Karlsruhe Institute of Technology

Robotik I: Einführung in die Robotik
Übung 4: Einführung in die Robotics Toolbox & Regelung

Jonas Beil, Fabian Paus, Tamim Asfour
Institut für Anthropomatik und Robotik

KIT-Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR)
Hochperformante Humanoide Technologien (H^2T)

Aufgaben

Einführung in die Robotics Toolbox und Regelung

1. Puma 560 aus der Robotics Toolbox verwenden

2. Roboter mit zwei Gelenken modellieren

3. Kaskadierte Regler

Aufgaben

Einführung in die Robotics Toolbox und Regelung

1. **Puma 560 aus der Robotics Toolbox verwenden**

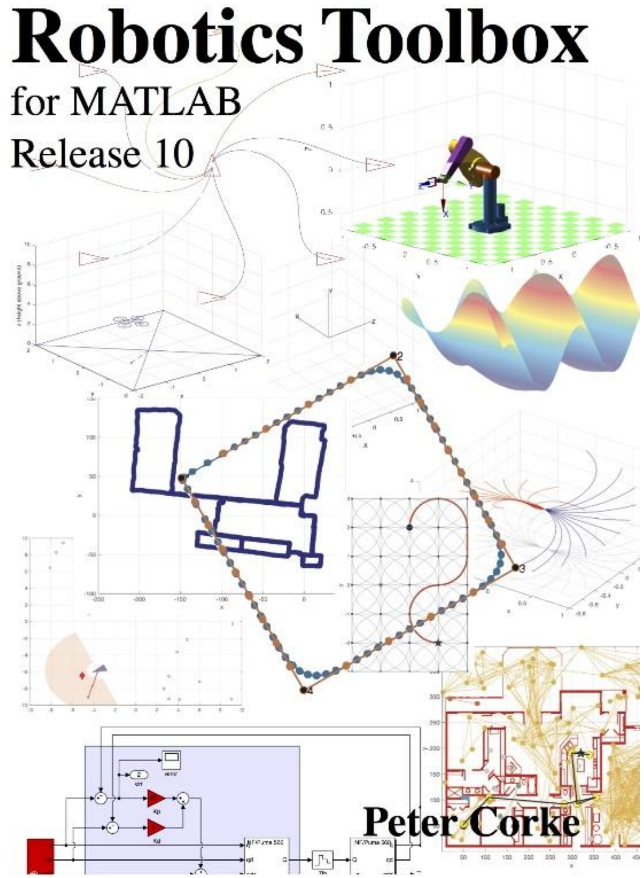
2. Roboter mit zwei Gelenken modellieren

3. Kaskadierte Regler

Aufgabe 1: Puma 560 aus der RBT verwenden

- Dokumentation: http://www.petercorke.com/RTB/r9/html/index.html

- Live in Matlab



Aufgaben

Einführung in die Robotics Toolbox und Regelung

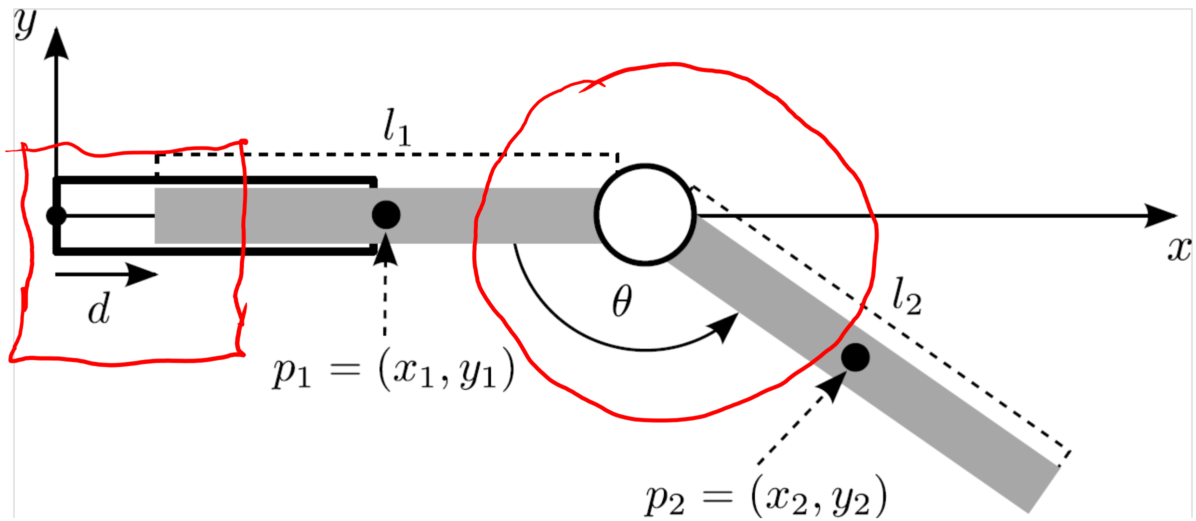
1. Puma 560 aus der Robotics Toolbox verwenden

2. **Roboter mit zwei Gelenken modellieren**

3. Kaskadierte Regler

Aufgabe 2: Roboter mit zwei Gelenken modellieren

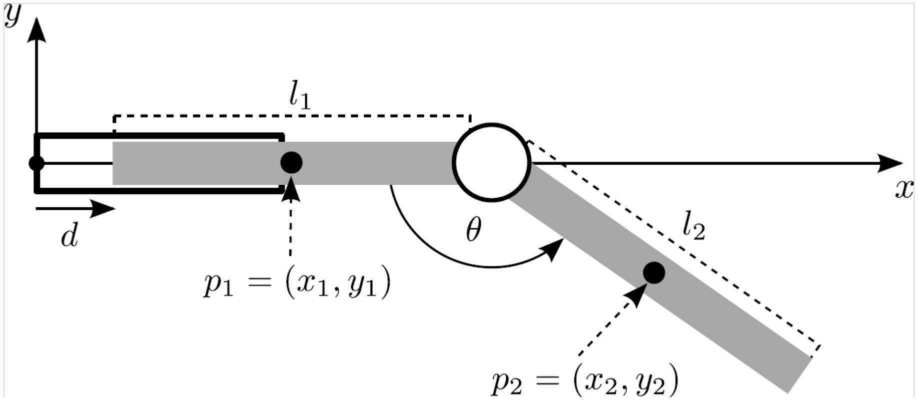
- Roboter
  - 2 Gelenke
    - 1 Schubgelenk
    - 1 Drehgelenk
  - 2 Segmente

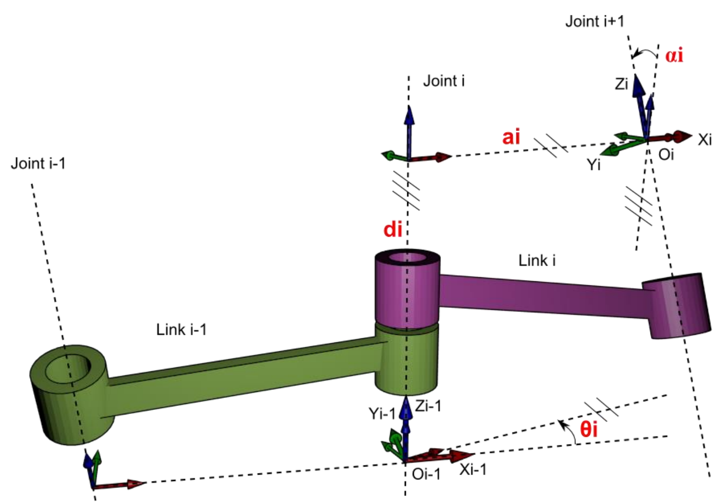


- Modellierung
  - 2.1 Bestimmen Sie die DH-Parameter
  - 2.2 Erstellen Sie einen **`SerialLink`** in der RBT
  - 2.3 Testen Sie das Modell

Aufgabe 2.1: Bestimmung der DH-Parameter

- Standard DH-Parameter des Roboters aus Aufgabe 3.2





von Ollydbg
[Public domain], via
Wikimedia Commons

Aufgabe 2.1: Bestimmung der DH-Parameter

alten z-Achse

Joint angle	θ_i	Winkel zwischen x_{i-1} und x_i – Achsen um z_{i-1} –Achse
Link offset	d_i	Abstand zwischen x_{i-1} – und x_i entlang der z_{i-1} –Achse
Link length	a_i	Abstand zwischen z_{i-1} – und z_i entlang der x_i –Achse
Link twist	α_i	Winkel zwischen z_{i-1} – und z_i – Achsen um x_i –Achse

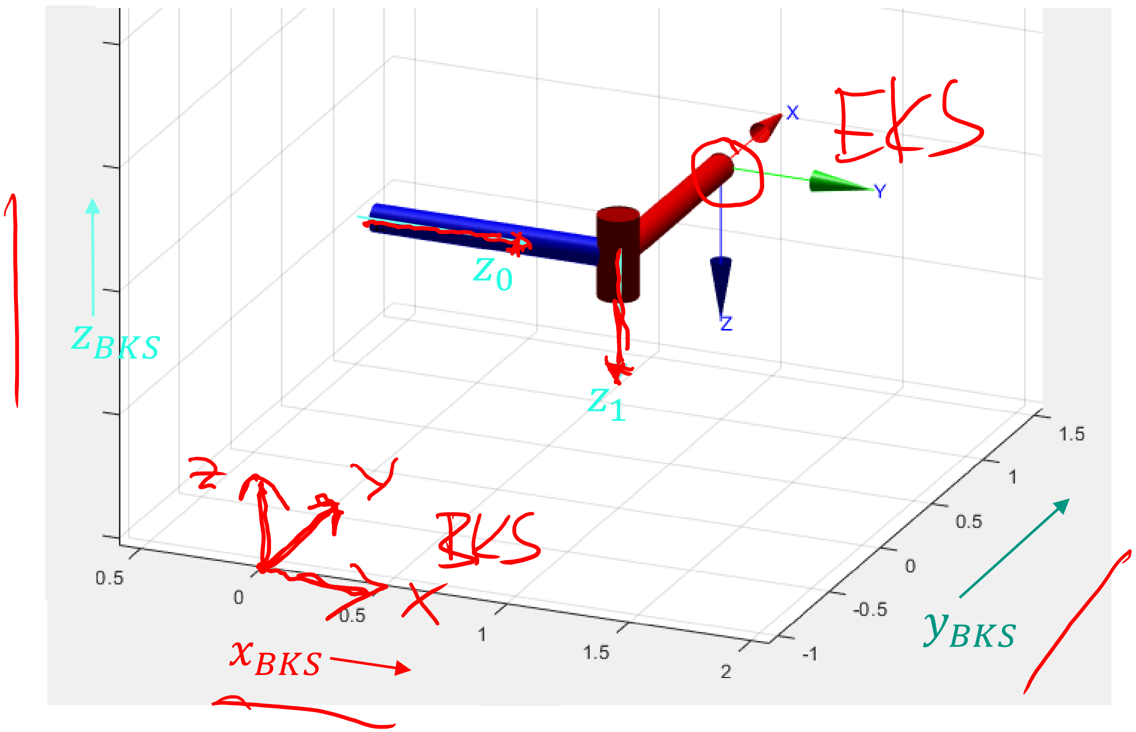
(Corke, Peter. Robotics, Vision and Control. 2017)

neue x-Achse

$$A_{i-1,i} = R_{z_{i-1}}(\theta_i) \cdot T_{z_{i-1}}(d_i) \cdot T_{x_i}(a_i) \cdot R_{x_i}(\alpha_i)$$

Aufgabe 2.1: Bestimmung der DH-Parameter

- Festlegung von BKS, EKS und z-Achsen.

