$$

$$T_M = \frac{0,15 \text{ Ws}^3 \cdot 750 \text{ m}\Omega}{(1,27 \text{ Vs})^2} = 69,9 \text{ ms}$$

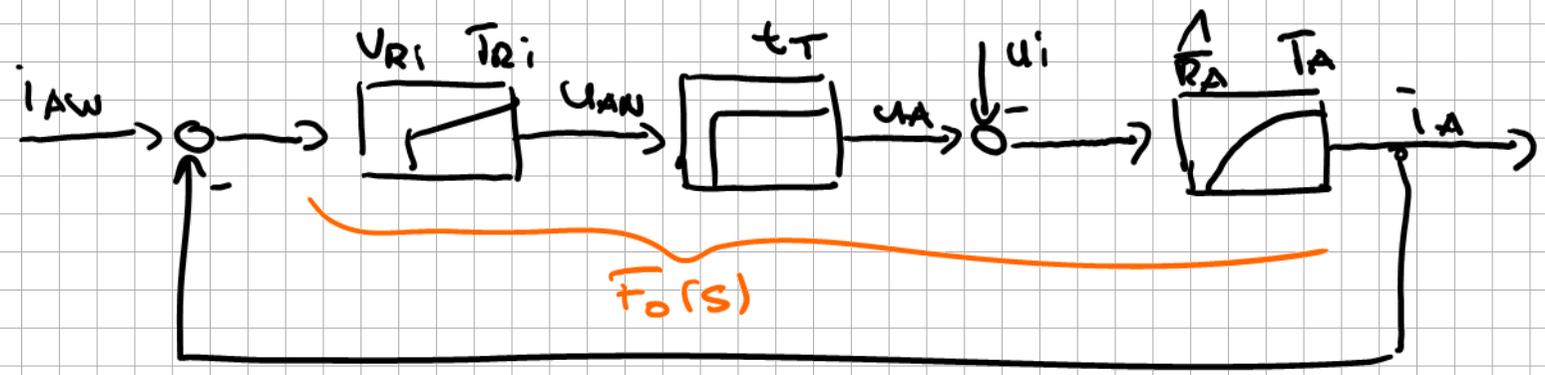
$$\rightarrow T_M \approx 5 \cdot T_A$$

vereinfachtes elektrisches Strichmodell



$$i_A = \frac{\frac{1}{R_A} \cdot u_A}{1 + T_A \cdot s} - \frac{\frac{1}{R_A} u_i}{1 + T_A \cdot s}$$

c) Stromregler mit vereinfachter Strecke und u_i als Störgröße



$$\text{Maschine: } G_S(s) = \frac{1}{R_A} \cdot \frac{1}{1 + T_A \cdot s}$$

$$\text{umwickeltes Totzeit: } G_T(s) = e^{-s t_{TSG}} \cdot e^{-s t_{TR}} = e^{-s(t_{TSG} + t_{TR})}$$

$$t_T = t_{TSG} + t_{TR} = 3/2 t_{TR}$$

$$G_T(s) = \frac{1}{1 + t_T \cdot s}$$

$$\text{Regler: PI-Regler: } F_R(s) = \bar{U}_{ri} \cdot \frac{1 + T_{ri} \cdot s}{T_{ri} \cdot s} = U_{ri} \left(1 + \frac{1}{T_{ri} \cdot s} \right)$$

$$\text{offener RK: } F_0(s) = F_R(s) \cdot G_T(s) \cdot G_S(s)$$

$$= \frac{U_{ri}}{T_{ri} \cdot s} \cdot \cancel{(1 + T_{ri} \cdot s)} \cdot \frac{1}{1 + t_T \cdot s} \cdot \frac{1}{R_A} \cdot \frac{1}{\cancel{1 + T_A \cdot s}}$$

$$\text{mit } \boxed{T_{ri} = T_A}$$

$$\bar{F}_q(s) = \frac{\bar{F}_0(s)}{1 + \bar{F}_0(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\bar{F}_0(s)}}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{T_{ri} R_A}{V_{ri}} \cdot s + \frac{T_{ri} R_A \cdot t_T}{V_{ri}} \cdot s^2}$$

$$\text{PTZ: } G(s) = \frac{K}{1 + \frac{2d s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}}$$

