Versuchsanleitung - Praktikum RST 3

Robuster Reglerentwurf und Fehlererkennung an einem Dreitanksystem

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

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 Stationäre Betrachtung . . . 6

3.2 Linearisierung . . . 6

3.3 Systemerweiterung zur Leckerkennung . . . 6

3.4 Beobachtbarkeit . . . 7

3.5 Robuste Regelung . . . 7

3.6 Implementierung in Matlab/Simulink . . . 8

4 Durchführung **9**

4.1 Systemkalibrierung . . . 11

4.2 Beobachter zur Leckererkennung berechnen . . . 11

4.3 Reglerentwurf . . . 12

A Anleitung zur Kalibrierung und Reglerimplementierung **13**

A.1 Anleitung: Kalibrierung . . . 13

A.2 Anleitung: Parametereingabe . . . 13

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* und *Regelungs- und Systemtechnik 3* mit den Themen:

- Linearisierung von nichtlinearen Regelungssystemen
- Entwurf robuster Regelungen
- Beobachterentwurf

1.2 Lernziele

- Entwurf einer $\mathcal{H}_\infty$-Regelung mittels Mixed-Sensitivity Ansatz
- Implementierung des Reglers am Modell 3-Tank
- Implementierung eines Algorithmus zur Fehlerdiagnose und Leckerkennung

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.

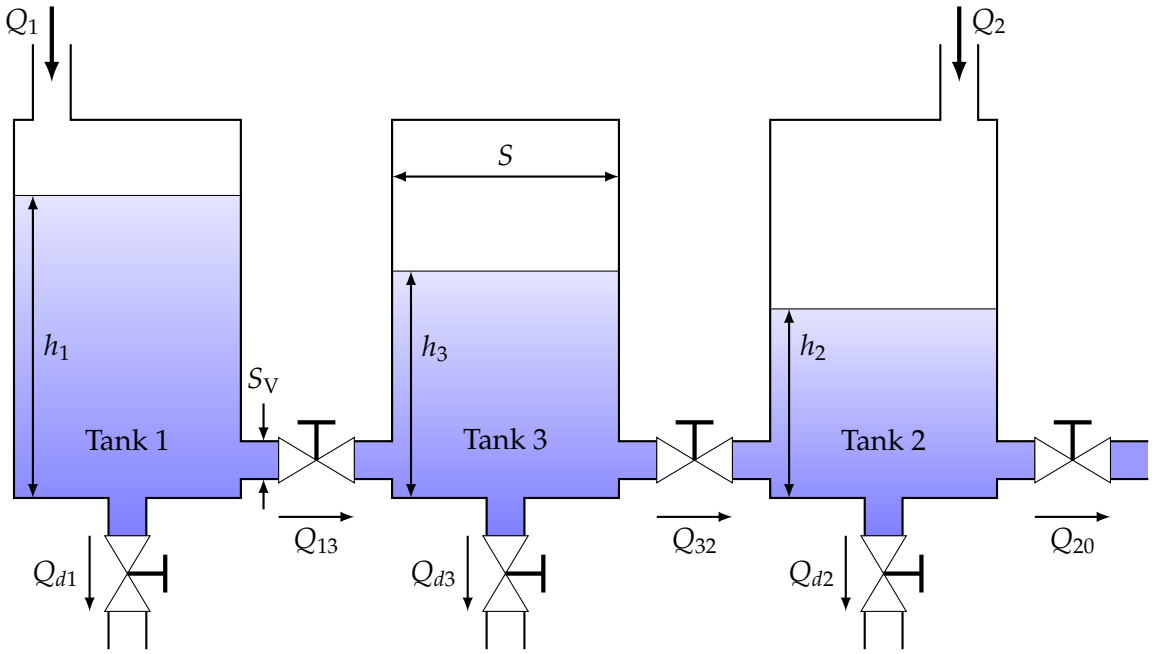

Abbildung 1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

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. Tank 2 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 $\frac{\text{mL}}{\text{s}}$, Zuflussmengen $0 < Q < 100\ \frac{\text{mL}}{\text{s}}$
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:	Querschnittsfläche 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:

$$S\frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{13} - Q_{d1} \tag{1}$$