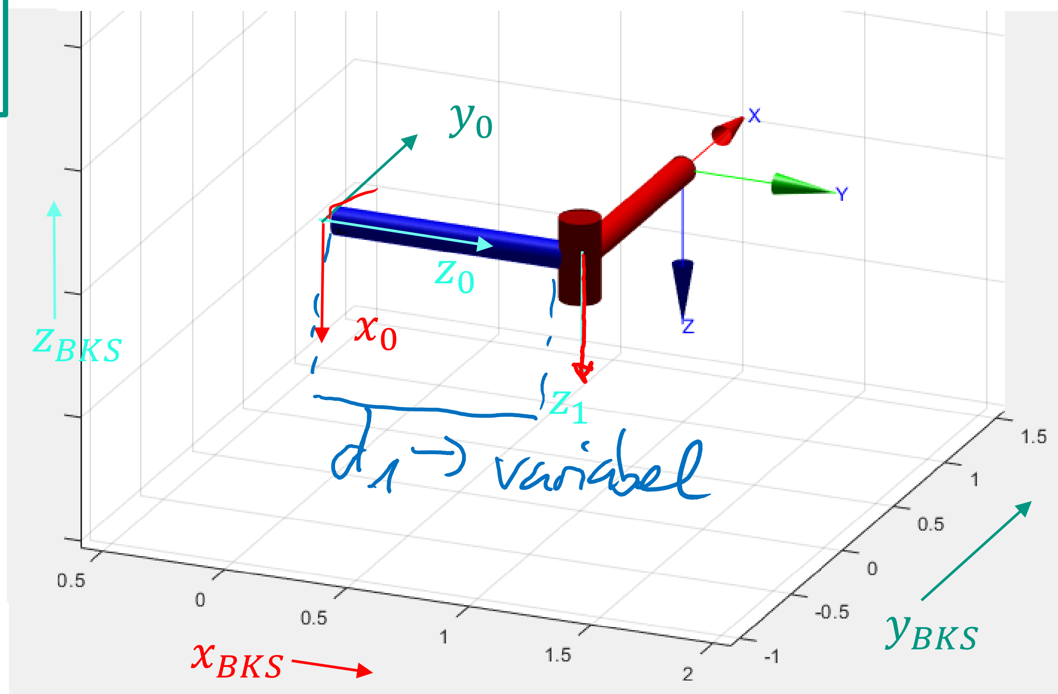


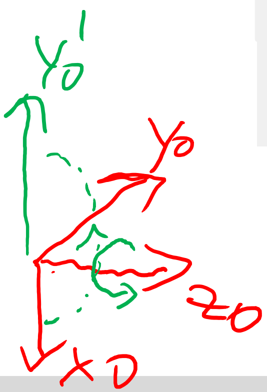
Aufgabe 2.1: Bestimmung der DH-Parameter

- Offset zum BKS: Drehung des Bases um 90° um y_0 Achse.

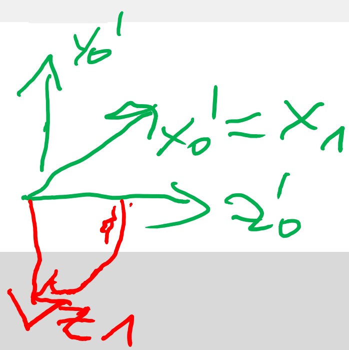
Kein Teil der DH-Parameter!

Offset



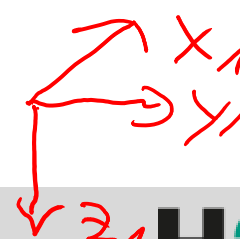


$\theta = 90°$



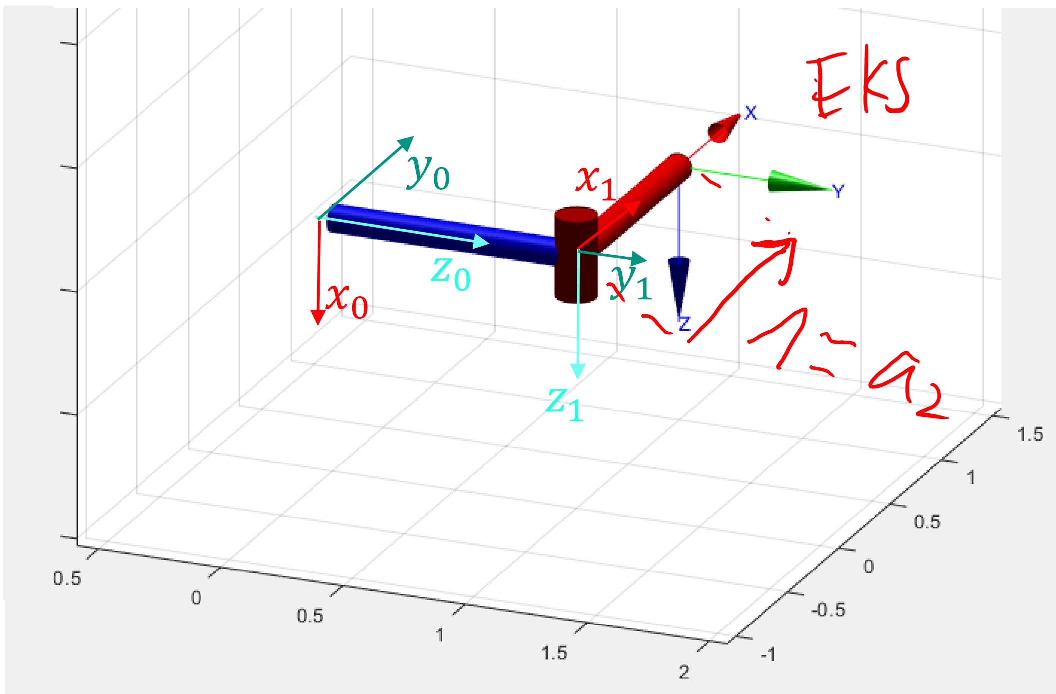
$\alpha = 90°$

$a_1 = 0$



Aufgabe 2.1: Bestimmung der DH-Parameter

- Parameter für das erste Lineargelenk.
  - $\theta_1 = 90°, \alpha_1 = 90°, a_1 = 0, d_1$ ist variabel

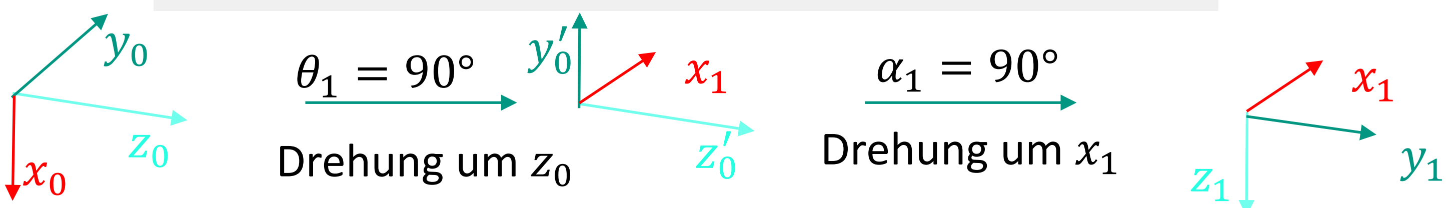


$\theta_2 =$ variabel

$d_2 = 0$

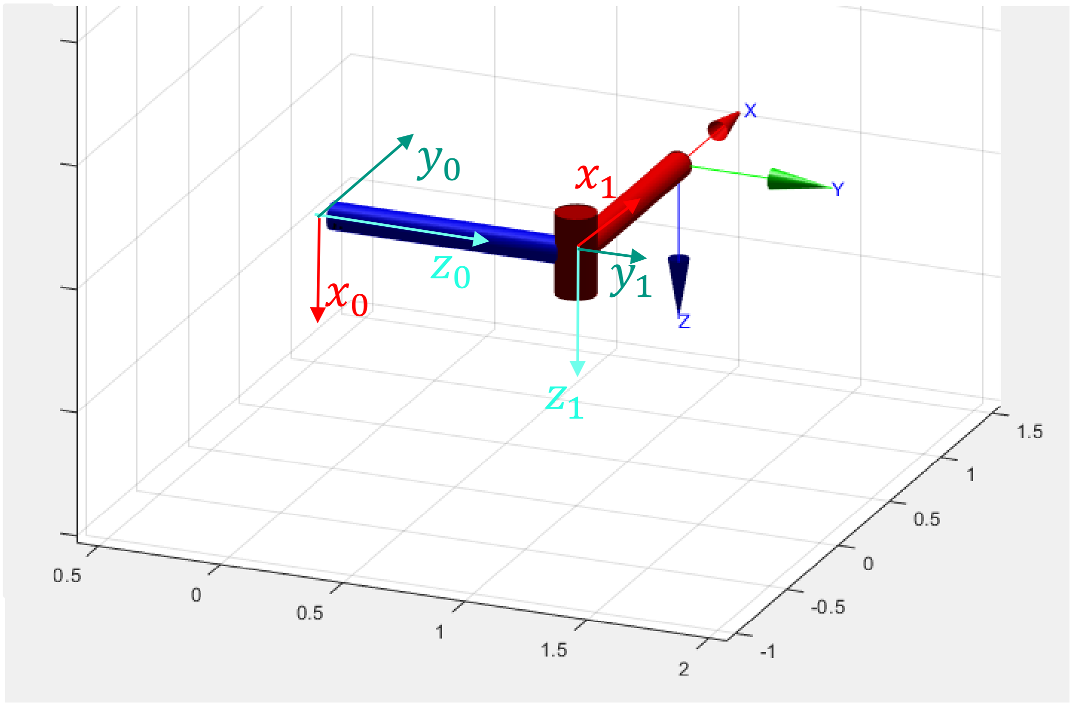
$\alpha_2 = 0°$

$a_2 = 1$



Aufgabe 2.1: Bestimmung der DH-Parameter

- Parameter für das zweite Rotationsgelenk.
  - θ_2 $ist\ variabel, \alpha_2 = 0°, a_2 = 1, d_1 = 0$

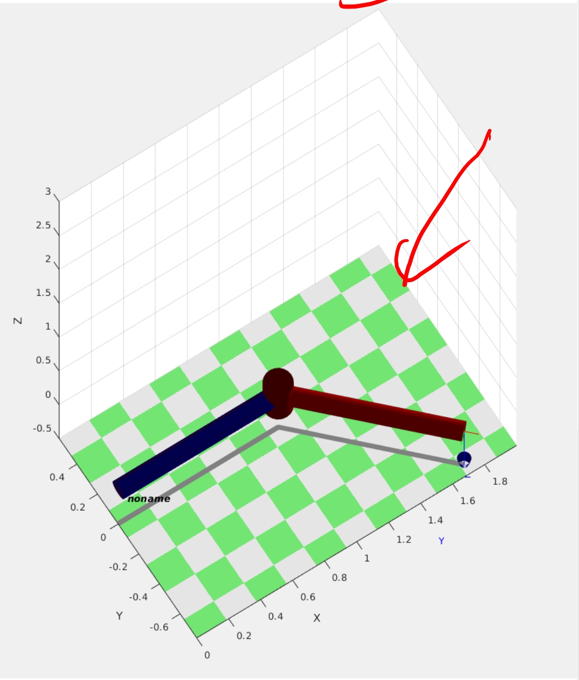


Aufgabe 2.1: Bestimmung der DH-Parameter

- DH-Parameter in Tabelle:

Gelenk	θ	d	α	a
1	90°	d_1 (variabel)	90°	0
2	θ_2 (variabel)	0	0°	1

- Aufgaben 2.2-2.3: Live in Matlab



Aufgaben

Einführung in die Robotics Toolbox und Regelung

1. Puma 560 aus der Robotics Toolbox verwenden

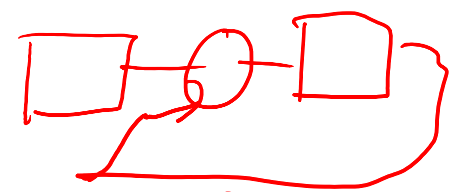
2. Roboter mit zwei Gelenken modellieren

3. **Kaskadierte Regler**

Aufgabe 3: Kaskadierte Regler

- Entwerfen Sie einen **kaskadierten** Regler für einen Roboterarm
  - Motor:
    - Stellgröße: $u_A(t)$ (Spannung)
    - Regelgröße: $i_A(t)$ (Strom)
  - Mechanik:
    - Stellgröße: $m_A(t)$ (Drehmoment)
    - Regelgröße: $\omega(t)$ (Winkelgeschwindigkeit)

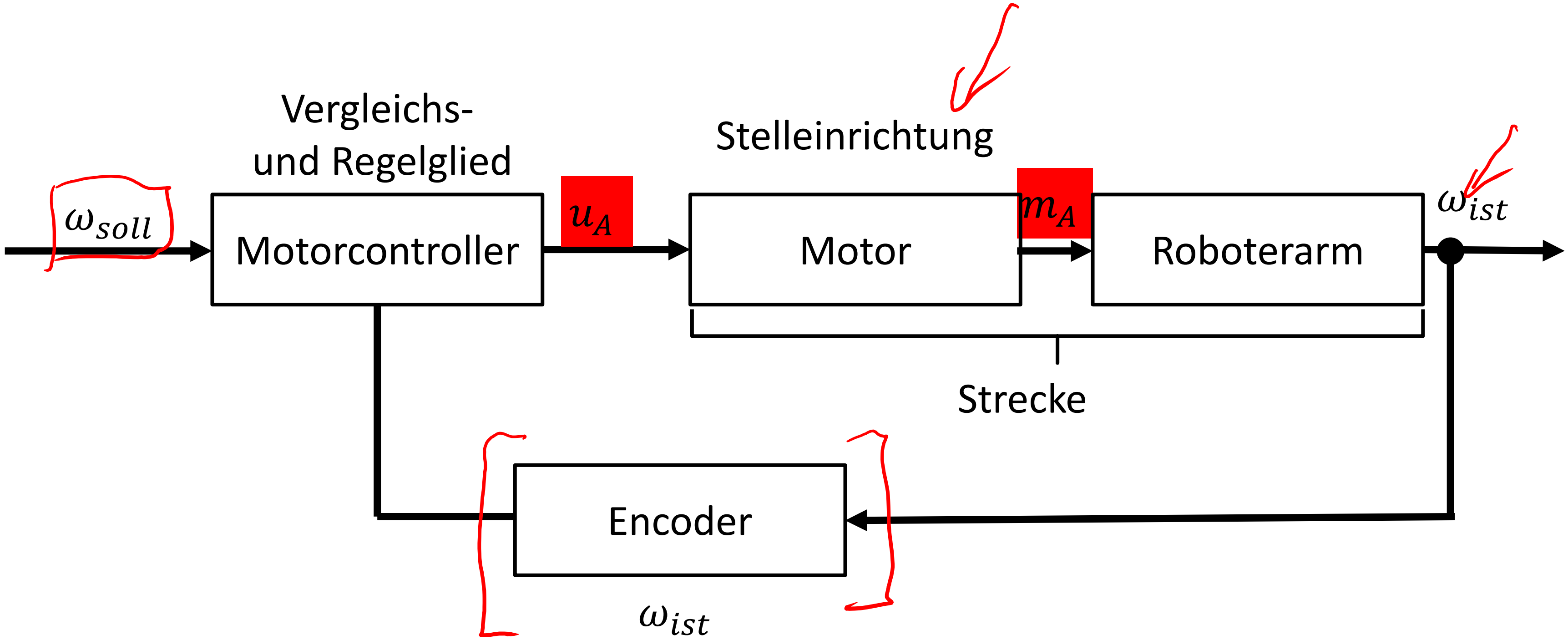
- Teilaufgaben
  - 3.1 Zeichnen Sie das Blockdiagramm des Regelkreises
  - 3.2 Berechnen Sie Laplace-Transformationen
  - 3.3 Stellen Sie die Übertragungsfunktion auf
  - 3.4 [Modellieren Sie den Regelkreis in Matlab+Simulink]



$\mathcal{L}\{f\}$

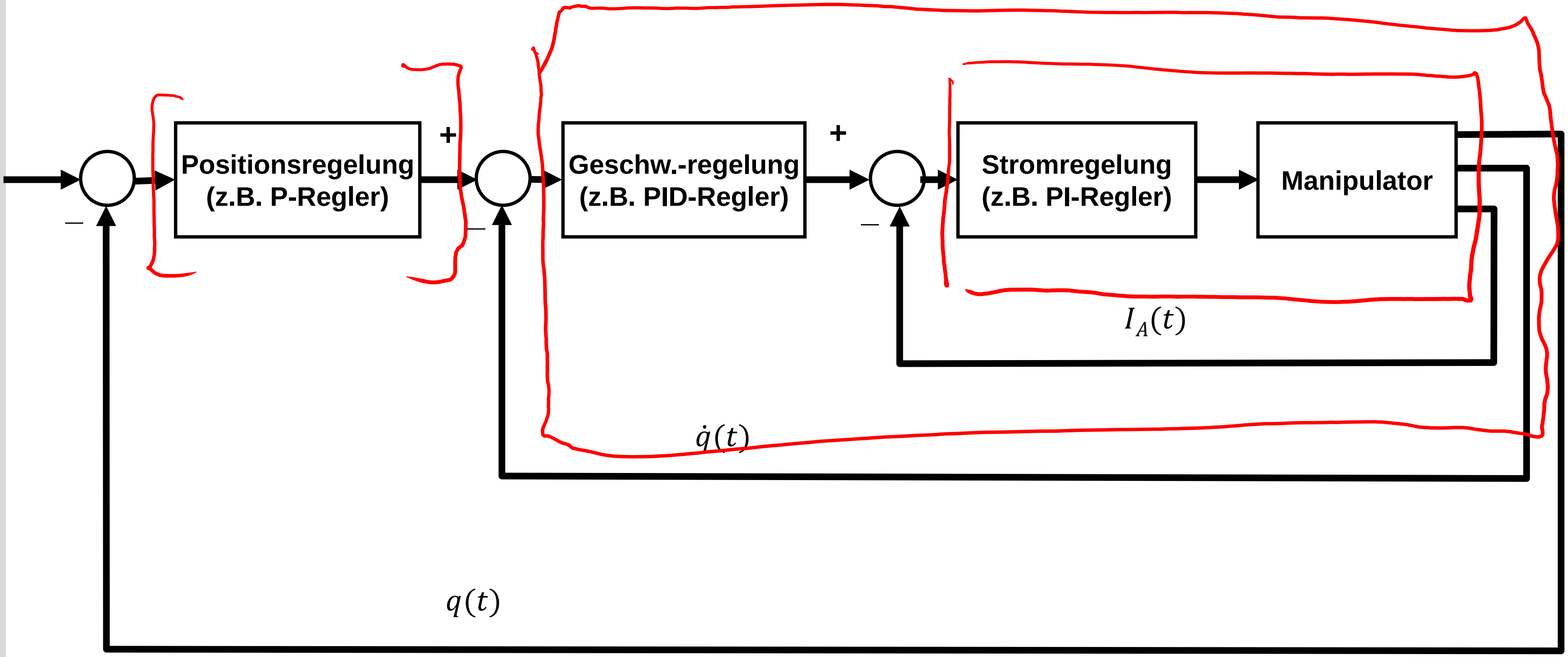
Aufgabe 3: Kaskadierte Regler

- u_A: Spannungsvorgabe an den Motor
- m_A: Vom Motor erzeugtes Drehmoment



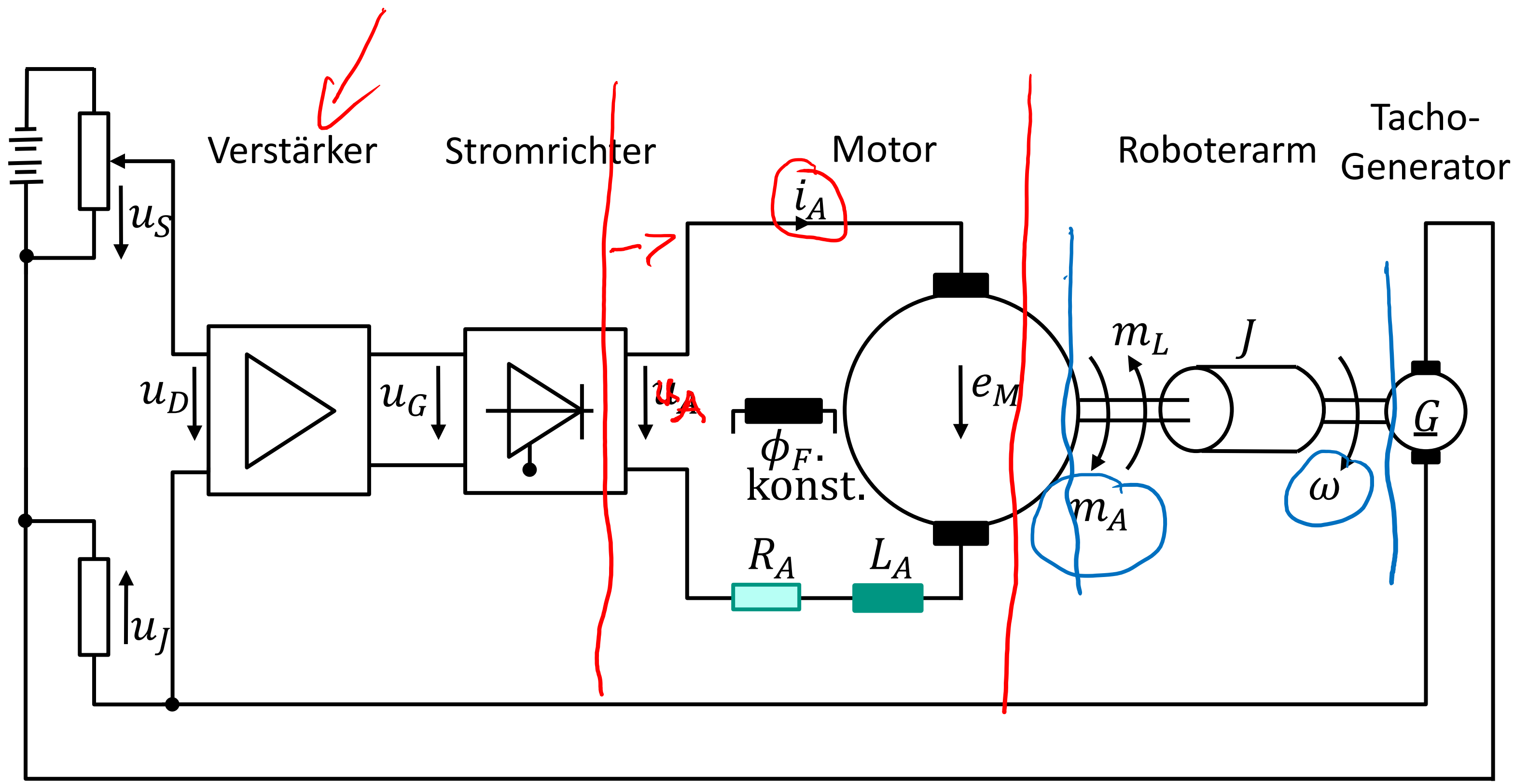
Kaskadenregelung

- Manipulator = **Mehrgrößensystem**
  - Unabhängige lineare Einzelregelkreis der einzelnen Gelenke



