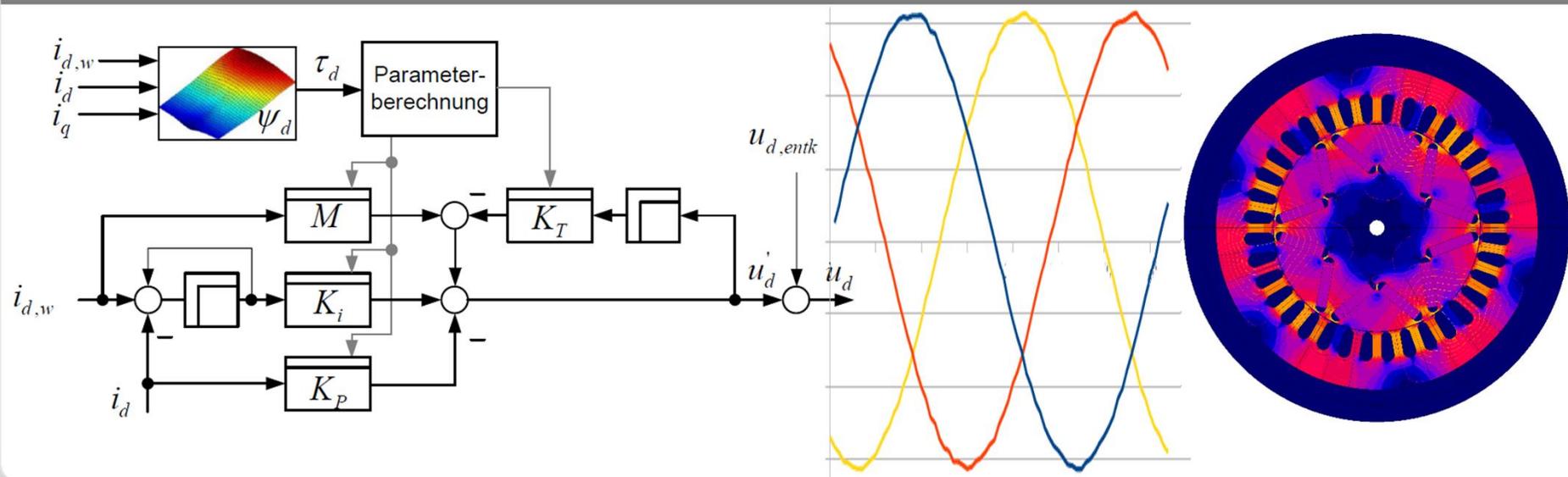


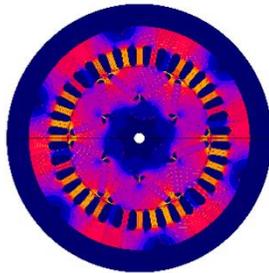
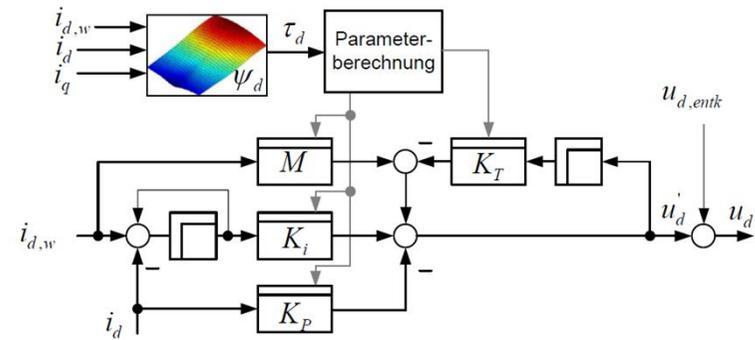
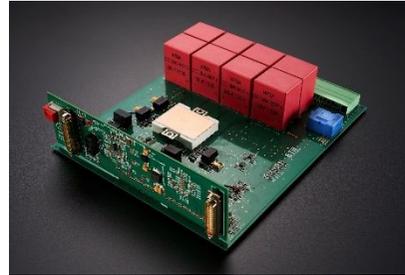
# Übung „Regelung leistungselektronischer Systeme“ SS22

## Übung 1 – Regelung eines Tiefsetzstellers

Elektrotechnisches Institut (ETI)  
Leistungselektronische Systeme



# 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

# Zeitleiste

10.05.

