Versuchsanleitung - Praktikum RST 3

Entkoppelung und Mehrgrößenregelung an einem Dreitanksystem

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing Johann Reger
Versuchsbetreuer: M.Sc. Julian Willkomm
M.Sc. Alexander Barth

Name, Vorname	Matrikelnummer	Datum
Gruppenmitglieder		
Note / Testat	Unterschrift	

Versuchsanleitung - Praktikum RST 3

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**

1.1 Voraussetzungen . . . 3

1.2 Lernziele . . . 3

1.3 Anmerkung zur verwendeten Software . . . 3

2 Versuchsbeschreibung **4**

2.1 Die Regelstrecke . . . 4

2.2 Modellbildung . . . 5

3 Vorbereitung **6**

3.1 Berechnung von Grenzwerten . . . 6

3.2 Stationäre Betrachtung . . . 6

3.3 Linearisierung . . . 6

3.4 Zustandsrückführung zur Entkopplung . . . 6

3.5 Reglerentwurf . . . 8

3.6 Implementierung in Matlab/Simulink . . . 8

4 Durchführung **9**

4.1 Systemkalibrierung . . . 11

4.2 Entkopplung berechnen . . . 11

4.3 Reglerentwurf P-Regler . . . 11

4.4 Reglerentwurf PI-Regler . . . 12

A Anleitung zur Kalibrierung und Reglerimplementierung **14**

A.1 Kalibrierung . . . 14

A.2 Reglerimplementierung . . . 15

Versuchsanleitung - Praktikum RST 3

1 Einleitung

Im Zentrum des Praktikumversuchs steht die Regelung eines verkoppelten Mehrgrößensystems. Als Regelstrecke dient hierzu das Dreitanksystem DTS200 der Firma AMIRA.

1.1 Voraussetzungen

Voraussetzung für die Vorbereitung und Durchführung des Versuchs sind die Lehrinhalte der Lehrveranstaltung *Regelungs- und Systemtechnik 2* mit den Themen:

- Linearisierung von nichtlinearen Regelungssystemen
- Regelungsentwurf im Zustandsraum
- Stabilität der Ruhelage, Stabilitätskriterien anhand Eigenwertlage
- Übertragungsfunktionen, interne Stabilität, Zeitkonstantenform
- Kenngrößen im geschlossenen Kreis

1.2 Lernziele

- Entwurf einer Entkopplungsregelung mittels Zustandsrückführung
- Implementierung entkoppelter Regler am Modell 3-Tank
- Stabilität der internen Dynamik bzw. Nulldynamik

1.3 Anmerkung zur verwendeten Software

Sämtliche Untersuchungen sollen dabei mit Hilfe der Software MATLAB der Firma The MathWorks durchgeführt werden. Falls Ihnen für die Vorbereitungsaufgaben kein privater Zugang zu MATLAB möglich ist, so besteht die Möglichkeit in den Rechenkabinetten des Universitätsrechenzentrums die Software zu nutzen. Alternativ kann eine vergleichsweise kostengünstige Studentenversion von MATLAB erworben werden.

2 Versuchsbeschreibung

Als Regelstrecke wird das Dreitanksystem DTS200 der Firma AMIRA mit zwei Stellgrößen und drei messbaren Zustandsgrößen verwendet. Ein digitaler Regler wird unter Zuhilfenahme von *Simulink-Coder*[1] umgesetzt. Hierdurch ist eine einfache Implementierung der Regelalgorithmen möglich.

