



Fachgebiet
Simulation und Optimale Prozesse



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Fakultät für Informatik und
Automatisierung
Institut für Automatisierungs-
und Systemtechnik

Praktikum

Versuch OPT-5

„Mehrgrößenregelungen am Drei-Tank-System“

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. P. Li

Versuchsverantwortlicher: Dr.-Ing. S. Hopfgarten

Name, Vorname	Matrikel-Nr.
Mitarbeiter	
Datum, Note, Unterschrift	

1 Einführung

Das Ziel dieses Praktikumsversuchs besteht darin, verschiedene Simulations- und Entwurfsmethoden für Mehrgrößenregelungssysteme anhand einer realen Regelstrecke aktiv zu üben.

Die Regelstrecke ist ein Drei-Tank-System DTS200 der Firma amira [1] mit zwei Steuergrößen und drei messbaren Zustandsgrößen. Zur Ansteuerung dient ein PC mit AD/DA-Karte. Die Simulation, der Reglerentwurf und die Regelung wird mit MATLAB[®]/Simulink[®]¹ an diesem PC durchgeführt.

Über eine grafische Benutzerschnittstelle werden in einem ersten Teil Sensorkalibrierungen, eine Modellparameterbestimmung und die Aufnahme von Pumpenkennlinien vorgenommen. Im zweiten Teil sind danach geeignete Zustandsregler unter Nutzung von Routinen der MATLAB[®] Control System Toolbox[™] zu entwerfen. Die Regelkreise werden unter Simulink[®] realisiert, in eine Echtzeitanwendung mittels Real-Time Windows Target[™] überführt und zur Regelung des Drei-Tank-Systems verwendet, so dass der Entwurf am realen Regelungssystem überprüft werden kann.

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Regelstrecke

Die im Praktikumsversuch verwendete Regelstrecke ist das in Abbildung 1 dargestellte Drei-Tank-System DTS200. Es besteht aus drei zylindrischen Plexiglastanks T_1 , T_2 und T_3 der Querschnittsfläche \bar{A} . Diese sind über zylindrische Verbindungskanäle der Querschnittsfläche S_n seriell miteinander verbunden. Tank T_2 besitzt zusätzlich einen sogenannten Nominal-Ausflusskanal gleichen Querschnitts. Die abfließende Flüssigkeit (destilliertes Wasser) wird in einem Auffangbecken gesammelt, aus dem die Pumpen 1 und 2 gespeist werden (geschlossener Kreislauf).

Die Pumpen 1 und 2 sind Fünf-Kammer-Membranpumpen mit Trockenlaufschutz, die für einen maximal 20-minütigen Dauerbetrieb ausgelegt sind. Sie werden von Gleichstrommotoren angetrieben.

Die Flüssigkeitsstände in den Tanks werden mit piezoresistiven Differenzdruck-Sensoren gemessen, wobei jeweils ein Druckaufnahmekanal den Atmosphärendruck misst.

Zur Simulation von Verstopfungen sind die Verbindungskanäle zwischen Tank 1 und 3 sowie zwischen Tank 3 und 2 mit elektrisch ansteuerbaren Ventilen ausgestattet. Der Nominalausfluss aus Tank 2 erfolgt über ein Handventil. Lecks können durch die zusätzlichen Öffnungen der Tanks (an Tank 1 über ein elektrisch ansteuerbares Ventil, an den Tanks 2 und 3 über je ein Handventil) simuliert werden. Diese Abflüsse münden ebenfalls in das Auffangbecken.

2.2 Regler

Zur Ansteuerung des Drei-Tank-Systems dient ein PC. Die Verbindung zur Regelstrecke wird dabei durch eine AD/DA-Karte (Humusoft MF624; www.humusoft.cz) geschaffen.

Der A/D-Wandler wird zum Einlesen der Tank-Füllstandshöhen über drei analog Eingangskanäle benötigt. Für die Ansteuerung der Pumpen werden zwei analoge Ausgangskanäle verwendet. Die Ausgangsspannungen der Sensoren werden auf die maximale Auflösung der A/D-Wandler abgebildet und umgekehrt der Ausgangsspannungsbereich der D/A-Wandler dem Leistungsteil der zugehörigen Pumpe angepasst.

¹MATLAB[®], Simulink[®], Control System Toolbox[™] und Real-Time Windows Target[™] sind eingetragene Warenzeichen der The Mathworks Inc.