Kenntnisse des PTZ-Verhaltens des geschl. TK

$$\text{Resonanzfrequenz } \omega_0 = \sqrt{\frac{V_{ri}}{R_A \cdot t_T \cdot T_{ri}}}$$

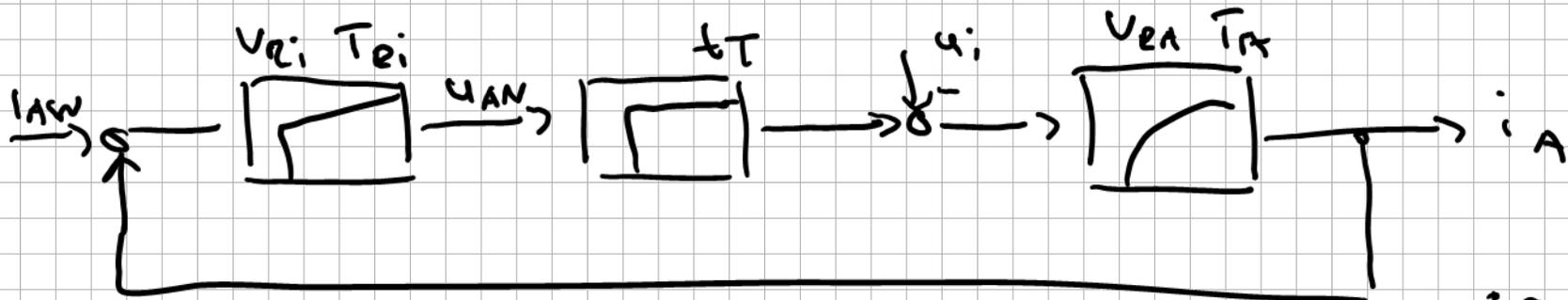
$$\text{Dämpfung: } d = \frac{1}{2} \omega_0 \frac{R_A T_{ri}}{V_{ri}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_{ri}}{R_A \cdot t_T \cdot T_{ri}}} \cdot \frac{R_A \cdot T_{ri}}{V_{ri}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_A T_{ri}}{V_{ri} t_T}}$$

$$d \stackrel{!}{=} \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow V_{ri} \text{ festlegen, } T_{ri} = T_A$$

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_A T_{2i}}{U_{2i} t_T}} \rightarrow U_{ei} = \frac{1}{2} \frac{R_A T_{2i}}{t_T} = \frac{1}{2} \frac{T_A R_A}{\epsilon_T}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{L_A}{\epsilon_T}$$

Ersatzzeitkonstante Stromregelkreis für Drehzahlregelkreis



:= PT2-Glied



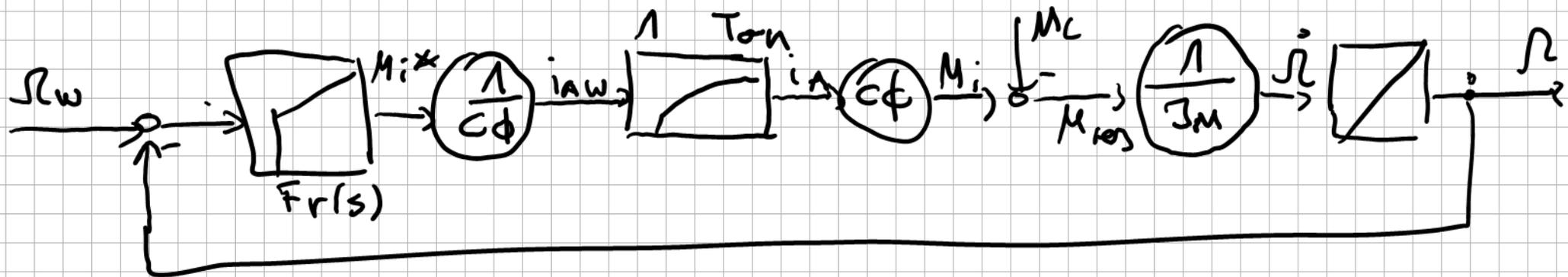
$$F_{on}(s) = \frac{1}{1 + \frac{2d}{\omega_0} s + \frac{1}{\omega_0^2} s^2} = \frac{1}{1 + 2t_T s + 2t_T^2 s^2}$$

