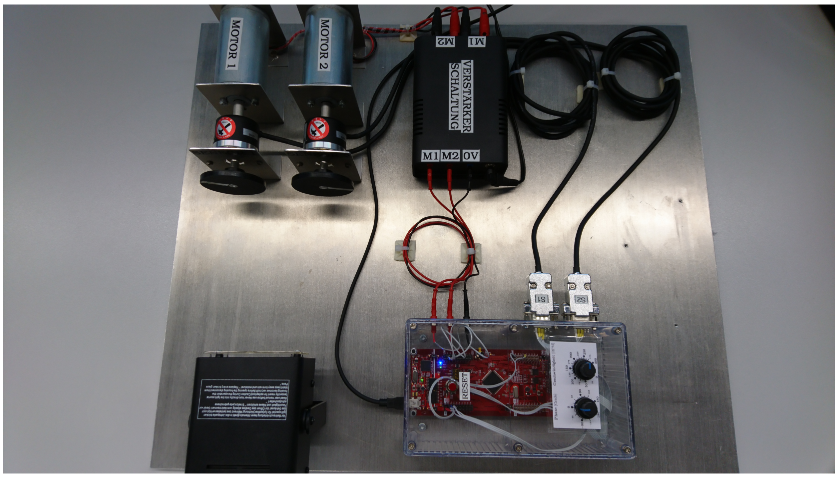
Lehrstuhl für Regelungstechnik
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Praktikum
Moderne Methoden der Regelungstechnik

Synchronisation zweier Gleichstrommotoren

Stand: 10. April 2024



Inhaltsverzeichnis

Theorie und Versuchsvorbereitung

Lesen Sie die gesamte Versuchsanleitung (Theorie *und* Versuchsdurchführung) vor dem Versuchstermin aufmerksam durch. Zu Beginn des Praktikumsversuchs werden Ihnen Fragen gestellt, um das Verständnis zu überprüfen. Bearbeiten Sie die Aufgaben 1-10 und geben Sie eine saubere Hausaufgabe pro Gruppe Versuchs ab. Sollten Sie einzelne Aufgaben nicht lösen können, so versuchen Sie diese in Gruppenarbeit zu beantworten oder wenden Sie sich rechtzeitig vor dem Versuchstermin an den entsprechenden Betreuer.

Empfohlene Literaturen:

1. *Regelungstechnik 1*, Jan Lunze, 2010.
2. *Regelungstechnik*, Otto Föllinger, 2013.

1 Einleitung und Motivation

1.1 Zielsetzung

Folgende Inhalte sollen in diesem Praktikumsversuch behandelt werden:

- Entkoppelung eines Mehrgrößensystems
- Konstruktion eines Reglers mit perfektem Folgeverhalten bzw. mit Trennung des Führungs- und des Störverhaltens
- Implementierung des Reglers in MATLAB/SIMULINK
- automatische Codegenerierung mit MATLAB/SIMULINK für das Evaluationsboard *„Launchpad-XL F28377S“* von Texas Instruments

Die für die ersten beiden Punkte benötigte Theorie wird in Kapitel 3 erläutert.

1.2 Versuchsaufbau

Die Abbildung 1 zeigt ein Foto dieses Versuchsaufbaus mit allen wichtigen Bestandteilen, die beschriftet werden.

In diesem Versuch sollen die zwei Gleichstrommotoren (1), welche die maximale Versorgungsspannung von 12 V haben, synchronisiert werden. Der Regelungsalgorithmus wird von einem Mikrocontroller (5) (LAUNCHXL-F28377S) ausgeführt. Der Ausgang des Mikrocontrollers ist ein PWM-Signal (Pulsweiten moduliertes Signal), mit welchen über die Transistoren einer Verstärkerschaltung (4) die beiden Motoren angesteuert werden. Da somit die Verstärkung des Reglerausgangs auf den maximalen Wert von 12 V der Spannungsversorgung außerhalb des Evaluationsboards nicht erfolgt, müssen die Ausgänge des Reglers gesättigt werden. Der Mikrocontroller kann mit einem Reset-Knopf neu gestartet werden.

Um die Drehwinkel der Motoren zu erfassen, wird jeweils ein Encoder (2) angebracht. Die gemessenen Daten werden gleichzeitig im Mikrocontroller gespeichert und zum Rechner zurückgeführt. Mit Hilfe eines Stroboskops (3) kann man das Verhalten der Motoren überprüfen.