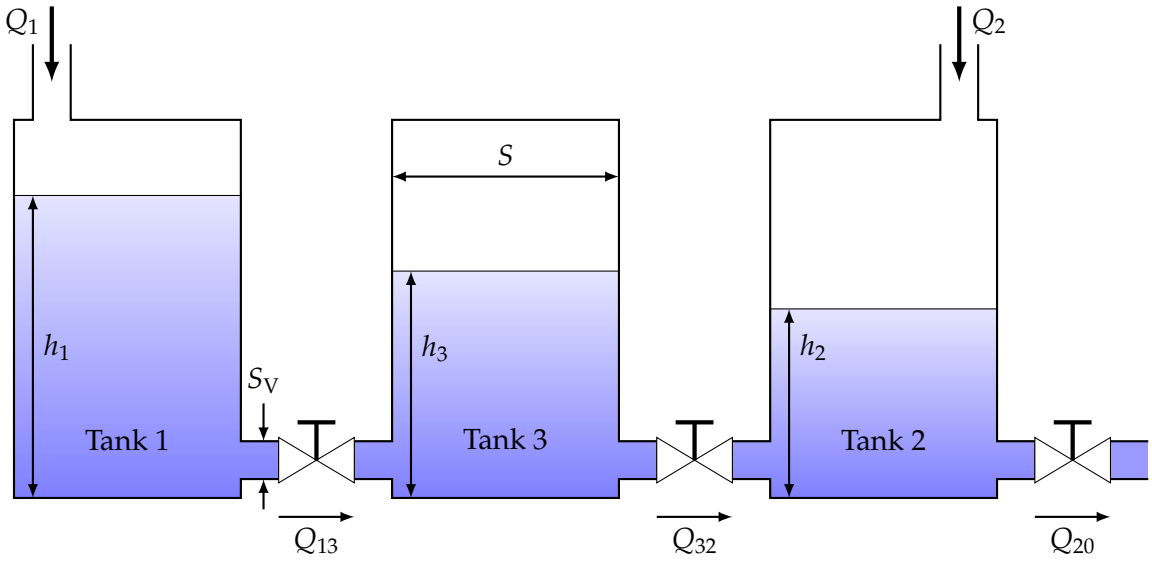

Abbildung 1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

2.1 Die Regelstrecke

Die im Praktikumsversuch verwendete Regelstrecke ist das in Abb. 1 dargestellte System DTS200. Es besteht aus drei zylindrischen Plexiglastanks Tank 1, Tank 2 und Tank 3 mit Querschnittsfläche S. Sie sind durch zylindrische Verbindungskanäle des Querschnittes S_V über Ventile miteinander verbunden. Außerdem befinden sich am Boden der Tanks weitere Ventilöffnungen, mit denen man Lecks simulieren kann. T2 besitzt eine weitere Ventilöffnung, den Nominalausfluss.

Das aus dem Nominalausfluss fließende destillierte Wasser wird in einem Auffangbecken gesammelt und den Pumpen 1 und 2 wieder zugeführt (geschlossener Kreislauf). Die Flüssigkeitsfüllstände in den Tanks (Zustandsgrößen) werden über piezoresistive Differenzdrucksensoren gemessen.

Die Pumpen 1 und 2 sind Dreikammermembranpumpen. Sie liefern auf Grund eines fest definierten Stösselhubs eine konstante Wassermenge pro Umdrehung und werden über Gleichstrommotoren betrieben, deren Eingangsspannungen durch die beiden Regler vorgegeben werden (Stellgrößen).

[1] http://de.mathworks.com/products/simulink-coder/

Dabei bedeuten die Abkürzungen:

Q_1, Q_2:	Pumpenzufluss in ml/sek, Zuflussmengen $0 < Q < 100\,\text{ml/sek}$
S:	Querschnittsfläche in den Tanks, $S = 154\,\text{cm}^2$
h_1, h_3, h_2:	Füllhöhen (Zustandsgrößen 1–3), $0 < h_i < 60\,\text{cm}$, bei überschreiten der maximalen Füllhöhe wird Pumpe abgeschaltet
S_V:	Querschnittfläche der Verbindungskanäle/Ventile, $S_\text{V} = 0,5\,\text{cm}^2$
$a_{\text{Z}i}$:	Ausflusszahlen der Ventile $i = 1, 2, 3$

2.2 Modellbildung

Für die Beschreibung des Systems werden folgende physikalische Zusammenhänge verwendet: die Bilanzgleichungen und das Torricelli-Ausflussgesetz. Für die Bilanzgleichung, zeitliche Volumenänderung gleich der Summe aller Volumenströme, entnimmt man die relevanten Größen aus Abb. 1. Dabei sind die drei Lecks geschlossen. Dies ergibt:

$$A\frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{13} \tag{1}$$

$$A\frac{dh_3}{dt} = Q_{13} - Q_{32} \tag{2}$$

$$A\frac{dh_2}{dt} = Q_2 + Q_{32} - Q_{20} \tag{3}$$

Für die Durch- und Abflüsse gilt mit dem Torricelli-Ausflussgesetz:

$$Q_{13} = a_{\text{Z}1} S_\text{V} \operatorname{sgn}(h_1 - h_3)\sqrt{2g|h_1 - h_3|} \tag{4}$$

$$Q_{32} = a_{\text{Z}3} S_\text{V} \operatorname{sgn}(h_3 - h_2)\sqrt{2g|h_3 - h_2|} \tag{5}$$

$$Q_{20} = a_{\text{Z}2} S_\text{V} \sqrt{2gh_2} \tag{6}$$

Die Werte der Ausflusszahlen

$$a_{\text{Z}1} = a_{\text{Z}3} = 0,45, \quad a_{\text{Z}2} = 0,65$$

wurden experimentell ermittelt.