Aufgabe 3: Kaskadierte Regler

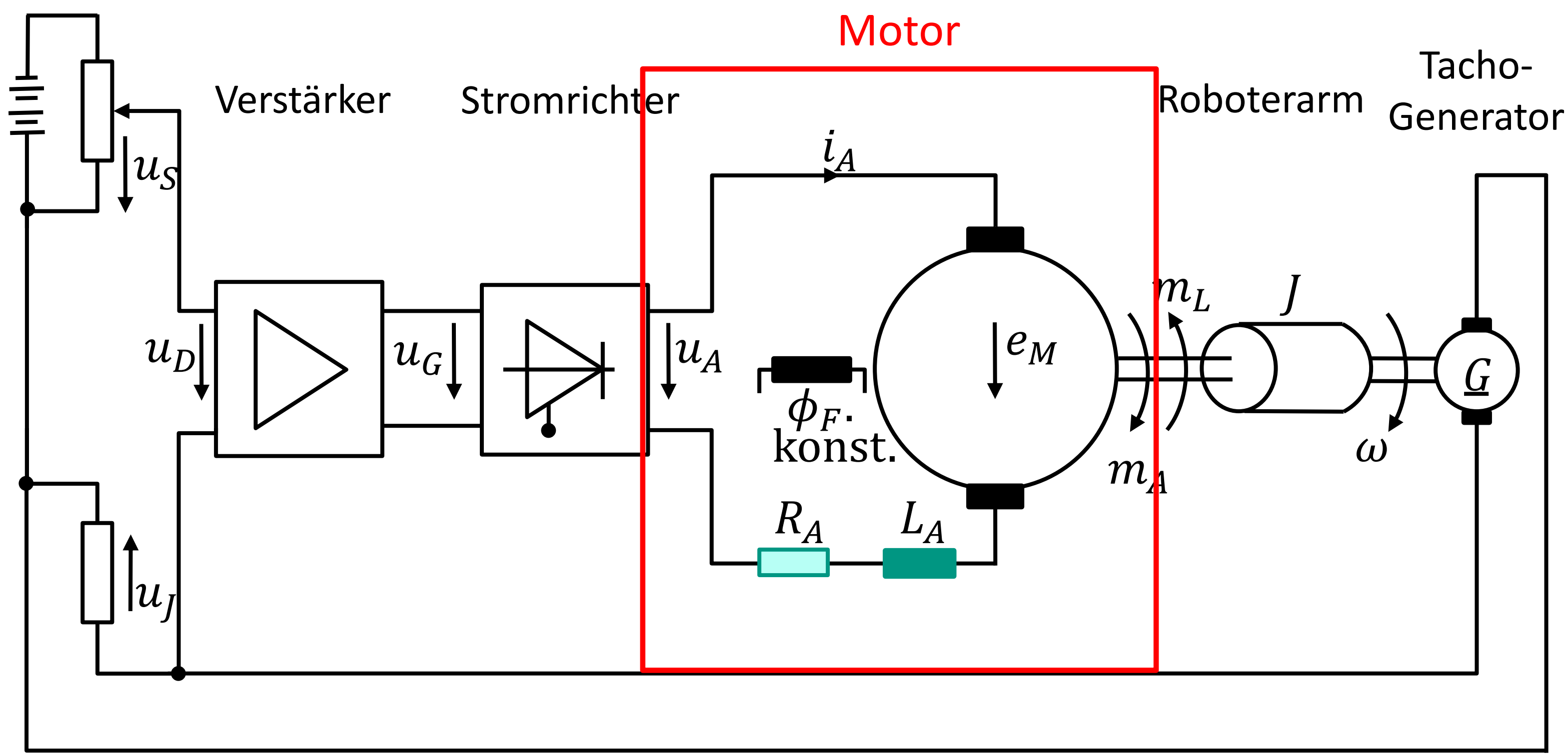
- Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs



Nach: ***Regelungstechnik; O. Föllinger***

Aufgabe 3: Kaskadierte Regler

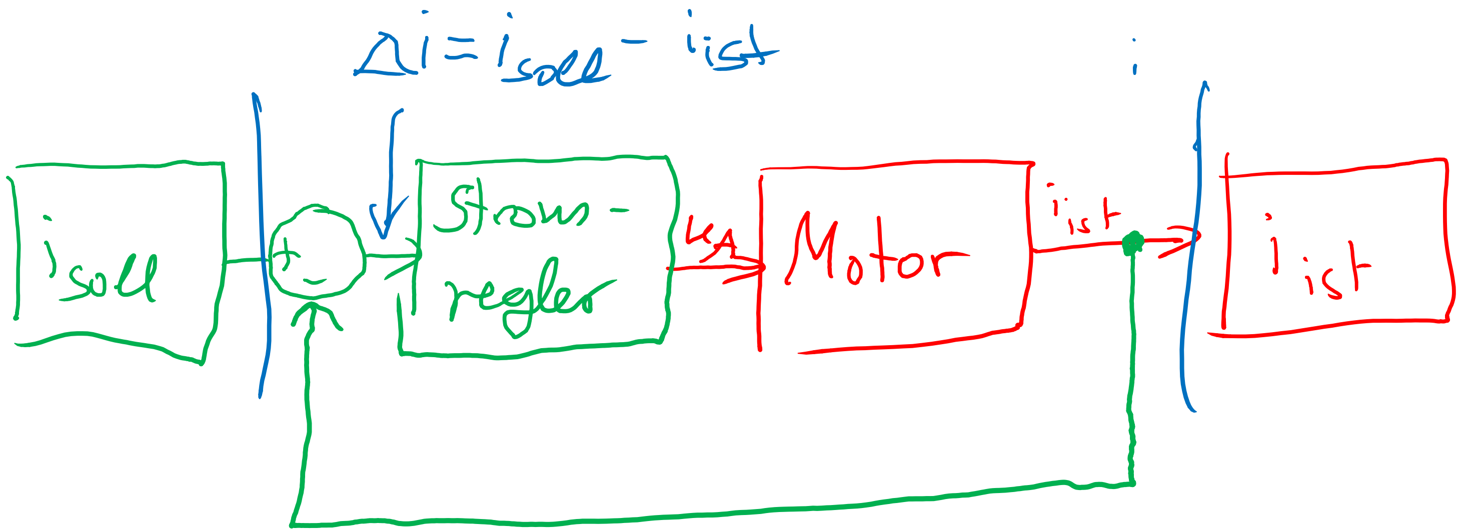
- Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs



Nach: ***Regelungstechnik; O. Föllinger***

Aufgabe 3.1: Blockdiagramm

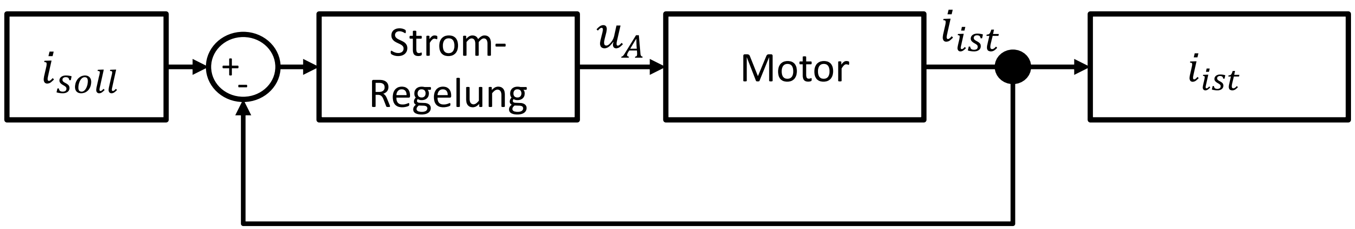
- Blockdiagramm des Regelkreises
  - Innen: Stromregelung



Aufgabe 3.1: Blockdiagramm

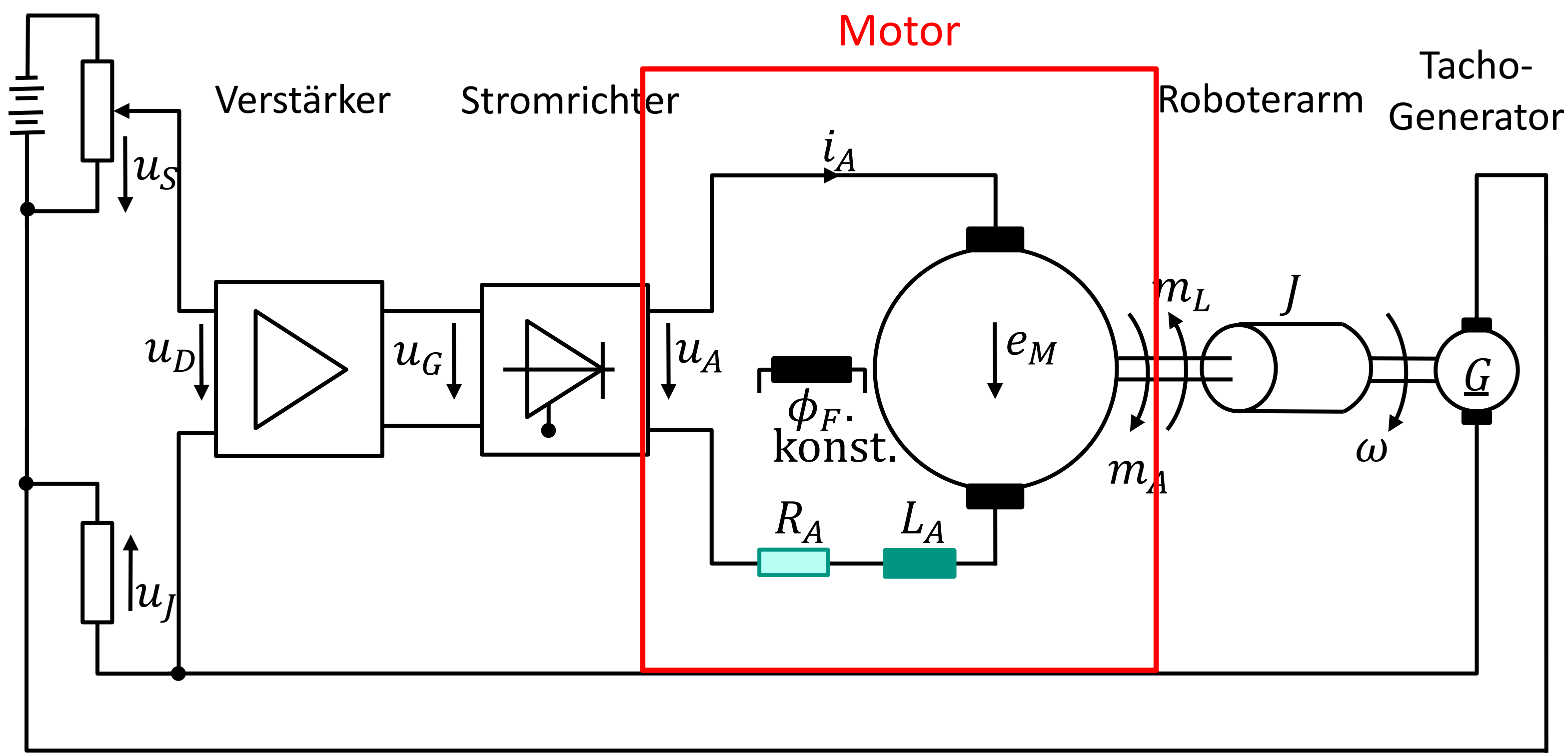
- Blockdiagramm des Regelkreises
  - Innen: Stromregelung