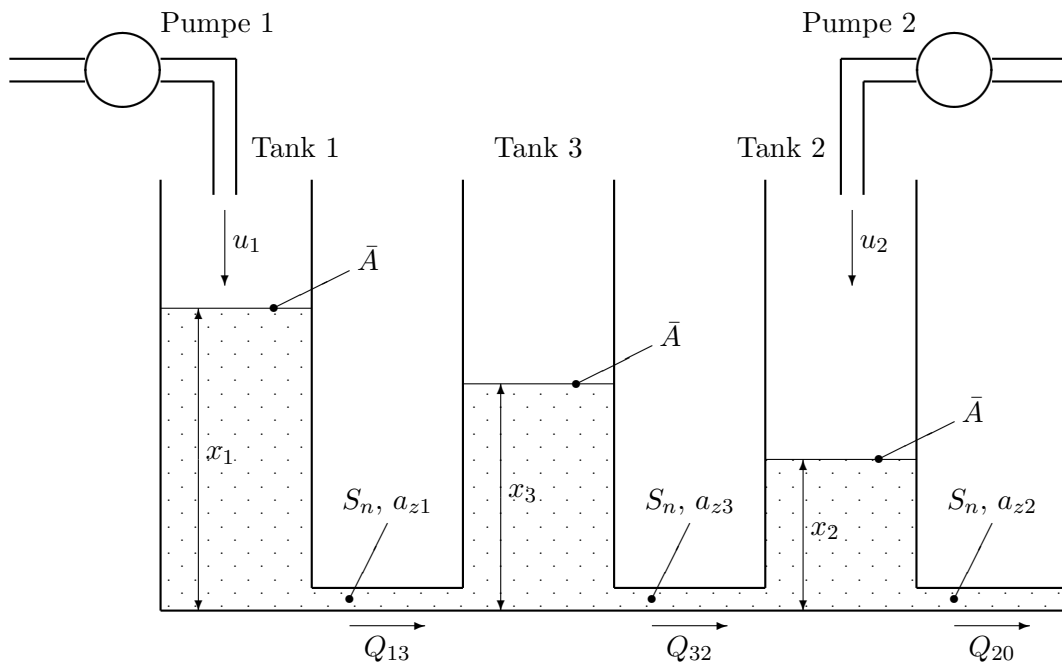


Abbildung 1: Drei-Tank-System

$$\begin{aligned} \bar{A} &= 15.4 \text{ cm}^2 \text{ Querschnittsfläche Tank 1, 2, 3,} \\ S_n &= 0.5 \text{ cm}^2 \text{ Querschnittsfläche Verbindungskanäle,} \\ 0 &\leq x_i(t) \leq 62 \text{ cm } i = 1, 2, 3, \\ 0 &\leq u_i(t) \leq 100 \text{ ml/s } i = 1, 2 \end{aligned}$$

Die Software zur Ansteuerung des Drei-Tank-Systems, zum Reglerentwurf und zur Simulation ist im M-File „dts“ und weiteren MATLAB[®]- bzw. Simulink[®]-Files realisiert. Nach dem Start des Programms können die Sensoren kalibriert, Modellparameter bestimmt, die Pumpenkennlinien und die Kennlinien der elektrisch betriebenen Ventile aufgenommen werden. Ebenso können gespeicherte Daten eingelesen bzw. aufgenommene gespeichert werden. Es stehen für den Praktikumsversuch OPT-5 zwei Regelalgorithmen zur Verfügung: ein reiner Zustandsregler sowie ein Zustandsregler mit zusätzlicher integraler Ausgangsrückführung, wobei die Zustandsreglerbemessung nach dem Prinzip der Polvorgabe (Polzuweisung, Polplatzierung, Eigenwertvorgabe) oder dem RICCATI-Reglerentwurf vorgenommen werden kann.

Mit einer Abtastzeit von 0,1 s, die im Vergleich zu den Zeitkonstanten der Strecke als quasi-kontinuierlich betrachtet werden kann, liest das Programm die Messsignale per A/D-Wandler ein, berechnet unter Berücksichtigung der Sollwerte und des Arbeitspunktes die entsprechenden Stellsignale und gibt diese über D/A-Wandler aus.

Während des Laufes werden die Mess- und Stellsignale am Bildschirm angezeigt. Es besteht die Möglichkeit, die Sollwerte für die Füllstände von Tank 1 und 2 beliebig zu verändern. Alle Prozesssignale werden in den entsprechenden Grafiken dargestellt.

2.3 Modellbildung

Es ergibt sich folgende Zuordnung der Systemgrößen:

- Steuergrößen $u_1(t)$, $u_2(t)$: Volumenströme durch die Pumpen 1 und 2 in ml/s.
- Zustandsgrößen $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$: Füllstandshöhen der Tanks 1, 2 und 3 in cm.

- Ausgangsgrößen $y_1(t)$, $y_2(t)$: Füllstandshöhen der Tanks 1 und 2 in cm.