Wie man an den Systemgleichungen sieht, wirkt der Pumpenfluss Q_1 indirekt auf die Füllhöhe h_2 des Tanks 2 und der Pumpenfluss Q_2 indirekt auf die Füllhöhe h_1 des Tanks 1 ein, das MIMO-System weist somit Verkopplungen auf. Ziel der Regelung soll es nun sein, das System zu entkoppeln — dies bedeutet, dass man durch Einsatz eines Reglers unter gewissen Bedingungen in der Lage ist, mittels Q_1 den Zustand h_1 zu regeln, ohne h_2 zu beeinflussen und umgekehrt, und h_3 dabei begrenzt halten kann. Bearbeiten Sie dazu die Vorbereitungsfragen.

3 Vorbereitung

Die Bearbeitung der Vorbereitungsfragen benötigt ca. 350 Minuten und muss **vor** dem eigentlichen Termin erfolgen. Ohne gründliche Vorbereitung kann der Versuch nicht durchgeführt werden. Falls sich bei der Versuchsvorbereitung Unklarheiten ergeben, setzen Sie sich bitte vor dem Versuchstag mit dem für den Versuch zuständigen Betreuer in Verbindung.

Aufgabe 3.1 (Berechnung von Grenzwerten)

a) Das Verbindungsventil von Tank 1 zu Tank 3 ist geschlossen. Wie groß ist die maximale Höhenänderung von h_1 in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ bei maximalem Zufluss Q_1?

b) Tank 1 sei leer und $h_3 = 60\,\text{cm}$. Nun wird das Ventil zwischen den Tanks geöffnet und Pumpe 1 wird voll zugeschaltet. Wie groß ist $\frac{\mathrm{d}h_1}{\mathrm{d}t}$ im ersten Moment? (Dieser Wert wird im normalen Betrieb nicht erreicht.)

c) Der größtmögliche Nominalfluss Q_{20} ist zu berechnen.

Aufgabe 3.2 (Stationäre Betrachtung)

Für einen stationären Arbeitspunkt $h_1 = 40\,\text{cm}$, $h_2 = 20\,\text{cm}$ sind die Werte für h_3, Q_{20}, Q_1 und Q_2 zu bestimmen (die Verbindungsventile sind geöffnet, allgemeiner Ansatz $h_1 > h_3 > h_2$).

Aufgabe 3.3 (Linearisierung)

Die nichtlinearen Systemgleichungen sind an einem Arbeitspunkt zu linearisieren (wiederum sei $h_1 > h_3 > h_2$), so dass ein Gleichungssystem der Form

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A\,x + B\,u \\ y &= C\,x + D\,u \end{aligned} \tag{7}$$

entsteht mit

$$x = \begin{pmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{pmatrix} \text{ (man beachte die Reihenfolge)} \quad \text{und} \quad u = \begin{pmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{pmatrix}$$

Berechnen Sie zahlenmäßig die Einträge der Systemmatrizen A und B für den Arbeitspunkt aus Aufgabe 3.2.

Aufgabe 3.4 (Zustandsrückführung zur Entkopplung)

Die linearisierte Dynamik des Dreitanksystems wird durch die Systemgleichung (7) beschrieben. Dieses System soll entkoppelt werden, um die Füllhöhe in Tank 1 und 2 unabhängig voneinander regeln zu können.

Da Δh_1 und Δh_2 über die Systemgleichungen gekoppelt sind, wird eine separate Regelung beider Größen ohne die Berücksichtigung der Verkopplung nur mäßige Erfolge bewirken.

Dazu soll eine Rückführung der Form

$$u = K\,x + F\,v \tag{8}$$

mit $K \in \mathbb{R}^{2\times 3}$ und $F \in \mathbb{R}^{2\times 2}$ verwendet werden. Dabei stellt v einen neuen Eingang zum System dar. Es soll gelten

$$\dot{x}_1 = v_1 \tag{9}$$

$$\dot{x}_2 = v_2 \tag{10}$$

Bemerkung: Aus den Gleichungen (9) und (10) ist ersichtlich, dass die Füllhöhen x_1 in Tank 1 und x_3 in Tank 2 nun völlig unabhängig voneinander mit Hilfe der korrespondierenden Eingänge v_1 und v_2 beeinflusst werden können.