- Tiefsetzsteller

17.05.

- Modellbildung & Stromregelung der Gleichstrommaschine
- Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine

14.06

- Stromeinprägung
- Raumzeiger und Dreiphasendrehssysteme

05.07

- Rotororientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine

12.07.

- Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine

22.07.

- Rotorwinkelidentifikation einer permanenterregten Synchronmaschine

# 1 Regelung eines Tiefsetzstellers

Am ETI soll zur Erweiterung des im Aufbau befindlichen Inselnetzes eine DC-Schnellladesäule für das Institutsfahrzeug integriert werden. Im Inselnetz soll hierbei erforscht werden, wie verschiedene leistungselektronische Teilnehmer, wie z.B. Solarwechselrichter, Batteriespeicher, Netz- und Maschinenumrichter miteinander interagieren. Eine Herausforderung stellt dabei die deutlich reduzierte rotierende Masse (fehlende Kraftwerksgeneratoren) zur Stabilisierung des Inselnetzes dar. Als Besonderheit sollen die Umrichter auf der Eingangsspannungsseite auf einem gemeinsamen DC-Bus gekoppelt werden. Die Stabilität des Microgrid sowie die DC-seitige Kopplung der unterschiedlichen leistungselektronischen System soll in diesem Microgrid erforscht werden.

Um eine große Bandbreite an unterschiedlichen Fahrzeugbatterien laden zu können, soll die DC-Ladesäule ausgangsseitig einen weiten Spannungsbereich abdecken können. Um die Batterie optimal laden zu können, soll ebenfalls die Möglichkeit bestehen, Konstantstrom-, Konstantleistung und Konstantspannungsladeprofile umschalten zu können. In der Aufgabe wird vereinfachend ein einphasiger Tiefsetzsteller angenommen.

Zum sicheren Betrieb des in der Schnellladesäule verbauten Tiefsetzstellers (TSS) sollen Sie eine Regelung entwerfen.

