

Bachelorthesis

Franziska Dölling

Heuristischer PI-Mehrgrößenreglerentwurf für ein
Dreitanksystem

Franziska Dölling
Heuristischer PI-Mehrgrößenreglerentwurf für ein
Dreitanksystem

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. -Ing. Florian Wenck
Zweitgutachter : Prof. Dr. -Ing. Wilfried Wöhlke

Abgegeben am 18. Januar 2016

Franziska Dölling

Thema der Bachelorthesis

Heuristischer PI-Mehrgrößenreglerentwurf für ein Dreitanksystem

Stichworte

Mehrgrößenregelung, Dreitanksystem, PI-Regler, Tuningfaktor, Güteforderung, Reglerentwurf, Regelstrecke

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst den heuristischen Entwurf und die Implementierung eines PI-Mehrgrößenreglers für ein Dreitanksystem. Der entworfene Regler soll die Füllstände der Tanks regeln. Dieser Regler wird mit verschiedenen Testverfahren getestet.

Franziska Dölling

Title of the paper

Heuristic design of a proportional-integral multi-variable controller for a three-tank system

Keywords

multivariable control, three-tank-system, proportional-integral controller, tuning factor, performance specification, controller design, plant

Abstract

This paper includes the heuristic design and the implementation of a proportional-integral multi-variable controller for a three-tank system. The designed regulator should control tanks' levels. Different test methods should verify the regulator.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
1.1 Motivation	10
1.2 Ziele	10
1.3 Gliederung	10
2 Grundlagen	12
2.1 Mehrgrößensysteme	12
2.2 Übergangsfunktionsmatrix und Statikmatrix	17
2.3 Entwurfsansatz	18
2.4 Entwicklungsumgebung	21
3 Anlagen- und Prozessbeschreibung	22
3.1 Physikalisches System	22
3.2 Blockschaltbild und Signalzuordnung	25
3.3 Linearisiertes System	26
3.4 Füllvorgang	29
3.5 Grundbild Simulink	30
4 Experimentelle Parameterermittlung	32
4.1 Kennlinienermittlung	32
4.1.1 Pumpenkennlinien	32
4.1.2 Sensorkennlinien	37
4.1.3 Erweitertes Simulinkmodell	42
4.2 Ermittlung der Statikmatrix	43
5 Experimenteller Entwurf	47
5.1 Voraussetzungen für Reglerentwurf	47
5.2 I-Regler	48
5.3 Zuschaltung P-Anteil	53

5.4	PI-Regler	57
6	Test	59
6.1	Sollwertfolge	59
6.2	Störgrößenkompensation	66
6.3	Vergleich mit modellbasiertem Regler	71
7	Zusammenfassung und Ausblick	76
7.1	Zusammenfassung	76
7.2	Ausblick	77
	Literaturverzeichnis	78

Tabellenverzeichnis

4.1	Werte Kennlinienermittlung Pumpe 1	33
4.2	Werte Kennlinienermittlung Pumpe 2	33
4.3	Werte zur Ermittlung der Sensorkennlinien	37
5.1	Messwerte α	50
5.2	Messwerte β	54

Abbildungsverzeichnis

1.1	Dreitanksystem	9
2.1	Mehrgrößenregelkreisstruktur (angelehnt an [4], S.10)	14
2.2	Mehrgrößenregelkreis (angelehnt an [4], S.11)	14
2.3	Mehrgrößenregelkreis (angelehnt an [4], S.11)	15
2.4	Eigenwerte der offenen Kette (angelehnt an [4], S.220)	19
3.1	Dreitankmodell schematisch aus [8], MRP1	22
3.2	Detailansicht Ventil	23
3.3	Detailansicht Pumpe	23
3.4	Detailansicht Sensor	24
3.5	Detailansicht Blackbox	25
3.6	Signalzuordnung	25
3.7	Beispiel Füllvorgang	29
3.8	Grundbild Simulink	30
3.9	Detailansicht Slider Gain	30
3.10	Simulationsblock Dreitankanlage	31
4.1	Pumpenkennlinien	34
4.2	Regressionsgerade Pumpe 1	35
4.3	Regressionsgerade Pumpe 2	36
4.4	Sensorkennlinien	39
4.5	Regression Sensor Tank 1	40
4.6	Regression Sensor Tank 2	41
4.7	erweitertes Simulinkmodell	42
4.8	erweiterter Dreitankblock	42
4.9	Sprung Pumpe 1	43
4.10	Sprung Pumpe 1 Endwerte	44
4.11	Sprung Pumpe 2	45
4.12	Sprung Pumpe 2 Endwerte	45
5.1	Simulinkmodell I-Regler	49
5.2	Istwerte $\alpha=0,1$	51

5.3	Istwerte $\alpha=0,2$	51
5.4	Istwerte $\alpha=9$	52
5.5	Simulinkmodell Zuschaltung des P-Anteils	53
5.6	Istwerte $\beta=10$	55
5.7	Istwerte $\beta=00$	55
5.8	Istwerte $\beta=140$	56
5.9	Simulinkmodell fertiger PI-Regler	58
6.1	Istwerte Sollwertsprung I-Regler	60
6.2	Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung I-Regler	60
6.3	Istwerte Sollwertsprung $\beta=10$	61
6.4	Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung $\beta=10$	62
6.5	Istwerte Sollwertsprung $\beta=100$	63
6.6	Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung $\beta=100$	63
6.7	Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung $\beta=100$ mit Begrenzer	64
6.8	Istwerte Sollwertsprung 0,5cm	65
6.9	Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung 0,5cm	65
6.10	Störgrößenkompensation Istwerte I-Regler	66
6.11	Störgrößenkompensation Reglerausgangsgrößen I-Regler	67
6.12	Störgrößenkompensation Istwerte $\beta=10$	68
6.13	Störgrößenkompensation Reglerausgangsgrößen $\beta=10$	69
6.14	Störgrößenkompensation Istwerte $\beta=100$	69
6.15	Störgrößenkompensation Reglerausgangsgrößen $\beta=100$	70
6.16	Simulinkmodell modellbasierter Regler	71
6.17	Istwerte Sollwertsprung modellbasierter Regler	72
6.18	Stellgrößen Sollwertsprung modellbasierter Regler	73
6.19	Istwerte Störgrößenkompensation modellbasierter Regler	74
6.20	Stellgrößen Störgrößenkompensation modellbasierter Regler	75

1 Einleitung



Abbildung 1.1: Dreitanksystem

In der Industrie ist es häufig notwendig mehrere Größen gleichzeitig zu regeln. Hinzu kommt, dass diese Größen voneinander abhängig sein können. Deshalb sind in vielen Bereichen Mehrgrößenregelungen notwendig. Vor allem in der Verfahrens- und Energietechnik werden diese häufig angewendet. Aus diesem Grund ist die Mehrgrößenregelung ein wichtiges Thema der Automatisierungstechnik. Beispiele für die Anwendung von Mehrgrößenregelungen sind Wärmekraftwerke in denen die Dampferzeuger geregelt werden müssen oder die Niveauregelung von Offshore-Windanlagen auf schwimmenden Plattformen. Für die Entwicklung von Mehrgrößenregelungen gibt es verschiedene Ansätze. Die meisten dieser Ansätze basieren auf einem Modell der verwendeten Regelstrecke. In dieser Bachelorarbeit wird die Entwicklung eines PI-Mehrgrößenreglers mit einem Ansatz ohne Modellbildung der Regelstrecke beschrieben. Dieser Ansatz basiert auf Experimenten mit der Regelstrecke und ist somit ein heuristischer Ansatz.

1.1 Motivation

Die Entwicklung von Mehrgrößenreglern ist Thema und Bestandteil der Vorlesung *Mehrgrößenregelung* des Masterstudiengangs Automatisierung. Für diese Vorlesung soll ein neuer Praktikumsversuch erstellt werden, in dem die Studierenden die Regelstrecke durch Experimente näher kennenlernen sollen. Mit Hilfe des heuristischen Entwurfsansatzes ist dies möglich.

Ein weiterer Grund für die Entwicklung nach dem heuristischen Ansatz ist, dass es in der Realität Situationen gibt, in denen kein Modell der Strecke vorliegt oder das dafür benötigte Fachwissen fehlt.

1.2 Ziele

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen PI-Mehrgrößenregler mit Hilfe eines heuristischen Entwurfsansatzes zu entwickeln und zu implementieren. Dafür ist es zunächst notwendig die Kennlinien der Aktoren und Sensoren aufzunehmen. Des Weiteren müssen die benötigten Parameter des Reglers experimentell bestimmt werden. Für die Bestimmung der Parameter ist es notwendig ein funktionierendes Simulationsmodell mit MATLAB/Simulink zu erstellen. Dieses Simulationsmodell muss im Laufe der Arbeit, bei verschiedenen Arbeitsschritten, erweitert werden. Der entwickelte Mehrgrößenregler soll gewisse Anforderungen erfüllen. Durch verschiedene Testverfahren sollen diese Anforderungen und die Qualität des Reglers geprüft werden.

1.3 Gliederung

Diese Arbeit ist in sieben Kapitel geteilt. Im ersten Kapitel geht es um die Einleitung. Hier wird das Thema Mehrgrößenregelung, die Motivation für das Thema dieser Arbeit, die Ziele und die Gliederung vorgestellt. Das nachfolgende Kapitel erläutert die Grundlagen, die für die Umsetzung des Themas benötigt werden. Hierzu gehören die Mehrgrößenregelung, die Übergangsfunktionsmatrix und Statikmatrix, der verwendete Entwurfsansatz, sowie die verwendete Entwicklungsumgebung. Das dritte Kapitel beschreibt das verwendete Dreitanksystem. Es werden die Sensoren, die Aktoren und die Signalzuordnung beschrieben. Des Weiteren wird das linearisierte System angegeben und ein Füllvorgang beschrieben. Anschließend wird das grundlegende Simulationsmodell erläutert. Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit der experimentellen Ermittlung der benötigten Parameter.

Es werden die Aufnahme der Kennlinien, der Sensoren und Aktoren, sowie die Ermittlung der Statikmatrix beschrieben. Das fünfte Kapitel umfasst die Entwicklung des Mehrgrößenreglers. Dafür wird zunächst überprüft, ob der gewählte Ansatz angewendet werden kann. Die Entwicklung umfasst zwei Schritte. Zunächst wird ein I-Regler entwickelt und die Reglerparameter experimentell ermittelt. Anschließend wird ein P-Anteil zugeschaltet. Für den P-Anteil werden die Parameter wie beim I-Regler bestimmt. Abschließend wird der fertige PI-Regler angegeben. In dem darauf folgenden Kapitel wird der entwickelte Regler durch zwei Testverfahren auf seine Qualität geprüft und mit einem modellbasierten Regler verglichen. Das letzte Kapitel fasst den Inhalt dieser Arbeit zusammen. Außerdem wird als Abschluss ein kleiner Ausblick auf Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten gegeben.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dieser Bachelorarbeit behandelt. In Unterkapitel 2.1 werden Mehrgrößensysteme näher erläutert. Unterkapitel 2.2 beschreibt die Übergangsmatrix und die Statikmatrix. Auf den verwendeten Entwurfsansatz wird in 2.3 eingegangen. In Unterkapitel 2.4 wird die Entwicklungsumgebung beschrieben.

Die Inhalte dieses Kapitels sind überwiegend den Lehrbüchern von Lunze [4] und Schulz [7] entnommen.

2.1 Mehrgrößensysteme

Mehrgrößensysteme sind Systeme, in denen gleichzeitig mehrere Regelgrößen auf Sollwerten gehalten werden sollen. Üblicherweise stehen hierfür mehrere Stellgrößen zur Verfügung. Wenn die Arbeitsweise einer Anlage durch mehrere Größen mit starker Wechselwirkung untereinander gekennzeichnet ist, ist eine Mehrgrößenregelung erforderlich. Dies entsteht, wenn das Verhalten der behandelten Regelstrecke von mehreren Regelgrößen gleichzeitig abhängt und dadurch mehrere Stellglieder angesteuert werden müssen. Sind die Teilsysteme einer Regelstrecke nicht stark gekoppelt, ist eine Mehrgrößenregelung trotzdem notwendig, sobald ein Zusammenspiel der Teilsysteme für die Regelungsaufgabe erforderlich ist. Ist dies nicht der Fall, ist eine dezentrale Regelung möglich. (vgl. [8], Kapitel MIMO)

Zusammengefasst verhält es sich so, dass es sich bei einer Regelstrecke erst dann um ein Mehrgrößensystem handelt, sobald die Kopplung zwischen den verschiedenen Stell- und Regelgrößen so stark ist, dass sie beim Reglerentwurf nicht mehr vernachlässigt werden darf. Die Stell- und Regelgrößen dürfen also nicht mehr als unabhängige Größen behandelt werden.

Die Anforderungen an eine Mehrgrößenregelung unterscheiden sich nicht stark von denen an ein Eingrößensystem. Diese Anforderungen werden jedoch durch weitere Güteforderungen ergänzt.

Bisher galten folgende Güteforderungen (vgl. [3], S.346f):

1. **Stabilität:** Es wird gefordert, dass der geschlossene Regelkreis asymptotisch stabil ist. Dies bedeutet, dass der Regelkreis bei einer endlichen Erregung, mit einem endlichen Ausgangssignal reagiert. Ohne Erregung kehrt dieser in seine Ruhelage zurück.
2. **Sollwertfolge und Störkompensation:** Die Regelgröße muss vorgegebenen Führungs- bzw. Störgrößen asymptotisch stabil folgen. Der Regelkreis muss also stationär genau sein.
3. **Dynamikforderungen:** Es müssen vorgegebene Güteforderungen von dem dynamischen Zusammenhang zwischen Führungs- bzw. Störgröße und der Regelgröße erfüllt werden. Hierbei handelt es sich um Anforderungen an das Übergangsverhalten bzw. die Art und Weise wie sich die Ausgangsgröße an die Erregung annähert. Es handelt sich dabei zum Beispiel um die Anstiegszeit oder die Überschwingweite.
4. **Robustheit:** Gibt es Unsicherheiten im Regelstreckenmodell, sollen die Güteforderungen 1 bis 3 trotzdem erfüllt werden. Dies ist der Fall, wenn die Regelstrecke nicht exakt durch das Modell wiedergegeben wird.

Zu diesen Güteforderungen kommen nun zwei weitere hinzu:

5. **Geringe Querkopplungen:** Es wird gefordert, dass im dynamischen Verhalten des Regelkreises die auftretenden Querkopplungen zwischen den Regelgrößen gering gehalten werden sollen.
6. **Integrität:** Des Weiteren wird die Integrität des Regelkreises gefordert. Sollten einzelne Stell- oder Messglieder versagen, muss der Regelkreis trotzdem stabil bleiben. Dies ist wichtig für die schrittweise Inbetriebnahme eines Regelkreises. (vgl. [4], S.9f)

Die Struktur des Mehrgrößenregelkreises entspricht vom prinzipiellen Aufbau dem einer Eingrößenregelung. Der Unterschied zwischen diesen beiden besteht darin, dass im Mehrgrößenfall die Signale als Vektoren und die Übertragungsfunktionen als Übertragungsfunktionsmatrizen dargestellt werden (siehe Abbildung 2.1).

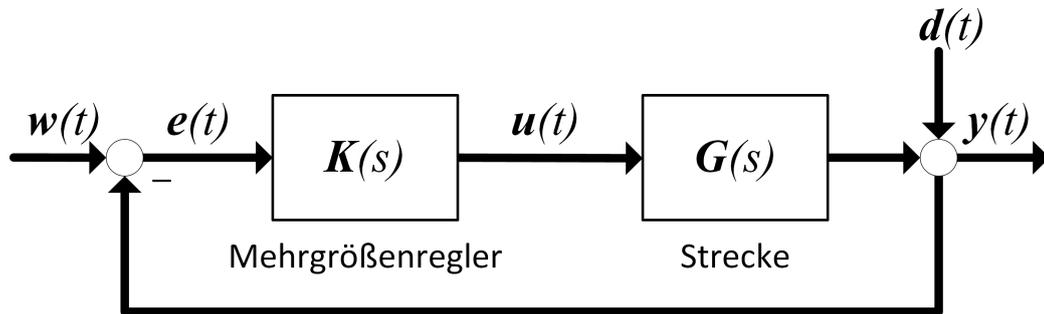


Abbildung 2.1: Mehrgrößenregelkreisstruktur (angelehnt an [4], S.10)

Das Problem beim Reglerentwurf ist die Rückkopplungsstruktur zwischen dem Regler und der Strecke. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, wird die Regelabweichung für die Regelgrößen getrennt gebildet. Der Regler muss die Querkopplungen der Regelstrecke kompensieren. Dafür wird u_1 nicht nur in Abhängigkeit von e_1 , sondern ebenfalls von e_2 vorgegeben.