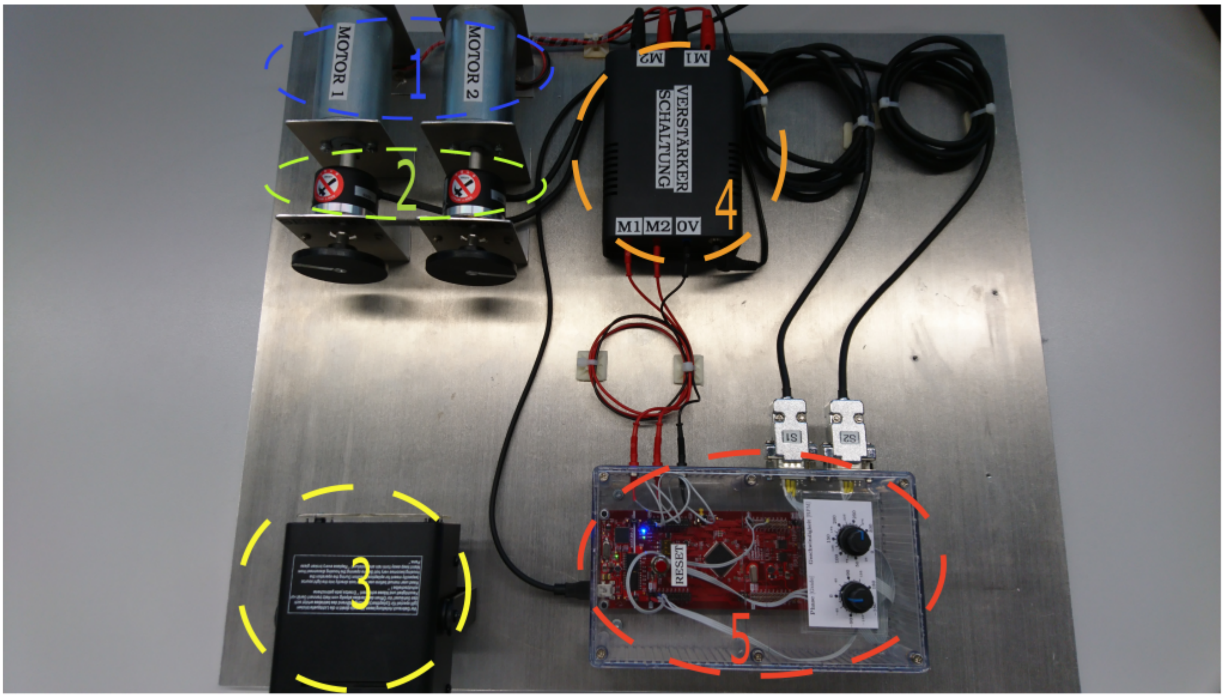


Abbildung 1: Foto des Versuchträgers inkl. Beschriftung

2 Modellbildung

Ein Gleichstrommotor ist eine rotierende elektrische Maschine, die elektrische Leistung in mechanische umwandelt. Das physikalische Blockschaltbild eines Gleichstrommotors ist in Abbildung 2 zu geben. Es besteht aus einem elektrischen und mechanischen Teilsystem, welches separat wie folgt modelliert werden kann:

- Elektrisches Teilsystem:

$$U = RI + L\dot{I} + U_i \tag{1}$$

- Mechanisches Teilsystem:

$$J\ddot{\varphi} = M_{\text{el}} - M_{\text{Last}} \tag{2}$$

Darin ist:
I der Ankerstrom, U die Ankerspannung, L die Induktivität der Ankerwicklung, U_i die induzierte Spannung, M_{el} das Antriebsmoment, M_{Last} das Lastmoment und φ der Drehwinkel des Motors.

Die induzierte Spannung U_i und das Antriebsmoment M_{el} werden durch die folgenden Zusammenhänge bestimmt:

$$\begin{aligned} U_i &= k\dot{\varphi} \\ M_{\text{el}} &= kI. \end{aligned}$$

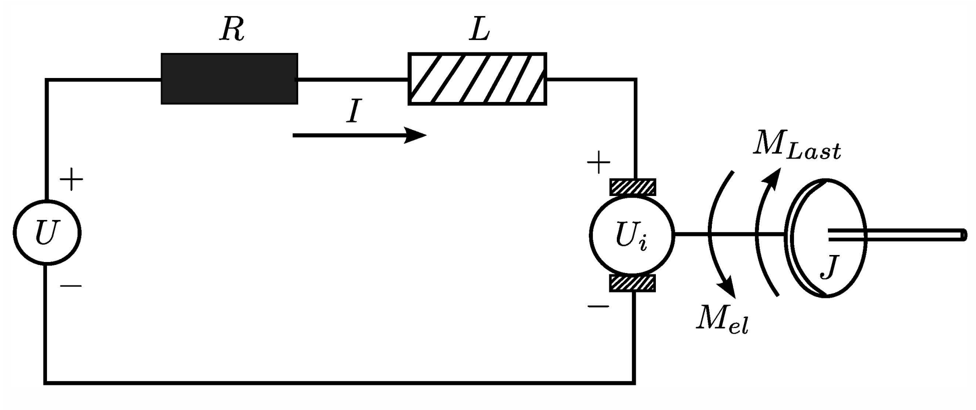


Abbildung 2: Ersatzschaltbild eines Gleichstrommotors (Quelle: Regelungstechnik, O. Föllinger, 2013)