Nach Einsetzten von (8) in die Systemdynamik (7) ergibt sich

$$\dot{x} = (A + B\,K)\;x + B\,F\,v\,. \tag{11}$$

Aufgaben:

a) Bestimmen Sie die Matrizen K und F mit

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{pmatrix}, \tag{12}$$

um die Anforderungen aus (9) und (10) zu erfüllen.

Hinweis: Die Entkopplungsbedingung (9) und (10) bedeutet, dass in der Matrix

$$A + B\,K = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \tag{13}$$

die Matrixelemente m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{21} m_{22} sowie m_{23} verschwinden müssen. Zudem soll gelten:

$$B\,F = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{14}$$

b) Schreiben Sie eine MATLAB-`function`, die Ihnen in Abhängigkeit der Matrizen A und B die Entkopplungsmatrizen K und F berechnet und ausgibt.

c) Verwenden Sie nun einen P-Regler der Form $v_i = K_P(r_i - y_i)$ mit $i \in \{1, 2\}$, wobei $y_1 = x_1$ und $y_2 = x_2$ sowie $K_p > 0$. Der Sollwert wird über die Größe r_i vorgegeben. Zeigen Sie, dass die entkoppelten Differentialgleichungen, die den dynamischen Zusammenhang zwischen x_1 und r_1 sowie x_2 und r_2 beschreiben, PT_1-Gliedern entsprechen.

d) Geben Sie die Entwurfsvorschrift für K_P an, wenn eine gewünschte Zeitkonstante τ für das Führungsverhalten vorgegeben wird.

e) Hat das entkoppelte System eine interne Dynamik? Falls ja geben Sie die Differentialgleichung der internen Dynamik an und überprüfen Sie diese hinsichtlich Stabilität.

Aufgabe 3.5 (Reglerentwurf)

Zur Regelung der Tanks soll nun ein entkoppelter PI-Regler der Form

$$v_i = K_P\,(r_i - y_i) + K_I \int_0^t (r_i(\tau) - y_i(\tau))\,d\tau \tag{15}$$

mit $i \in \{1, 2\}$ verwendet werden.

Aufgaben:

- Bestimmen Sie die Führungsübertragungsfunktion $T_i(s) = \frac{Y_i(s)}{R_i(s)}$ in Zeitkonstantenform.
- Wie müssen K_P und K_I gewählt werden, so dass interne Stabilität vorliegt?
- Geben Sie die Entwurfsvorschrift für K_P und K_I an, wenn eine gewünschte Dämpfung ζ und eine gewünschte Zeitkonstante T_w des Führungsverhaltens vorgegeben werden.
- Folgende Regelereinstellungen sind zu zu untersuchen:
  a) $K_I = 1$, $K_P = 4$: Kreisfrequenz ω_0, Schwingungsdauer τ_0 und Dämpfung ζ sind zu berechnen.
  b) $K_P = 0.1$, $\omega_0 = 0.1$: Berechnen Sie K_I, ζ und τ_0.
  c) $K_P = 10$, $\zeta = 1,55$: K_I, ω_0 und τ_0 sind zu berechnen.

Aufgabe 3.6 (Implementierung in Matlab/Simulink)

Implementieren sie das komplette linearisierte System inklusive Entkopplung in MATLAB. Verwenden Sie den P-Regler aus der Aufgabe 3.4. Hierbei sollen die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Untersuchen Sie hierbei unterschiedliche Werte für den Parameter K_P.
- Entwerfen Sie unterschiedliche Regler für die Ausgänge y_1 und y_2. Welche Effekte sind zu beobachten?
- Variieren Sie den Anfangszustand von Tank 3. Welcher Einfluss lässt sich erkennen?

4 Durchführung

Versuchsaufbau

In Abb. 2 ist der Versuchsaufbaues dargestellt. Dieser besteht aus drei zylinderförmigen Tanks, die