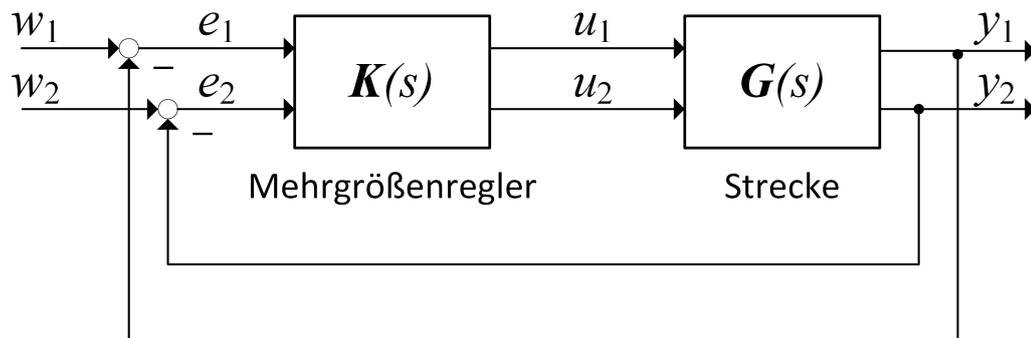


Abbildung 2.2: Mehrgrößenregelkreis (angelehnt an [4], S.11)

Eine weitere Möglichkeit ein Mehrgrößensystem zu regeln ist eine dezentrale Regelung. Hierfür werden Teilregler entworfen, in denen die Querkopplungen vernachlässigt werden (siehe Abbildung 2.3).

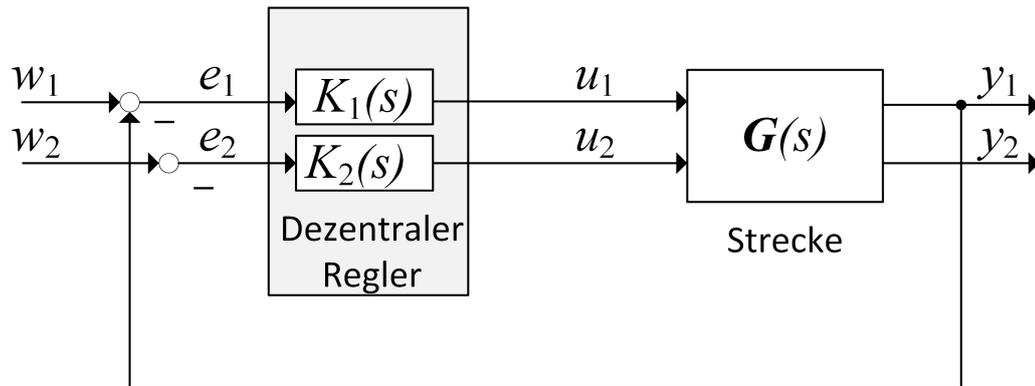


Abbildung 2.3: Mehrgrößenregelkreis (angelehnt an [4], S.11)

Im Zeitbereich kann das Mehrgrößensystem sowohl durch Differentialgleichungen, als auch durch das Zustandsraummodell beschrieben werden. Diese werden in den folgenden Absätzen näher erläutert.

Bei der Darstellung durch Differentialgleichungen kann für jede Ausgangsgröße eine eigene Differentialgleichung aufgestellt werden. In diese werden sämtliche Eingangsgrößen einbezogen. Verallgemeinert sieht diese Gleichung folgendermaßen aus (vgl. [4], S.15f):

$$\sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot \frac{d^j \cdot y_i(t)}{dt^j} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^q b_{kj} \cdot \frac{d^j \cdot u_k(t)}{dt^j}, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (2.1)$$

Mit den bekannten Anfangsbedingungen:

$$\frac{d^j y_i}{dt^j}(0) = y_{0,ij}, \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, r \\ j = 0, 1, \dots, n-1 \end{array} \quad (2.2)$$

Durch den Index i können die Ordnungen n und q der höchsten Ableitungen variieren. Die **Systemordnung n** wird durch die höchste Ableitung der Ausgangsgröße bestimmt.

Aus Komplexitätsgründen wird die Differentialgleichung selten zur Beschreibung und Behandlung von Mehrgrößensystemen verwendet. Sie wird nur zur Bestimmung der Systemklasse angewendet.

Die wesentlich einfachere Beschreibungsform ist das Zustandsraummodell. Dieses Zustandsraummodell verwendet innere Systemgrößen (Zustandsvariablen) zur Systembeschreibung. Es besteht aus der Zustandsgleichung, der Ausgangsgleichung und der Anfangsbedingung. Das Zustandsraummodell für den Eingrößenfall wird auf m Eingangsgrößen $u_i(t)$ und r Ausgangsgrößen $y_i(t)$ erweitert (vgl. [7], S.29):

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}\mathbf{d}(t), & \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}\mathbf{d}(t)\end{aligned}\quad (2.3)$$

Hierfür gelten folgende Bezeichnungen und Dimensionen (vgl. [8], Kapitel MIMO):

Zustandsvektor: $\mathbf{x}(t)$, $(n, 1)$	Systemmatrix: \mathbf{A} , (n, n)
Eingangsvektor: $\mathbf{u}(t)$, $(m, 1)$	Steuermatrix: \mathbf{B} , (n, m)
Ausgangsvektor: $\mathbf{y}(t)$, $(r, 1)$	Beobachtungsmatrix: \mathbf{C} , (r, n)
Störgrößenvektor: $\mathbf{d}(t)$, $(p, 1)$	Durchgangsmatrix: \mathbf{D} , (r, m)
Auswirkung der Störgrößen auf die Zustandsableitungen: \mathbf{E} , (n, p)	
Auswirkung der Störgrößen auf die Regelgrößen: \mathbf{F} , (n, p)	

Für dieses Modell wird vorausgesetzt, dass für $\text{Rang}(\mathbf{B}) = m$ und $\text{Rang}(\mathbf{C}) = r$ gilt.

Im Frequenzbereich wird das Mehrgrößensystem durch die Übertragungsfunktionsmatrix beschrieben:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2.4)$$

$\mathbf{G}(s)$ ist für ein System mit m Eingangsgrößen und r Ausgangsgrößen eine (r, m) -Matrix:

$$\mathbf{G}(s) = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1m}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \cdots & G_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ G_{r1}(s) & G_{r2}(s) & \cdots & G_{rm}(s) \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$G_{ij}(s)$ beschreibt die Einwirkung des Eingangs $U_j(s)$ auf den Ausgang $Y_i(s)$. Jedes Element der Übertragungsfunktionsmatrix ist eine gebrochene rationale Funktion. (vgl. [4], S.20).

2.2 Übergangsfunktionsmatrix und Statikmatrix

Die Übergangsfunktionsmatrix $H(t)$ beschreibt, wie die Übergangsfunktion bei Eingrößensystemen, die Antwort des Mehrgrößensystems auf einen Einheitssprung (siehe Gleichung 2.7). Der Unterschied zum Eingrößenfall ist, dass mehrere Eingangsgrößen verändert und mehrere Ausgangsgrößen beobachtet werden können.

Für die Übergangsfunktionsmatrix werden aus der Ruhelage eine oder mehrere Eingangsgrößen sprungförmig verändert. Die entstehenden Werte der Ausgangsgrößen stellen die Elemente der Matrix dar. Bei der sprungförmigen Veränderung einzelner Eingangsgrößen, erhält man m Messvektoren. Schreibt man diese nebeneinander, erhält man ebenfalls die Übergangsfunktionsmatrix:

$$\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} y_1^1(t) & y_1^2(t) & \cdots & y_1^m(t) \\ y_2^1(t) & y_2^2(t) & \cdots & y_2^m(t) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_r^1(t) & y_r^2(t) & \cdots & y_r^m(t) \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Das Element y_i^j beschreibt die erzeugte Übergangsfunktion der Eingangsgröße $u_j(t)$ an der Ausgangsgröße $y_i(t)$ (vgl. [4], S.19).

Übergangsfunktionen, die durch mehrere Eingangsgrößen gleichzeitig erzeugt werden, werden auf Grund der Linearität des Systems nach dem Superpositionsprinzip überlagert. Bei einer allgemeinen sprungförmigen Erregung $\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{u}}\sigma(t)$ mit

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

erhält man die Ausgangsgröße durch Multiplikation der Übergangsfunktionsmatrix mit dem Amplitudenvektor:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(t)\bar{\mathbf{u}} \quad (2.8)$$

Bei asymptotisch stabilen Systemen wird das statische Übertragungsverhalten durch die Endwerte der Übergangsfunktionen beschrieben (vgl. [4], S.38). Daraus entsteht die Statikmatrix:

$$\mathbf{K}_s = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{H}(t) = \mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} \quad (2.9)$$

Im nächsten Abschnitt wird näher auf die Bestimmung der Statikmatrix eingegangen.

2.3 Entwurfsansatz

In der Realität gibt es Situationen, in denen kein Modell für die Strecke vorliegt oder das dafür benötigte Know-How nicht vorhanden ist. Aus diesem Grund ist man häufig auf andere Möglichkeiten für den Reglerentwurf angewiesen.

Im Eingrößenfall gibt es für dieses Problem verschiedene Lösungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel die Einstellregeln nach Ziegler-Nichols sowie nach Chien, Hrones und Reswick ([9], S. 128ff). Für ein Mehrgrößensystem gibt es ebenfalls einen heuristischen Ansatz für den Entwurf eines Reglers. Für diesen Ansatz muss kein Modell der Strecke vorliegen. In diesem Kapitel soll dieser Entwurfsansatz näher beschrieben werden.

Für diese Bachelorarbeit wurde der experimentelle Entwurf eines PI-Reglers gewählt. Um diesen Entwurfsansatz anwenden zu können, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein (vgl. [4], S.211f):

1. **Stabilität:** Die behandelte Regelstrecke muss asymptotisch stabil sein.
2. **Güteforderungen:** Die Güteforderungen an den geschlossenen Regelkreis beschränken sich auf die Stabilität, die Störkompensation und die Sollwertfolge. Es muss also möglich sein einen Störgrößen- bzw. Sollwertsprung zu kompensieren.
3. **Experimentierfähigkeit:** Des Weiteren müssen Experimente mit der Regelstrecke möglich sein.

Das Besondere an diesem Ansatz ist, dass keine Modelle der Strecke und des geschlossenen Kreises für den Reglerentwurf vorliegen müssen. Der Entwurf basiert vollständig auf Experimenten mit der Regelstrecke.

In dieser Arbeit wird nur die praktische Umsetzung des Ansatzes beschrieben. Auf die Herleitung wird nicht weiter eingegangen. Die Herleitung kann in [4], Kapitel 5 nachgelesen werden.

Im ersten Schritt des Entwurfsalgorithmus wird die Statikmatrix \mathbf{K}_S der Regelstrecke aufgenommen. Dafür wird das System in einen stationären Zustand gebracht und die erste Eingangsgröße sprungförmig erhöht. Anschließend werden die Endwerte der Regelgrößen gemessen. Dies wird nacheinander mit allen Eingangsgrößen durchgeführt. Die Differenzen aus den Endwerten und den stationären Werten ergeben die Elemente der Statikmatrix (vgl. [4], S224f). Da der Entwurfsansatz auf stationären Endwerten basiert, ist es wichtig, dass die Strecke einen Ausgleich hat. Die Ausgangsgrößen der Strecke dürfen also nicht ins Unendliche gehen, da die Statikmatrix in diesem Fall ebenfalls unendlich wird.

Die Statikmatrix für ein System mit zwei Eingangsgrößen sieht folgendermaßen aus:

$$\mathbf{K}_S = \begin{pmatrix} k_{s11} & k_{s12} \\ k_{s21} & k_{s22} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Das Element k_{sij} beschreibt den Endwert der Ausgangsgröße y_i bei einer sprungförmigen Änderung der Stellgröße u_j .

Nach dem Bestimmen der Statikmatrix muss in einem nächsten Schritt die Existenzbedingung überprüft werden. Diese schreibt vor, dass bei einer quadratischen Statikmatrix die Determinante von \mathbf{K}_S ungleich Null sein muss. Ist \mathbf{K}_S nicht quadratisch, muss der Rang der Matrix der Anzahl an Regelgrößen entsprechen. Ist die Existenzbedingung nicht erfüllt, muss ein anderes Entwurfsverfahren gewählt werden (vgl. [4], S.214).

Für das weitere Vorgehen wird zunächst mit einem I-Regler gearbeitet. Der P-Anteil wird später hinzu geschaltet. Die Zustandsgleichungen lauten (vgl. [4], S. 213):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_r(t) &= \mathbf{y}(t) - \mathbf{w}(t), & \mathbf{x}_r(0) &= \mathbf{x}_{r0} \\ \mathbf{u}(t) &= -\mathbf{K}_I \cdot \mathbf{x}_r(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

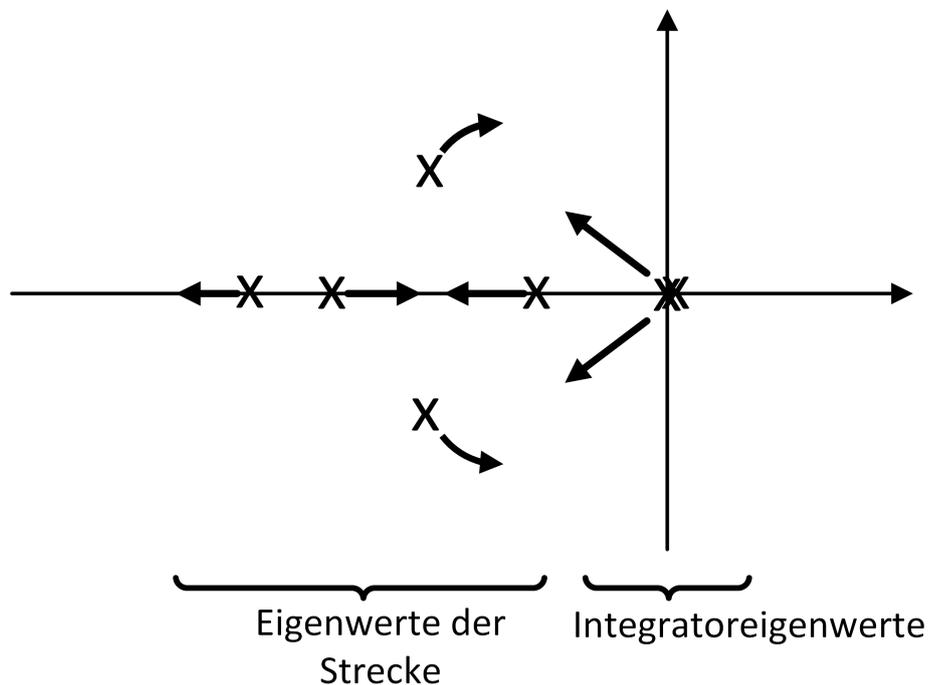


Abbildung 2.4: Eigenwerte der offenen Kette (angelehnt an [4], S.220)

Die Eigenwerte der Regelstrecke liegen in der linken komplexen Halbebene, da diese asymptotisch stabil ist. Die Eigenwerte der Integratoren liegen jedoch im Ursprung. Das Ziel ist es, die Reglerparameter so zu wählen, dass die r Integratoreigenwerte in die linke Halbebene wandern und die Streckeneigenwerte nicht aus der linken Halbebene hinaus wandern (siehe Abb. 2.4).