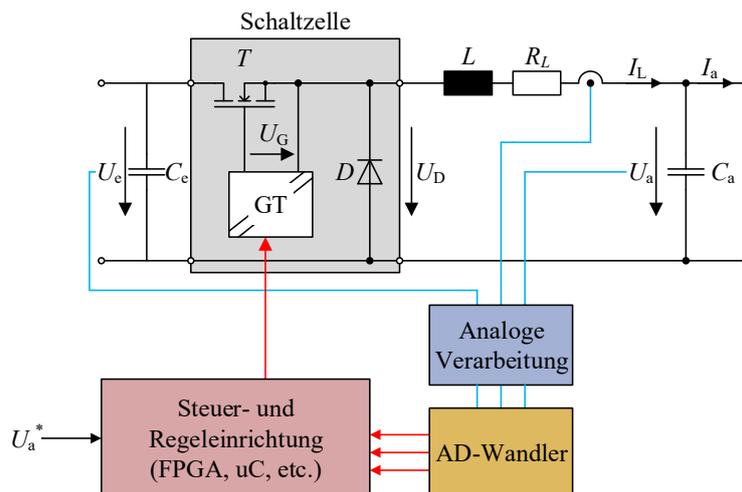
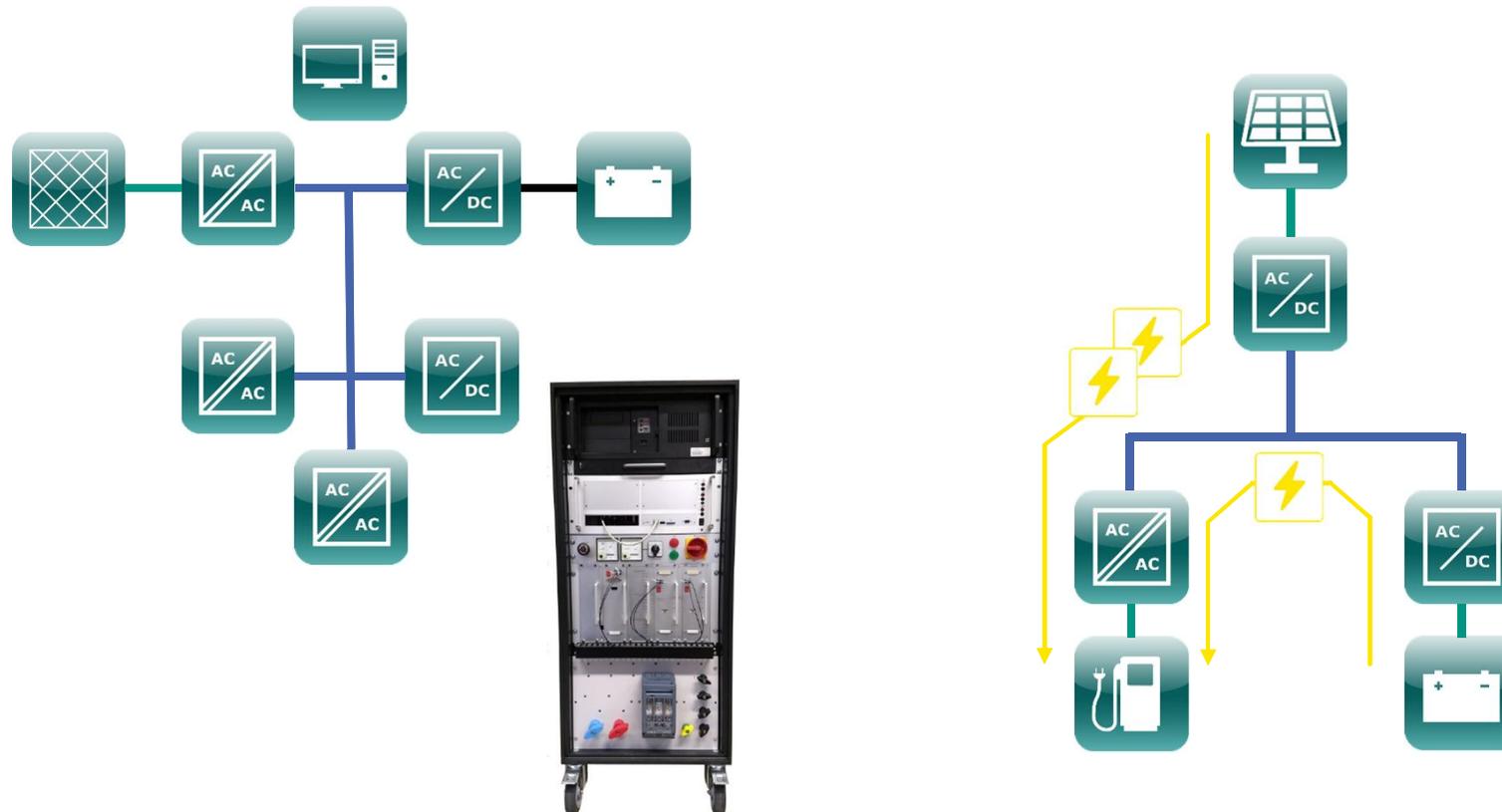


Abbildung 1: Blockschaltbild eines einphasigen TSS mit Regelung

# Packet-based Energy Internet / Design and Operation of an ETI Microgrid



**Folgende Daten sind gegeben:**

$$\text{Induktivität} \quad L = 100 \mu\text{H} \quad (1.1)$$

$$\text{Widerstand der Drossel} \quad R_L = 0.5 \text{ m}\Omega \quad (1.2)$$

$$\text{Ausgangskapazität} \quad C_a = 560 \mu\text{F} \quad (1.3)$$

$$\text{Schaltfrequenz} \quad f_{\text{sw}} = 100 \text{ kHz} \quad (1.4)$$

$$\text{Bandbreite des Stromsensors} \quad f_{3\text{db}} = 300 \text{ kHz} \quad (1.5)$$