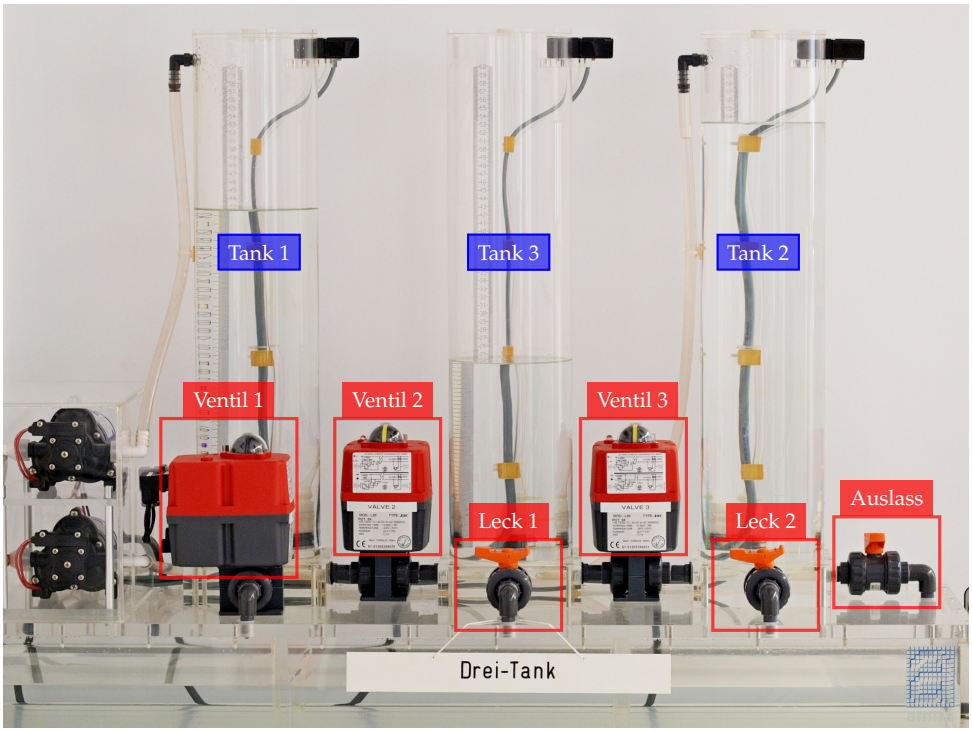

Abbildung 2: Versuchsaufbau

über die Ventile 2 und 3 miteinander verbunden sind. Die Ventile können elektronisch angesteuert werden. Zudem besteht die Möglichkeit in Tank 1 über das Ventil 1 einen zusätzlichen Abfluss zu realisieren. In diesem Versuch soll dieses Ventil jedoch die ganze Zeit geschlossen sein.

Die Ansteuerung der Ventile erfolgt über einen Kasten, welcher sich links neben dem eigentlichen Versuchsaufbau befindet, siehe Abb. 3. Für die Kalibrierung ist es notwendig, dass die Ventile 2 & 3

Abbildung 3: Ventilsteuerung

geöffnet beziehungsweise geschlossen werden. Dazu muss der Schalter zu dem jeweiligen Ventil so lange betätigt werden, bis die dazugehörige Signalleuchte entweder *Valve open* oder *Valve closed* signalisiert.

Weiterhin befinden sich am Versuchsaufbau mehrere Sperrventile, welche manuell betätigt werden müssen. Diese verfügen über einen maximalen Stellbereich von einer viertel Umdrehung. Achten Sie darauf, dass Sie diesen Bereich nicht überschreiten! In der Abb. 2 sind diese Sperrventile mit dem Leck 1 & 2 und Auslass gekennzeichnet.

Alle Ventile leiten das Wasser in einem unter dem Aufbau befindlichen Tank ab. Aus diesem Tank können die Pumpen, welche mit Tank 1 und 2 verbunden sind, das Wasser anschließend entnehmen. Die Ansteuerung der Pumpen erfolgt mit der in Abb. 4 abgebildeten Einheit. Zum Befüllen der Tanks

Abbildung 4: Pumpensteuerung

besteht die Möglichkeit der manuellen Ansteuerung der Pumpen. Der Schalter muss sich hierzu in der Stellung *Manual* befinden. Anschließend kann mit dem sich darunter angebrachten Drehregler die Förderleistung vorgegeben werden. Sollen die Pumpen über den PC angesteuert werden, so muss sich der Schalter in die Stellung *Automatic* gebracht werden.

Start des Praktikums

Starten Sie MATLAB mithilfe der Verknüpfung `Praktikum RST3 - Entkopplungsregelung` und geben Sie in das Kommandofenster `dts` ein. Es öffnet sich ein Fenster wie in Abb. 5. Prüfen Sie, ob im Punkt „1. Tank-System“ der Drei-Tank ausgewählt ist.