Aus diesem Grund wird die Reglermatrix \mathbf{K}_I in eine Matrix und einen skalaren Faktor (Tuningfaktor) α aufgeteilt (vgl. [4], S.221).

$$\mathbf{K}_I = \alpha \cdot \tilde{\mathbf{K}}_I \quad (2.12)$$

Damit folgt für die Zustandsgleichungen:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_r(t) &= \mathbf{y}(t) - \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{u}(t) &= -\alpha \cdot \tilde{\mathbf{K}}_I \cdot \mathbf{x}_r(t) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Die Matrix $\tilde{\mathbf{K}}_I$ wird folgendermaßen gewählt:

- Wenn $m=r$:

$$\tilde{\mathbf{K}}_I = \mathbf{K}_S^{-1} \quad (2.14)$$

- Ist die Statikmatrix nicht quadratisch, so wird sie über die Pseudoinverse

$$\tilde{\mathbf{K}}_I = \mathbf{K}_S^T \cdot (\mathbf{K}_S \cdot \mathbf{K}_S^T)^{-1} \quad (2.15)$$

berechnet (vgl. [4], S.223f)

Im Anschluss wird der Regelkreis mit einem sehr kleinen Tuningfaktor α geschlossen und das Verhalten experimentell bestimmt. Solange kein instabiles Verhalten auftritt, kann α erhöht werden.

Anschließend wird der Regler um einen P-Anteil erweitert, um die Geschwindigkeit zu verbessern. Die Reglermatrix \mathbf{K}_P wird, wie \mathbf{K}_I , in eine Matrix und einen Tuningfaktor β zerlegt:

$$\mathbf{K}_P = \beta \cdot \tilde{\mathbf{K}}_P \quad (2.16)$$

Für die Zustandsgleichung folgt:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_r(t) &= \mathbf{y}(t) - \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{u}(t) &= -\alpha \cdot \tilde{\mathbf{K}}_I \cdot \mathbf{x}_r(t) - \beta \cdot \tilde{\mathbf{K}}_P \cdot (\mathbf{y}(t) - \mathbf{w}(t)) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Die Matrix $\tilde{\mathbf{K}}_P$ wird wie $\tilde{\mathbf{K}}_I$ gewählt (vgl. [4], S.227):

- Wenn $m=r$:

$$\tilde{\mathbf{K}}_P = \mathbf{K}_S^{-1} \quad (2.18)$$

- Wenn die Statikmatrix nicht quadratisch ist, wird sie wie bei dem zuvor beschriebenen I-Anteil über die Pseudoinverse

$$\tilde{\mathbf{K}}_P = \mathbf{K}_S^T \cdot (\mathbf{K}_S \cdot \mathbf{K}_S^T)^{-1} \quad (2.19)$$

gebildet.

Im Anschluss wird der Regelkreis mit dem vorher bestimmten α und einem sehr kleinen β geschlossen. Das dynamische Verhalten des geschlossenen Regelkreises kann verbessert werden, indem der Tuningfaktor β erhöht wird. Dieser kann nun solange erhöht werden, bis das dynamische Verhalten den Wünschen entspricht.

2.4 Entwicklungsumgebung

Als Entwicklungsumgebung wurde das Programm MATLAB/Simulink in der Version R2012b von der Firma MathWorks verwendet. Dies ist eine Software zur Lösung und grafischen Darstellung von mathematischen Problemen. In [5] kann mehr über die Software nachgelesen werden.

Mit Hilfe dieser Software und dem Realtime Target, wurde ein Simulinkmodell erstellt, mit dem Stellgrößen vorgegeben und Größen des Systems angezeigt werden können. Durch das Realtime Target wird das Modell echtzeitfähig. Der Regler wurde ebenfalls mit Simulink realisiert. Auch die Matrizen, $\tilde{\mathbf{K}}_I$ und $\tilde{\mathbf{K}}_P$, wurden mit MATLAB berechnet.

Die einzelnen Simulinkmodelle werden in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt und beschrieben.

3 Anlagen- und Prozessbeschreibung

In diesem Kapitel wird das Dreitanksystem aus dem Labor für Regelungstechnik der HAW Hamburg näher beschrieben. Bei diesem System handelt es sich um die Regelstrecke, die für den im vorigen Kapitel beschriebenen Ansatz verwendet wurde.

Abschnitt 3.1 befasst sich mit dem physikalischen System. Hier wird die Hardware des Systems, also die Sensoren und Aktoren, beschrieben. Das Unterkapitel 3.2 erläutert die Signalzuordnung. Die Eingangs-, Ausgangs- und Systemgrößen werden angegeben. Das linearisierte System wird in Abschnitt 3.3 dargestellt. In Unterkapitel 3.4 wird ein beispielhafter Füllvorgang beschrieben. Das grundlegende Simulinkmodell wird in Abschnitt 3.5 angegeben und erläutert.

3.1 Physikalisches System

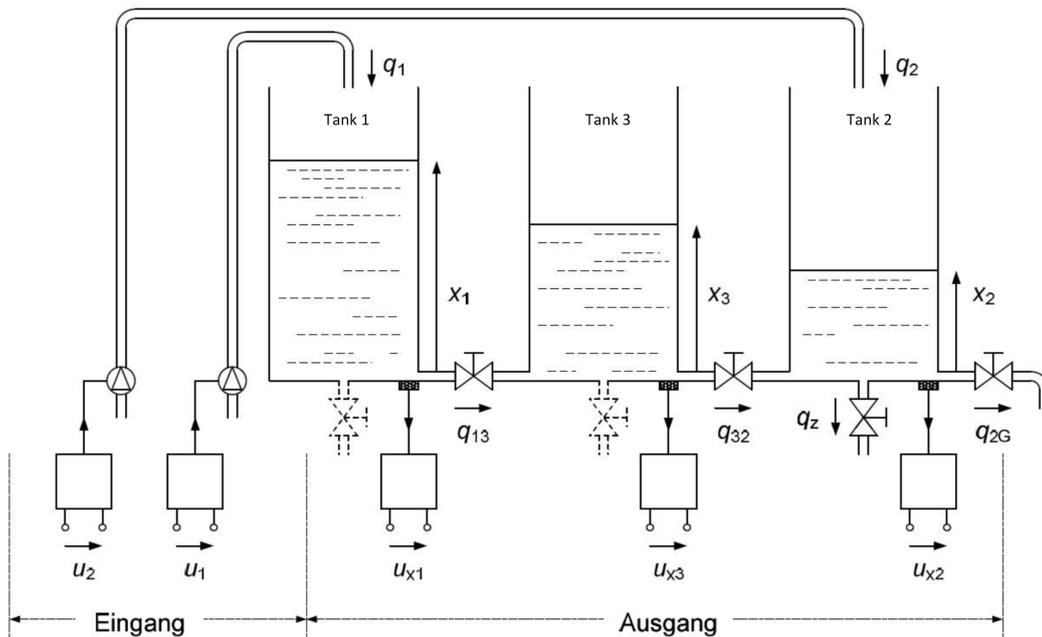


Abbildung 3.1: Dreitankmodell schematisch aus [8], MRP1

Das Dreitanksystem, welches in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist, besteht aus drei zylinderförmigen Wassertanks mit einem Durchmesser von jeweils 14 cm. Die Fläche beträgt somit $F = \pi r^2 = \pi \left(\frac{14\text{cm}}{2}\right)^2 = 153,94\text{cm}^2$ (vgl. [10],S.3). Die Tanks sind über Verbindungsrohre miteinander gekoppelt. Zusätzlich befindet sich an jedem Tank ein Ablassrohr zur Simulation von Leckagen. An Tank 2 befindet sich ein weiteres Ablassrohr für den kontinuierlichen Abfluss. Es handelt sich hierbei um ein Mehrgrößensystem, da die Füllhöhen der Tanks, auf Grund der Kopplung durch die Verbindungsrohre, voneinander abhängig sind.



Abbildung 3.2: Detailansicht Ventil

An den Ablass- und Verbindungsrohren sitzen 2-Wege-Handventile aus PVC (siehe Abbildung 3.2). Die Ventile zwischen den Tanks (HV13, HV32) und das Ventil für den kontinuierlichen Abfluss (HV2G) sind im Normalbetrieb geöffnet. Die Ventile für die Simulation von Leckagen (HV1, HV3, HV2) bleiben im Normalbetrieb geschlossen.



Abbildung 3.3: Detailansicht Pumpe

Tank 1 und 2 werden durch die Pumpen 1 und 2 befüllt (siehe Abbildung 3.3). Diese beiden Pumpen liefern die Zuflüsse q_1 und q_2 . Der Füllstand von Tank drei resultiert aus den Füllhöhen der beiden anderen Tanks. In den verbauten Pumpen befinden sich drei Kolben, welche abwechselnd an einer Membran ziehen und das Wasser fördern. Es handelt sich hierbei um Klarwasserpumpen für den Haushalt, woraus resultiert, dass der Zufluss der Pumpen bei gleichbleibender Eingangsspannung nicht konstant ist.



Abbildung 3.4: Detailansicht Sensor

Die Füllstände der Wassertanks werden über Sensoren gemessen. Diese befinden sich, wie in Abbildung 3.4 zu erkennen ist, oben an den Tanks. Hierbei handelt es sich um Differenzdrucksensoren (vgl. [10],S.4). Diese messen sowohl den Luftdruck der Umgebung als auch den Druck des Wassers am Boden des Tanks und berechnen daraus den Füllstand des Tanks. Die Sensorkennlinien mussten an jedem Versuchstag neu aufgenommen werden, da der Luftdruck der Umgebung als Bezugspotential für die Füllstandsmessung verwendet wird.

Angesteuert wird das System über die in Abbildung 3.5 abgebildete Blackbox. Diese ist über eine Schnittstelle mit MATLAB/Simulink verbunden. An der Blackbox kann der Benutzer zwischen einem Hand- und einem Automatikbetrieb wählen. Im Handbetrieb kann der Zufluss der beiden Pumpen manuell über zwei Potentiometer eingestellt werden. Im Automatikbetrieb hingegen wird das System über MATLAB/Simulink angesteuert.



Abbildung 3.5: Detailansicht Blackbox

3.2 Blockschaltbild und Signalzuordnung

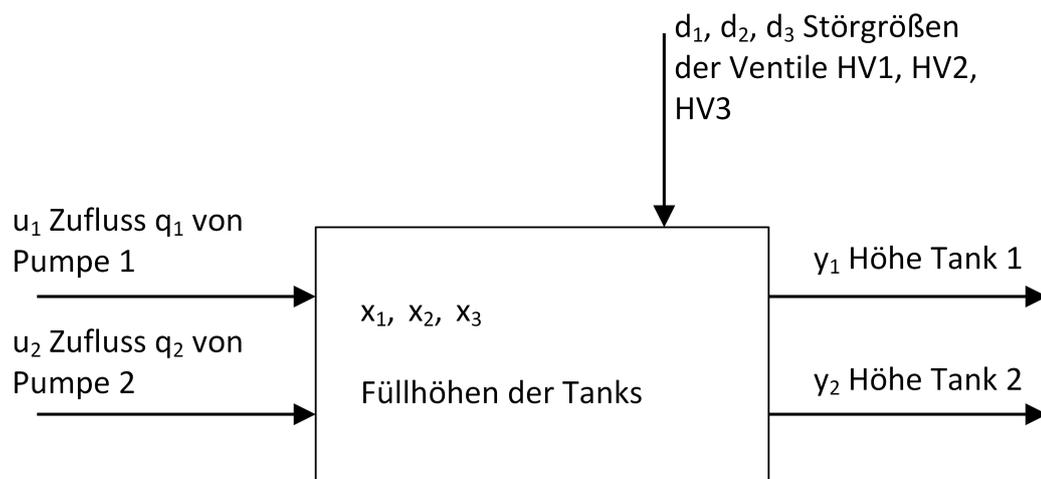


Abbildung 3.6: Signalzuordnung

Das Dreitanke-System besteht, wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist, aus zwei Eingangs- und zwei Ausgangsgrößen. Die Eingangsgrößen u_1 und u_2 sind die Zuflüsse q_1 und q_2 der beiden Pumpen. Diese werden mit einer Spannung von -10V bis 10V angesteuert.

Im System gibt es drei Zustandsgrößen x_1 , x_2 und x_3 . Diese sind die Füllhöhen der drei Wassertanks. Dieses System besitzt lediglich zwei Ausgangsgrößen, da nur die Füllhöhen von Tank 1 und Tank 2 geregelt werden. Die Ausgangsgrößen y_1 und y_2 sind dementsprechend

die Füllhöhen von Tank 1 und 2. Diese werden von den Differenzdrucksensoren gemessen und mit einer Spannung von -10V bis 10V dargestellt. Hierbei entspricht eine Spannung von -10V einer Füllhöhe von 5cm und 10V einer von 55cm.

Die Füllhöhe von Tank 3 resultiert aus den Füllhöhen von Tank 1 und 2. Diese stellt sich automatisch in der Mitte der beiden anderen Füllhöhen ein. Deshalb muss diese nicht geregelt werden.

Auf das System können 3 verschiedene Störgrößen (d_1 , d_2 und d_3) einwirken. Diese Störgrößen entstehen durch das Öffnen der Ablassventile HV1, HV2 und HV3, die im normalen Betrieb geschlossen sind und lediglich zur Simulation von Leckagen dienen.

3.3 Linearisiertes System

Bei dem Dreitanksystem handelt es sich um ein nichtlineares Mehrgrößensystem. Für den Entwurfsansatz wird der Arbeitspunkt des Systems benötigt. Aus diesem Grund wird hier das um den Arbeitspunkt herum linearisierte System angegeben. Die Berechnung des linearisierten Systems wird im Folgenden nicht weiter beschrieben, da es für diesen Ansatz nicht notwendig ist.

Das nichtlineare System wird durch folgende Gleichungen beschrieben (vgl.[6],S.27):

$$\dot{x}_1(t) = \frac{q_1(t) - c_{13} \cdot \text{sign}(x_1(t) - x_3(t)) \cdot \sqrt{|x_1(t) - x_3(t)|}}{F} \quad (3.1)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{c_{32} \cdot \text{sign}(x_3(t) - x_2(t)) \cdot \sqrt{|x_3(t) - x_2(t)|} + q_2(t) - c_{2G} \cdot \sqrt{x_2(t)}}{F} \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_3(t) = \frac{c_{13} \cdot \text{sign}(x_1(t) - x_3(t)) \sqrt{|x_1(t) - x_3(t)|} - c_{32} \cdot \text{sign}(x_3(t) - x_2(t)) \sqrt{|x_3(t) - x_2(t)|}}{F} \quad (3.3)$$

$$y_1(t) = x_1(t), \quad y_2(t) = x_2(t) \quad (3.4)$$

Auf Grund der *sign*-Funktion handelt es sich um ein nichtlineares System (vgl. [2],S.32). Im Arbeitspunkt sollen sich die Füllstände bei $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = (44 \text{ cm}, 22 \text{ cm}, 33 \text{ cm})$ einpendeln.