$$(1.6)$$

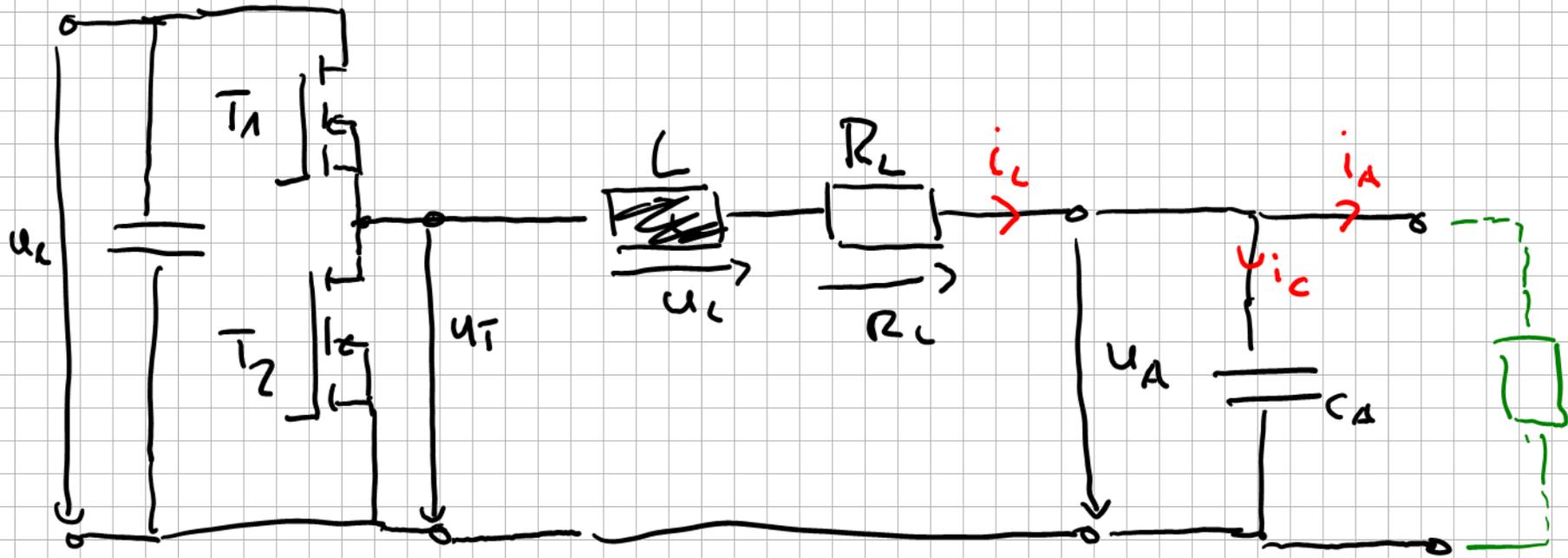
**Vereinfachende Annahmen:**

- Der Stromsensor kann als Tiefpass 1. Ordnung modelliert werden.
- Die Spannungsmessung erfolgt über einen frequenzkompensierten Spannungsteiler.
- Transistor und Diode können als ideale Bauteile betrachtet werden.
- Die (in der Praxis notwendige) galvanische Trennung des Tiefsetzstellers erfolgt bereits auf der Seite des Microgrids.
- Filter, Isolationsmonitoring und Symmetrierung der DC-Schiene werden nicht betrachtet.

**Aufgaben:**

- a) Zeichnen Sie den kaskadierten Regelkreis des Tiefsetzstellers. Modellieren Sie hierbei Regelung, Skalierung und Stellglied im ersten Schritt unabhängig voneinander. Welche Bedingung muss für die Modellierung als Kaskadenregelung eingehalten werden?
- b) Legen Sie nun den inneren Regelkreis aus. Zeichnen sie das Ersatzschaltbild für die inneren Stromregelstrecke und leiten Sie die Übertragungsfunktion  $G(s) = \frac{I_L}{U_d}$  her. Welche Vereinfachung können Sie hier bei dem Tiefsetzsteller in guter Näherung treffen? Vergleichen Sie im Bodediagramm die Übertragungsfunktionen mit und ohne Vereinfachung.
- c) Stellen Sie die Übertragungsfunktion des Stellgliedes und der Messung auf und linearisieren Sie diese wenn nötig.

# Modellbildung TSS



Stellglied  
einstellbare  
Spannungsquelle

Strecke

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt$$

$$u_L = -L \frac{di_c(t)}{dt}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_1 \text{ ein} : u_T = u_e \\ T_2 \text{ ein} : u_T = 0 \end{array} \right\} \overline{u_T} = \frac{1}{T_{\text{PWM}}} \left[ T_{\text{ein}} \cdot u_e + (1 - T_{\text{ein}}) \cdot 0V \right]$$

$$= \underbrace{\frac{T_{\text{ein}}}{T_{\text{PWM}}}}_a \cdot u_e = a \cdot u_e = u_S$$