Unter Vernachlässigung der Induktivität $(L = 0)$, lautet die Dynamik eines Gleichstrommotors:

$$\begin{aligned}\ddot{\varphi} &= \frac{1}{J}\left(M_{\mathrm{el}} - M_{\mathrm{Last}}\right) = \frac{1}{J}\left(kI - M_{\mathrm{Last}}\right) = \\ &= \frac{1}{J}\left(k\frac{U - k\dot{\varphi}}{R} - M_{\mathrm{Last}}\right) \qquad (3)\end{aligned}$$

mit

- Massenträgheitsmoment des Motors $J = 175 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{kg\,m^2}$
- Ohmscher Widerstand des Motors $R = 6{,}5\,\Omega$
- Motorkonstante $k = 0{,}031\,\mathrm{N\,m/A}$

Im Praktikumsversuch soll die mittlere Winkelgeschwindigkeit und der Phasenwinkel (die Differenz der beiden Winkel) zweier Gleichstrommotoren geregelt werden (siehe Abbildung 1).

Aufgabe 1:
Stellen Sie das aus zwei gleichen Gleichstrommotoren bestehende System in der Form:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \qquad (4)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \qquad (5)$$

dar, wobei $y_1 = \varphi_1 - \varphi_2$ die Differenz der beiden Winkel φ_1 und φ_2 und y_2 die mittlere Winkelgeschwindigkeit der beiden Motoren sei. Der Eingangsvektor $\mathbf{u}$ besteht aus den Spannungen U_1 und U_2, welche an die Motoren angelegt werden können und der Zustandsvektor $\mathbf{x}$ sei:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 & \dot{\varphi}_1 & \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix}^T \qquad (6)$$

Wie lauten die Matrizen $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$? (Es tritt kein Lastmoment auf)

Aufgabe 2:
Falls die Motoren nun auch noch mit einem Lastmoment beaufschlagt werden, erhält man ein System der Form:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{N}\mathbf{m}_{\text{Last}} \quad (7)$$
$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (8)$$

Wie Lautet die Matrix $\mathbf{N}$?

3 Theoretische Grundlagen zum Regelungsentwurf

3.1 Entkopplung eines Mehrgrößensystems

Für die Entkopplung eines Mehrgrößensystems betrachtet man die Darstellung des Systems im Zustandsraum:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (9)$$
$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (10)$$

mit $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n\times m}$, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{m\times n}$. Das System hat also jeweils m Ein- und Ausgänge und n Zustände. In der Regel wirken nun die Eingänge jeweils auf mehrere Ausgänge des Systems (Siehe die Abbildung 3).

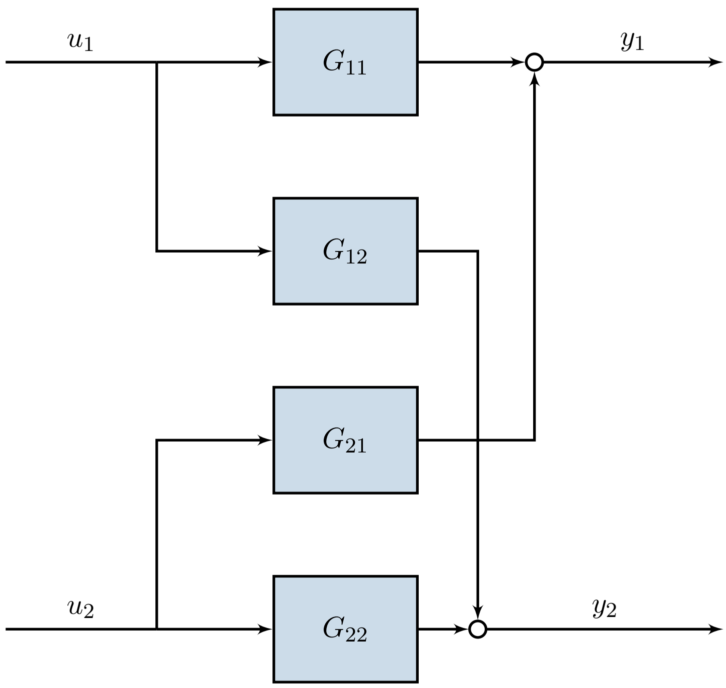


Abbildung 3: Koppelungen der Eingänge in einem Systems mit 2 Eingängen

Ziel einer Entkoppelung ist es nun den Eingangsvektor $\mathbf{u}$ so zu wählen, dass jede Ausgangsdynamik von genau einem neuen, frei vorgebbaren Eingang v_i abhängt und somit die Verkoppelung der Systemeingänge aufgehoben wird (Siehe die Abbildung 4).