$$S\frac{dh_3}{dt} = Q_{13} - Q_{32} - Q_{d3} \tag{2}$$

$$S\frac{dh_2}{dt} = Q_2 + Q_{32} - Q_{20} - Q_{d2} \tag{3}$$

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

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

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

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

$$Q_{d1} = a_{\text{Z}d} S_\text{V} \sqrt{2gh_1} d_1 \tag{7}$$

$$Q_{d2} = a_{\text{Z}d} S_\text{V} \sqrt{2gh_2} d_2 \tag{8}$$

$$Q_{d3} = a_{\text{Z}d} S_\text{V} \sqrt{2gh_3} d_3 \tag{9}$$

Dabei ist d_i mit $i \in 1, 2, 3$ und $d_i \in [0, 100]$ die Öffnung der Ventile in Prozent. Die Werte der Ausflusszahlen

$$a_{\text{Z}1} = a_{\text{Z}3} = 0{,}45, \quad a_{\text{Z}2} = a_{\text{Z}d} = 0{,}65 \tag{10}$$

wurden experimentell ermittelt.

Die Durchflüsse Q_{d1}, Q_{d2} und Q_{d3} können Lecks und somit Störungen an den jeweiligen Tanks darstellen. Ziel ist es, einen robusten Regler zu entwerfen, der diese Störeinflüsse ausgleichen kann. Zu diesem Zweck wird ein $\mathcal{H}_\infty$-Regler mit Mixed-Sensitivity Ansatz entworfen. Außerdem sollen die Lecks diagnostiziert werden. Bearbeiten Sie dazu die Vorbereitungsaufgaben.

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 (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, die Ausgangsventile sind bis auf den Nominalausfluss geschlossen, allgemeiner Ansatz $h_1 > h_3 > h_2$).

Aufgabe 3.2 (Linearisierung)

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

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A\,x + B\,u + E\,d \\ y &= C\,x + D\,u \end{aligned} \tag{11}$$

entsteht mit

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

Berechnen Sie die Einträge der Systemmatrizen A, B und E für den Arbeitspunkt aus Aufgabe 3.1.

Aufgabe 3.3 (Systemerweiterung zur Leckerkennung)

Die Störeingänge $d_i \in [0,1]$, $i \in \{1,2,3\}$ sollen als Zustände eines erweiterten Systems betrachtet werden. Dabei wird angenommen, dass diese in guter Näherung konstant sind, d. h.

$$\dot{d}_i = 0 \quad \forall i \in \{1,2,3\}. \tag{12}$$

Bestimmen Sie die Matrizen $\tilde{A}$ und $\tilde{B}$ der Zustandsdifferentialgleichung

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}u \quad \text{mit} \quad \tilde{x} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & d_1 & d_2 & d_3 \end{pmatrix}^\mathsf{T} \tag{13}$$

allgemein (in Abhängigkeit der Matrizen A, B, C, D, E) und mit Zahlenwerten.

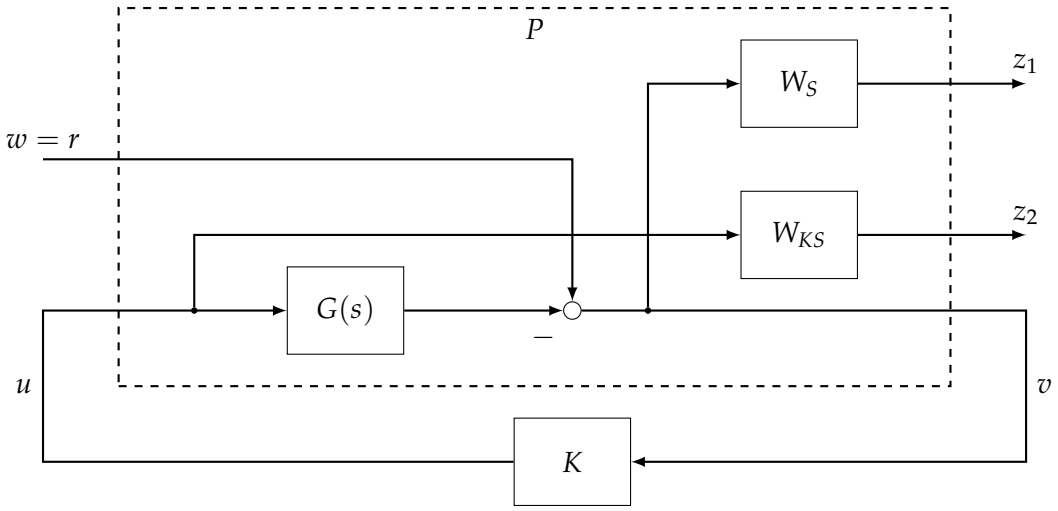

Abbildung 2: Erweiterte Regelstrecke

Aufgabe 3.4 (Beobachtbarkeit)