$$\approx \frac{1}{1 + 2t_T \cdot s}$$

↗ Näherung für kleine Frequenzen
 $s = j\omega$

⇒ Ersatzzeitkonstante $T_{on} = 2t_T = 37.5 \mu s$

e) Drehzahlregelkreis



Gleichung nach System : $M_i \cdot i_A - M_c = M_{res} = J_M \dot{\Omega}$

$$\frac{\Omega}{M_{res}} = \frac{1}{J_M} \cdot \frac{1}{s}$$

Stellglied : $F_{on}(s) = \frac{i_A}{i_{AW}} = \frac{1}{1 + T_m \cdot s}$

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

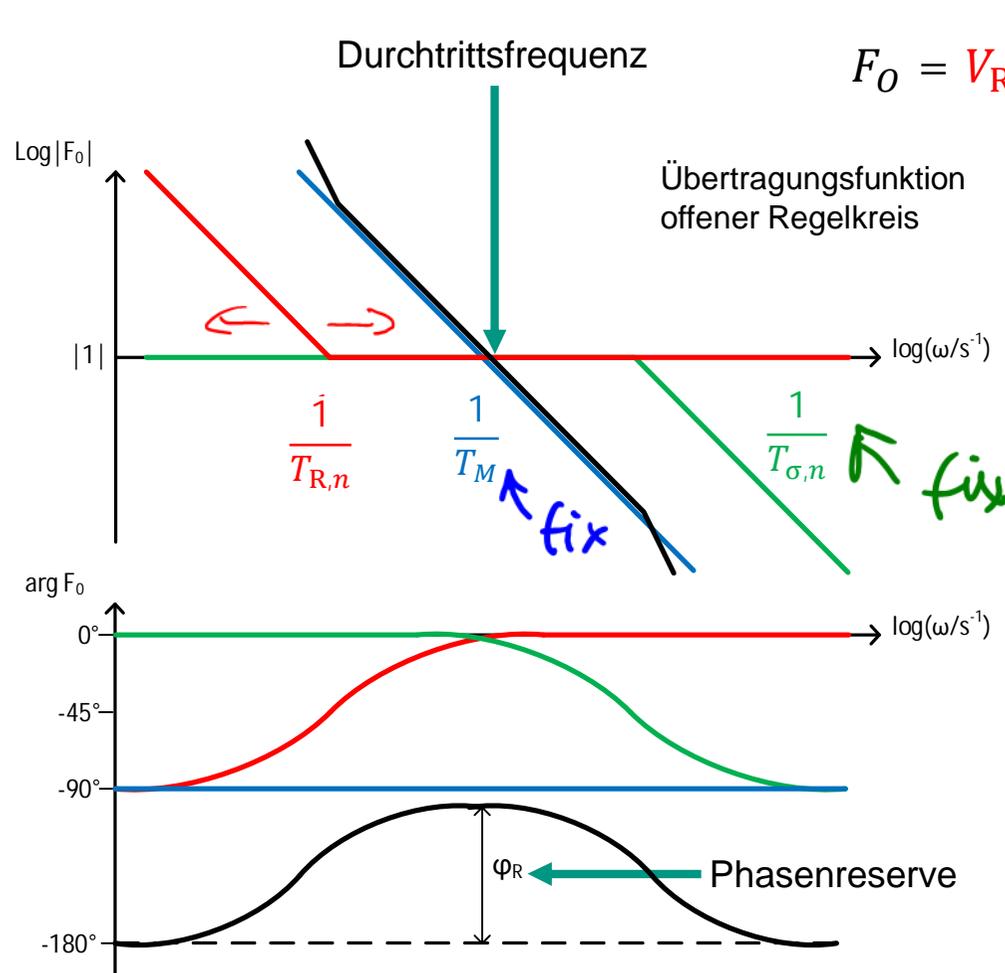
$$F_0(s) = V_{RN} \frac{1 + T_{RN} \cdot s}{T_{RN} \cdot s} \cdot \frac{1}{1 + T_{\sigma N} \cdot s} \cdot \frac{1}{J_m} \cdot \frac{1}{s}$$