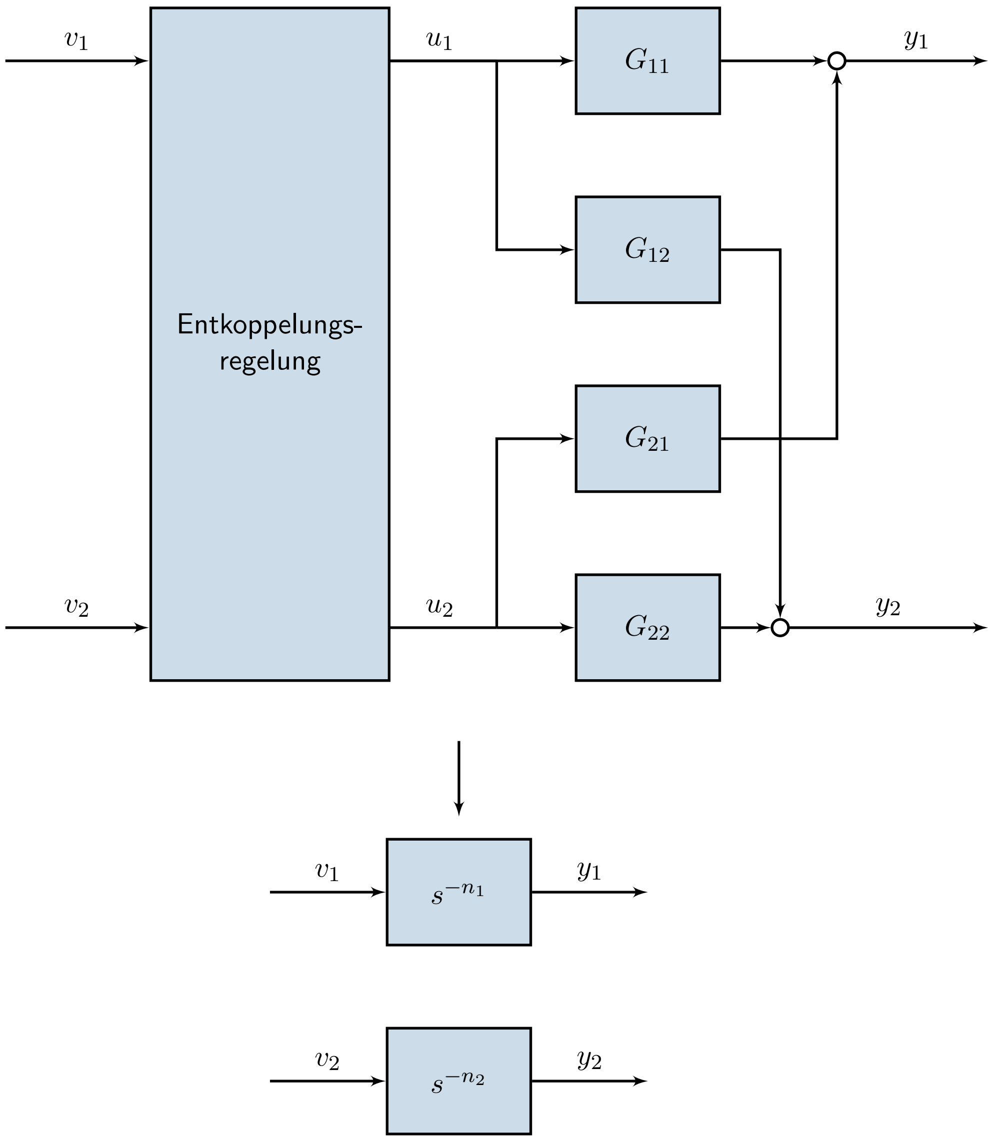


Abbildung 4: Entkoppelungen eines Systems mit 2 Eingänge

Um das hierfür benötigte Regelgesetz $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ zu bestimmen, wird die Dynamik der Systemausgänge betrachtet. Für die 1.Ableitung des i-ten Ausgangs gilt:

$$\dot{y}_i = C_i\dot{\mathbf{x}} = C_i\mathbf{A}\mathbf{x} + C_i\mathbf{B}\mathbf{u} \tag{11}$$

wobei C_i die i-te Zeile der Matrix $\mathbf{C}$ bezeichnet. Falls der zweite Summand in (11) Null ist, wirkt kein Eingang direkt auf $\dot{y}_i$. In diesem Falle kann man (11) solange differenzieren bis der zweite Summand ($C_i\mathbf{A}^{n_i-1}\mathbf{B}$) verschieden von Null ist und somit $\mathbf{u}$ zum ersten Mal auf eine Ableitung von y_i wirkt. Die Ableitung bei der dies zum ersten mal vorkommt, bezeichnet man als die Differenzordnung n_i des Ausgangs y_i.

Für diese Ableitung gilt:

$$y_i^{(n_i)} = C_i\mathbf{A}^{n_i}\mathbf{x} + \underbrace{C_i\mathbf{A}^{n_i-1}\mathbf{B}}_{\neq 0}\mathbf{u} \tag{12}$$

Führt man diesen Schritt für alle Ausgänge des Systems aus, so erhält man schließlich:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} y_1^{(n_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(n_m)} \end{pmatrix}}_{=\mathbf{v}} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_1\mathbf{A}^{n_1} \\ \vdots \\ C_m\mathbf{A}^{n_m} \end{bmatrix}}_{=\mathbf{F}} \mathbf{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} C_1\mathbf{A}^{n_1-1}\mathbf{B} \\ \vdots \\ C_m\mathbf{A}^{n_m-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}}_{=\mathbf{G}} \mathbf{u} \tag{13}$$