Prüfen Sie das System auf Beobachtbarkeit, wenn die Ausgänge des Systems den Zuständen x_1 und x_2 entsprechen (Ausgangsvektor y^1). Prüfen Sie weiterhin das System auf Beobachtbarkeit, wenn die Informationen für alle drei Füllstandshöhen verfügbar sind (Ausgangsvektor y^2):

$$y^1 = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{=\tilde{C}_1} \tilde{x}, \qquad y^2 = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{=\tilde{C}_2} \tilde{x}.$$

Zur Prüfung auf Beobachtbarkeit können Sie MATLAB verwenden.

Es soll ein Luenberger-Beobachter der Form

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \tilde{A}\hat{x} + \tilde{B}u + L(\hat{y} - y) \\ \hat{y} &= \tilde{C}\hat{x} \end{aligned} \tag{14}$$

mit den geschätzten Zuständen $\hat{x} \in \mathbb{R}^6$ und der Beobachterverstärkung L passender Dimension für eines der erweiterten Systeme entworfen werden. Überlegen Sie wo die gewünschten Pole der Beobachterfehlerdynamik $\dot{e} = (\tilde{A} + L\tilde{C})e$ mit dem Fehler $e = \hat{x} - \tilde{x}$ liegen sollen. Beachten Sie dabei die Eigenwerte des erweiterten Systems. Wie können Sie in MATLAB die Beobachterverstärkung L mit gewünschter Pollage bestimmen?

Aufgabe 3.5 (Robuste Regelung)

Es soll eine robuste Regelung mithilfe des Mixed-Sensitivity Verfahrens entworfen werden. Dafür wird das am Arbeitspunkt linearisierte System betrachtet. Mit Verwendung eines robusten Reglers sollen Abweichungen vom Arbeitspunkt sowie Störeinflüsse ausgeregelt werden.

a) Stellen Sie allgemein die erweiterte Regelstrecke P für das in Abbildung 2 dargestellte Blockschaltbild auf.

b) Wie lautet der Eingang u in Abhängigkeit der Eingangsgröße w bzw. r?

c) Berechnen Sie die Übertragungsfunktion T_{zw}, d. h. von Signal w zu Signal z.

d) Welche Regelungsziele werden durch die Minimierung der $\mathcal{H}_\infty$-Norm $\|T_{zw}\|_\infty$ mit dem Regler K erreicht?

Aufgabe 3.6 (Implementierung in Matlab/Simulink)

Gegeben ist die Regelstrecke eines Systems mit der Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{200}{10s+1}\frac{1}{(0,05s+1)^2}. \tag{15}$$

Die Wichtung der Stellgröße soll zunächst mit $W_{KS} = 1$ angenommen werden. Als Wichtung W_S soll

a) $W_S = \frac{s/M+\omega_B}{s+\omega_B A}$

b) $W_S = \frac{\left(s/M^{\frac{1}{2}}+\omega_B\right)^2}{\left(s+\omega_B A^{\frac{1}{2}}\right)^2}$

verwendet werden. Die Parameter sind $M = 1,5$, $\omega_B = 10$, $A = 1 \times 10^{-4}$. Berechnen Sie für die oben gegebenen Übertragungsfunktionen und Wichtungen den Regler K mittels mixed-sensitivity-Ansatz. Implementieren Sie den Regelkreis bestehend aus dem Regler K und der Strecke G in Simulink und betrachten Sie den Streckenausgang y. Vergleichen Sie den Ausgang für Sollwertsprünge und sprunghafte Eingangsstörungen für die verschieden Wichtungsfunktionen. (Zusatz: Variieren Sie die Wichtungsfunktionen und diskutieren Sie die Auswirkung auf den Streckenausgang y.)