i_{soll}: Vorgabe Motorstrom
i_{ist}: Gemessener Motorstrom
u_A: Spannung



Aufgabe 3: Kaskadierte Regler

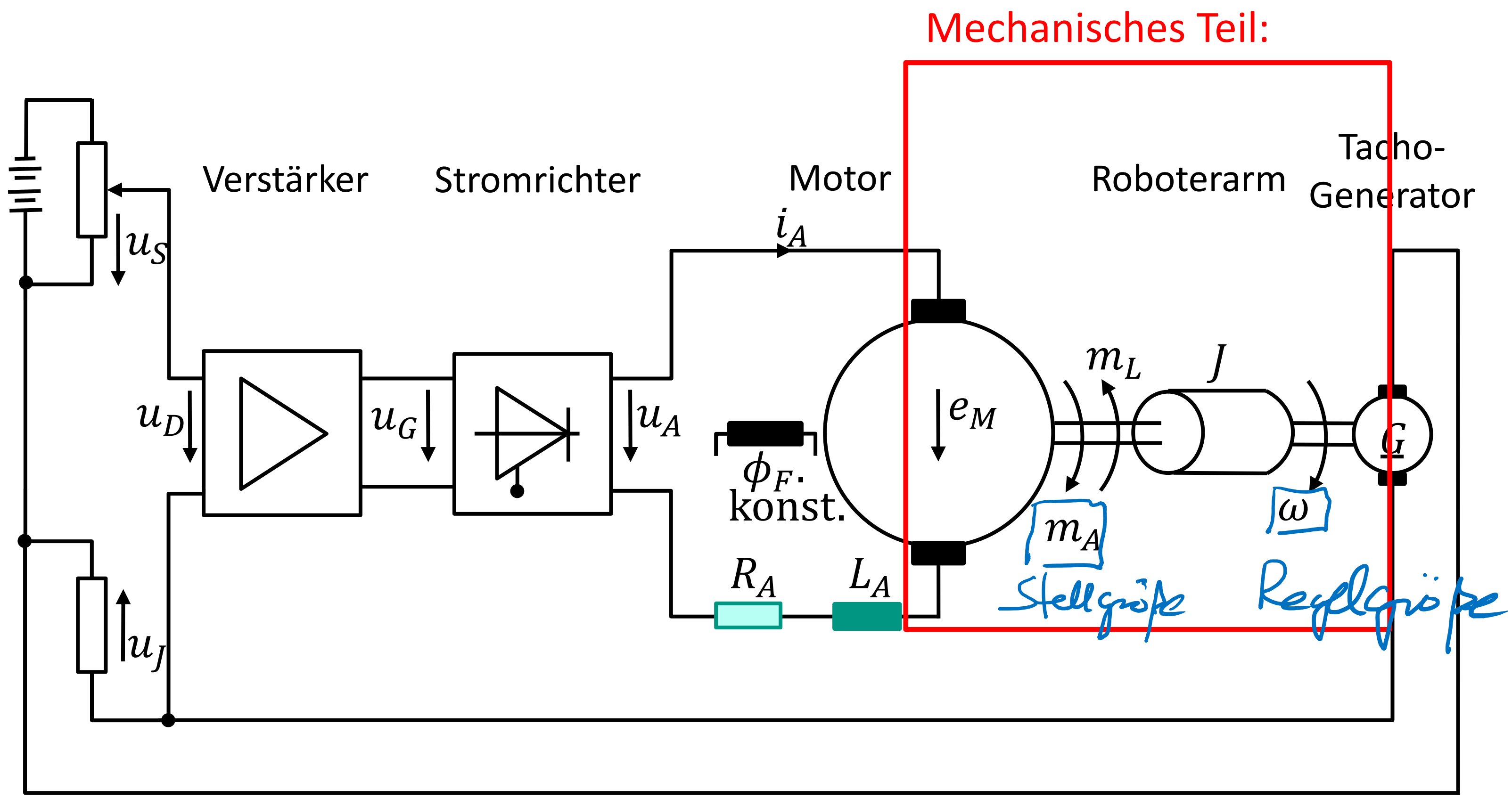
- Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs



Nach: ***Regelungstechnik; O. Föllinger***

Aufgabe 3: Kaskadierte Regler

- Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs



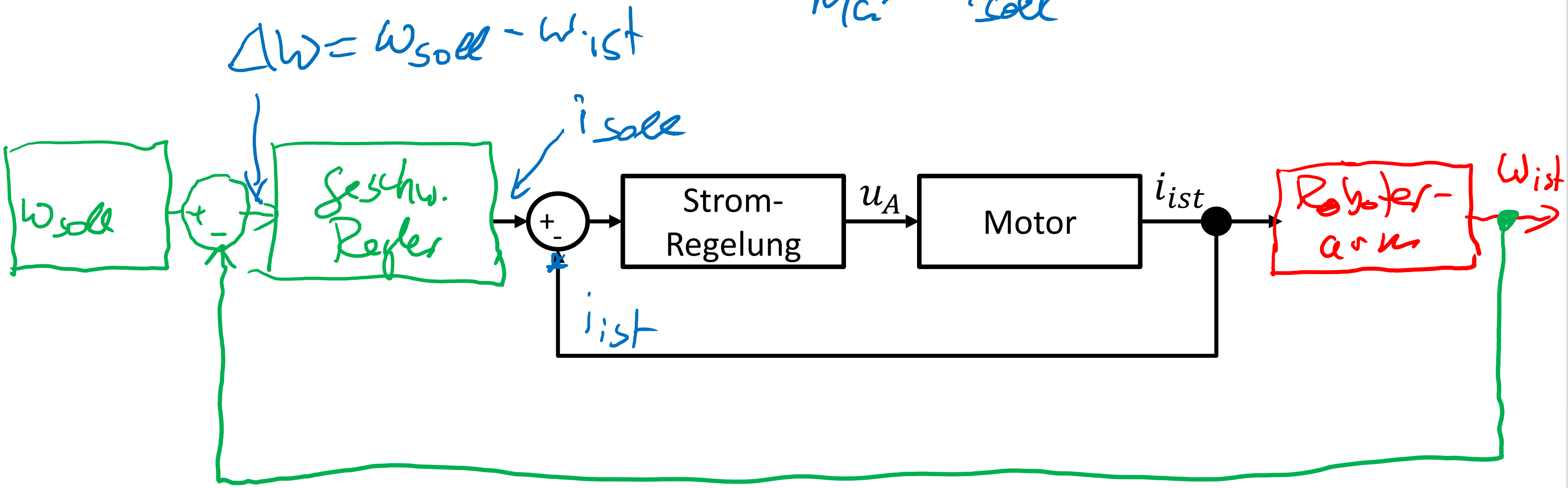
Nach: ***Regelungstechnik; O. Föllinger***

Aufgabe 3.1: Blockdiagramm

- Blockdiagramm des Regelkreises
  - Innen: Stromregelung
  - Außen: Geschwindigkeitsregelung

M_a : Drehmoment

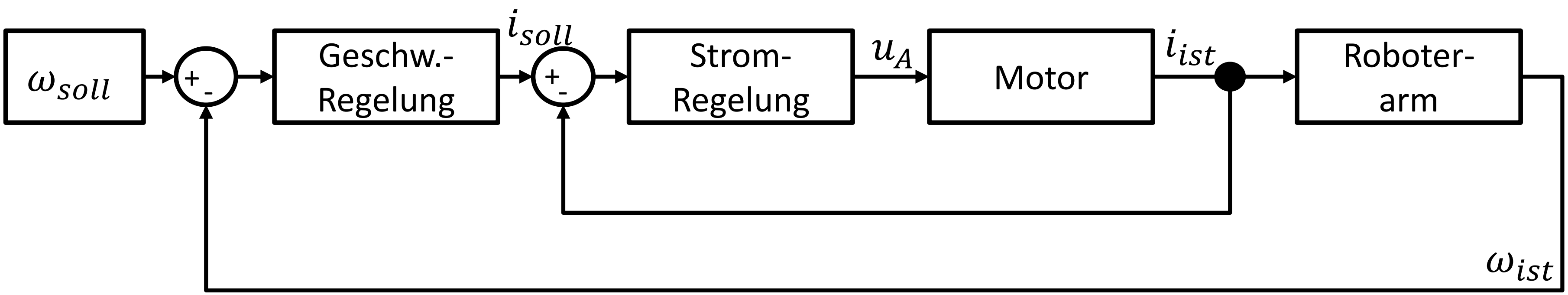
$M_a \sim i_{soll}$



Aufgabe 3.1: Blockdiagramm

- Blockdiagramm des Regelkreises
  - Innen: Stromregelung
  - Außen: Geschwindigkeitsregelung

ω_{soll}: Vorgabe Winkelgeschw.
ω_{ist}: Gemessener Winkelgeschw.
i_A: Motostrom
u_A: Spannung



Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- Berechnen Sie die Laplace-Transformationen von:

$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)$$

$$m_A(t) = J \cdot \frac{d}{dt} \omega(t) + K_v \cdot \omega(t)$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- Berechnen Sie die Laplace-Transformationen von:

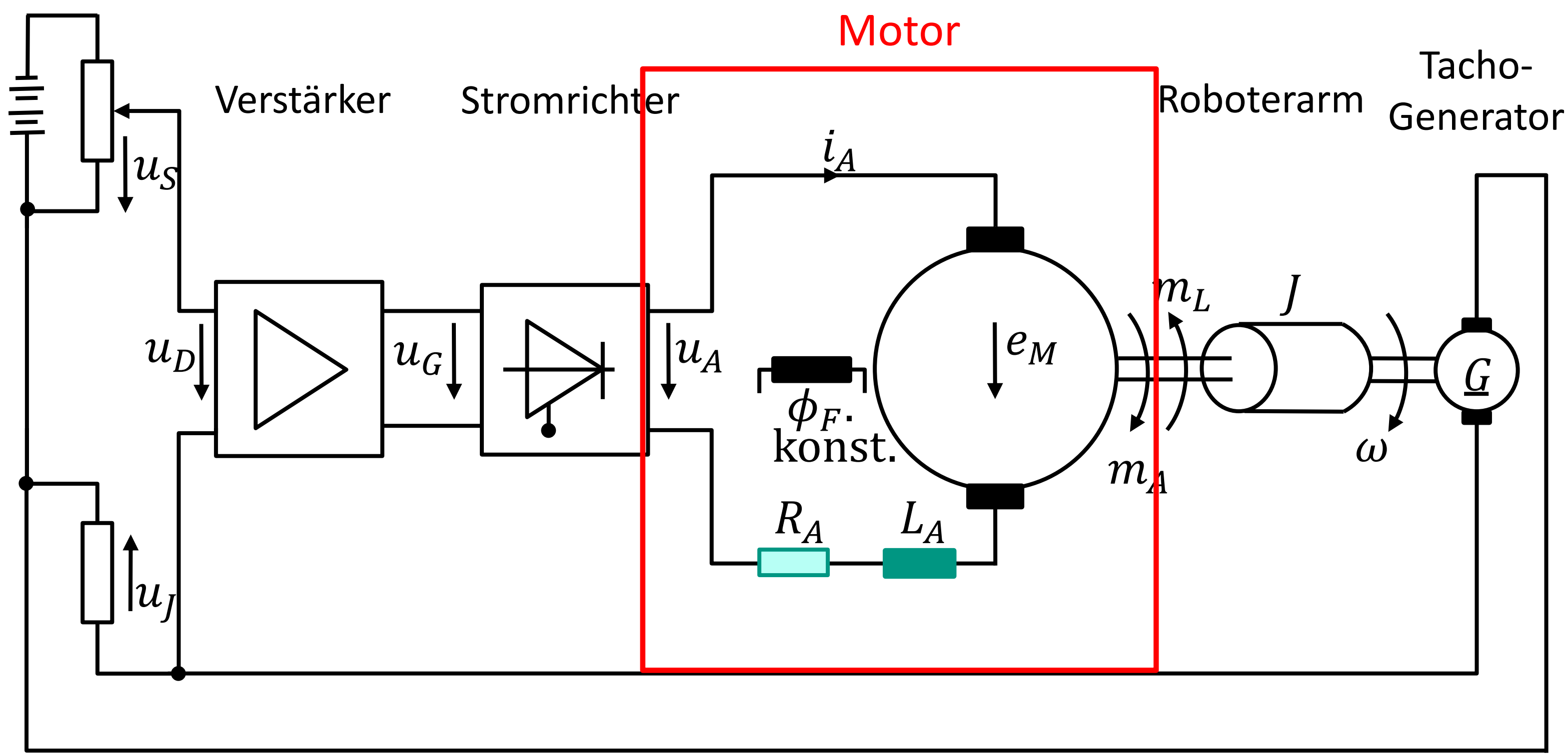
$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)$$

$$m_A(t) = J \cdot \frac{d}{dt} \omega(t) + K_v \cdot \omega(t)$$

- Wo kommen diese Gleichungen her?