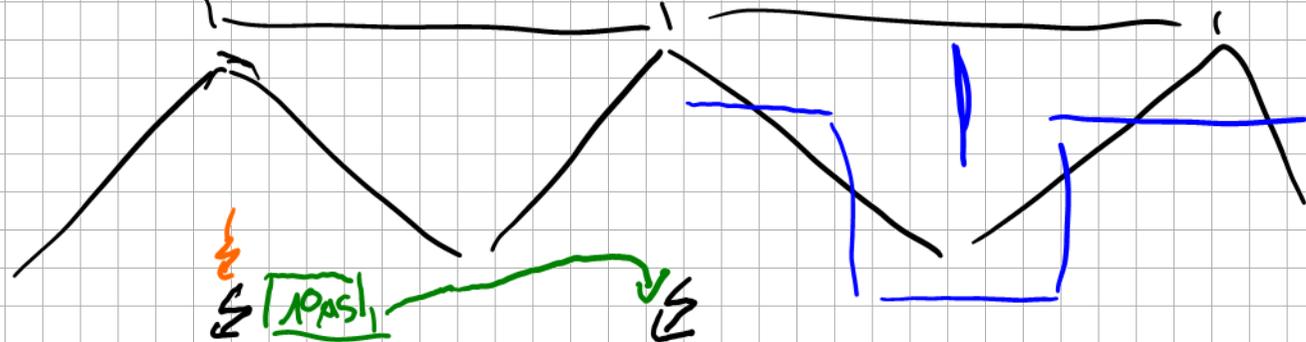
$a$  : „Aussteuergrad“

• Modell des Stellglieds



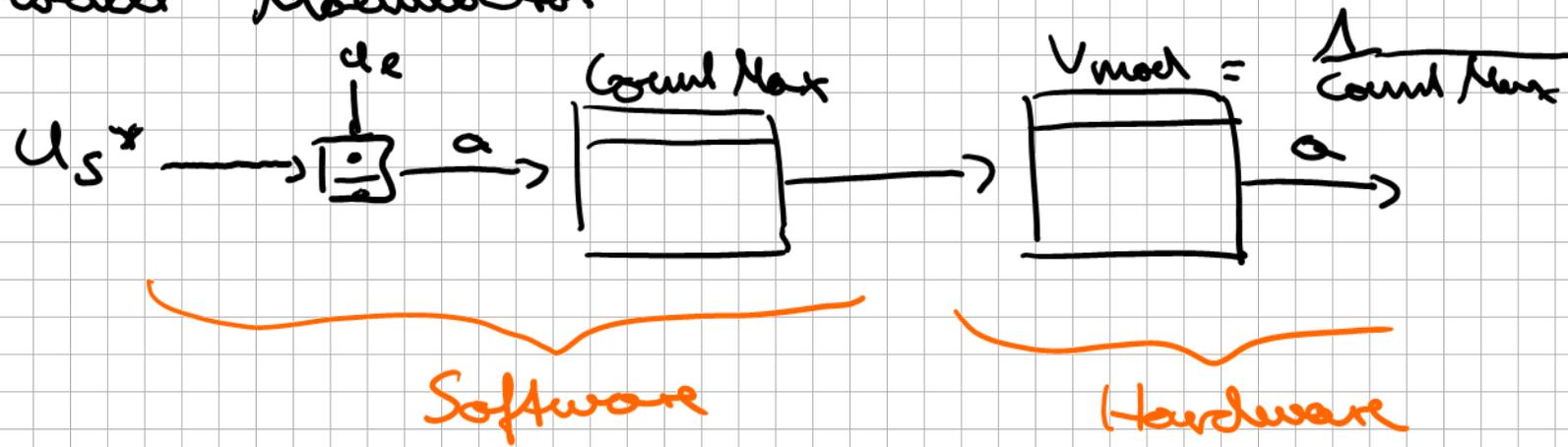
$$U_{SG} = u_e$$

$$T_{e,SG} = 1 T_{\text{PWM}} + 1/2 T_{\text{PWM}} = 3/2 T_{\text{PWM}}$$



$$G_{T,c} = e^{-sT_{e,sa}} \approx \frac{1}{1 + sT_{e,sa}}$$

• Modell Molekulator

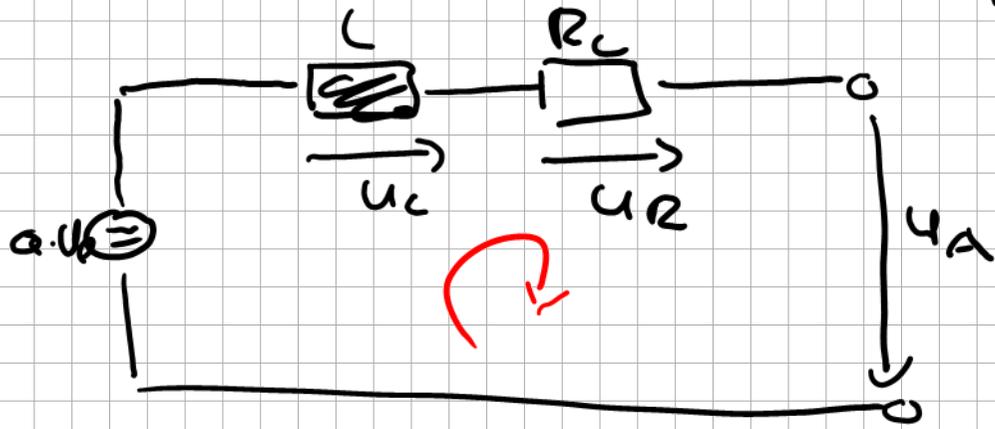


$\Rightarrow$

The simplified diagram shows the input  $U_S^*$  entering a summing junction. A feedback signal  $u_e$  is subtracted at the junction. The output of the summing junction is labeled  $a$  and exits to the right.