Machen Sie sich dabei mit der *Robust Control Toolbox* von MATLAB vertraut. Hilfreiche Befehle sind:
`augw, hinfsyn, mixsyn`

Für weitere Informationen kann in [SP05] Kapitel 2.8.3 und Kapitel 9.3.5 nachgeschlagen werden.

Literatur

[SP05] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2005.

4 Durchführung

Versuchsaufbau

In Abb. 3 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Dieser besteht aus drei zylinderförmigen Tanks, die

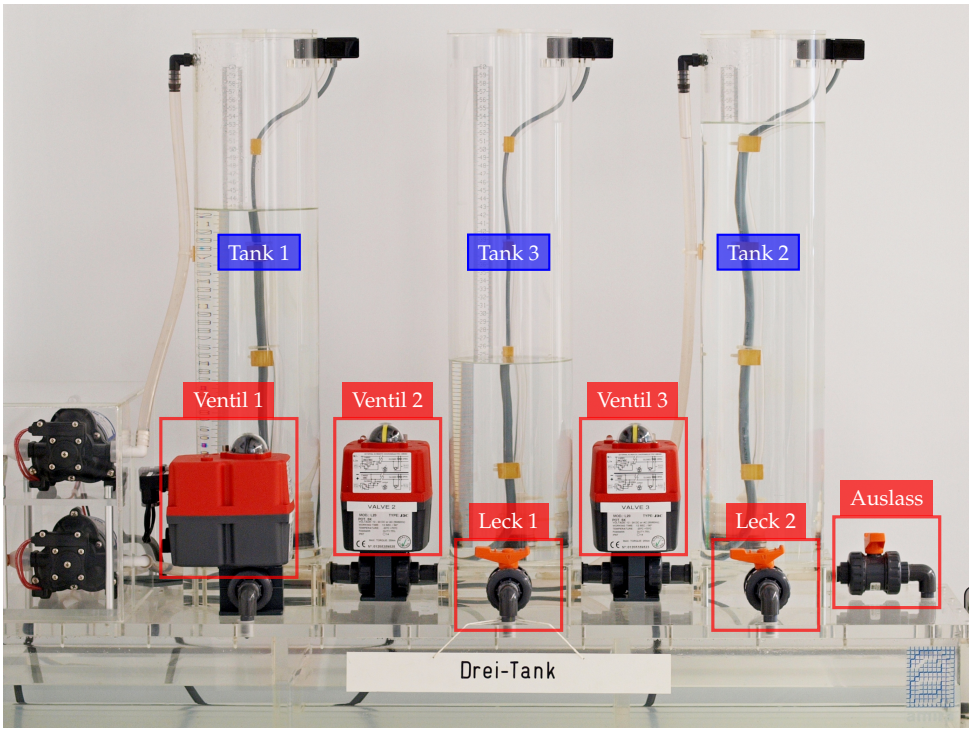

Abbildung 3: Versuchsaufbau

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. 4. Für die Kalibrierung ist es notwendig, dass die Ventile 2 & 3

Abbildung 4: 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. 3 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 diesm 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. 5 abgebildeten Einheit. Zum Befüllen der Tanks

Abbildung 5: 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 - H_infinity` und geben Sie in das Kommandofenster `dts` ein. Es öffnet sich ein Fenster wie in Abb. 6. Prüfen Sie, ob im Punkt „1. Tank-System“ der Drei-Tank ausgewählt ist.

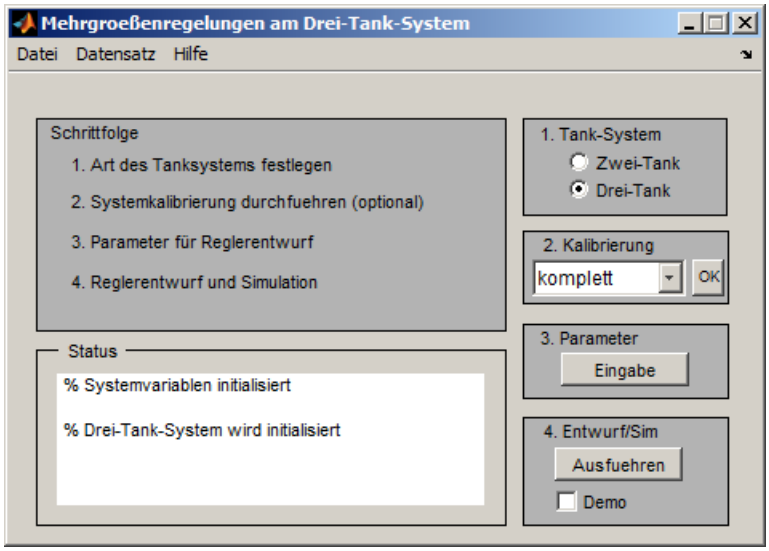

Abbildung 6: Menüfenster

Aufgabe 4.1 (Systemkalibrierung)