$$\approx \frac{V_{RN}}{T_{RN}} \frac{1}{J_m} \frac{1 + T_{RN} \cdot s}{1 + T_{\sigma N} \cdot s} \cdot \frac{1}{s^2}$$

⇒ keine direkte Kompensation möglich, da $\frac{1}{s^2}$ -Term

⇒ Regler muss Stabilität sicherstellen!

Offener Regelkreis



$$F_0 = V_{R,n} \cdot \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_{R,n}} \right) \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_{\sigma,n}} \cdot \frac{1}{s \cdot J_M}$$

PI-Regler geschlossener Stromregelkreis Mech. Strecke

Durchschnittsfrequenz: $\omega_D = \sqrt{\frac{1}{T_{RN}} \cdot \frac{1}{T_{ON}}} \quad (\text{geom. Mittel})$

Betrag der Durchtrittsfrequenz ω_D

$$|F_0(j\omega_D)| = \frac{V_{RN}}{T_{RN} \cdot \beta_M} \cdot \frac{1}{\omega_D^2} \cdot \frac{\sqrt{1 + T_{RN}^2 \omega_D^2}}{\sqrt{1 + T_{ON} \omega_D^2}} \stackrel{!}{=} 1 \quad (0 \text{ dB})$$

$$V_{RN} = T_{RN} \cdot \beta_M \cdot \omega_D^2 \cdot \frac{\sqrt{1 + T_{ON}^2 \omega_D^2}}{\sqrt{1 + T_{RN}^2 \omega_D^2}}$$

ω_D einsetzen: $V_{RN} = T_{RN} \cdot \beta_M \cdot \frac{1}{T_{RN} T_{ON}} \cdot \frac{\sqrt{1 + T_{ON}^2 \frac{1}{T_{RN} T_{ON}}}}{\sqrt{1 + T_{RN}^2 \frac{1}{T_{RN} T_{ON}}}}$

$$V_{RN} = \frac{\beta_M \sqrt{1 + \frac{T_{ON}}{T_{RN}}}}{T_{ON} \sqrt{1 + \frac{T_{RN}}{T_{ON}}}}$$

Verhalten T_{2n} zu T_{0n} allgemein

$$T_{2n} = a^2 T_{0n}$$

$$a > 1$$

$$V_{2n} = \frac{I_M \sqrt{1 + \frac{1}{a^2}}}{T_{0n} \sqrt{1 + a^2}} = \frac{I_M}{a \cdot T_{0n}}$$