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs



*Nach: **Regelungstechnik; O. Föllinger***

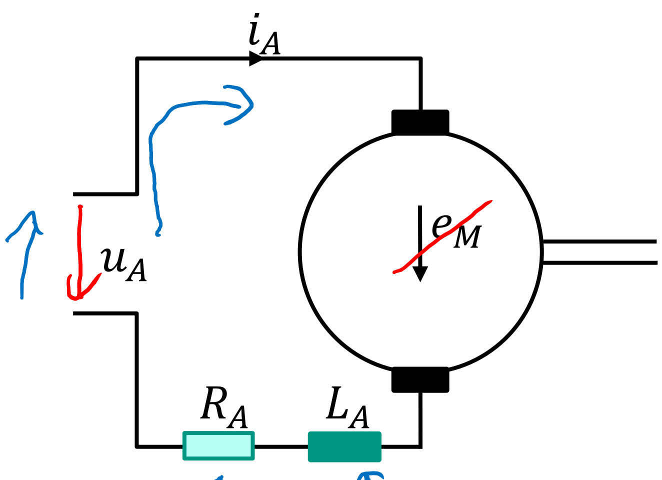
Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- 2. Kirchhoffsches Gesetz:
  - (vom Rotor induzierte Spannung (e_M) wird vernachlässigt)

$$\sum_{k=1}^{n} u_k = 0 = u_L + u_R - u_A$$

$$u_A = u_L + u_R$$

$$\boxed{u_A = L_A \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_A(t) + R_A \cdot i_A(t)}$$



Bez zw.

Regelgröße $i_A(t)$

Stellgröße $u_A(t)$

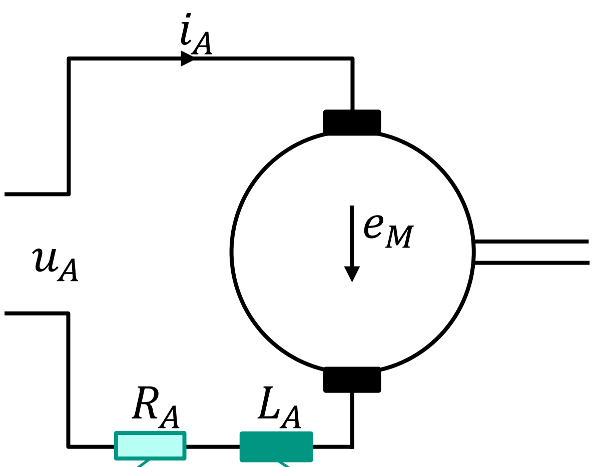
$$u_L = L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)$$

$$u_R = R_A \cdot i_A(t)$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- 2. Kirchhoffsches Gesetz:
  - (vom Rotor induzierte Spannung (e_M) wird vernachlässigt)

$$\sum_{k=1}^{n} u_k = 0$$



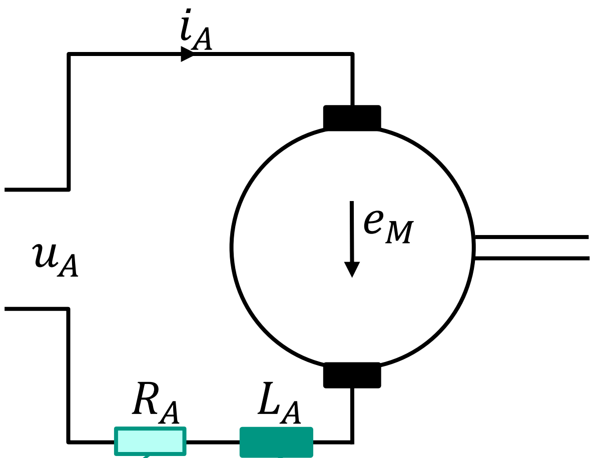
$$u_R = R_A \cdot i_A$$

$$u_L = L_A \cdot \mathrm{i_A} \frac{d}{dt}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- 2. Kirchhoffsches Gesetz:
  - (vom Rotor induzierte Spannung (e_M) wird vernachlässigt)

$$\sum_{k=1}^{n} u_k = 0$$



$$u_R(t) + u_L(t) - u_A(t) = 0$$
$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)$$

$$u_R = R_A \cdot i_A$$

$$u_L = L_A \cdot \frac{d}{dt} \mathrm{i_A}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$\boxed{u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)}$$

$$U_A(s) = \mathcal{L}\{u_A(t)\}$$

$$= \mathcal{L}\{R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)\}$$

$$= R_A \cdot \mathcal{L}\{i_A(t)\} + L_A \cdot \underline{\mathcal{L}\{\frac{d}{dt} i_A(t)\}}$$

$$\boxed{= R_A \cdot I_A(s) + L_A \cdot s \cdot I_A(s)}$$

Lin. Gesetz

$$\mathcal{L}\{\alpha f(t) + \beta \cdot g(t)\}$$

$$= \alpha \cdot \mathcal{L}\{f(t)\}$$

$$+ \beta \cdot \mathcal{L}\{g(t)\}$$

Diff. Gesetz

$$\mathcal{L}\{\frac{d}{dt} f(t)\}$$

$$= s \cdot \mathcal{L}\{f(t)\}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)$$

$$U_A(s) = L\{u_A(t)\}$$

$$= L\{R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)\}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)$$

$$U_A(s) = L\{u_A(t)\}$$

$$= L\{R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)\}$$

Linearitätssatz:
$L\{\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)\} = \alpha f_1(s) + \beta f_2(s)$

$$= R_A \cdot L\{i_A(t)\} + L_A \cdot L\{\frac{d}{dt} i_A(t)\}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)$$

$$U_A(s) = L\{u_A(t)\}$$

$$= L\{R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{d}{dt} i_A(t)\}$$

$$= R_A \cdot L\{i_A(t)\} + L_A \cdot L\{\frac{d}{dt} i_A(t)\}$$

$$= R_A \cdot I_A(s) + L_A \cdot s \cdot I_A(s)$$

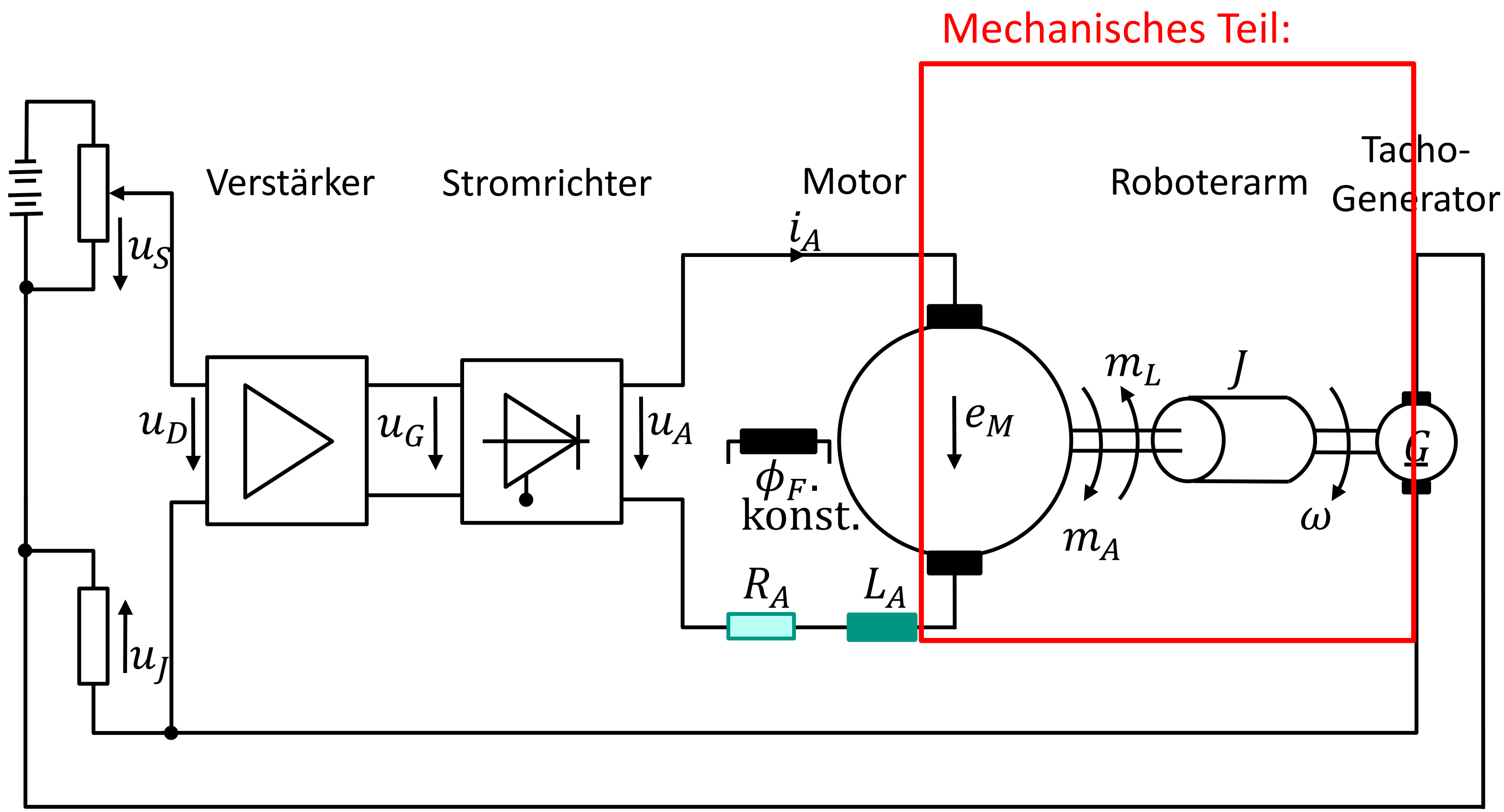
Linearitätssatz:
$L\{\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)\} = \alpha f_1(s) + \beta f_2(s)$

Differentiationssatz:

$$L\left\{\frac{d}{dt} f(t)\right\} = sF(s)$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- 1-DoF Rotationsgelenk