Die Fläche F ist aus Kapitel 3.1 bekannt. Die Ventilbeiwerte werden durch folgende Werte beschrieben: $c_{13} = c_{32} = 10,44 \frac{cm^3}{sec\sqrt{cm}}$, $c_{2G} = 13,26 \frac{cm^3}{sec\sqrt{cm}}$

Für das linearisierte System folgt (vgl. [6], S.27ff):

$$f_1 : \quad 0 = \frac{1}{F} \cdot (\bar{q}_1 - c_{13} \cdot \sqrt{\bar{x}_1 - \bar{x}_3}) \quad (3.5)$$

$$f_2 : \quad 0 = \frac{1}{F} \cdot (c_{32} \cdot \sqrt{\bar{x}_3 - \bar{x}_2} + \bar{q}_2 - c_{2G} \cdot \sqrt{\bar{x}_2}) \quad (3.6)$$

$$f_3 : \quad 0 = \frac{1}{F} \cdot (c_{13} \cdot \sqrt{\bar{x}_1 - \bar{x}_3} - c_{32} \cdot \sqrt{\bar{x}_3 - \bar{x}_2}) \quad (3.7)$$

$$g_1 : \quad \bar{y}_1 = \bar{x}_1 \quad (3.8)$$

$$g_2 : \quad \bar{y}_2 = \bar{x}_2 \quad (3.9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta \bar{x}_1} & \frac{\delta f_1}{\delta \bar{x}_2} & \frac{\delta f_1}{\delta \bar{x}_3} \\ \frac{\delta f_2}{\delta \bar{x}_1} & \frac{\delta f_2}{\delta \bar{x}_2} & \frac{\delta f_2}{\delta \bar{x}_3} \\ \frac{\delta f_3}{\delta \bar{x}_1} & \frac{\delta f_3}{\delta \bar{x}_2} & \frac{\delta f_3}{\delta \bar{x}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -K_1 & 0 & K_1 \\ 0 & -K_2 - K_3 & K_2 \\ K_1 & K_2 & -K_1 - K_2 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Die Koeffizienten werden wie folgt berechnet:

$$K_1 = \frac{c_{13}}{2F\sqrt{\bar{x}_1 - \bar{x}_3}} = 0,01022 \quad (3.11)$$

$$K_2 = \frac{c_{32}}{2F\sqrt{\bar{x}_3 - \bar{x}_2}} = 0,01022 \quad (3.12)$$

$$K_3 = \frac{c_{2G}}{2F\sqrt{\bar{x}_2}} = 0,00918 \quad (3.13)$$

Durch Einsetzen in Gleichung 3.10 folgt für **A**:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0,01022 & 0 & 0,01022 \\ 0 & -0,0194 & 0,01022 \\ 0,01022 & 0,01022 & -0,02045 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Die Matrizen **B**, **C** und **D** des linearisierten Systems lauten:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta \bar{q}_1} & \frac{\delta f_1}{\delta \bar{q}_2} \\ \frac{\delta f_2}{\delta \bar{q}_1} & \frac{\delta f_2}{\delta \bar{q}_2} \\ \frac{\delta f_3}{\delta \bar{q}_1} & \frac{\delta f_3}{\delta \bar{q}_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{F} & 0 \\ 0 & \frac{1}{F} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0065 & 0 \\ 0 & 0,0065 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \frac{\delta g_1}{\delta \bar{x}_1} & \frac{\delta g_1}{\delta \bar{x}_2} & \frac{\delta g_1}{\delta \bar{x}_3} \\ \frac{\delta g_2}{\delta \bar{x}_1} & \frac{\delta g_2}{\delta \bar{x}_2} & \frac{\delta g_2}{\delta \bar{x}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \frac{\delta g_1}{\delta \bar{q}_1} & \frac{\delta g_1}{\delta \bar{q}_2} \\ \frac{\delta g_2}{\delta \bar{q}_1} & \frac{\delta g_2}{\delta \bar{q}_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Die Zuflüsse der Pumpen im Arbeitspunkt berechnen sich wie folgt:

$$\bar{q}_{10} = c_{13} \cdot \sqrt{\bar{x}_1 - \bar{x}_3} = 34,6199 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \quad (3.18)$$

$$\bar{q}_{20} = c_{2G} \cdot \sqrt{\bar{x}_2} - c_{32} \cdot \sqrt{\bar{x}_3 - \bar{x}_2} = 27,575 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \quad (3.19)$$

3.4 Füllvorgang

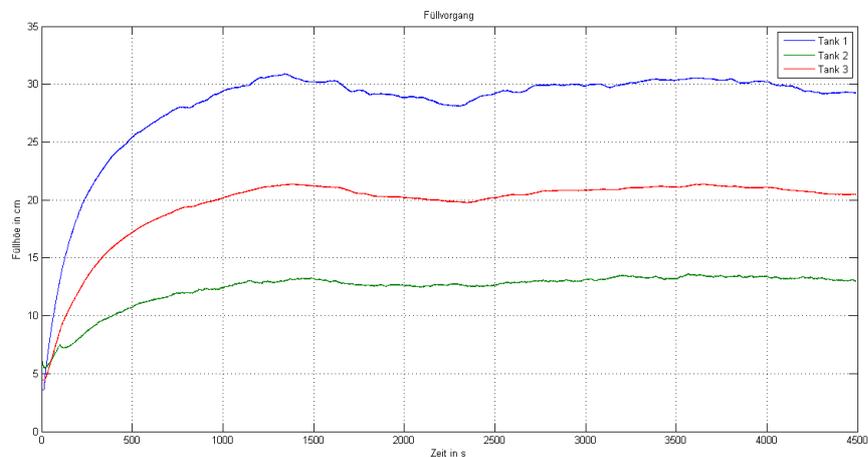


Abbildung 3.7: Beispiel Füllvorgang

Der in Abbildung 3.7 dargestellte Füllvorgang wurde mit den im vorherigen Abschnitt berechneten Zuflüssen der Pumpen im Arbeitspunkt aufgenommen. Es ist erkennbar, dass Tank 2 langsamer gefüllt wird als die Tanks 1 und 3. Dies resultiert daraus, dass der Zufluss von Pumpe 2 geringer ist als der von Pumpe 1. Außerdem wirkt der Abfluss stärker auf Tank 2 als auf die beiden anderen Tanks.

Des Weiteren ist zu sehen, dass mit den errechneten Zuflüssen der gewünschte Arbeitspunkt nicht erreicht wird. Das System befindet sich trotzdem in einem stationären Zustand, bei den Füllhöhen von 29cm, 13cm und 21 cm. Im stationären Zustand ändern sich die Füllhöhen der Tanks nicht mehr. Es kann daraus geschlossen werden, dass das System mehrere stationäre Zustände hat.

Die Füllhöhe der Tanks steigt zunächst schnell an und wird in der Nähe des stationären Zustands langsamer. Es findet eine asymptotische Annäherung der Füllhöhen statt. Im stationären Zustand schwingt das System leicht. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Pumpen nicht zu jedem Zeitpunkt die gleiche Menge an Wasser fördern. Außerdem entstehen durch das Einfüllen des Wassers in die Tanks zusätzliche Schwingungen an der Wasseroberfläche.

3.5 Grundbild Simulink

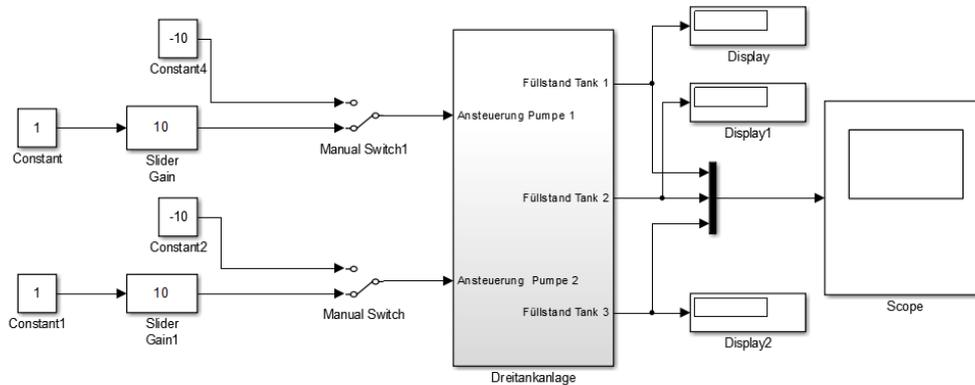


Abbildung 3.8: Grundbild Simulink

In Abbildung 3.8 ist das Grunds simulationsmodell aus Simulink dargestellt. In diesem Simulationsmodell kann die Spannung zur Ansteuerung der Pumpen eingestellt werden. Mit Hilfe eines Schalters kann zwischen einem festen und einen einstellbaren Wert gewechselt werden. Der feste Wert beträgt -10V , die Pumpe fördert demnach kein Wasser. Mit dem "Slider Gain" (Abb. 3.9) kann ein Wert zwischen -10 und 10V eingestellt werden.



Abbildung 3.9: Detailansicht Slider Gain

Die Werte für die Ansteuerung der Pumpe gehen dann in den Block "Dreitankanlage" (siehe Abb. 3.10). In diesem Block werden die ankommenden Werte über Analog Output Bausteine an die Blackbox aus Abschnitt 3.1 weitergeleitet. Außerdem kommen über Analog Input Bausteine die Werte der Sensoren an.

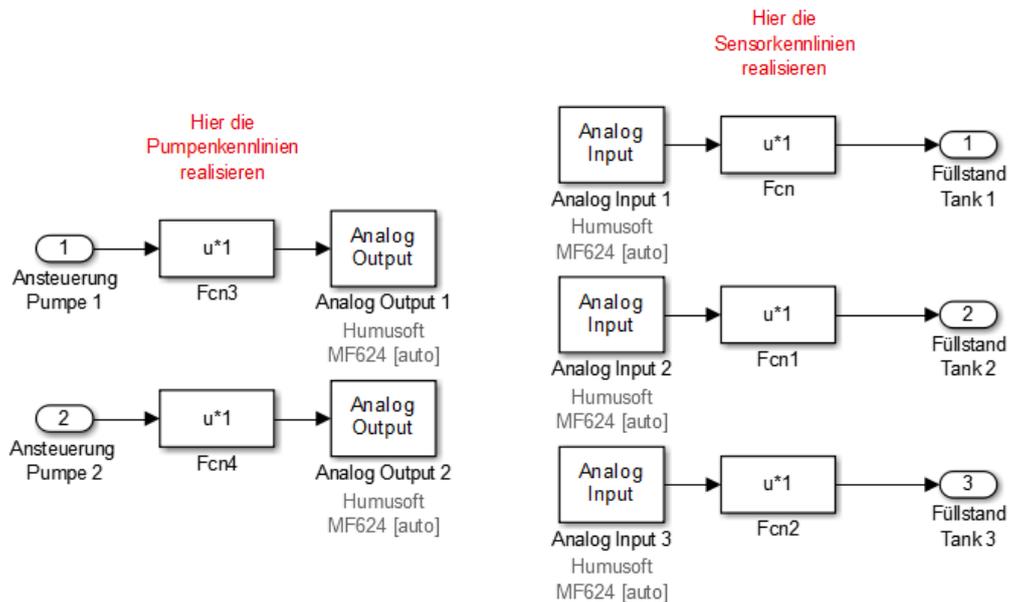


Abbildung 3.10: Simulationsblock Dreitankanlage

In die vorhandenen Funktionsblöcke können die inversen Kennlinien der Pumpen und Sensoren eingetragen werden. Dadurch wird die Ein- und Ausgabe der Werte vereinfacht, da die Werte zur Ansteuerung der Pumpe als Zufluss in $\frac{cm^3}{s}$ eingegeben und die Werte der Sensoren als Füllhöhe in cm ausgegeben werden können.

Die Signale der Sensoren werden als Werte mit Hilfe der Anzeigebausteine dargestellt. Außerdem kann der Verlauf der Füllstände mit Hilfe eines Scope-Blocks (vgl. [1],S.59) beobachtet werden.

4 Experimentelle Parameterermittlung

Der Inhalt dieses Kapitels beschäftigt sich mit der experimentellen Ermittlung der benötigten Parameter. In Unterkapitel 4.1 geht es um die Bestimmung der Kennlinien der Pumpen und der Sensoren. Diese werden für das Simulinkmodell benötigt. Das erweiterte Simulinkmodell wird ebenfalls in diesem Unterkapitel angegeben. Abschnitt 4.2 beschäftigt sich mit der Aufnahme der Statikmatrix.

4.1 Kennlinienermittlung

In diesem Abschnitt werden die Kennlinien für die Erweiterung des Simulinkmodells ermittelt. Dafür werden zum einen die Kennlinien der Pumpen und zum anderen die Kennlinien der Sensoren aufgenommen. Im Folgenden werden die verschiedenen Kennlinien, die für das Experiment benötigt werden, näher erläutert und beschrieben. Anschließend wird das erweiterte Simulinkmodell erläutert.

4.1.1 Pumpenkennlinien

Um in dem Simulinkmodell mit Zuflüssen zu arbeiten, werden die Kennlinien der beiden Pumpen aufgenommen. Mit Hilfe der Kennlinien können Zuflüsse in Spannungen umgerechnet werden. Dafür wird die Umrechnungsformel in das Simulinkmodell eingefügt.

Für die Ermittlung der Pumpenkennlinien müssen die Zuflüsse der Pumpen in $\frac{cm^3}{s}$ für die verschiedenen einstellbaren Spannungswerte bestimmt werden. Dafür wird im Simulinkmodell eine Spannung für die Pumpen eingestellt und für eine gewisse Zeit Wasser in den jeweiligen Tank gefüllt. Mit einer Stoppuhr wird währenddessen die Zeit gemessen. Der Füllstand des Tanks wird nach dem Ausschalten der Pumpe abgelesen. Mit der abgelesenen Füllhöhe, der Zeit und der Fläche des Tanks kann anschließend der Zufluss bestimmt werden. Der Zufluss berechnet sich folgendermaßen:

$$q = \frac{x \cdot F}{t} \quad (4.1)$$

Die Fläche F ist aus Kapitel 3.1 bekannt und beträgt $153,938 cm^2$.

Die Spannung wurde in 2V-Schritten erhöht und der jeweilige Zufluss wurde bestimmt. Im Bereich von -5V bis -2V wurde die Spannung in 1V-Schritten erhöht. Die gemessenen Zeiten, Füllhöhen und die berechneten Zuflüsse sind in den Tabellen 4.1 und 4.2 dargestellt. Die Darstellung der Kennlinien ist in Abbildung 4.1 zu finden.

Tabelle 4.1: Werte Kennlinienermittlung Pumpe 1

Spannung in V	Zeit in s	Füllhöhe in cm	Zufluss in $\frac{cm^3}{s}$
-10	0	0	0
-8	83,00	4,1	7,6042
-6	39,84	5,1	19,7059
-5	33,94	5,1	23,1315
-4	20,29	3,9	29,5889
-3	20,83	4,9	36,2120
-2	19,93	5,5	42,4816
0	22,51	7,6	51,9737
2	14,02	5,8	63,6834
4	13,12	6,2	72,7451
6	11,03	5,9	82,3422
8	10,13	5,8	88,1383
10	9,10	5,9	99,8060

Tabelle 4.2: Werte Kennlinienermittlung Pumpe 2

Spannung in V	Zeit in s	Füllhöhe in cm	Zufluss in $\frac{cm^3}{s}$
-10	0	0	0
-8	83,00	4,9	9,0879
-6	39,84	5,4	20,8651
-5	33,94	5,6	25,3993
-4	20,29	4,1	31,1063
-3	20,83	5	36,9510
-2	19,93	5,7	44,0264
0	22,51	8,1	55,3931
2	14,02	6,1	66,9773
4	13,12	6,4	75,0917
6	11,03	6,2	86,5291
8	10,13	6,1	92,6971
10	9,10	6,2	104,8809

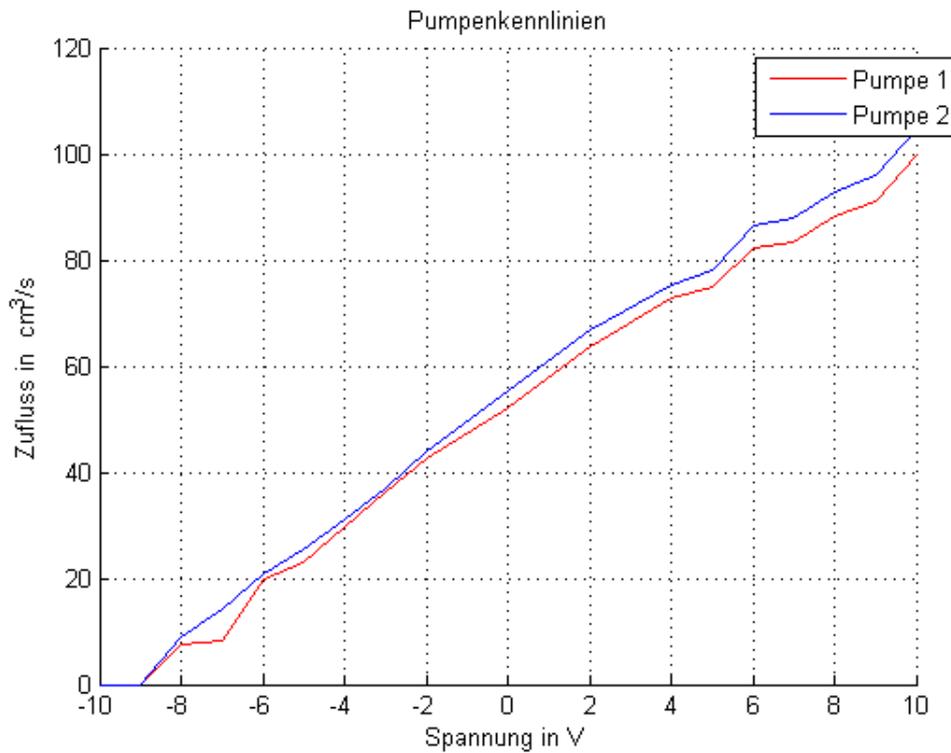


Abbildung 4.1: Pumpenkennlinien

Wie in Abbildung 4.1 erkennbar ist, verhalten sich die Pumpen nicht linear. Im Bereich des Arbeitspunktes hingegen verhalten sie sich annähernd linear. Damit im Arbeitspunkt eine korrekte Umrechnung der Zuflüsse in Spannung gewährleistet werden kann, müssen die Pumpenkennlinien im Bereich des Arbeitspunktes linearisiert werden. Um dies zu erreichen, gibt es in MATLAB den Befehl *Regression*. Dieser ermittelt aus den übergebenen Zufluss- und Spannungswerten die Steigung und den Offset. Mit Hilfe des Befehls *plotregression* werden die linearisierte Kennlinie und die übergebenen Daten grafisch dargestellt. Der dazugehörige MATLAB-Code befindet sich in Listing 4.1.

```
1 %Spannungswerte
2 x=[-5 -4 -3 -2 0];
3
4 %Zuflusswerte
5 y=[23.1315 29.5889 36.2120 42.4816 51.9737];
6
7 %Ausgabe der Steigung und des Y-Achsenabschnitts
8 [r,m,b]=regression(x,y)
9
10 %Ausgabe als Plot
11 plotregression(x,y)
```

Listing 4.1: MATLAB-Code für die Regression von Pumpe 1

Die Regressionsgeraden der Pumpen sind in den Abbildungen 4.2 und 4.3 zu sehen.