$$a \sqrt{\frac{1}{a^2} + 1}$$

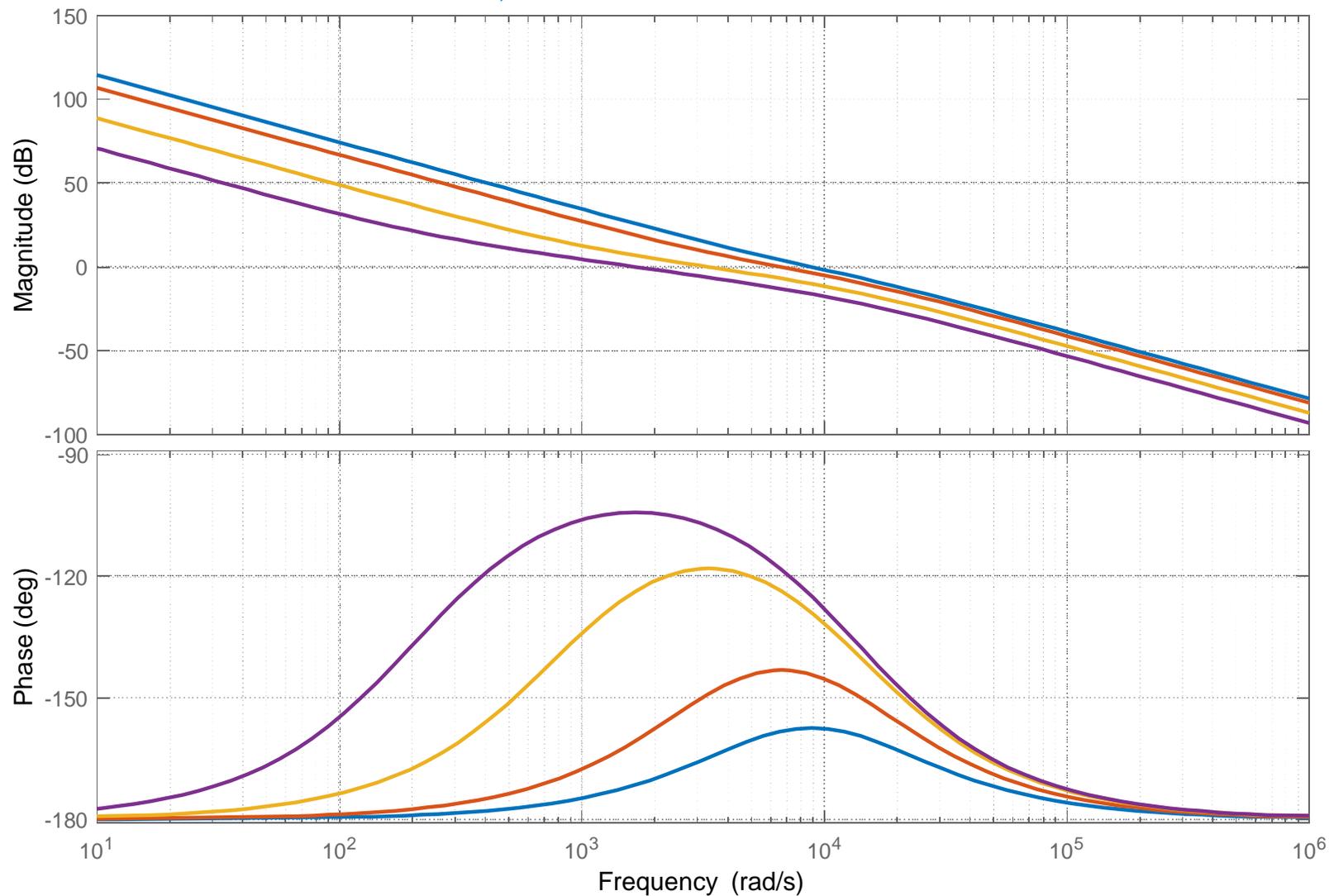
mit $a=2$
→ Spannungliches
Optimum

mit $a=2$: $T_{2n} = 4 T_{0n} = 1,5 \text{ ms}$

$$V_{2n} = \frac{I_M}{T_{0n} \cdot a} = 200 \text{ Ws}^2 = 200 \frac{\text{Nm}}{\text{s}^{-1}}$$