$$G_M(s) = \frac{a}{U_S^*} = \frac{1}{u_p}$$

• Modell der Strecke (ausführlich)



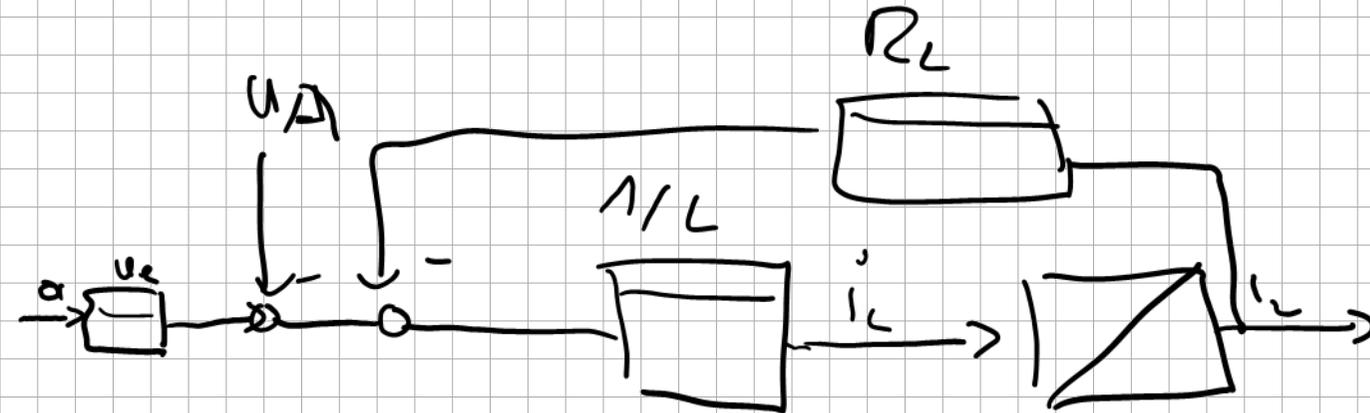
$$- a \cdot U_e + \left( \frac{di_L}{dt} + R_L i_L \right) + U_A = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (a \cdot U_e - U_A) - \frac{R_L}{L} i_L$$

!

$$s \cdot i_L(s) = \frac{1}{L} [a \cdot U_e(s) - U_A(s)] - \frac{R_L}{L} i_L(s)$$

$$\Leftrightarrow i_L(s) = \frac{1/R_L}{1 + sL/R_L} \left[ \underbrace{a \cdot U_e(s)}_{\text{Führungsgröße}} - \underbrace{U_A(s)}_{\text{Störgröße}} \right]$$