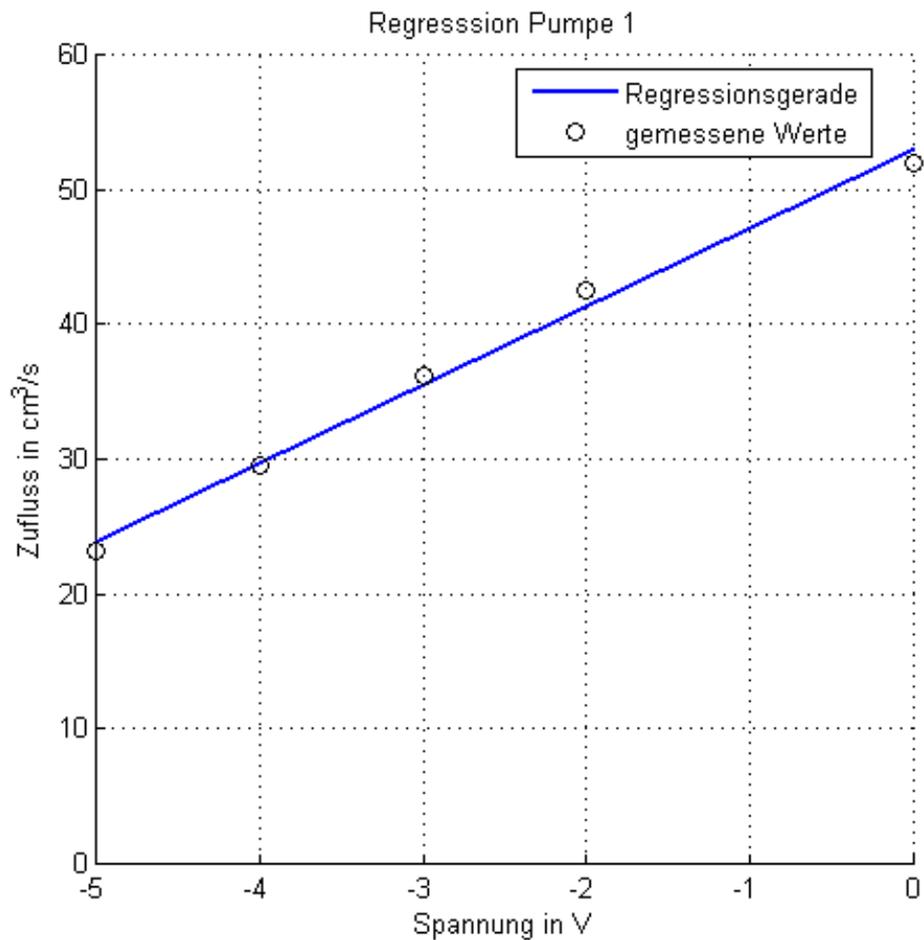


Abbildung 4.2: Regressionsgerade Pumpe 1

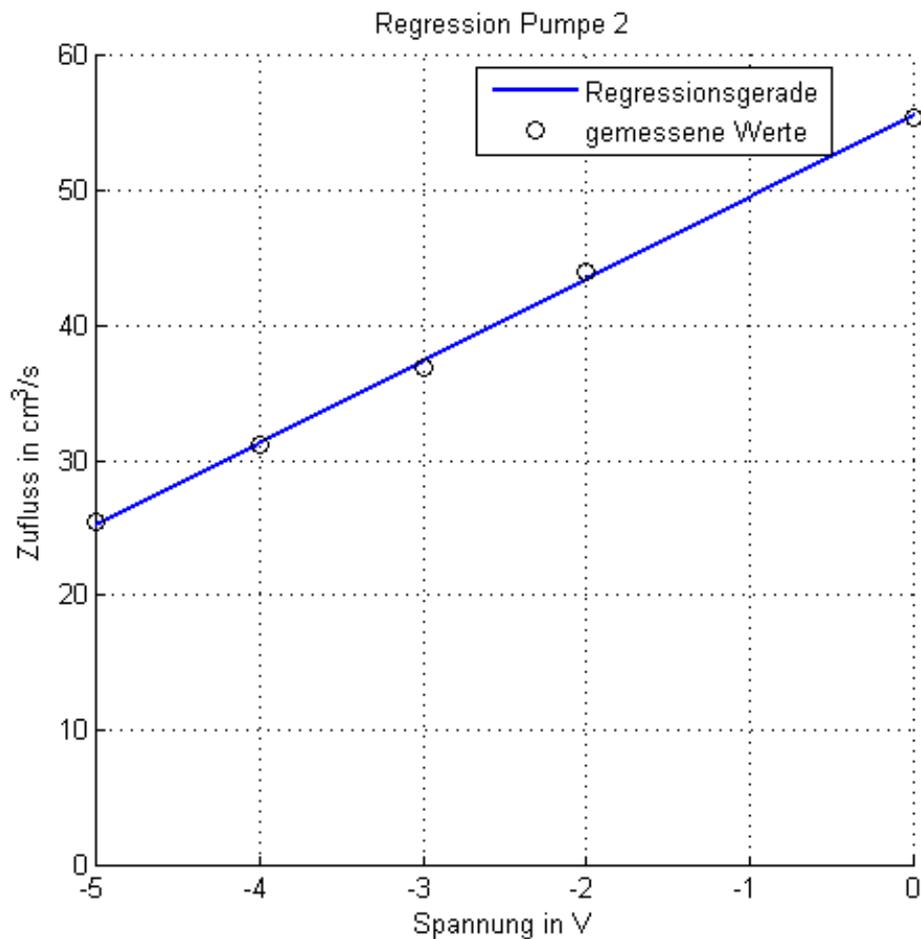


Abbildung 4.3: Regressionsgerade Pumpe 2

Die Gleichungen der Ausgleichsgeraden lauten:

$$\text{Pumpe 1: } q_1(t) = 52,9238 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} + 5,8022 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}\cdot\text{V}} \cdot u(t)$$

$$\text{Pumpe 2: } q_2(t) = 55,5503 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} + 6,0625 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}\cdot\text{V}} \cdot u(t)$$

Für das Simulinkmodell werden die inversen Kennlinien benötigt. Deshalb müssen die Gleichungen nach $u(t)$ umgestellt werden:

$$\text{Pumpe 1: } u_1(t) = \frac{q_1(t) - 52,9238 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{5,8922 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}\cdot\text{V}}}$$

$$\text{Pumpe 2: } u_2(t) = \frac{q_2(t) - 55,5503 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{6,0625 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}\cdot\text{V}}}$$

Die inversen Kennlinien können nun in das Simulinkmodell aus Kapitel 3.5 eingefügt werden.

4.1.2 Sensorkennlinien

Für die Ermittlung der Sensorkennlinien wurde bei verschiedenen Füllhöhen der ausgegebene Spannungswert der Sensoren mit einem Multimeter gemessen. Dafür wurden die Tanks in 1cm-Schritten und um den Arbeitspunkt herum in 0,5cm-Schritten gefüllt. Dabei wurde die jeweilige Spannung gemessen. Ausgeführt wurden diese Arbeitsschritte lediglich für die Sensoren der Tanks 1 und 2. Dieser Arbeitsschritt kann bei Tank 3 vernachlässigt werden, da dessen Füllhöhe nicht geregelt wird. Die Füllhöhen und die dazugehörigen Spannungswerte sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Werte zur Ermittlung der Sensorkennlinien

x_1 in cm	x_1 in V	x_2 in cm	x_2 in V
5	-10,46	5	-9,56
6	-10,01	6	-9,16
7	-9,60	7	-8,74
8	-9,14	8	-8,35
9	-8,77	9	-7,92
10	-8,25	10	-7,52
11	-7,86	11	-7,14
12	-7,43	12	-6,75
13	-7,03	13	-6,36
14	-6,63	14	-5,94
15	-6,19	15	-5,52
16	-5,79	16	-5,11
17	-5,42	17	-4,71
18	-4,99	18	-4,32
19	-4,58	19	-3,92
20	-4,22	20	-3,52
21	-3,80	20,5	-3,32
22	-3,37	21	-3,13
23	-3,01	21,5	-2,91
24	-2,57	22	-2,72
25	-2,20	22,5	-2,51
26	-1,77	23	-2,31
27	-1,39	23,5	-2,10
28	-0,98	24	-1,92
29	-0,57	25	-1,51
30	-0,18	26	-1,13

31	0,24	27	-0,71
32	0,62	28	-0,31
33	1,02	29	0,07
34	1,41	30	0,47
35	1,82	31	0,85
36	2,19	32	1,27
37	2,62	33	1,67
38	2,98	34	2,05
39	3,40	35	2,46
40	3,74	36	2,82
41	4,14	37	3,24
42	4,56	38	3,62
42,5	4,76	39	3,99
43	4,96	40	4,41
43,5	5,16	41	4,79
44	5,36	42	5,17
44,5	5,56	43	5,58
45	5,75	44	5,94
45,5	5,93	45	6,38
46	6,13	46	6,76
47	6,54	47	7,15
48	6,94	48	7,54
49	7,33	49	7,93
50	7,70	50	8,32
51	8,10	51	8,73
52	8,49	52	9,11
53	8,88	53	9,51
54	9,28	54	9,87
55	9,65	55	10,27

In Abbildung 4.4 sind die Kennlinien der beiden Sensoren dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Kennlinien nicht ganz linear sind. Deshalb wird auch hier, wie in Kapitel 4.1.1, mit dem Regressionsbefehl von MATLAB gearbeitet. Die MATLAB Codierung für die Regression von Tank 1 wird in Listing 4.2 gezeigt.

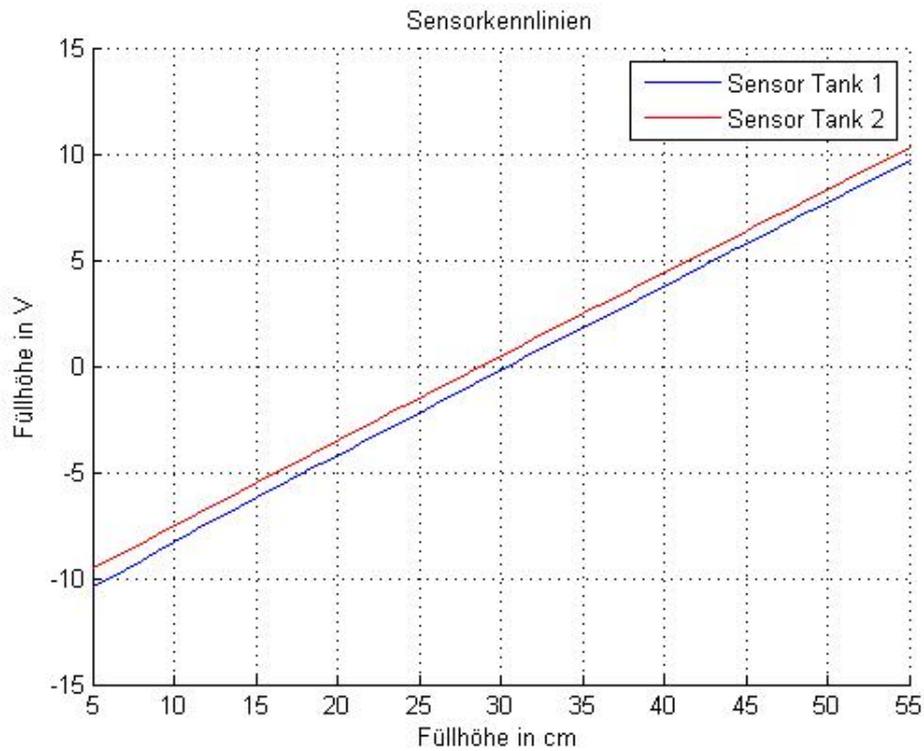


Abbildung 4.4: Sensorkennlinien

```

1 %Füllhöhe Tank 1 in cm
2 x1=[5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 ...
3     29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 42.5 43 43.5 44 44.5 45 ...
4     45.5 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55];
5
6
7 %Füllhöhe Tank 1 in V
8 y1=[-10.46 -10.01 -9.60 -9.14 -8.77 -8.25 -7.86 -7.43 -7.03 -6.63 -6.19 ...
9     -5.79 -5.42 -4.99 -4.58 -4.22 -3.80 -3.37 -3.01 -2.57 -2.20 -1.77 ...
10    -1.39 -0.98 -0.57 -0.18 0.24 0.62 1.02 1.41 1.82 2.19 2.62 2.98 ...
11     3.40 3.74 4.14 4.56 4.76 4.96 5.16 5.36 5.56 5.75 5.93 6.13 6.54 ...
12     6.94 7.33 7.70 8.10 8.49 8.88 9.28 9.65];
13
14
15 %Ausgabe der Steigung und des Y-Achsenabschnitts
16 [r,m,b]=regression(y1,x1)
17
18 %Ausgabe als Plot
19 plotregression(y1,x1)

```

Listing 4.2: MATLAB-Code für die Regression von Sensor 1

Die Ausgleichsgeraden der beiden Sensoren sind in den Abbildungen 4.5 und 4.6 zu sehen.