Offener Regelkreis - Bodediagramm

$\alpha = 1,5$ $\alpha = 2$ $\alpha = 4$ $\alpha = 8$



Problem: großer Überschwinger bei Führungsgrößenprung

$$F_{GW}(s) = \frac{1}{1 + F_0(s)} = \frac{1}{1 + \frac{T_{zn} \cdot J_M}{V_{zn}} \cdot \frac{1 + T_{on} \cdot s}{1 + T_{zn} \cdot s} \cdot s^2}$$

$$= \frac{1 + T_{zn} \cdot s}{1 + T_{zn} \cdot s + \frac{T_{zn} \cdot J_M}{V_{zn}} s^2 + \frac{T_{zn} \cdot J_M}{V_{zn}} s^3}$$

PD-Verhalten

→ Kompensation PD-Verhalten in Sollwertpfad durch
PI-1-Glied



$$F_{WF} = \frac{1}{1 + T_{zn} \cdot s} = \frac{1}{1 + a^2 T_{on} \cdot s}$$

Führgrößenfilter

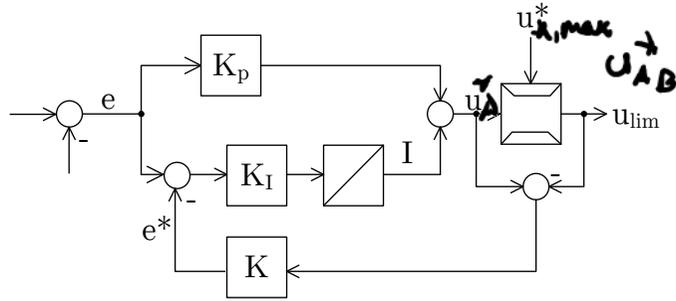
g) Anti Wind-Up

$$(I) \quad e - e^* \stackrel{!}{=} 0 \quad \Leftrightarrow \quad e - \underbrace{k(u_A^* - u_{AB}^*)}_{=1} \stackrel{!}{=} 0$$

$$(II) \quad u_A^* = e \cdot k_p + I$$

$$\Leftrightarrow k = \frac{e}{u_A^* - u_{AB}^*}$$

$$\Leftrightarrow e = \frac{u_A^* - I}{k_p}$$



$$(I+II) \quad k = \frac{u_A^* - I}{k_p (u_A^* - u_{AB}^*)} = \frac{u_A^* - I}{u_A^* - u_{AB}^*} \cdot \frac{1}{k_p} \rightarrow I \stackrel{!}{=} u_{AB}^*$$