Ist die Matrix $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{m\times m}$ invertierbar, so lautet das gesuchte Regelgesetz für die Entkoppelung:

$$\mathbf{u} = \mathbf{G}^{-1}(-\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{v}) \tag{14}$$

Das Regelgesetz (14) ist so gewählt, dass sich beim Einsetzen in die Systemdynamik (13) folgendes ergibt:

$$\begin{pmatrix} y_1^{(n_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(n_m)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix} \tag{15}$$

Das heißt die n_i-te Ableitung des i-ten Ausgangs kann direkt mit v_i vorgegeben werden. Die Auslegung des Reglers erfolgt somit in 2 Schritten:

1. Bestimmung von $\mathbf{u}$, so dass eine Entkoppelung der Eingänge erreicht wird:

$$\mathbf{u} = \mathbf{G}^{-1}(-\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{v}) \tag{16}$$

2. Bestimmung von $v_i = v_i(y_i, \dot{y}_i, \ldots, y_i^{(n_i)})$, so dass der i-te Ausgang die gewünschte Dynamik aufweist.

Aufgabe 3:
Bestimmen Sie die Differenzordnung für y_1 und y_2 vom Streckenmodell ohne Lastmoment.

Aufgabe 4:
Tritt eine interne Dynamik auf? Falls Ja: Welche Aussage können Sie über ihre Stabilität machen?
Hinweis: Nehmen Sie an dass alle invarianten Nullstellen des Systems in der offenen linken komplexen Halbebene liegen.

Aufgabe 5:
Bringen Sie das System in die Form (13).

- Wie lauten die Matrizen $\mathbf{F}$ und $\mathbf{G}$?
- Ist $\mathbf{G}$ invertierbar?

3.2 Konstruktion eines Reglers mit perfektem Folgeverhalten

Im vorhergehenden Abschnitt wurde die Berechnung von $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ beschrieben, so dass gilt:

$$y_i^{(n_i)} = v_i \tag{17}$$

In diesem Abschnitt soll nun die Berechnung von v_i beschrieben werden, so dass y_i perfekt einem gewünschten Signalverlauf $w_i(t)$ folgt. Unter einem perfekten Folgeverhalten versteht man, dass der Fehler zwischen w_i und y_i exponentiell abklingt. Da v_i jedoch erst auf die n_i-te Ableitung des Ausgangs wirkt, können nur Signalverläufe vorgegeben werden, welche mindestens bis zur n_i-ten Ableitung stetig sind. (Man kann z.B. nicht erwarten, dass sich die Geschwindigkeit eines Körpers sprungförmig ändert.) Kennt man den Signalverlauf bis zur n_i-te Ableitung so führt das folgende Regelgesetz zu dem gewünschten Folgeverhalten:

$$v_i = w_i^{(n_i)} + a_{i,n_i-1}(w_i^{(n_i-1)} - y_i^{(n_i-1)}) + ... + a_{i,0}(w_i - y_i) \tag{18}$$

Setzt man dies in (17) ein so erhält man:

$$\begin{aligned} y_i^{(n_i)} &= w_i^{(n_i)} + a_{i,n_i-1}(w_i^{(n_i-1)} - y_i^{(n_i-1)}) + ... + a_{i,0}(w_i - y_i) \\ 0 &= w_i^{(n_i)} - y_i^{(n_i)} + a_{i,n_i-1}(w_i^{(n_i-1)} - y_i^{(n_i-1)}) + ... + a_{i,0}(w_i - y_i) \\ 0 &= e_i^{(n_i)} + a_{i,n_i-1}e_i^{(n_i-1)} + ... + a_{i,0}e_i \end{aligned} \tag{19}$$

mit $e_i = w_i - y_i$. Wählt man hierin die Koeffizienten $a_{i,1}...a_{i,n_i}$ so, dass alle Lösungen der Gleichung:

$$0 = s^{n_i} + a_{i,n_i-1}s^{n_i-1} + ... + a_{i,0} \tag{20}$$

einen negativen Realteil haben, klingt der Fehler e_i exponentiell ab.

Falls man nicht sicherstellen kann, dass der Signalverlauf w_i bis zur n_i-ten Ableitung stetig ist, oder wenn diese Ableitungen dem Regler nicht zur Verfügung gestellt werden können, kann ein Führungsfilter verwendet werden, um die benötigten Ableitungen des Führungssignals zu konstruieren. Dieser hat die Struktur:

$$\hat{y}_i^{(n_i)} = -b_{i,n_i-1}\hat{y}_i^{(n_i-1)} - ... - b_{i,0}\hat{y}_i + b_{i,0}w_i \tag{21}$$

Anstatt der nicht verfügbaren Signale $w^{(n_i)}...\dot{w}_i$ können nun die im Filter erzeugten Signale $\hat{y}^{(n_i)}...\dot{\hat{y}}_i$ verwendet werden:

$$v_i = \hat{y}_i^{(n_i)} + a_{i,n_i-1}(\hat{y}_i^{(n_i-1)} - y_i^{(n_i-1)}) + ... + a_{i,0}(\hat{y}_i - y_i) \tag{22}$$