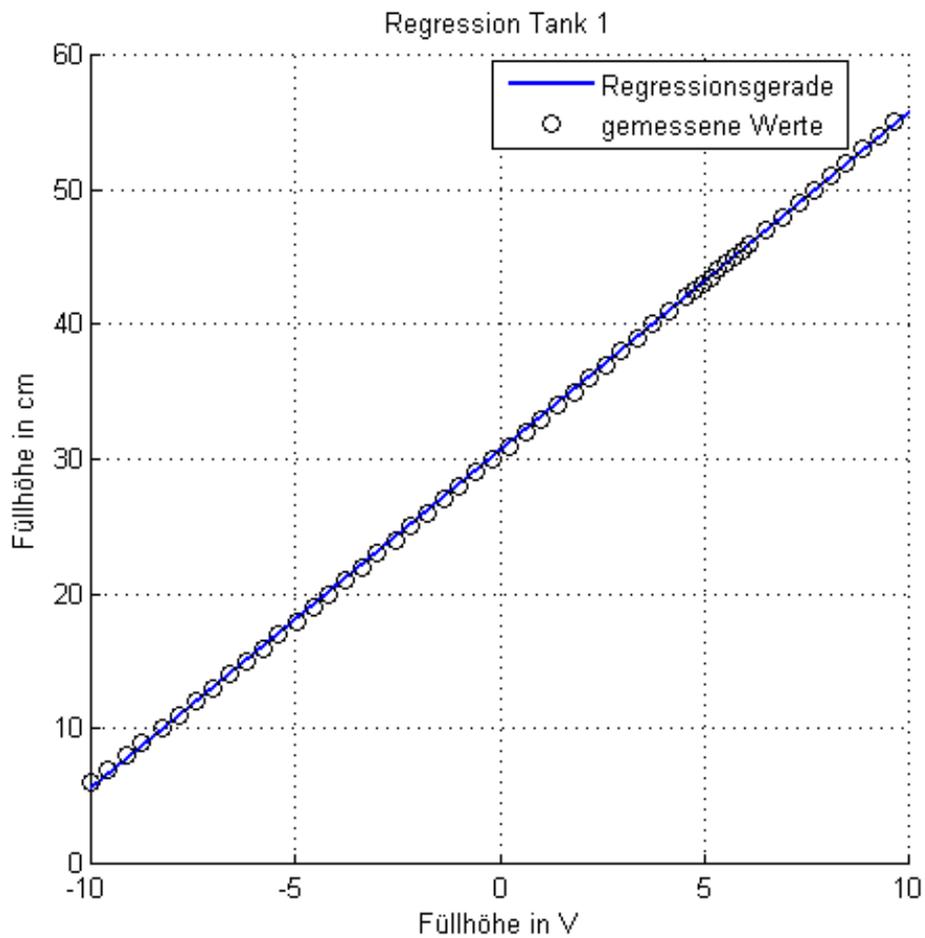


Abbildung 4.5: Regression Sensor Tank 1

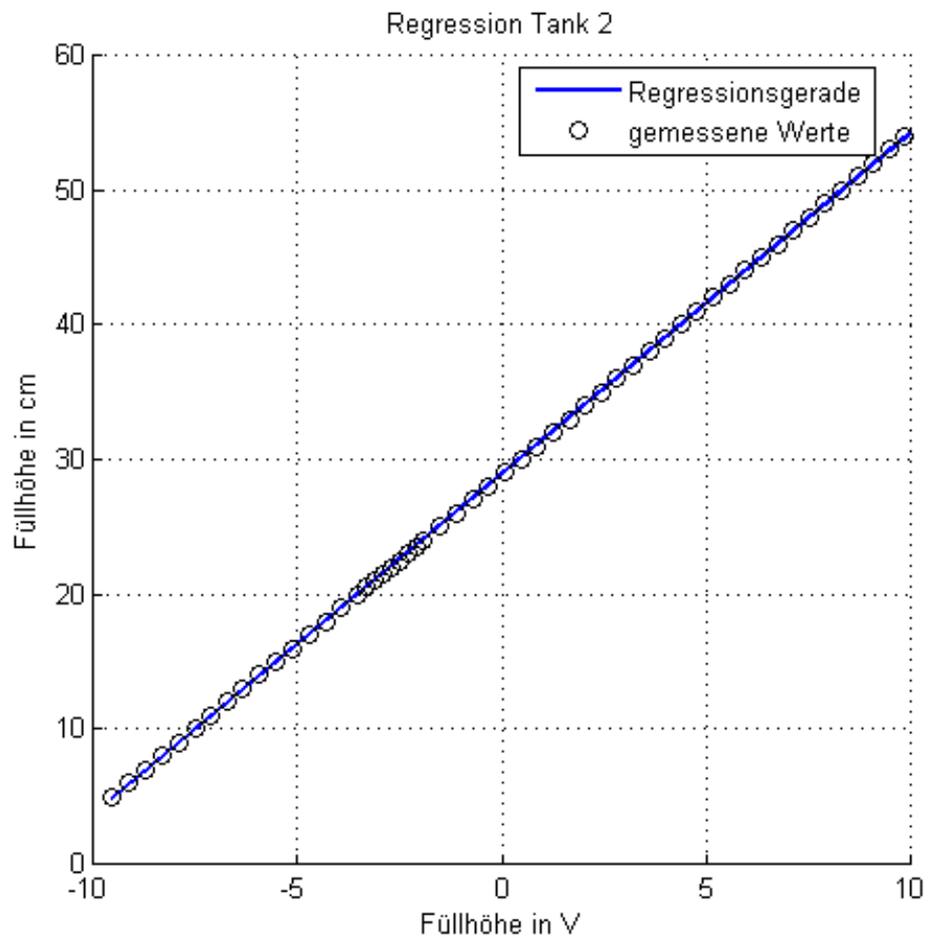


Abbildung 4.6: Regression Sensor Tank 2

Die Gleichungen der Ausgleichsgeraden lauten:

$$\text{Füllhöhe Tank 1: } x_1 = u_{x_1}(t) \cdot 2,4988 \frac{\text{cm}}{\text{V}} + 30,6070 \text{ cm}$$

$$\text{Füllhöhe Tank 2: } x_2 = u_{x_2}(t) \cdot 2,5228 \frac{\text{cm}}{\text{V}} + 28,9205 \text{ cm}$$

Die Kennlinien können jetzt in das Simulinkmodell aus Kapitel 3.5 eingefügt werden.

4.1.3 Erweitertes Simulinkmodell

Das Simulinkmodell aus Kapitel 3.5 wurde mit einem zweiten Scopeblock erweitert, um die absolute Abweichung vom Arbeitspunkt erkennen zu können. Der Füllstand von Tank 3 wird nicht mehr angezeigt. Im folgenden Verfahren werden nur die Füllstände von Tank 1 und 2 geregelt. Deshalb muss Tank 3 für die weitere Durchführung nicht weiter berücksichtigt werden. In Abbildung 4.7 ist das erweiterte Simulinkmodell zu sehen.

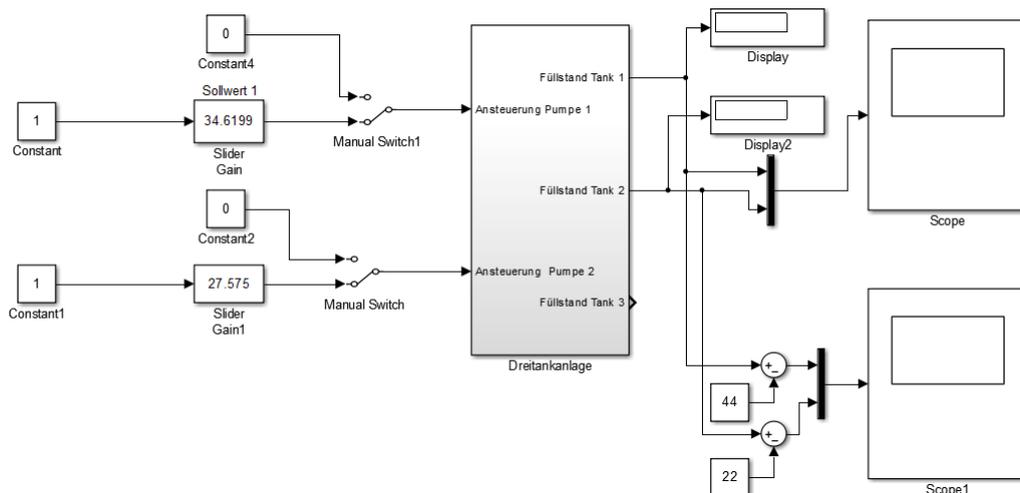


Abbildung 4.7: erweitertes Simulinkmodell

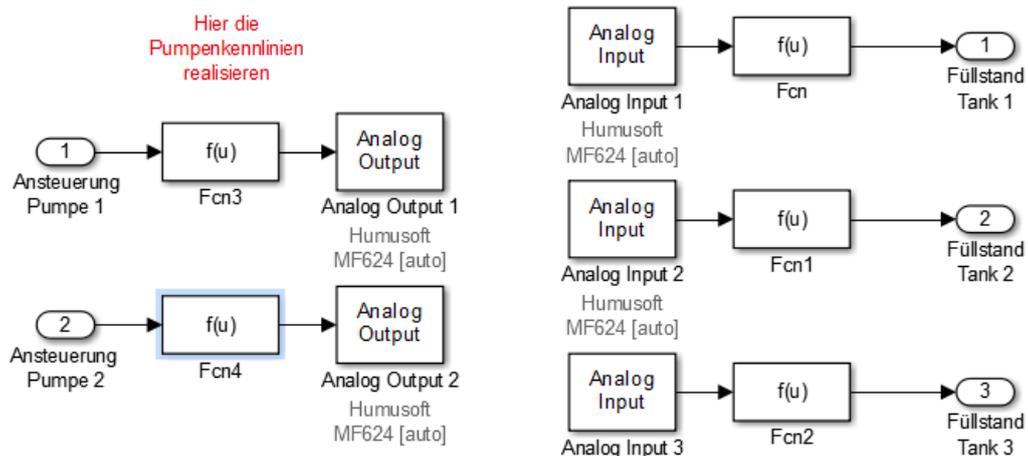


Abbildung 4.8: erweiterter Dreitankeblock

Der Simulationsblock Dreitanke wurde um die inversen Pumpenkennlinien und die Sensorkennlinien erweitert. Der erweiterte Simulationsblock ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

4.2 Ermittlung der Statikmatrix

Für die Ermittlung der Statikmatrix K_s wird das System in den bereits in Kapitel 3.3 beschriebenen stationären Zustand gebracht. Der Arbeitspunkt (44cm, 22cm, 33cm) konnte nicht eingestellt werden, da die Pumpen ungenau arbeiten und keinen konstanten Zufluss liefern können.

Wie bereits in Abschnitt 3.4 erwähnt, existieren für das Dreitanksystem bei mehreren Füllhöhen stationäre Zustände, daher wurde eine andere Ruhelage eingestellt. Die für die Ermittlung von K_s eingestellte Ruhelage liegt bei $x_1=42,6\text{cm}$ und $x_2=19,8\text{cm}$. Die Zuflüsse der Pumpen betragen $q_1=33\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ und $q_2=32,5\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$.

Nach dem Einstellen der Ruhelage wird der Zufluss von Pumpe 1 sprunghaft um $1\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ erhöht (nach ca. 400s). In Abbildung 4.9 ist die Reaktion der Füllhöhen zu erkennen. In den folgenden Abbildungen steht die gelbe Kurve für die Füllhöhe von Tank 1 und die violette Kurve für die Füllhöhe von Tank 2.

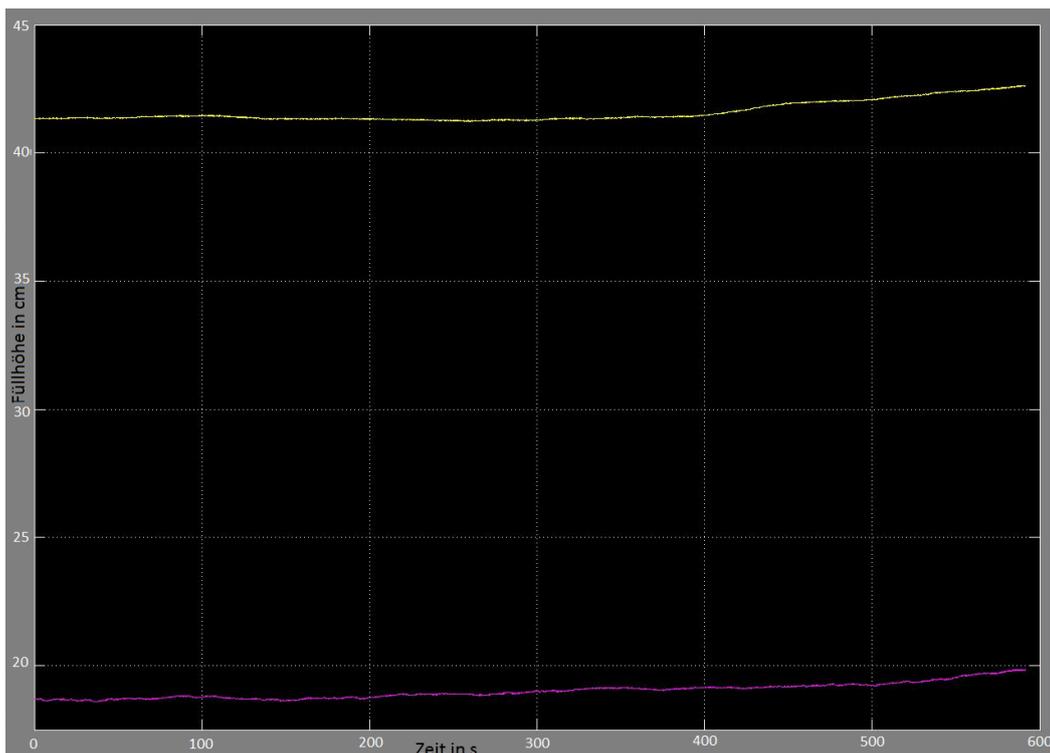


Abbildung 4.9: Sprung Pumpe 1

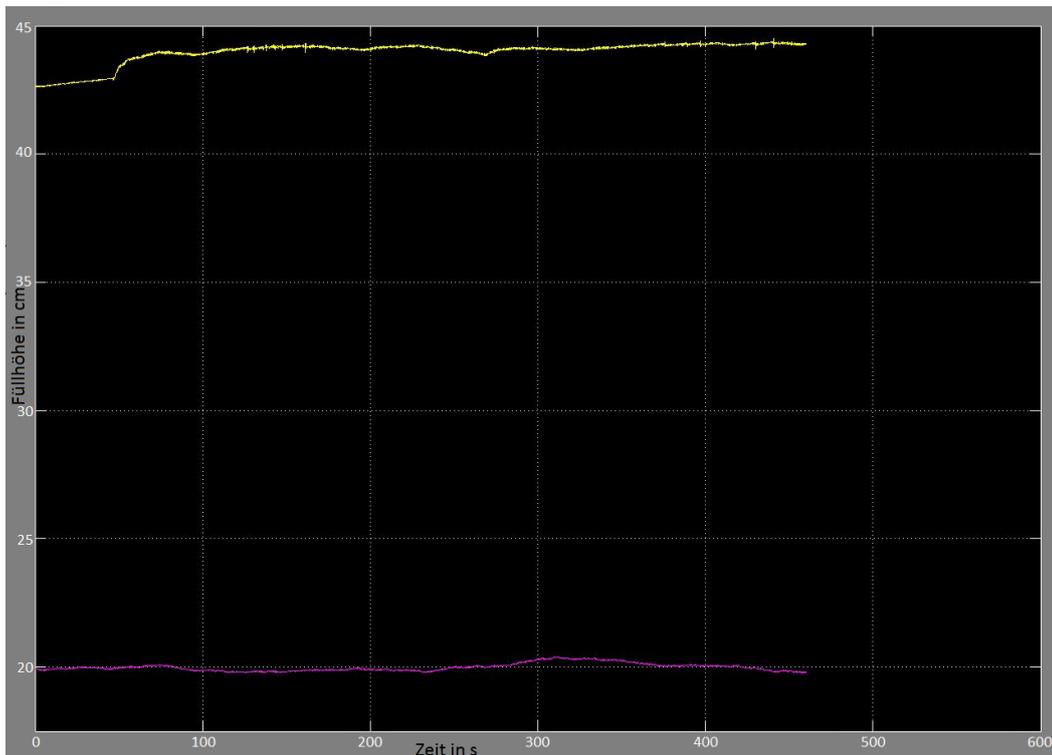


Abbildung 4.10: Sprung Pumpe 1 Endwerte

Erreicht das System nach dem Sprung einen neuen stationären Zustand (s. Abb. 4.10), können die Endwerte der Füllhöhen abgelesen werden. Auf Grund von Ungenauigkeiten bei der Messung der absoluten Abweichung vom Arbeitspunkt, wurden die Endwerte direkt an den Tanks abgelesen. Die abgelesenen Endwerte betragen $x_{11}=44,5\text{cm}$ und $x_{21}=20,6\text{cm}$. Die Differenz zwischen den Endwerten und der anfänglichen Ruhelage ergibt die Elemente der ersten Spalte der Statikmatrix \mathbf{K}_s .

$$\mathbf{K}_s = \begin{pmatrix} k_{s11} & k_{s12} \\ k_{s21} & k_{s22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 44,5\text{cm} - 42,6\text{cm} & k_{s12} \\ 20,6\text{cm} - 19,8\text{cm} & k_{s22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,9 & k_{s12} \\ 0,8 & k_{s22} \end{pmatrix}$$

Nach dem Aufnehmen der ersten Spalte der Statikmatrix, wird das System in die anfängliche Ruhelage zurückgeführt. Dafür wird der Sprung auf Pumpe 1 zurückgenommen.