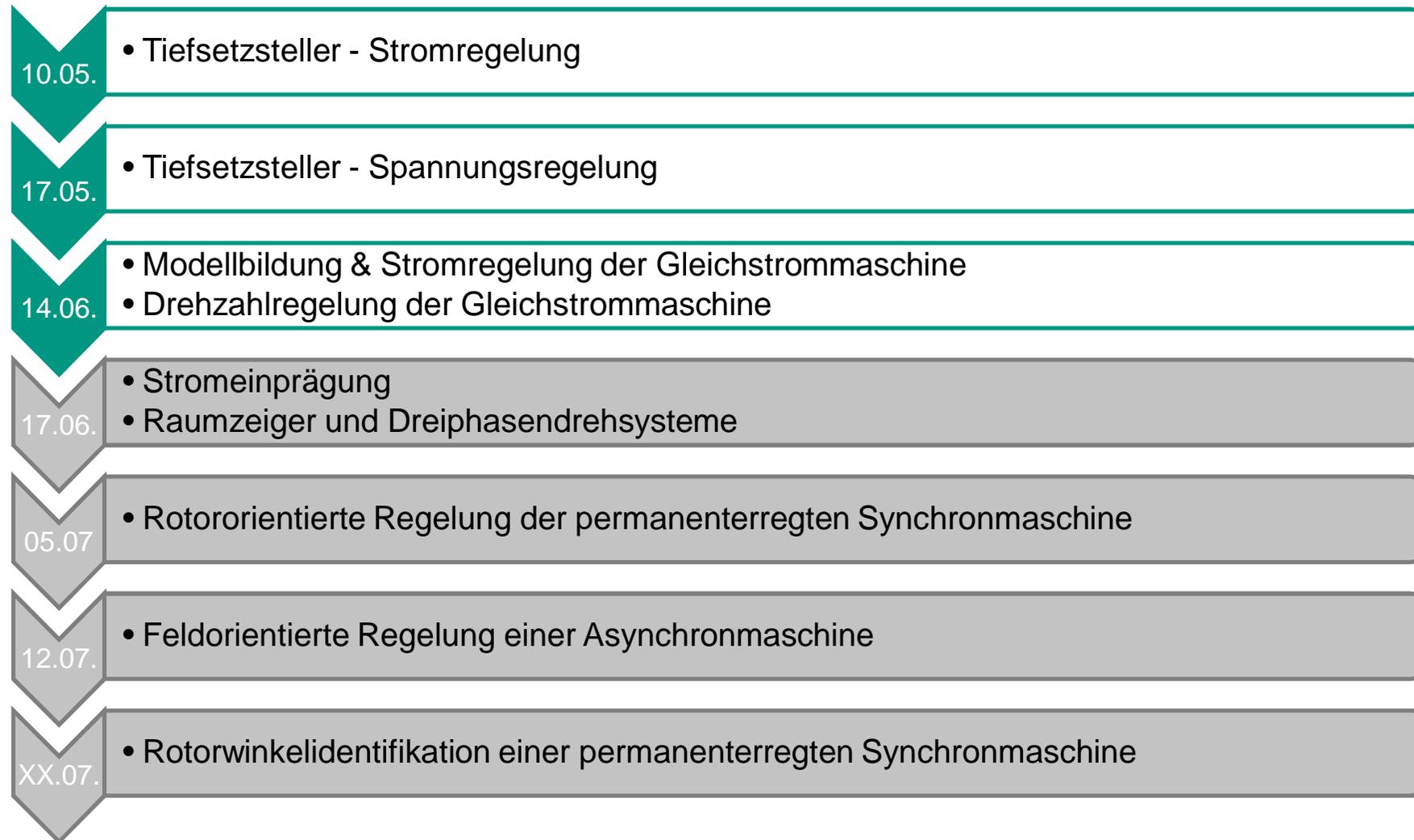
$$k = \frac{1}{k_p} = \frac{1}{v_{en}}$$

Evaluation

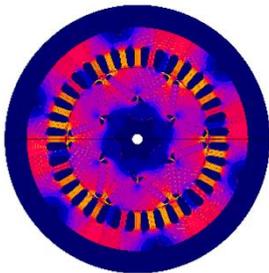
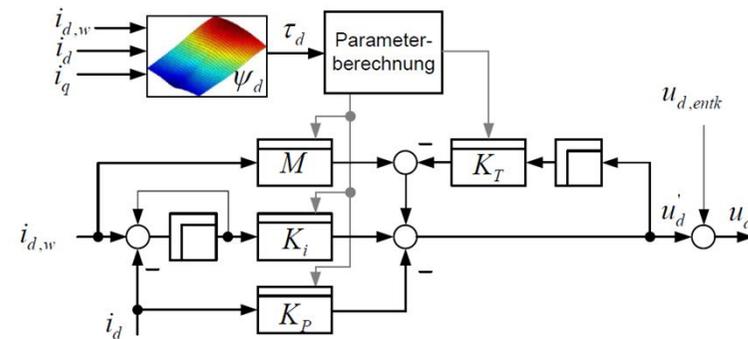


<https://tinyurl.com/56mhau6p>

Zeitleiste



Übung – Regelung leistungselektronischer Systeme



Benedikt Schmitz-Rode

0721 608-46521
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