Führungsleittragungsfunktion:

$$G_W(s) \Big|_{U_a(s)=0} = \frac{U_c(s)}{\underbrace{U_e(s)}_{U_s(s)}} = \frac{1/R_L}{1 + s \underbrace{L/R_L}_{T_{Si}}} = \frac{U_{Si}}{1 + s T_{Si}}$$

$U_{Si}$   
 $T_{Si}$

mit Werten aus Aufgabe:

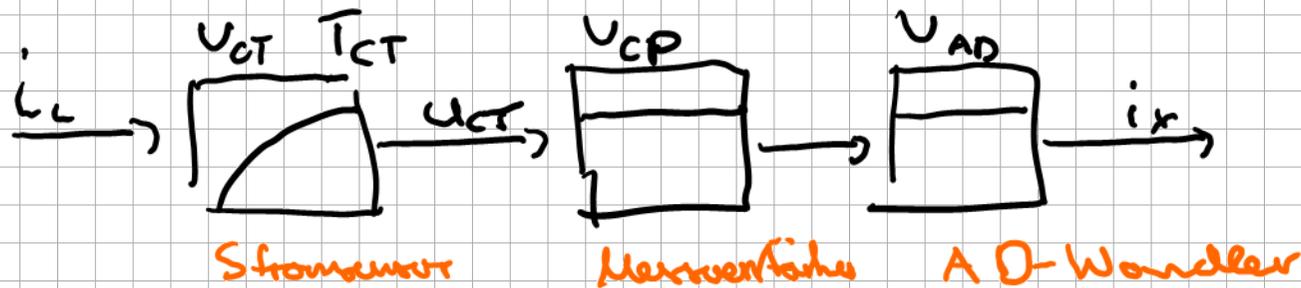
$$T_{Si} = \frac{L}{R_L} = \frac{100 \mu\text{H}}{0,5 \text{ m}\Omega} = 0,2 \text{ s} \gg T_{Ti} \approx 0$$

• vereinfachte Strecke (Drossel, ideale)



$$G_S(s) = \frac{1}{sL}$$

- Modellbildung Strommessung  $\rightarrow$  aus Aufgabe  
 $\rightarrow$  PT1-Glied mit  $f_g = 300 \text{ kHz}$  für Stromsensor



$$\text{PT1-Glied: } G_{CT}(s) = \frac{U_{CT}}{1 + s \cdot T_{CT}} = \frac{U_{CT}}{1 + s \frac{1}{2\pi \cdot f_g}}$$

$$G_M(s) = \frac{i_x}{i_L} = G_{CT}(s) \cdot G_{OP}(s) \cdot G_{AD}(s)$$

$$= \frac{\cancel{U_{CT}}}{1 + \frac{1}{2\pi f_g}} \cdot \frac{\cancel{U_{AD}}}{\cancel{U_{CT}}} \cdot \frac{1}{\cancel{U_{AD}}} = \frac{1}{1 + s T_{CT}}$$

Im stationären Zustand bestimmt Störgröße  $u_A$   
Stellgröße  $u_S$

$$\rightarrow \Delta i_L = 0 \quad \leadsto \quad u_S = u_A$$

Störgrößenaufrhaltung vorkommen, Regler aber dennoch  
nötig!

Ziel der Regelung:

- ↳ Stationär genau
- ↳ Schnell
- ↳ Stabil

$$\rightarrow \text{PI-Regler: } F_R(s) = U_{ei} \cdot \frac{1 + T_{Ri} \cdot s}{s \cdot T_{Ri}} = U_{ei} \left( 1 + \frac{1}{T_{Ri} \cdot s} \right)$$

$$\begin{aligned} F_o(s) &= F_R(s) \cdot G_M(s) \cdot G_{BG}(s) \cdot G_S(s) \cdot G_{CT}(s) \\ &= F_e(s) \cdot \cancel{U_e} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_{L,sa}} \cdot \frac{1}{\cancel{U_e}} \cdot \frac{1}{sL} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_{CT}} \\ &= U_{ei} \cdot \frac{1 + T_{Ri} \cdot s}{s \cdot T_{Ri}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_{L,sa}} \cdot \frac{1}{sL} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_{CT}} \end{aligned}$$

## Auslegung

- ↳ Ausprobieren / Einstellregeln
- ↳ PID-Tuner
- ↳ Frequenzkennlinienverfahren

quadratisch  $J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \stackrel{!}{=} \min$