Die anfängliche Ruhelage ließ sich nicht exakt wieder einstellen. Der stationäre Zustand liegt nun bei $x_1=43\text{cm}$ und $x_2=19,8\text{cm}$. Die Zuflüsse der Pumpen bleiben jedoch so wie anfänglich eingestellt. Ist der stationäre Zustand erreicht, wird der Zufluss von Pumpe 2 um $1 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ erhöht (nach ca. 200s). Die Reaktion der Füllhöhen ist in 4.11 dargestellt.

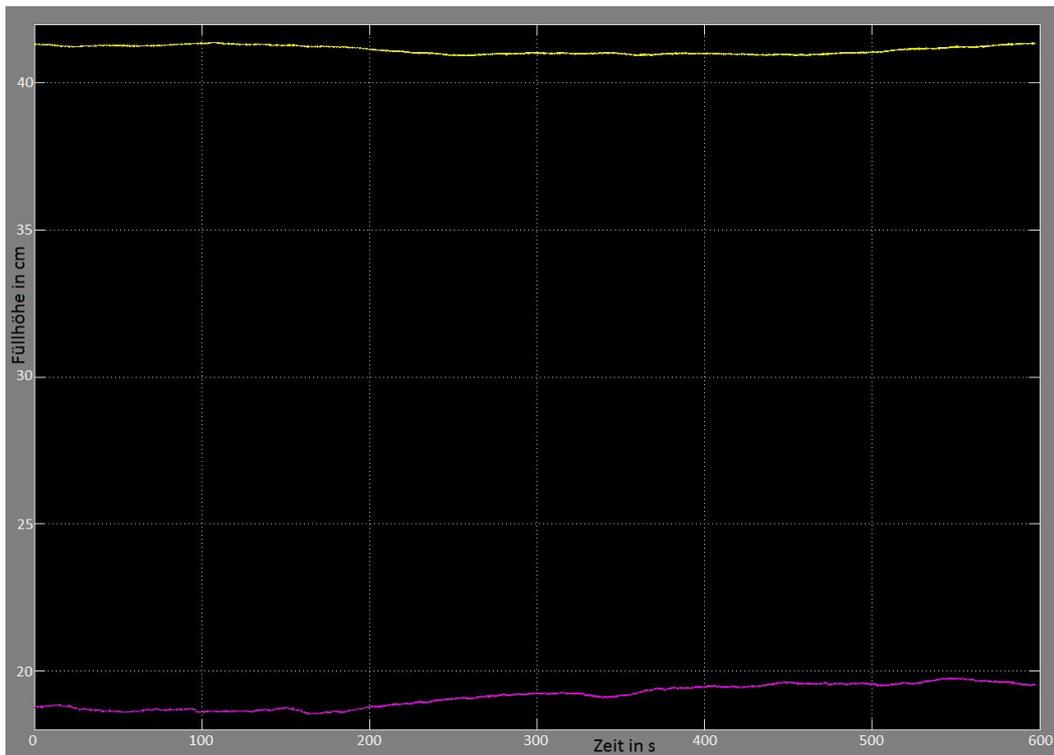


Abbildung 4.11: Sprung Pumpe 2

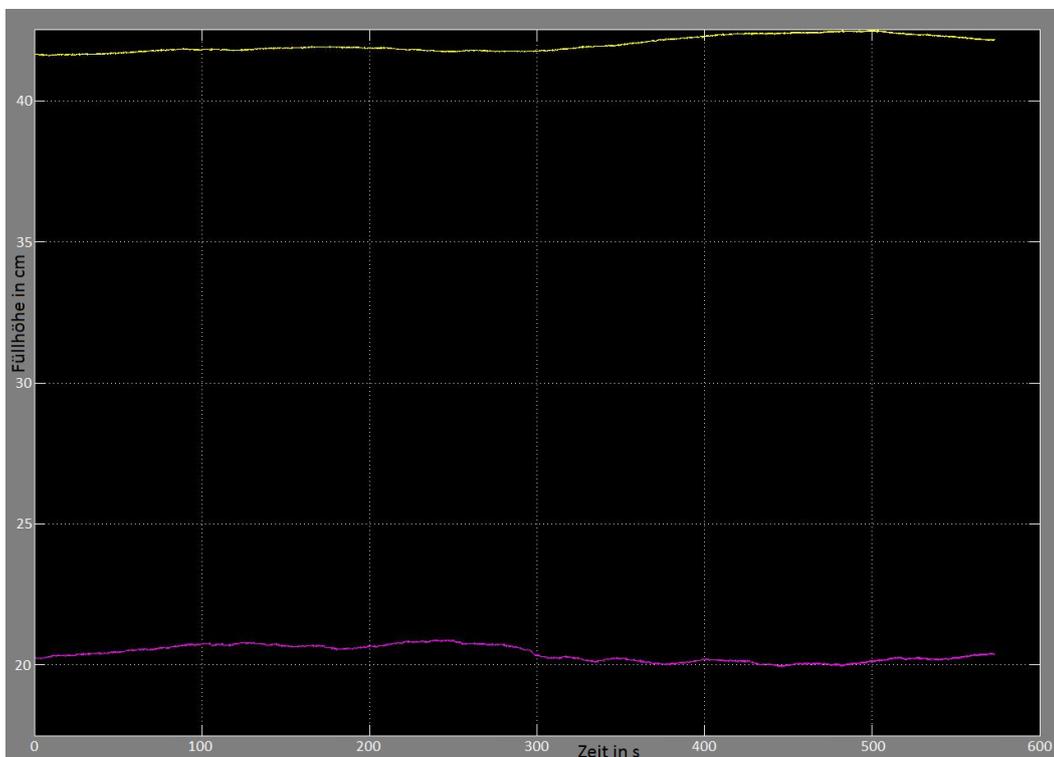


Abbildung 4.12: Sprung Pumpe 2 Endwerte

Erreicht das System nach dem Sprung die neue Ruhelage (siehe Abbildung 4.12) werden, wie zuvor bei dem Sprung auf Pumpe 1, die Endwerte abgelesen. Die abgelesenen Werte betragen $x_{12}=44\text{cm}$ und $x_{22}=21,1\text{cm}$. Die Differenzen zwischen den Endwerten und den Füllhöhen der Ruhelage vor dem Sprung ergeben die Elemente der zweiten Spalte der Statikmatrix.

$$\mathbf{K}_s = \begin{pmatrix} k_{s11} & k_{s12} \\ k_{s21} & k_{s22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{s11} & 44\text{cm} - 43\text{cm} \\ k_{s21} & 21,1\text{cm} - 19,8\text{cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{s11} & 1 \\ k_{s21} & 0,9 \end{pmatrix}$$

Die vollständige Statikmatrix sieht wie folgt aus:

$$\mathbf{K}_s = \begin{pmatrix} 1,9 & 1 \\ 0,8 & 1,3 \end{pmatrix}$$

5 Experimenteller Entwurf

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem experimentellen Entwurf eines PI-Reglers für das Dreitanksystem. Der Entwurf wird nach dem im Grundlagenkapitel beschriebenen Ansatz durchgeführt.

Im Abschnitt 5.1 wird zunächst überprüft, ob die Voraussetzungen für diesen Entwurfsansatz erfüllt werden. Unterkapitel 5.2 beschäftigt sich mit dem Entwurf des benötigten I-Reglers. In 5.3 wird zu dem zuvor entwickelten I-Regler ein P-Anteil zugeschaltet. Der fertig entworfene PI-Regler wird in Abschnitt 5.4 dargestellt und beschrieben.

5.1 Voraussetzungen für Reglerentwurf

Für die Umsetzung des Entwurfsansatzes aus Abschnitt 2.3 müssen bestimmte Voraussetzungen von dem Dreitanksystem erfüllt werden.

1. **Stabilität der Regelstrecke:** Es wird gefordert, dass die Regelstrecke asymptotisch stabil ist. Das bedeutet, dass sie auf eine endliche Erregung mit einem endlichen Ausgangssignal reagieren sollte. Es muss also ein Ausgleich vorhanden sein. Diese Voraussetzung wird von dem beschriebenen Dreitanksystem erfüllt. Durch den kontinuierlichen Abfluss an Tank 2 besitzt das Dreitanksystem einen Ausgleich, welcher verhindert, dass die Füllhöhen unendlich wachsen können. Der Abfluss ändert sich mit dem einwirkenden Wasserdruck. Dies ist der Grund, weshalb sich die Füllstände bei einer endlichen Erregung asymptotisch einem Endwert nähern. Dies ist in Unterkapitel 4.2 bei der Aufnahme der Statikmatrix ersichtlich.
2. **Güteforderungen geschlossener Regelkreis:** Der geschlossene Regelkreis muss die Güteforderungen der Stabilität und der Sollwertfolge bzw. Störgrößenkompensation für sprungförmige Führungs- bzw. Störgrößen erfüllen. Durch den kontinuierlichen Abfluss wird auch diese Voraussetzung erfüllt. Mit dem PI-Regler können Störgrößen kompensiert und Sollwertänderungen Folge geleistet werden.

3. **Experimentierfähigkeit:** Es wird vorausgesetzt, dass Experimente mit der Regelstrecke möglich sein müssen. Dies ist mit dem Dreitanksystem möglich, da es kein Problem ist, wenn die Füllhöhen schwanken. Außerdem können die Tanks nicht überlaufen, da die Blackbox ab einer gewissen Füllhöhe den Zufluss der jeweiligen Pumpe stoppt.
4. **Existenzbedingung:** Die Existenzbedingung schreibt vor, dass die Determinante der Statikmatrix nicht Null sein darf.

$$\det(\mathbf{K}_S) \neq 0 \quad (5.1)$$

Mit Hilfe von MATLAB wurde die Determinante von der in Abschnitt 4.2 ermittelten Statikmatrix berechnet:

```

1 %Statikmatrix K_S
2 K_S=[1.8 1; 0.8 1.3];
3
4 %Existenzbedingung
5 a=det(K_S);

```

Listing 5.1: Matlabcode für die Überprüfung der Existenzbedingung

Der Quellcode liefert folgendes Ergebnis:

$$a = \det(\mathbf{K}_S) = 1,54 \neq 0 \quad (5.2)$$

Die Existenzbedingung wird erfüllt.

Die Voraussetzungen werden alle von dem verwendeten Dreitanksystem erfüllt. Somit ist ein Reglerentwurf nach dem geplanten Ansatz möglich.

5.2 I-Regler

Für den Entwurf des I-Reglers wurde das Simulinkmodell, welches in Abbildung 5.1 zu sehen ist, entwickelt.

Grundlegend ist das Simulinkmodell aus Abbildung 5.1 vergleichbar mit dem aus Abschnitt 4.1.3, jedoch wurde es um einen I-Regler erweitert. Die absolute Abweichung vom Arbeitspunkt wird auf einen Summierer (vgl. [1],S.61) zurückgeführt. Die Sollwerte, die mit Hilfe der beiden Sprungblöcke eingestellt werden können, werden ebenfalls auf diesen Summierer geführt und auf die rückgeführten Werte addiert. Die dabei entstehende Summe geht in einen

Integrator. Nach dem Integrieren werden die Werte mit dem Tuningfaktor α und der Matrix $\tilde{\mathbf{K}}_I$ (Gain-Block) multipliziert. Diese werden anschließend mit den eingestellten Zuflüssen summiert und an die Pumpen weitergeleitet.

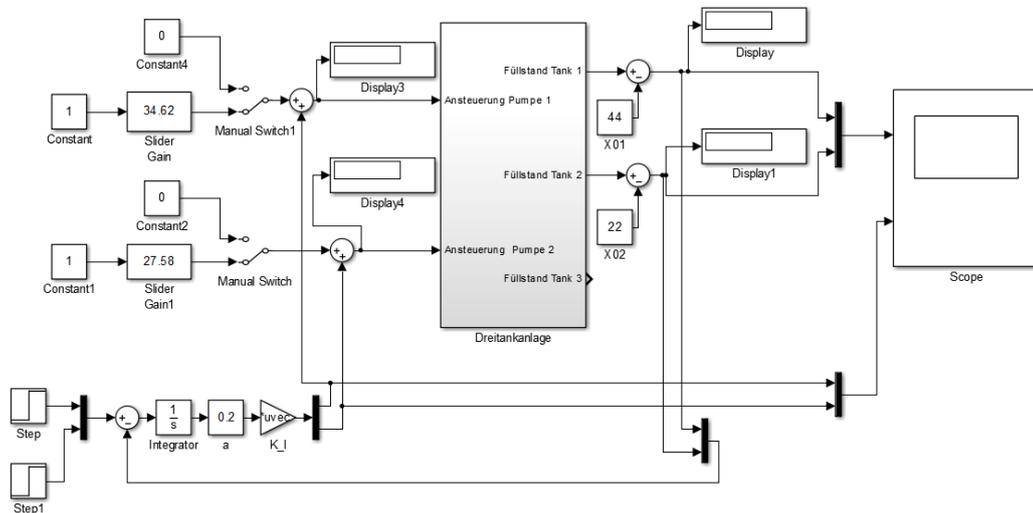


Abbildung 5.1: Simulinkmodell I-Regler

Der Regelkreis wird zunächst mit einem geringen Wert für α geschlossen. Dieser Wert wird langsam erhöht. α kann so lange erhöht werden wie der Regelkreis stabil bleibt.

```

1 %Statikmatrix K_S
2 K_S=[1.8 1; 0.8 1.3];
3
4 %Reglermatrix K_ISchlange
5 K_ISchlange=inv(K_S);

```

Listing 5.2: MATLAB-Code für die Berechnung von $\tilde{\mathbf{K}}_I$

Der Regelkreis wird zunächst mit einem geringen Wert für α geschlossen. Dieser Wert wird langsam erhöht. α kann so lange erhöht werden wie der Regelkreis stabil bleibt.

Für die Auswahl des endgültigen Wertes von α wurden bestimmte Kriterien festgelegt. Die Einschwingzeit T_s soll nicht höher als 700sek sein und die Überschwingweite Δh soll maximal 5cm betragen. Der eingeschwungene Zustand ist erreicht bei einer Abweichung von $\pm 0,5\text{cm}$. Die Auswahlkriterien wurden mit Hilfe eines Testszenarios überprüft. Dafür wird an beiden Tanks jeweils eine Höhe von 5cm abgelassen. Der Füllstand von Tank 1 wird auf 39cm und der von Tank 2 auf 17cm gesenkt. Anschließend werden Δh und T_s gemessen. Die aufgenommenen Werte sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

An den Werten aus Tabelle 5.1 ist erkennbar, dass mit größeren Werten von α die Einschwingzeit kleiner wird, die Überschwingweite jedoch zunimmt. Für α wurde der Wert 0,2 ausgewählt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen grafisch den Vergleich einzelner Werte.

Tabelle 5.1: Messwerte α

α	Δh Tank 1 in cm	Δh Tank 2 in cm	T_s in s
0,09	3,731	2,4	768,6
0,1	4,878	3,514	948,6
0,2	5,00	2,985	661,5
0,3	5,012	3,718	533,7
0,4	5,73	3,102	450,8
0,5	5,516	3,317	413,1
0,6	5,98	3,665	353,1
0,7	7,999	5,261	493,3
0,8	6,422	3,093	447
0,9	7,444	4,411	543,5
1	11,59	11,62	647,8

In Abbildung 5.2 ist die grafische Darstellung der Istwerte für ein α von 0,1 zu sehen. Es ist erkennbar, dass die maximale Überschwingweite unterhalb der 5cm Grenze liegt. Die Einschwingzeit jedoch sehr hoch ist. Der eingeschwungene Zustand wird nach zwei Schwingungen erreicht. Das System schwingt schon vor dem Ablassen des Wassers um den Arbeitspunkt. Viel höher darf der Wert von α nicht werden, da die Überschwingweite sonst über die 5cm hinaus geht. Die Kennlinien rutschen kurzzeitig bis über -15cm ab, das liegt daran, dass durch das Öffnen der Störventile sich der Wasserdruck am Boden des Tanks verändert und der Sensor die Füllhöhe nicht mehr exakt darstellen kann. Dies ist gerade bei den Störventilen von Tank 1 und 3 der Fall, da diese nicht gedrosselt sind. Die Kurve der Istwerte von Tank 1 geht über die von Tank 2 hinaus, da der Füllstand von Tank 1 höher ist und somit auch eine höhere Überschwingweite zu erwarten ist.