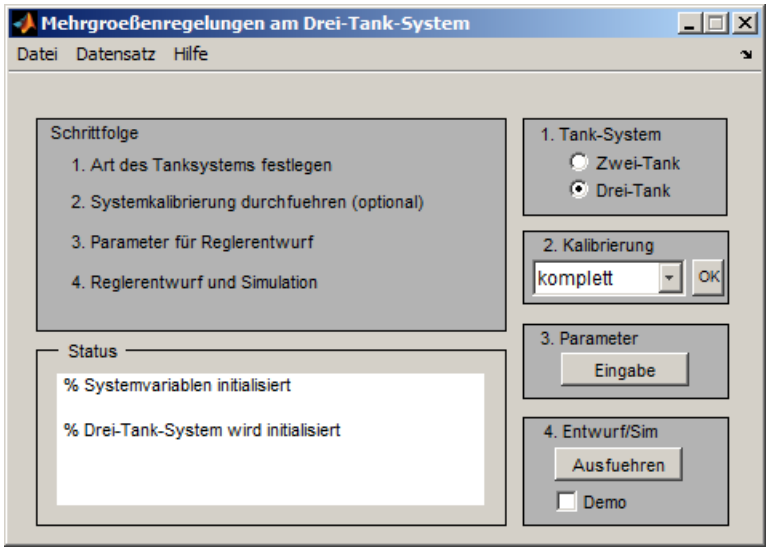

Abbildung 5: Menüfenster

Aufgabe 4.1 (Systemkalibrierung)

Kalibrieren Sie das System. Folgen Sie dabei der Anleitung im Anhang A.1.

Aufgabe 4.2 (Entkopplung berechnen)

Der Vorgang zur Reglerimplementierung ist im Anhang A.2 beschrieben. Mit Bestätigung der Schaltfläche *Berechne Arbeitspunkt* in Abb. 10 wird das Dreitanksystem für den angegebenen Arbeitspunkt linearisiert. Im Workspace von MATLAB kann dann mithilfe der Variablen `Sys.a`, `Sys.b`, `Sys.c`, `Sys.d` auf die Matrizen des Systems A, B, C, D zugegriffen werden.

a) Vergleichen Sie die Systemmatrizen mit denen von Ihnen ermittelten. Prüfen Sie dabei auch die Eigenwerte beider Systeme und stellen Sie diese gegenüber. Wie sind gegebenenfalls auftretende Unterschiede zu erklären?

b) Berechnen Sie die Matrizen K und F in dem Regelgesetz

$$u = K\,x + F\,v\,, \tag{16}$$

so dass eine Entkopplung der Ein- und Ausgangsgrößen erzielt werden kann. Nutzen Sie dafür ihre `function`, die Sie in der Vorbereitung geschrieben haben. Tragen Sie die Werte anschließend in die dafür vorgesehene Eingabemaske ein.

Aufgabe 4.3 (Reglerentwurf P-Regler)

In dieser Aufgabe sollen für das entkoppelte System zwei unabhängige P-Regler der Form

$$v = K_\mathrm{P}\,e \tag{17}$$

mit $e := r - y$ und $K_\mathrm{P} > 0$ entworfen werden.

a) Geben Sie die Dynamik des geschlossenen Regelkreises unter Verwendung des Reglers aus (17) an. Nutzen Sie dabei die Ergebnisse ihrer Vorbereitung. Wie muss die Reglerverstärkung K_P eingestellt werden, um eine Wunschzeitkonstante T_w vorzugeben?

b) Bestimmen Sie die Verstärkung K_P so, dass der geschlossene Regelkreis eine Zeitkonstante von $\tau_1 = 25\,\mathrm{s}$ für den ersten Tank und $\tau_2 = 15\,\mathrm{s}$ für den zweiten Tank aufweist. Implementieren Sie den erhaltenen Regler für beide Kanäle in der Regelstrecke. Welches Verhalten kann beobachtet werden?

c) Wiederholen Sie nun das vorherige Experiment und öffnen Sie nach zirka 100 s das zusätzliche Ventil, um an Tank 3 ein Leck nachzubilden. Hierbei sollte das Ventil nicht mehr als um die Hälfte geöffnet werden.

   Achtung: Das Ventil hat einen maximalen Stellbereich von einer viertel Umdrehung!

d) Nun soll der Arbeitspunkt $x_\mathrm{AP} = (20, 10)^\mathrm{T}$ betrachtet werden. Testen Sie den in der vorherigen Aufgabe entworfenen Regler an dem neuen Arbeitspunkt mit den Entkopplungsmatrizen K und F für den ursprünglichen Arbeitspunkt $x_\mathrm{AP} = (40, 20)^\mathrm{T}$ in der *Simulation*. Welche Veränderung ist zu beobachten?