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

Aufgabe 4.2 (Beobachter zur Leckererkennung berechnen)

Der Vorgang zur Parametereingabe ist im Anhang A.2 beschrieben. Mit Bestätigung der Schaltfläche *Berechne Arbeitspunkt* in Abb. 11 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`, `Sys.e` auf die Matrizen A, B, C, D, E des Systems zugegriffen werden.

a) Berechnen Sie das erweiterte System und vergleichen Sie die Systemmatrizen mit denen von Ihnen in der Vorbereitung ermittelten Systemmatrizen. Prüfen Sie dabei auch die Eigenwerte beider Systeme und stellen Sie diese einander gegenüber. Wie sind gegebenenfalls auftretende Unterschiede zu erklären?

b) Berechnen Sie einen Luenberger-Beobachter, sodass die Eigenwerte der Fehlerdynamik der Form $\dot{e} = (\tilde{A} + L\tilde{C})\, e$ mit dem Fehler $e = \hat{x} - \tilde{x}$ bei $\lambda = [-1, -1, -1, -2, -2, -2]$ liegen. Tragen Sie die Werte anschließend in die dafür vorgesehene Eingabemaske ein.

Die Überprüfung der Leckerkennung geschieht zusammen mit den Auswertungen der implementierten Regler in der nächsten Aufgabe!

Aufgabe 4.3 (Reglerentwurf)

In dieser Aufgabe sollen für das Dreitanksystem ein robuster $\mathcal{H}_\infty$-Regler nach der Mixed-Sensitivity Methode entworfen werden. Implementieren Sie die Wichtungsfunktionen

$$W_S = \frac{\left(s/M^{\frac{1}{p}} + \omega_B\right)^p}{\left(s + \omega_B A^{\frac{1}{p}}\right)^p} \tag{16}$$

$$W_{KS} = \frac{ks}{s + \omega_1}. \tag{17}$$

und wählen Sie zunächst folgende Parameter: $p = 1$, $M = 1,5$, $\omega_B = 0,05$, $A = 1 \times 10^{-5}$, $k = 7$ und $\omega_1 = 2$.

Bewerten Sie die Regelgüte der ausgegebenen Simulation. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, dann können Sie den Regler am realen Dreitanksystem einsetzen und bewerten. Dabei sollen folgende Szenarien beachtet werden:

Führungsverhalten: Lassen Sie die Tanks bei $x_0 = [20, 20, 20]^\mathsf{T}$ starten und wählen Sie als Sollgröße den Arbeitspunkt $x_{AP} = [40, 20, 30]^\mathsf{T}$.

Robustheit gegenüber Modellunsicherheiten: Prüfen Sie die Regelung an einem anderen Arbeitspunkt z. B. am Punkt $x = [54, 12, 33]^\mathsf{T}$.

Robustheit gegenüber Störungen: Simulieren Sie ein Leck durch Öffnen eines weiteren Ventils. Dabei können Sie gleichzeitig den entworfenen Beobachter zur Leckerkennung testen.

Variieren Sie die Parameter. Verwenden Sie nun beispielsweise $p = 2$ und die restlichen Parameter wie vorher. Welches Verhalten erwarten Sie? Stimmt Ihre Vermutung mit dem eintretenden Verhalten überein?

A Anleitung zur Kalibrierung und Reglerimplementierung

A.1 Anleitung: Kalibrierung

Wählen Sie im Hauptfenster (Abb. 6) Punkt „2. Kalibrierung“ *komplett* aus und bestätigen Sie die Wahl mit OK. In dem sich darauf öffnenden Fenster in Abb. 7 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.