Die Zustandsgleichungen sind nichtlinear und können mit Hilfe der Bilanzgleichungen für die Tanks aufgestellt werden.

$$\bar{A}\dot{x}(t) = q_{zu}(t) - q_{ab}(t) \quad (1)$$

Dabei ist \bar{A} die Querschnittsfläche des Tanks, $q_{zu}(t)$ die Summe der Zuflüsse in den jeweiligen Tank und $q_{ab}(t)$ die Summe der Abflüsse aus dem Tank. Dabei werden sowohl die Förderströme der Pumpen als auch die Durchflüsse durch die Verbindungs- und Ausflusskanäle berücksichtigt.

Diese Durchflüsse ergeben sich nach dem verallgemeinerten TORRICELLI-Gesetz zu

$$q(t) = a_z S_n \text{sign}(\Delta h(t)) \sqrt{2g|\Delta h(t)|} \quad (2)$$

wobei $q(t)$ den Durchfluss, $\Delta h(t)$ die Füllstandshöhendifferenz der verbundenen Tanks, g die Erdbeschleunigung und a_z die jeweilige Ausflusszahl, einen dimensionslosen Korrekturfaktor mit $0 < a_z \leq 1$, bezeichnet.

Die Ausflusszahlen werden zu Beginn des Versuchs identifiziert.

2.4 Simulation und Reglerentwurf

Als Werkzeuge zur Simulation und zum Reglerentwurf stehen das Programmpaket MATLAB[®] mit der Control System Toolbox[™], der Simulationsumgebung Simulink[®] und der Entwurfs- und Testkomponente für Echtzeitsysteme Real-Time Windows Target[™] zur Verfügung, [3]. Speziell für diesen Praktikumsversuch wurde ein M-File „dts“ mit grafischer Benutzeroberfläche entwickelt, das folgende Funktionen umfasst und folgende Untersuchungen ermöglicht:

- Sensorkalibrierung, Ausflusszahlenbestimmung, Pumpen-, Ventil-Kennlinienaufnahme
- Berechnung von Arbeitspunkten und linearisierten Streckenmodellen,
- Reglerentwurf unter Nutzung des linearen Modells,
- Simulation des Verhaltens des nichtlinearen und des linearisierten geregelten Systems,
- Erzeugung eines echtzeitfähigen Codes und Erprobung des Reglerentwurfs,
- Analyse der am Drei-Tank-System gemessenen und der Modellsignalverläufe.

3 Praktikumsaufgaben

3.1 Versuchsvorbereitung

1. Stellen Sie die vollständigen nichtlinearen Zustandsgleichungen des Drei-Tank-Systems auf!
2. Geben Sie in der x_1 - x_2 -Ebene qualitativ den Arbeitsbereich des Systems an, der sich durch *konstante* Steuergrößen realisieren lässt! Berücksichtigen Sie dabei die Stellgrößenbeschränkungen

$$0 \leq u_i(t) \leq 100 \text{ ml/s}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

und die Zwangsabschaltung der jeweiligen Pumpe bei $x_i \geq 62$ cm.

Können stationäre Zustände mit $x_2 > x_1$ oder $x_2 = 0$, $x_1 = 62$ eingestellt werden?

3. Linearisieren Sie die in Aufgabe 1 gefundenen Zustandsgleichungen in der Umgebung eines mit konstanten Steuergrößen realisierbaren Arbeitspunktes! Welche Struktur besitzen die Systemmatrix A und die Eingangsmatrix B des linearisierten Systems?

4. Für das Drei-Tank-System soll ein Zustandsregler entworfen werden. Welche Arbeitsschritte sind hierzu erforderlich?
5. Ein Zustandsregler soll durch Minimierung eines quadratischen Gütefunktional entworfen werden. Welchen Voraussetzungen muß die Strecke genügen, wie erfolgt die Berechnung der Reglermatrix, welche freien Entwurfsparameter gibt es und wie sind diese auszuwählen?
6. Durch Öffnen eines Handventils an Tank 2 oder 3 kann ein Leck simuliert werden. Wie reagiert der Zustandsregelkreis und welche Maßnahmen schlagen Sie zur Erhöhung der stationären Genauigkeit der Regelung vor?