Aufgabe 4.4 (Reglerentwurf PI-Regler)

Es wird wieder der ursprünglichen Arbeitspunkt $x_\mathrm{AP} = (40, 20)^\mathrm{T}$ betrachtet. Der Regler soll nun um einen integralen Anteil erweitert werden. Das Regelgesetz lautet

$$v = K_\mathrm{P}\, e + K_\mathrm{I} \int_0^t e(\tau) d\tau \tag{18}$$

mit $K_\mathrm{P}, K_\mathrm{I} > 0$.

a) Geben Sie die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises in Zeitkonstantenform an. Nutzen Sie dabei die Ergebnisse ihrer Vorbereitung. Wie müssen die Reglerparameter K_P und K_I eingestellt werden, um eine Wunschzeitkonstante T_w und gewünschte Dämpfung ζ vorzugeben?

b) Entwerfen Sie für den ersten Eingang einen PI-Regler so, dass die Dynamik des geschlossenen Regelkreises eine Zeitkonstante von $\tau_1 = 35\,\mathrm{s}$ und eine Dämpfung von $\zeta = 1$ aufweist. Wiederholen Sie dies für den zweiten Ausgang mit einer Zeitkonstante von $\tau_2 = 25\,\mathrm{s}$ mit der gleichen Dämpfung. Testen Sie die entworfenen Regler zunächst in der Simulation, dann an der Strecke, indem Sie in dem Fenster in Abb. 10 einen Regler mit integralem Anteil auswählen.

c) Tank 2 weise nun wieder ein Leck auf. Dazu öffnen Sie nach 100 s das Ventil an Tank 2 auf maximal zur Hälfte. Beobachten Sie den Verlauf der Sollgrößen h_1 und h_2. Welches Verhalten zeigt die mit einem PI-Regler geregelte Strecke?

d) Schließen Sie nun das zusätzliche Ventil an Tank 2. Berechnen Sie die Reglerparameter für eine Dämpfung von $\zeta = 1$ und $\tau = 4$. Implementieren Sie die erhaltenen Parameter für beide Regler. Welches Verhalten können Sie in der Simulation beobachten? Stimmt dieses mit ihren Erwartungen überein?

A Anleitung zur Kalibrierung und Reglerimplementierung

A.1 Kalibrierung

Wählen Sie im Hauptfenster (Abb. 5) Punkt „2. Kalibrierung“ *komplett* aus und bestätigen Sie die Wahl mit OK. In dem sich darauf öffnenden Fenster in Abb. 6 werden Sie aufgefordert, die Tanks auf eine Höhe von 20 cm zu füllen. Nachdem Sie die Tanks auf diese Höhe gefüllt haben, bestätigen Sie mit OK.

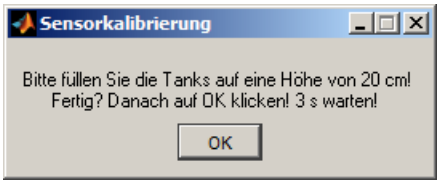

Abbildung 6: Erste Meldung beim Kalibrierungsvorgang

Anschließend öffnet sich ein weiteres Fenster wie in Abb. 7. Nun sollen die Tanks auf eine Höhe von 50 cm gefüllt werden. Nachdem dies erledigt wurde, bestätigen Sie wieder mit OK.

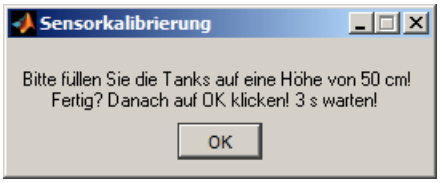

Abbildung 7: Zweite Meldung beim Kalibrierungsvorgang

Ein weiteres Fenster öffnet sich, siehe Abb. 8. Füllen Sie die Tanks auf eine Höhe von 60 cm. Jetzt öffnen Sie den Nominalausfluss am Tank 2 und bestätigen möglichst schnell danach das Fenster mit OK.

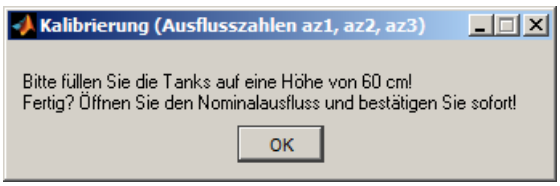

Abbildung 8: Dritte Meldung beim Kalibrierungsvorgang

Im letzten Schritt der Kalibrierung, siehe Abb. 9, sollen die Tanks zunächst auf eine Höhe von 12 cm gefüllt werden. Im Anschluss schließen Sie alle Ventile, stellen die Schalter auf Automatik und bestätigen mit OK.