Der Ausgang y_i folgt dann perfekt dem Ausgang des Führungsfilters $\hat{y}_i$. Die Übertragungsfunktion des Führungsfilters ist:

$$G(s) = \frac{\hat{y}(s)}{w(s)} = \frac{b_{i,0}}{s^{n_i} + b_{i,n_i-1}s^{n_i-1} + ... + b_{i,0}} \tag{23}$$

Die charakteristische Gleichung, welche das Abklingen des Folgefehlers e_i beschreibt, ist mit (20) gegeben. Die Dynamik, welche das Abklingen des Folgefehlers beschreibt, wird als *Störverhalten* bezeichnet, während die Dynamik des Führungsfilters als *Führungsverhalten* bezeichnet wird. Durch die Verwendung der obigen Reglerstruktur ist es möglich verschiedene Dynamiken für das Folge- und das Störverhalten vorzugeben. Da die Frequenz und die Amplituden der Störungen sich oft stark von den selben Größen der gewünschten Trajektorie unterscheiden, kann es sehr nützlich sein zwei verschiedene Dynamiken vorzugeben.

Hinweis:
Nutzen Sie von nun an die natürliche Zeitkonstante für die Geschwindigkeitsregelung des Gleichstrommotors:

$$T := \frac{JR}{k^2} \tag{24}$$

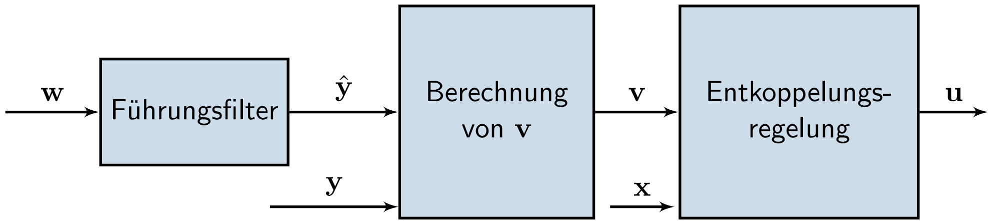


Abbildung 5: Blockschema der Regelung

Aufgabe 6:
Bestimmen Sie die Koeffizienten des Führungsfilters für y_2 nach (23), so dass dieser folgende Übertragungsfunktion aufweist:

$$\frac{\hat{y}_2}{w_2} = \frac{1}{1.2Ts + 1} \tag{25}$$

Führen Sie auch die Rücktransformation in den Zeitbereich durch.

Aufgabe 7:
Die Zeitkonstante für das Führungsverhalten für y_1 sei $0.6T$. Bestimmen Sie den Führungsfilter für y_1 nach (23) so dass:

$$\frac{\hat{y}_1}{w_1} = \frac{1}{(0.6Ts + 1)^2} \tag{26}$$

Führen Sie auch die Rücktransformation in den Zeitbereich durch.

Aufgabe 8:
Um stationäre Genauigkeit zu gewährleisten bzw. um konstante Störungen auszuregeln, soll das Regelgesetz (18) um einen I-Anteil erweitert werden. Wie lautet das Regelgesetz für v_1 und v_2, wenn für die Fehlerdynamiken die folgenden charaktertistischen Polynome erreicht werden sollen:

$$0 = (0.4Ts + 1)^3 e_1 \tag{27}$$
$$0 = (0.4Ts + 1)^2 e_2 \tag{28}$$

Aufgabe 9:
Wie muss $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ gewählt werden, damit die Ausgänge y_1 und y_2 mit der gewünschten Fehlerdynamik dem Ausgang des Führungsfilters folgen?
Hinweis: Sie müssen Matrizen *nicht* explizit einsetzen.

Aufgabe 10:
Die Zeitkonstanten für die Fehler- bzw. Führungsdynamik sind ein Maß für die Winkelgeschwindigkeit mit der Fehler bzw. Störungen ausgeregelt werden können. Was spricht dagegen diese Zeitkonstanten beliebig klein zu machen?

4 Realisierung des Reglers

Die Realisierung des Reglers erfolgt auf einem Entwicklungskit von Texas Instruments (Launchpad-XL F28377S). Dafür existiert die Unterstützung von Mathworks, so dass es möglich ist, den Regler in Matlab/Simulink zu implementieren und anschließend den C-Code für den Mikrocontroller automatisch zu erzeugen. Um die automatische Codegenerierung aus Simulink durchführen zu können, sind die drei folgenden Software benötigt:

- Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors:
  Generiert automatisch den C-Code aus Simulink für den Mikrocontroller.
- Code Composer Studio CCSv6:
  Kompiliert den erzeugten C-Code und übersetzt ihn zu Maschinencode.
- TI controlSUITE v3.3.9:
  Enthält die entsprechenden Treiber für die Platinen von Texas Instruments.

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass ...