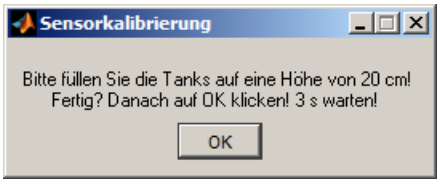

Abbildung 7: Erste Meldung beim Kalibrierungsvorgang

Anschließend öffnet sich ein weiteres Fenster wie in Abb. 8. Nun sollen die Tanks auf eine Höhe von 50 cm gefüllt werden. Nachdem dies erledigt wurde, bestätigen Sie wieder mit OK.

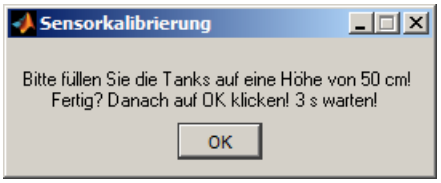

Abbildung 8: Zweite Meldung beim Kalibrierungsvorgang

Ein weiteres Fenster öffnet sich, siehe Abb. 9. 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.

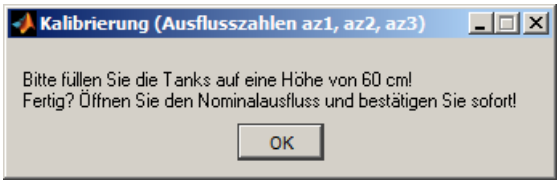

Abbildung 9: Dritte Meldung beim Kalibrierungsvorgang

Im letzten Schritt der Kalibrierung, siehe Abb. 10, 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.

A.2 Anleitung: Parametereingabe

Im Punkt „3. Parameter“ des Hauptfensters (Abb. 6) können die Beobachterverstärkung L und Wichtungsfunktionen eingegeben werden. Bestätigen Sie hierzu die Eingabe-Schaltfläche. Es öffnet sich

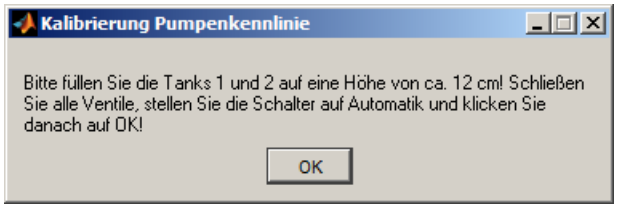

Abbildung 10: Vierte Meldung beim Kalibrierungsvorgang

ein Fenster wie in Abb. 11.

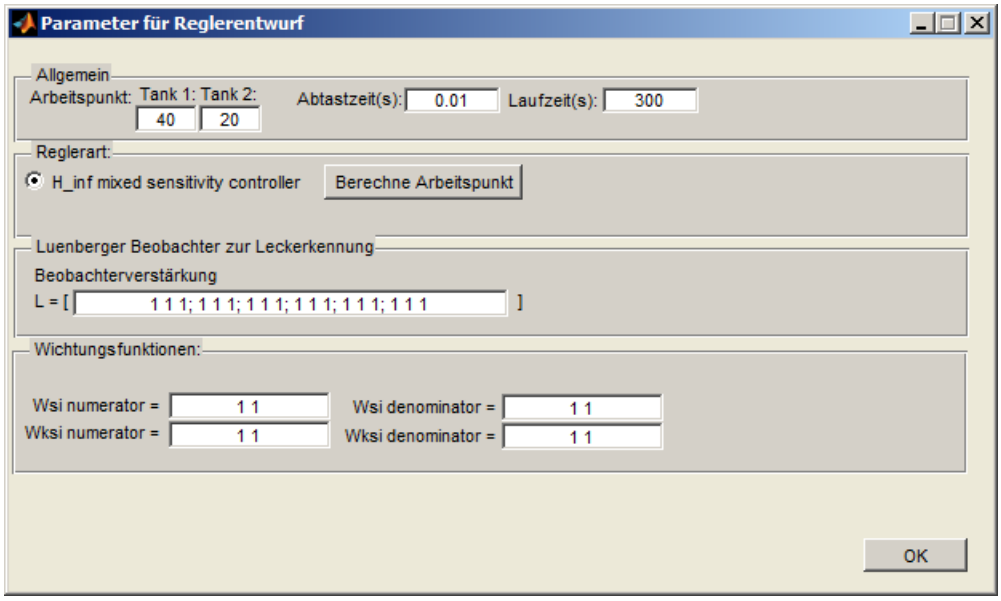

Abbildung 11: Parameterfenster

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.