Nach: ***Regelungstechnik; O. Föllinger***

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

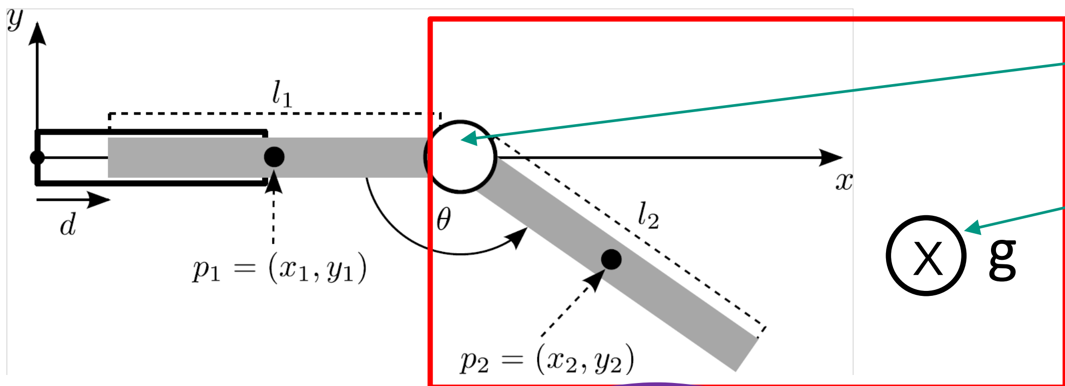
$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{m}_L = M(q)\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{c}(\dot{\boldsymbol{q}}, \boldsymbol{q}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$$

Vektoren und Matrizen

$M(q)\ddot{\boldsymbol{q}}$: Trägheitskräfte
$\boldsymbol{c}(\dot{\boldsymbol{q}}, \boldsymbol{q})$: Corioliskräfte
$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$: Gravitationskräfte

Bewegungsgleichung eines 1-DOF Rotationsgelenkes

1-DOF Rotationsgelenk aus dem Übungsbeispiel:

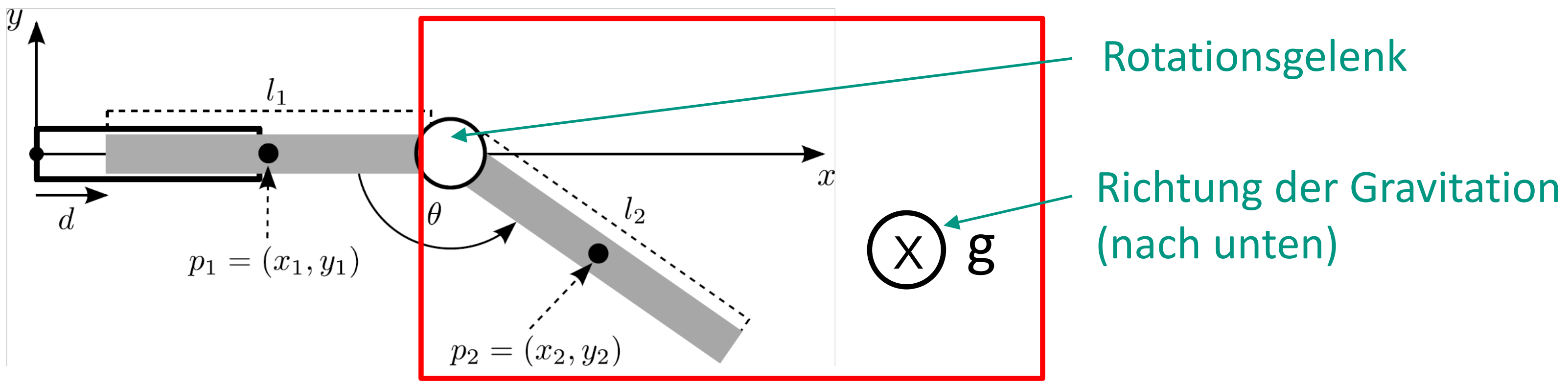


$$\boxed{m_L = \underbrace{J\cdot\ddot{\theta}}_{\substack{F = m\cdot\ddot{x} \\ = m\cdot a}} + \underbrace{K_r\cdot\dot{\theta}}_{\text{Reibung}}} + \cancel{g}$$

$g = 0$

Bewegungsgleichung eines 1-DOF Rotationsgelenkes

1-DOF Rotationsgelenk aus dem Übungsbeispiel:

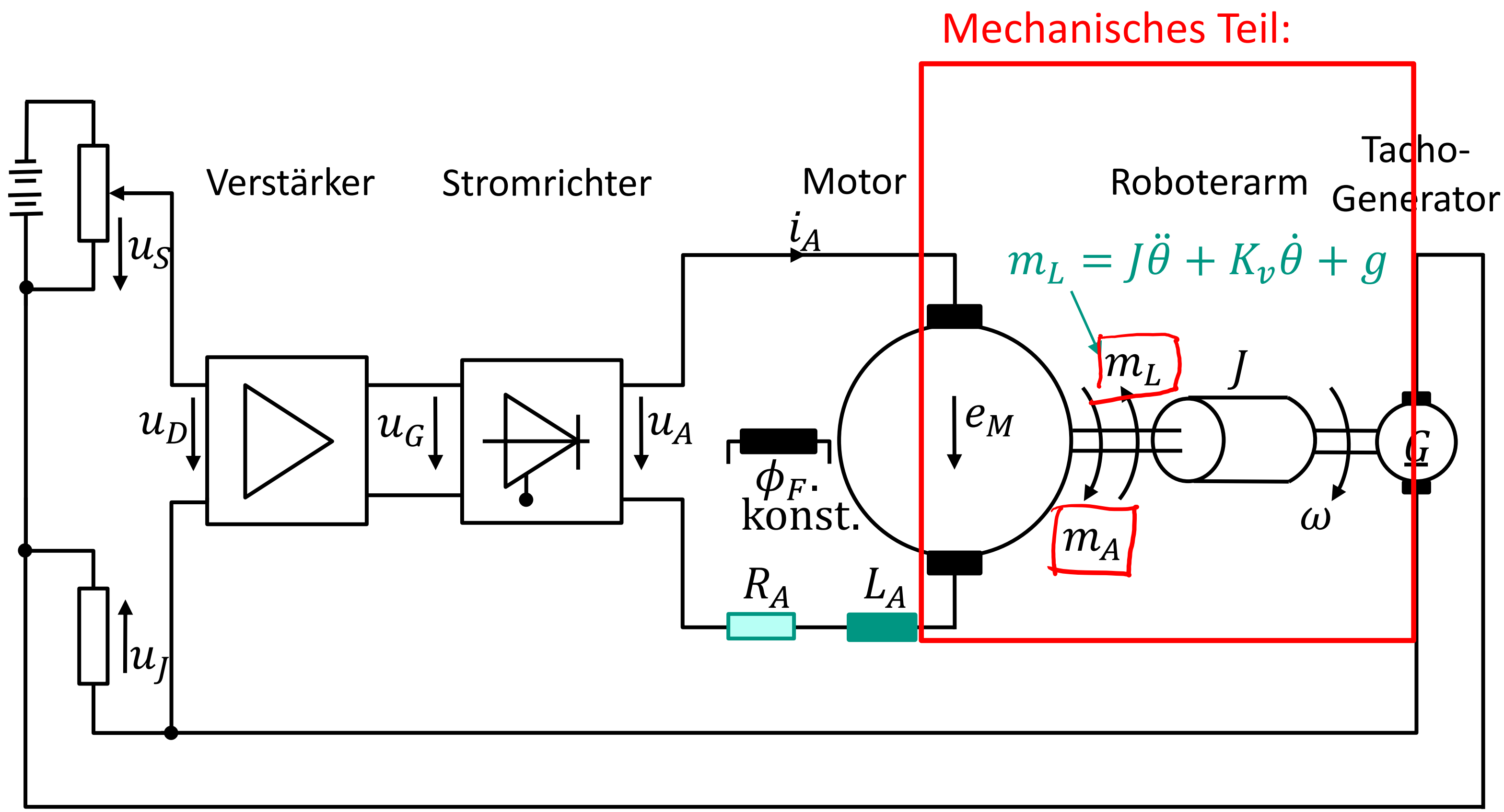


$$m_L = J\ddot{\theta} + K_v\dot{\theta} + g$$

K_v:	Drehzahlabhängige Reibungskonstante
J:	Trägheit bleibt konstant (Winkelunabhängig)
g:	Gravitationskraft bleibt constant ($m_2 \cdot g \cdot \frac{l_2}{2}$)

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

- 1-DoF Rotationsgelenk



*Nach: **Regelungstechnik; O. Föllinger***

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$m_L = J\ddot{\theta} + K_v\dot{\theta} + g$$

$$m_A - m_L = 0$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$m_L = J\ddot{\theta} + K_v\dot{\theta} + g$$

$\omega = \dot{\theta}$

$$m_A - m_L = 0$$

$$m_A = J\,\dot{\omega} + K_v\omega + g$$

Schwerkraft wirkt orthogonal zur Bewegung

$$g = 0$$

$$\boxed{m_A = J\,\dot{\omega} + K_v\omega}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$m_A(t) = J \cdot \frac{d}{dt}\omega(t) + K_v \cdot \omega(t)$$

$M_A(s) =$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$m_A(t) = J \cdot \frac{d}{dt}\omega(t) + K_v \cdot \omega(t)$$

$$M_A(s) = L\{m_A(t)\}$$

$$= L\{J \cdot \frac{d}{dt}\omega(t) + K_v \cdot \omega(t)\}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$m_A(t) = J \cdot \frac{d}{dt}\omega(t) + K_v \cdot \omega(t)$$

$$M_A(s) = L\{m_A(t)\}$$

$$= L\{J \cdot \frac{d}{dt}\omega(t) + K_v \cdot \omega(t)\}$$

Linearitätssatz:
$L\{\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)\} = \alpha f_1(s) + \beta f_2(s)$

$$= J \cdot L\{\frac{d}{dt}\omega(t)\} + K_v \cdot L\{\omega(t)\}$$

Aufgabe 3.2: Laplace-Transformation

$$m_A(t) = J \cdot \frac{d}{dt}\omega(t) + K_v \cdot \omega(t)$$

$$M_A(s) = L\{m_A(t)\}$$

$$= L\{J \cdot \frac{d}{dt}\omega(t) + K_v \cdot \omega(t)\}$$

Linearitätssatz:
$L\{\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)\} = \alpha f_1(s) + \beta f_2(s)$

$$= J \cdot L\{\frac{d}{dt}\omega(t)\} + K_v \cdot L\{\omega(t)\}$$

Differentiationssatz:

$$L\left\{\frac{d}{dt}f(t)\right\} = sF(s)$$

$$\boxed{= J \cdot s \cdot \Omega(s) + K_v \cdot \Omega(s)}$$

Aufgabe 3.3: Übertragungsfunktion

- Häufig Blöcke von folgendem Typ:
  - Lineares zeitinvariantes Übertragungsglied (LZI-Glied)

Stell $\boxed{u(t)} \rightarrow \boxed{G(t)} \rightarrow \boxed{y(t)}$ Regel

  - Im komplexen s-Bereich:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\mathcal{L}\{\text{Regel}\}}{\mathcal{L}\{\text{Stell}\}}$$

$$\boxed{Y(s) = G(s) \cdot U(s)}$$

  - Im Zeitbereich:

Faltungsregel der Laplace-Transformation

$$y(t) \quad = \quad g(t) * u(t) = \int_0^t g(t-\tau) * u(\tau) * d\tau$$

Aufgabe 3.3: Übertragungsfunktion

$$\text{Übertragungsfunktion} = \frac{L\{\text{Regelgröße}\}}{L\{\text{Stellgröße}\}}$$

$$U_A(s) = R_A \cdot I_A(s) + L_A \cdot s \cdot I_A(s)$$

$$\frac{I_A(s)}{U_A(s)} = \frac{\cancel{I_A(s)}\ 1}{R_A \cdot \cancel{I_A(s)} + L_A \cdot s \cdot \cancel{I_A(s)}}$$

$$\boxed{= \frac{1}{R_A + L_A \cdot s}}$$

Aufgabe 3.3: Übertragungsfunktion

$$\text{Übertragungsfunktion} = \frac{L\{\text{Regelgröße}\}}{L\{\text{Stellgröße}\}}$$

$$U_A(s) = R_A \cdot I_A(s) + L_A \cdot s \cdot I_A(s)$$

$$\frac{I_A(s)}{U_A(s)} =$$

Aufgabe 3.3: Übertragungsfunktion

$$\text{Übertragungsfunktion} = \frac{L\{\text{Regelgröße}\}}{L\{\text{Stellgröße}\}}$$

$$U_A(s) = R_A \cdot I_A(s) + L_A \cdot s \cdot I_A(s)$$

$$\frac{I_A(s)}{U_A(s)} = \frac{I_A(s)}{R_A \cdot I_A(s) + L_A \cdot s \cdot I_A(s)}$$

$$= \frac{I_A(s)}{I_A(s) \cdot (R_A + L_A \cdot s)}$$

$$= \frac{1}{R_A + L_A \cdot s}$$

Aufgabe 3.3: Übertragungsfunktion

$$\text{Übertragungsfunktion} = \frac{L\{\text{Regelgröße}\}}{L\{\text{Stellgröße}\}}$$

$$M_A(s) = J \cdot s \cdot \Omega(s) + K_v \cdot \Omega\,(s)$$

$$\frac{\Omega(s)}{M_A(s)} =$$

Aufgabe 3.3: Übertragungsfunktion

$$\text{Übertragungsfunktion} = \frac{L\{\text{Regelgröße}\}}{L\{\text{Stellgröße}\}}$$

$$M_A(s) = J \cdot s \cdot \Omega(s) + K_v \cdot \Omega\,(s)$$

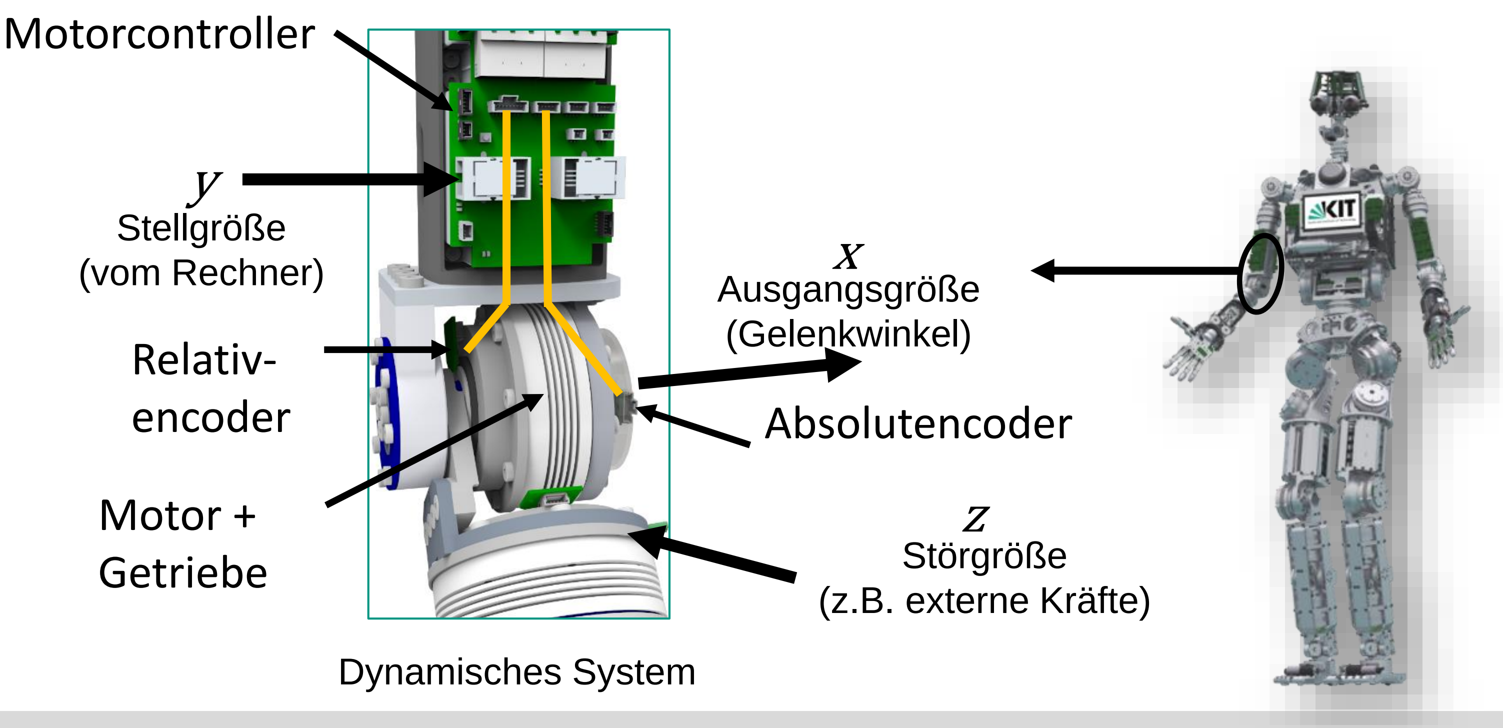
$$\frac{\Omega(s)}{M_A(s)} = \frac{\Omega(s)}{J \cdot s \cdot \Omega(s) + K_v \cdot \Omega\,(s)}$$

$$= \frac{\Omega(s)}{\Omega(s) \cdot (J \cdot s + K_v)}$$

$$\boxed{= \frac{1}{J \cdot s + K_v}}$$

Aufgabe 3.4: Regelung mit Simulink

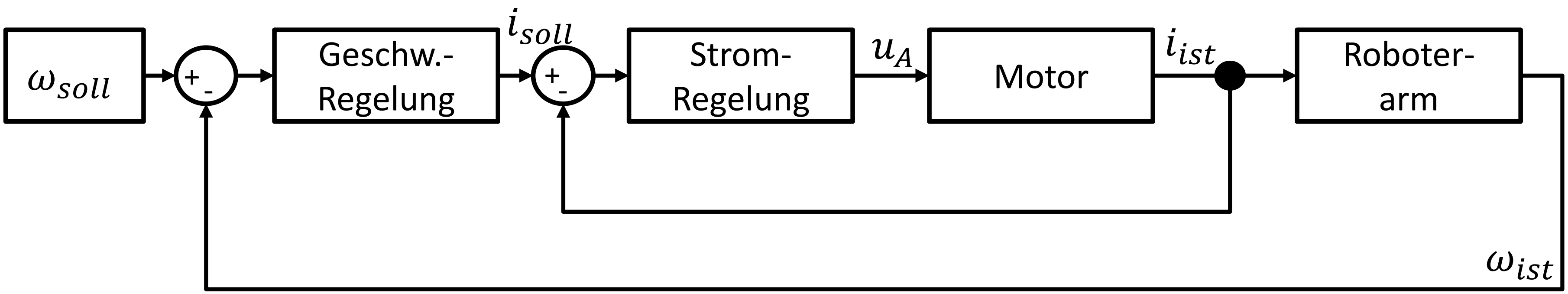
- Regelung eines Robotergelenks
  - Aufstellen der Übertragungsfunktionen für die Einzelsysteme
  - Aufbau der Simulation in Simulink
  - Tunen der Reglerparameter



Aufgabe 3.4: Zwischenergebnisse

ω_{soll}: Vorgabe Winkelgeschw.
ω_{ist}: Gemessener Winkelgeschw.
i_A: Motostrom
u_A: Spannung

- Blockdiagramm des Regelkreises



- Übertragungsfunktionen

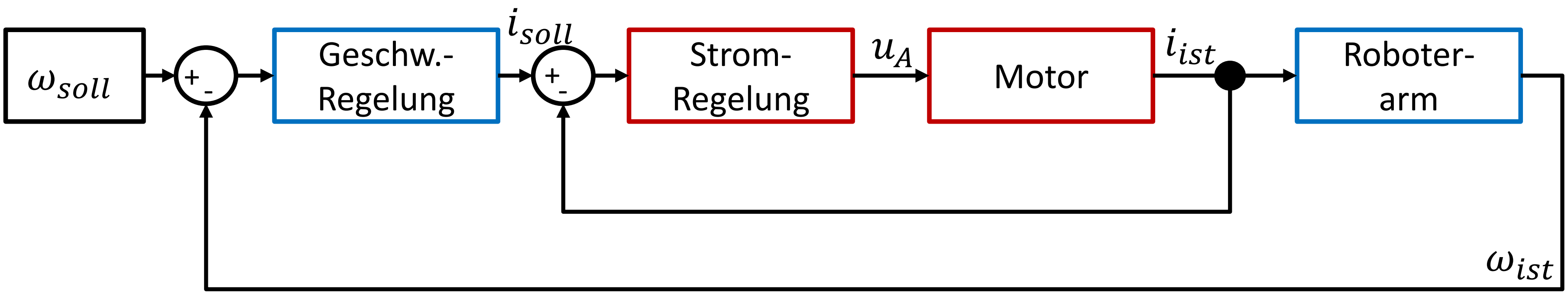
Motor: $\frac{I_A(s)}{U_A(s)} = \frac{1}{R_A + L_A \cdot s}$

Mechanik: $\frac{\Omega(s)}{M_A(s)} = \frac{1}{J \cdot s + K_v}$

Aufgabe 3.4: Zwischenergebnisse

ω_{soll}: Vorgabe Winkelgeschw.
ω_{ist}: Gemessener Winkelgeschw.
i_A: Motostrom
u_A: Spannung

- Blockdiagramm des Regelkreises



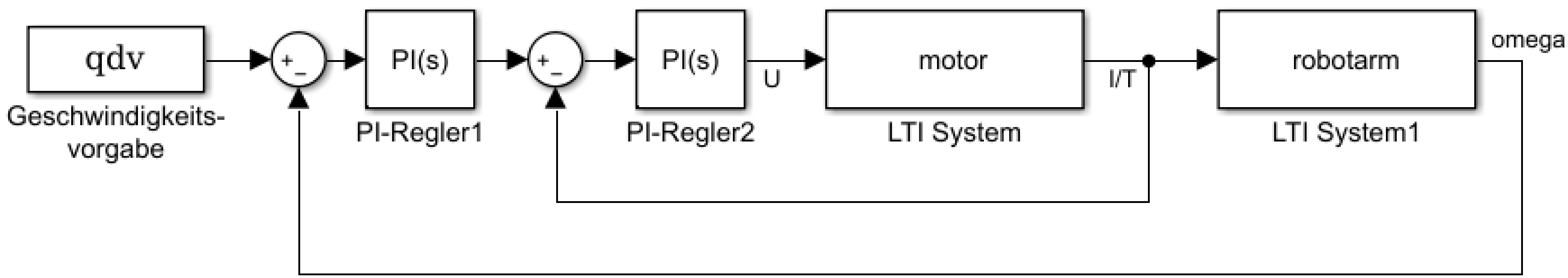
- Übertragungsfunktionen

Motor: $\frac{I_A(s)}{U_A(s)} = \frac{1}{R_A + L_A \cdot s}$

Mechanik: $\frac{\Omega(s)}{M_A(s)} = \frac{1}{J \cdot s + K_v}$

Aufgabe 3.4: Regelung mit Simulink

- Regelkreis in Simulink
  - Außen: Geschwindigkeitsregelung
  - Innen: Stromregelung



Motor: $\frac{I_A(s)}{U_A(s)} = \frac{1}{R_A + L_A \cdot s}$

Mechanik: $\frac{\Omega(s)}{M_A(s)} = \frac{1}{J \cdot s + K_v}$