- der Regler in der selben Umgebung erstellt wird, in der auch normalerweise die Modellbildung und Simulation des Systems stattfinden.
- die Struktur des Reglers sehr übersichtlich gestaltet werden kann (Blockschaltbilder in Simulink).
- man sich um viele I/O-Funktionalitäten nicht kümmern muss, da hierfür bereits Simulink-Blöcke existieren.

Die Nachteile eines solchen Vorgehens sind:

- es werden sowohl zusätzliche MATLAB/SIMULINK Toolboxen als auch die anderen Software benötigt (evtl. zusätzliche Kosten).
- nicht alle I/O-Funktionalitäten werden mit Simulink Blöcken abgedeckt.
- der erzeugte C-Code ist u.U. nicht optimal und nur beschränkt verständlich.

Versuchsdurchführung

Lesen Sie die folgenden Seiten zur Versuchsdurchführung vor dem Versuchstermin aufmerksam durch. Nach Ende des Versuchstermins fertigen Sie ein *Protokoll* an, das für jede der nachfolgenden Aufgaben alle relevanten Aspekte, Ideen, Beobachtungen, Maßnahmen, Besonderheiten etc. beinhaltet. Ergänzen Sie Ihr Protokoll um Plots von repräsentativen Messungen an den Gleichstrommotoren. Benennen Sie die einzelnen Signale und Achsen und markieren Sie wichtige Stellen. Bitte geben Sie Ihr Protokoll zu den Aufgaben 13-15 innerhalb von zwei Wochen nach Durchführung des Versuchs ab.

Vorbereitungen und Rechnerumgebung

- Kopieren Sie den Ordner `Vorlage_Motorsynch` auf dem Desktop und benennen Sie ihn nach Ihrer Gruppennummer.
- Starten Sie MATLAB R2016b.

Aufgabe 11:
Öffnen Sie das MATLAB Skript `template_init.m` und ergänzen Sie im Skript die Werte für die Matrizen $\mathbf{F}$ und $\mathbf{G}$ sowie für die Reglerparameter. Hinweis:

$$\begin{aligned} P\_omega &= a_{2,0} \\ I\_omega &= a_{2,-1} \\ &\vdots \\ D\_phi &= a_{1,1} \\ b\_omega\_0 &= b_{2,0} \\ &\vdots \end{aligned}$$

- Benennen Sie das Skript um als `synch_init.m` und führen Sie es aus. Nachdem der Betreuer die Ergebnisse überprüft hat, fügen Sie den folgenden Befehl im Skript hinzu (bzw kommentieren ihn ein):
`set_param('regler_synch','SimulationCommand','start')` .

Aufgabe 12:
Öffnen Sie nun das Modell `template_regler.slx` und speichern Sie dieses als `regler_synch.sxl` ab. In dem Modell gibt es grüne und orange gefärbte Blöcke (siehe Abbildung 6). Die grünen Blöcke müssen nicht mehr verändert werden, während die orangen so zu ergänzen sind, dass sich die gewünschte Reglerstruktur ergibt. (Hinweis: die grünen Blöcke können jedoch teilweise als Anregung verwendet werden.)

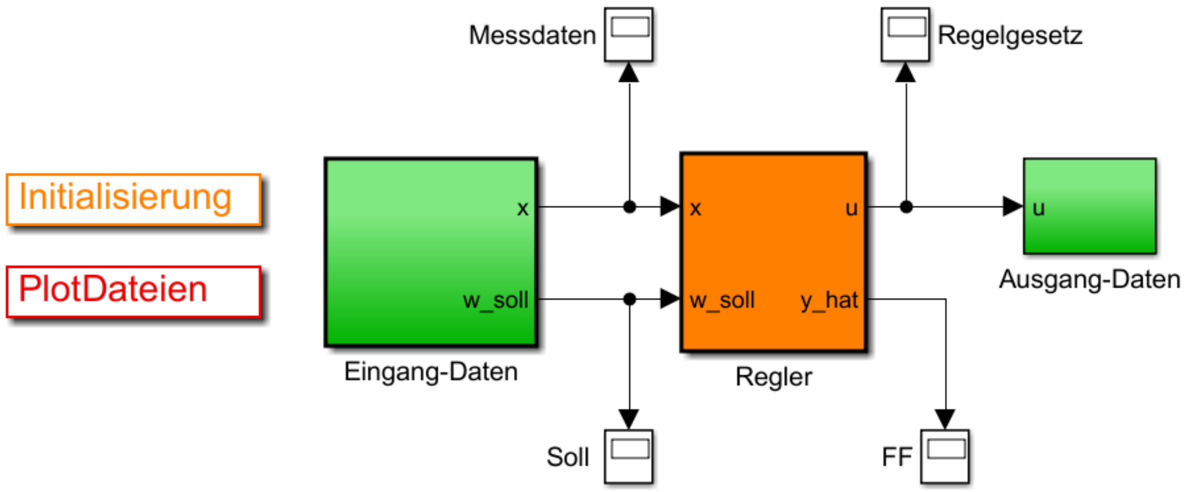


Abbildung 6: Frontplatte des Simulinkmodells

Versuchsdurchführung für alle Aufgaben:

- Stellen Sie sicher dass der Strom für den Versuchsaufbau angeschaltet ist. Falls noch ein Programm geladen ist, können die Motoren jetzt schon angehen.
- Speichern Sie den fertigen Regler ab und starten Sie die automatische Codegenerierung. Drücken Sie dazu den orangen Knopf **Initialisierung** im SIMULINK-Modell. Dieser führt das MATLAB-Skript aus, welches wiederum über die letzte Zeile darin das SIMULINK-Modell startet.