3.2 Versuchsdurchführung

1. Nach Start des Programms „dts“ im MATLAB[®]-Kommandofenster ist das Drei-Tank-System als Standard bereits angewählt (Schritt 1). Danach sind die Kennlinie Füllstandshöhe - A/D-Wandler-Spannungseingangssignal, die Ausflusszahlen zu bestimmen, die Kennlinie D/A-Wandler-Ausgangsspannung - Pumpendurchfluss sowie die Kennlinie des elektrisch ansteuerbaren Ventils V1 experimentell aufzunehmen. Diese Daten dienen zur Anpassung an die aktuellen Bedingungen und sind unbedingt erforderlich. Wählen Sie dazu den Schritt 2. Kalibrierung („komplett“) aus! Folgen Sie den Instruktionen des Programms!
2. Bemessen Sie mittels Polvorgabe (Polzuweisung, Polplatzierung, Eigenwertvorgabe) einen Zustandsregler für das Drei-Tank-System! Dabei sind die Forderungen nach stationärer Genauigkeit, Einhaltung der Stellgrößenbeschränkungen sowie Schnelligkeit der Übergangsvorgänge (Überführung aus dem Anfangszustand in den Arbeitspunkt nach ca. 3 min abgeschlossen) zu beachten. Entwerfen Sie den Regler für ein in der Umgebung des Arbeitspunktes $x_{10} = 40$, $x_{20} = 20$ gültiges lineares Modell der Strecke!
 - a) Führen Sie Schritt 3 des Programms „dts“ aus und wählen Sie dazu die Schaltfläche „Parameter - Eingabe“. Danach können Sie den Arbeitspunkt, die Abtastzeit, die Laufzeit des Versuchs und die Reglerart einstellen. Wählen Sie die Reglerart aus und geben Sie die entsprechenden Pole durch Leerzeichen getrennt im Feld „Pole oder Wichtungskoeffizienten“ vor!
 - b) Zur Durchführung des Reglerentwurfsprozesses führen Sie den 4. Schritt des Programms „dts“ aus und wählen Sie dazu die Schaltfläche „Entwurf/Sim - Ausführen“! Speichern Sie das entstehende Simulink[®]-Modell **nicht** ab, weil durch die veränderten Reglerrealisierungen und -parameterzuweisungen immer auf das Originalmodell zurückgegriffen wird! (Bei versehentlichem Speichern stellt das Ausführen der MATLAB[®]-M-Datei `copy_orig_model.m` im Kommandofenster die Ausgangssituation wieder her!)
Vergleichen Sie das simulativ erhaltene Verhalten des geschlossenen Regelkreises bei linearisierter und nichtlinearer Strecke anhand der Grafik „Drei-Tank-System: Reglerentwurf“!
 - c) Testen Sie den Zustandsregler an der realen Strecke! Dazu müssen Sie
 - überprüfen, ob die Betriebsart der Pumpen auf „Automatic“ eingestellt ist,
 - den Anfangszustand des Systems herstellen (alle Tanks weisen eine Füllstandshöhe von 20 cm auf) und das Nominalausflussventil noch geschlossen halten,
 - das Simulink[®]-Modell „dreitank_run“ in einen echtzeitfähigen Code umwandeln, entweder durch die Tastenkombination `< Strg >+< B >` oder über das Menü „Code/C++ Code/Build Model“ (die erfolgreiche Umwandlung erkennen Sie an der abschließenden Ausschrift im Kommando-Fenster: „Successful completion ...“),
 - eine Verbindung zum Code herstellen über das Menü „Simulation/Connect to Target“ (korrekt bei Ausschrift „Model dreitank_run loaded“),
 - den Betrieb des Drei-Tank-Systems starten entweder durch die Tastenkombination `< Strg >+< T >` oder im Menü „Simulation/Run“ **und sofort** das Nominalausflussventil öffnen. (Parallel zum Betrieb läuft automatisch die Simulation ab.)

Vergleichen Sie die Messdaten mit den Simulationsergebnissen anhand der Grafiken in den Ausgabeblöcken („Scopes“)!

3. Wiederholen Sie Aufgabe 2 der Versuchsdurchführung, d. h. die Schritte 3. und 4. des Programms, mehrfach für jeweils eine andere Wahl der Entwurfsparameter!
4. Wiederholen Sie Aufgabe 2 der Versuchsdurchführung, aber bemessen Sie den Regler jetzt durch Minimieren eines quadratischen Gütefunctionals (RICCATI-Regler-Entwurf)!
Wählen Sie dazu die Schaltfläche „Parameter - Eingabe“ (Schritt 3) und geben Sie durch Leerzeichen getrennt die entsprechenden Wichtungskoeffizienten (Hauptdiagonalkoeffizienten der Diagonalmatrizen Q und R) vor! Verfahren Sie weiter analog zu Punkt 2. der Versuchsdurchführung!
5. Durch Öffnen eines Handventils an Tank 2 oder 3 wird ein Leck simuliert. Nehmen Sie den Zeitverlauf der Signale im Regelkreis auf. Ändern Sie die Struktur des Kreises so, dass die Forderung nach stationärer Genauigkeit der Regelung erfüllt wird!

Literatur

- [1] amira GmbH, Duisburg. *DTS200 Laborversuch Drei-Tank-System*, 1993.
- [2] O. Föllinger. *Regelungstechnik*. Hüthig, Heidelberg, 1990.
- [3] The MathWorks Inc. MATLAB Documentation. <http://de.mathworks.com/help/matlab>. 2015.
- [4] J. Lunze. *Regelungstechnik 2*. Springer, 1997.
- [5] {P. Li, J. Reger}. Vorlesung Regelungs- und Systemtechnik 2. TU Ilmenau.