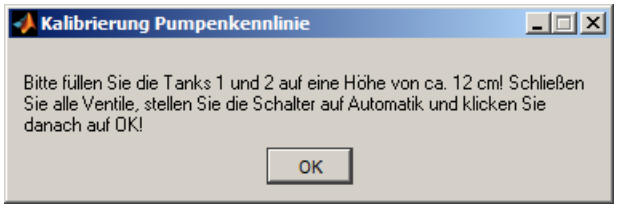

Abbildung 9: Vierte Meldung beim Kalibrierungsvorgang

A.2 Reglerimplementierung

Im Punkt „3. Parameter“ des Hauptfensters (Abb. 5) können die Reglerparameter eingegeben werden. Bestätigen Sie hierzu die Eingabe-Schaltfläche. Es öffnet sich ein Fenster wie in Abb. 10.

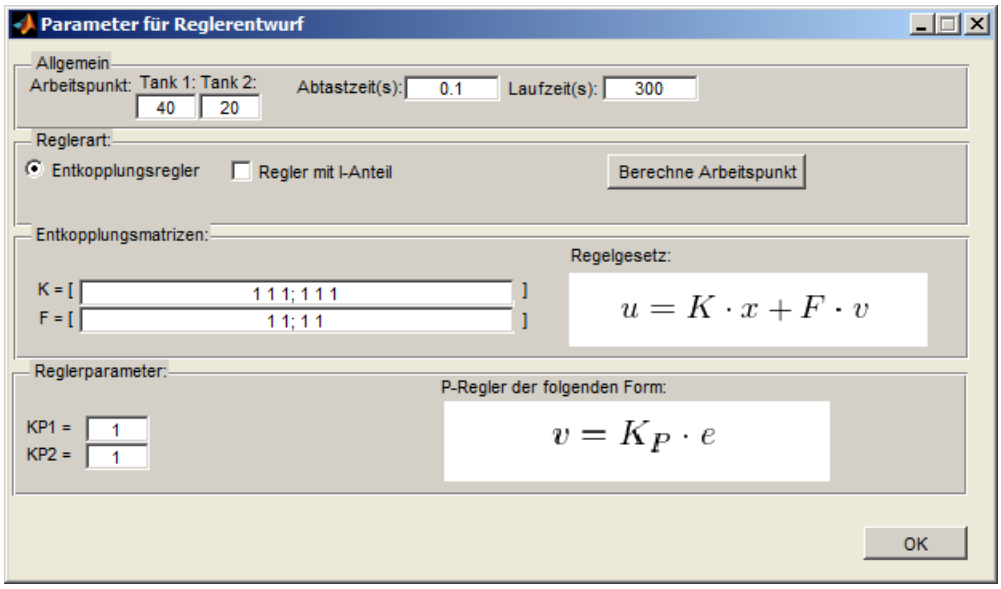

Abbildung 10: Parameterfenster

Anschließend starten Sie die Simulation im Punkt „4. Entwurf/Sim“ des Hauptfensters mit einem Klick auf die Schaltfläche *Ausfuehren*:

- Es öffnen sich die Grafiken *Test_von_einzelnen_Steuerungen* und *Reglerentwurf*. Prüfen Sie ob die Simulation zufriedenstellend ist. Ist dies nicht der Fall, so können Sie die Parameter wie in Punkt 3 beschrieben nochmal ändern. Wenn alles in Ordnung ist, kann die Regelung am Dreitanksystem getestet werden.
- Dafür sollen zunächst die Ventile 2 und 3 geöffnet und die restlichen Ventile geschlossen sein. Die Tanks sollen einen Startwert von $x_0 = 20\,\text{cm}$ haben. Die Schalter müssen auf Automatik gestellt sein.
- Wählen Sie das Simulinkmodell aus und kompilieren Sie es, indem Sie die Tastenkombination < STRG > + < B > drücken oder über das Menü *Code/C++ Code/Build Model* drücken. Eine erfolgreiche Kompilierung erkennt man an der abschließenden Ausgabe im Kommandofenster:

`### Successful completion of build procedure for model: dts_run`. Wählen Sie nun im Reiter über das Menü *Simulation/Connect to Target* aus. Starten Sie die Regelung und öffnen Sie sofort den Nominalausfluss am Tank 2.