  SIMULINK erzeugt nun C-Code und ruft das CODE COMPOSER STUDIO von Texas Instruments auf um den C-Code zu kompilieren und den Maschinencode für den Mikrocontroller zu erzeugen. Dies geschieht voll automatisch und könnte eine Minute dauern.
  Sobald die Simulationszeit in SIMULINK läuft ist der Versuch bereit.
- Öffnen Sie den `Diagnostic Viewer`, um etwaige Fehler und Warnungen zu sehen und diagnostizieren. Diesen öffnen Sie über über `View` → `Diagnostic Viewer` in der SIMULINK-Menüleiste.
- Sie können nun mit den beiden Potentiometer die Phasenlage und die Geschwindigkeit der Motoren verändern. Um das Verhalten der Motoren zu überprüfen, können Sie das Stroboskop benutzen.
- Um das Programm zu stoppen, setzen Sie in MATLAB die Variable aus $= 1$ im Command Window. Öffnen Sie in Simulink das `External Mode Control Panel`, welcher sich unter Code → External Mode Control Panel befindet, und anschließend drücken Sie den **Download** Button.
- Stoppen Sie die Simulation und klicken Sie nun auf den Button **PlotDateien** im Simulink-Modell, um alle Messergebnisse darzustellen.

Aufgabe 13:
Stellen Sie das Stroboskop auf die höchste Blitzfrequenz. Führen Sie einen Versuchslauf durch bei dem Sie die Winkelgeschwindigkeit der Motoren so einstellen, dass sich ein "stehendes Bild" ergibt.

$T_1 \approx 15s$
$T_2 \approx 28s$
$T_3 \approx 39s$
$T_4 \approx 50s$

a) Wie viele solcher Winkelgeschwindigkeiten gibt es und wie groß sind sie?

b) Wie groß ist die Amplitude des Phasenfehlers im stationären Betrieb?

0.052 & -0.052

c) Was ist die höchste Frequenz des Stroboskops?

$\to 61 \frac{rad}{s} \div 2\pi \approx 10\,Hz$

Aufgabe 14:
Lassen Sie die beiden Motoren mit der max. Winkelgeschwindigkeit für ein stehendes Bild drehen. Nun soll der Effekt des P-Anteils für den Phasenfehler φ untersucht werden. Wiederholen Sie dazu den Versuch mit einem P-Anteil für φ, der mit Faktor 5 multipliziert wurde.

α ändern: $58s$

a) Wie verändert sich das Verhalten des Regelfehlers qualitativ?

reaktiver

b) Wie verändert sich die stationäre Amplitude des Regelfehlers?

von: ± 0.012 $\to \pm 0.005$

c) Was spricht gegen eine beliebig große Wahl des P-Anteils?

$\to$ Stellgrößenbeschränkung & Modellunsicherheiten & Rauschempfindlichkeit

Aufgabe 15:
Es soll nun das Führungsverhalten untersucht werden. Setzen Sie die Variable `schalter` auf 1 in MATLAB, so dass für die Winkelgeschwindigkeit ein Rechtecksignal als Sollwertvorgabe verwendet wird.
Hinweis: Die Parameteränderung erfolgt durch Drücken des **Download** Buttons im External Mode Control Panel.

1. Takt

Führen Sie nun zwei Versuchsläufe durch:

1) Einmal mit den Reglerparametern entsprechend den Werten aus der Hausaufgabe

2) Einmal mit einer modifizierten Zeitkonstante für das Führungsfilter von der mittleren Winkelgeschwindigkeit y_2: $T_{neu} = 0.12T$ $\to$ $T_{switch} = 60$

Beantworten Sie dann folgende Fragen:

a) Wird bei 1) die rechteckförmige Geschwindigkeitsreferenz gut nachgefahren? Geben Sie mögliche Gründe an?

b) Können Sie bei 2) Veränderungen am Führungsfilter und den Eingangs-/Ausgangsgrößen beobachten?

c) Wieso kann eine zu schnelle Wahl des Führungsfilters speziell im Mehrgrößenfall Probleme erzeugen?

Hinweis:
Laden das Modell `regler_synch.slx` mit dem Parameter aus=1 auf dem Mikrocontroller nach dem Versuch, um den Mikrocontroller für die nächste Gruppe vorzubereiten. Sonst läuft der Motor mit dem alten gespeicherten Programm automatisch, wenn man den Rechner startet.

P-Anteil war zu klein (falsch eingegeben in mat) $\to$ führt zu wind_up im I_Anteil $\to$ Stellgrößenbeschränkung