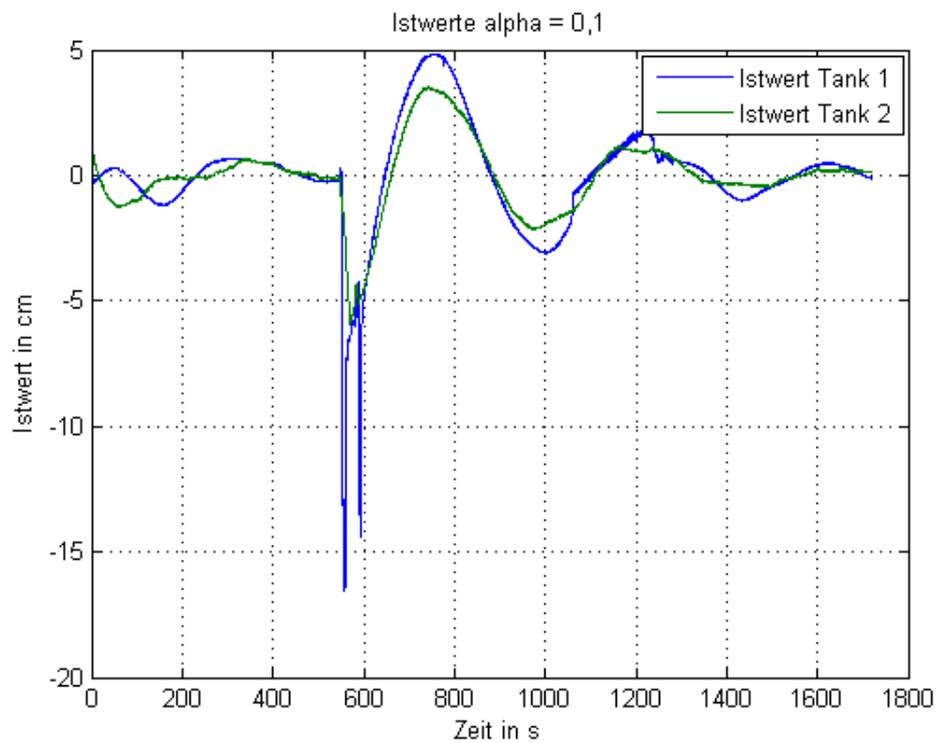
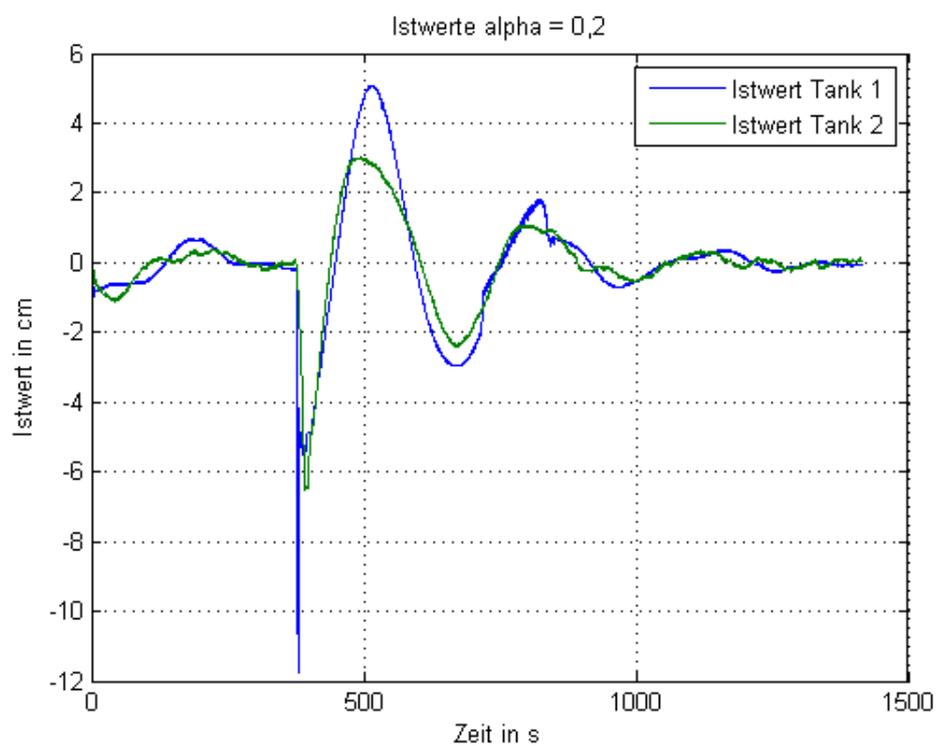
Abbildung 5.2: Istwerte $\alpha=0,1$ Abbildung 5.3: Istwerte $\alpha=0,2$

Abbildung 5.3 stellt die Istwerte für $\alpha=0,2$ grafisch dar. Dies ist der nach den Kriterien ausgewählte, endgültige Wert. Das System schwingt auch hier um den Arbeitspunkt herum. Es wird ebenfalls nach zwei Über- und zwei Unterschwingern der eingeschwingene Zustand erreicht. Die 5cm-Grenze wird für Tank 1 zwar nur noch knapp eingehalten, jedoch ist die Einschwingzeit in diesem Fall bedeutend kürzer als im vorherigen. Für die Einhaltung der Auswahlkriterien darf der Wert nicht weiter erhöht werden, da die Überschwingweite sonst größer als 5 cm wird.

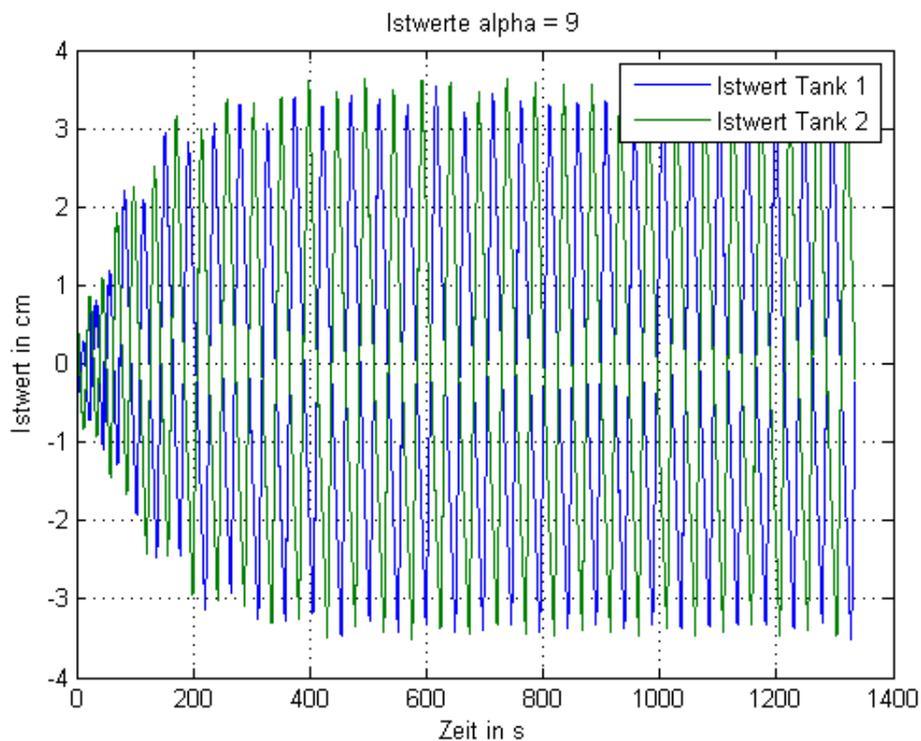


Abbildung 5.4: Istwerte $\alpha=9$

Abbildung 5.4 zeigt die Istwerte für einen höheren Wert von α . Hier ist zu sehen, was passiert, wenn der Wert zu hoch eingestellt wird. Das System wird instabil. Die Schwingung des Systems wird nicht kleiner, sondern immer größer. In den vorherigen Fällen wird die Schwingung immer geringer und die Istwerte nähern sich dem Arbeitspunkt an. Dies ist hier nicht mehr der Fall. Mit zunehmender Zeit entfernen sich die Istwerte immer weiter von der Ruhelage. Bei einem Wert von 9 passiert dies schon bevor das Wasser abgelassen wird.

5.3 Zuschaltung P-Anteil

Das Simulinkmodell aus Kapitel 5.2 wird um die Zuschaltung des P-Anteils erweitert (siehe Abbildung 5.5). Die rückgeführten Abweichungen gehen nicht mehr nur in den Integrator, sondern werden parallel mit dem Tuningfaktor β , sowie der Matrix $\tilde{\mathbf{K}}_P$ multipliziert. Diese Werte werden mit den Ergebnissen aus dem in Abschnitt 5.2 erläuterten I-Pfades summiert. Die Summe aus den beiden Pfaden werden mit den eingestellten Zuflüssen summiert und an die Pumpen weitergeleitet.

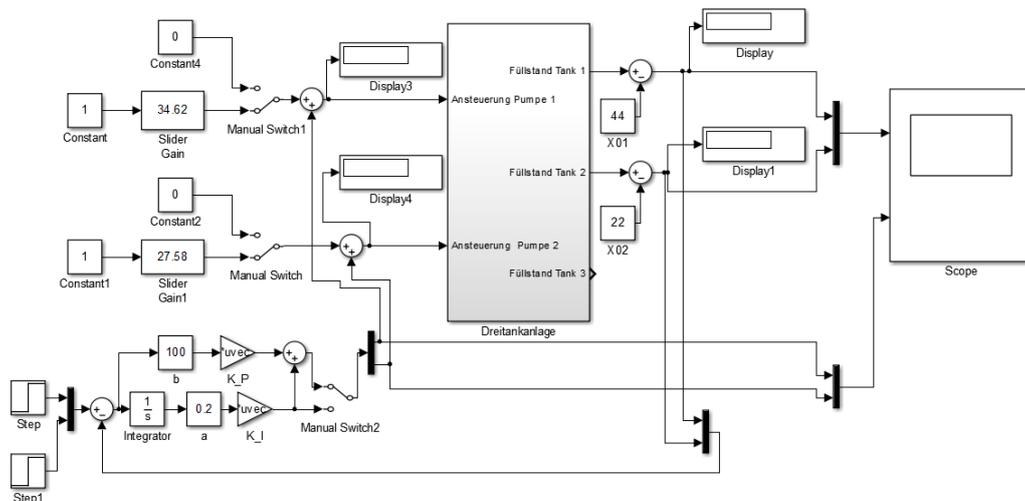


Abbildung 5.5: Simulinkmodell Zuschaltung des P-Anteils

Der Tuningfaktor β kann wie α über einen SSlider Gain eingestellt werden. Die Matrix $\tilde{\mathbf{K}}_P$ wird wie $\tilde{\mathbf{K}}_I$ mit MATLAB berechnet und an das Simulinkmodell weitergeleitet. In Listing 5.3 ist der MATLAB -Code für die Berechnung der beiden Matrizen dargestellt.

```

1 %Statikmatrix K_S
2 K_S=[1.8 1; 0.8 1.3];
3
4 %Reglermatrix K_ISchlange
5 K_ISchlange=inv(K_S);
6
7 %Reglermatrix K_PSchlange
8 K_PSchlange=inv(K_S);

```

Listing 5.3: MATLAB-Code für die Berechnung von $\tilde{\mathbf{K}}_I$ und $\tilde{\mathbf{K}}_P$

Der Regelkreis wird mit dem zuvor ermittelten Wert von α und einem kleinen Wert für β geschlossen. β wird so lange erhöht, bis das dynamische Verhalten des Regelkreises den

zuvor festgelegten Wünschen entspricht. Die Zuschaltung des P-Anteils dient dazu die Einschwingzeit zu verringern und das Überschwingen zu glätten.

Für die Auswahl des endgültigen Werts von β wurden wie in Abschnitt 5.2 bestimmte Kriterien festgelegt. Die Einschwingzeit T_s soll nicht höher als 200s sein und die Überschwingweite Δh soll maximal 0,2 cm betragen. Der eingeschwungene Zustand ist bei einer Abweichung von $\pm 0,1$ cm erreicht. Die Auswahlkriterien wurden mit dem gleichen Testszenario wie in Kapitel 5.2 überprüft. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

An den Werten aus Tabelle 5.2 ist erkennbar, dass mit größeren Werten für β die Einschwingzeit kleiner wird und die Überschwingweite abnimmt. Zusätzlich wird die Schwingung geglättet. Als endgültiger Wert für β wurde der Wert 100 ausgewählt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Verläufe der Istwerte für einzelne Werte von β .

Tabelle 5.2: Messwerte β

β	Δh Tank 1 in cm	Δh Tank 2 in cm	T_s in s
0,1	6,586	4,112	926,3
1	4,28	2,966	672,8
10	1,386	1,045	468,7
20	0,8671	0,6073	685,1
30	0,6109	0,4965	637,4
40	0,5987	0,4534	713,8
50	0,3641	0,3641	387,2
60	0,4675	0,2193	298,7
70	0,1778	0,1778	288,3
80	0,2747	0,2747	446,4
90	0,1854	0,1854	309,3
100	0,1392	0,1392	80,1
110	0,1146	0,1146	75,6

In Abbildung 5.6 ist die grafische Darstellung der Istwerte für ein β von 10 zu sehen. Dies ist ein relativ kleiner Wert für β . Erkennbar ist dies daran, dass die Schwingungen noch nicht vollkommen geglättet wurden. Das System befindet sich nach einer Schwingung im eingeschwungenen Zustand. Die maximale Überschwingweite von 0,2 cm wird überschritten. Vergleicht man die Schwingung dieses Systems mit denen aus dem vorherigen Abschnitt ist erkennbar, dass die Schwingung abgenommen hat. Hieraus ist ersichtlich, dass sich bereits ein Effekt des P-Anteils eingestellt hat.

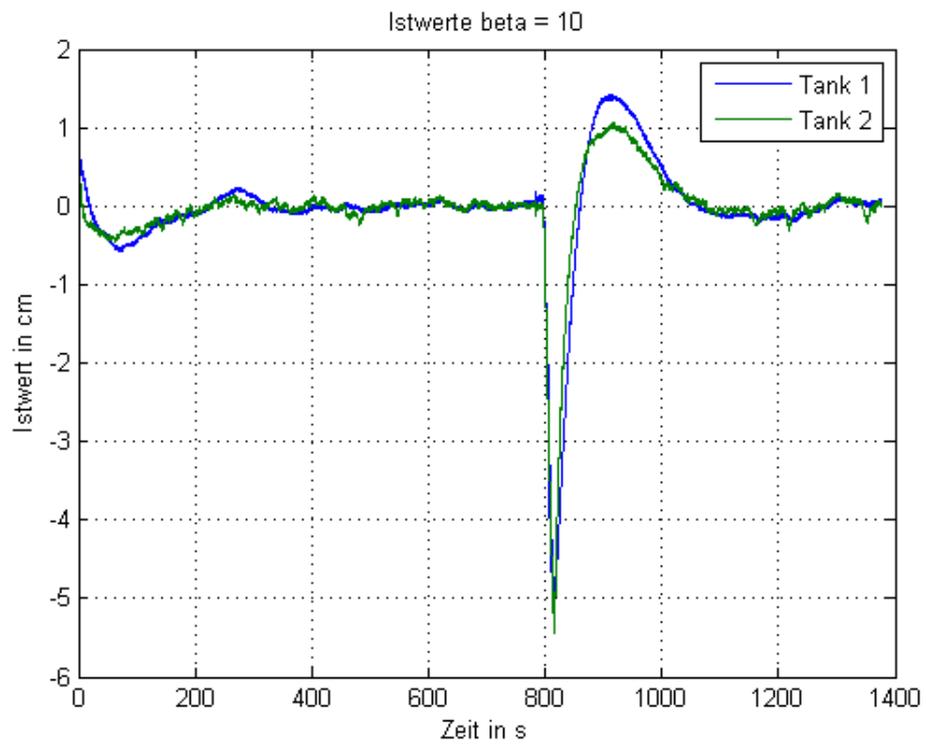
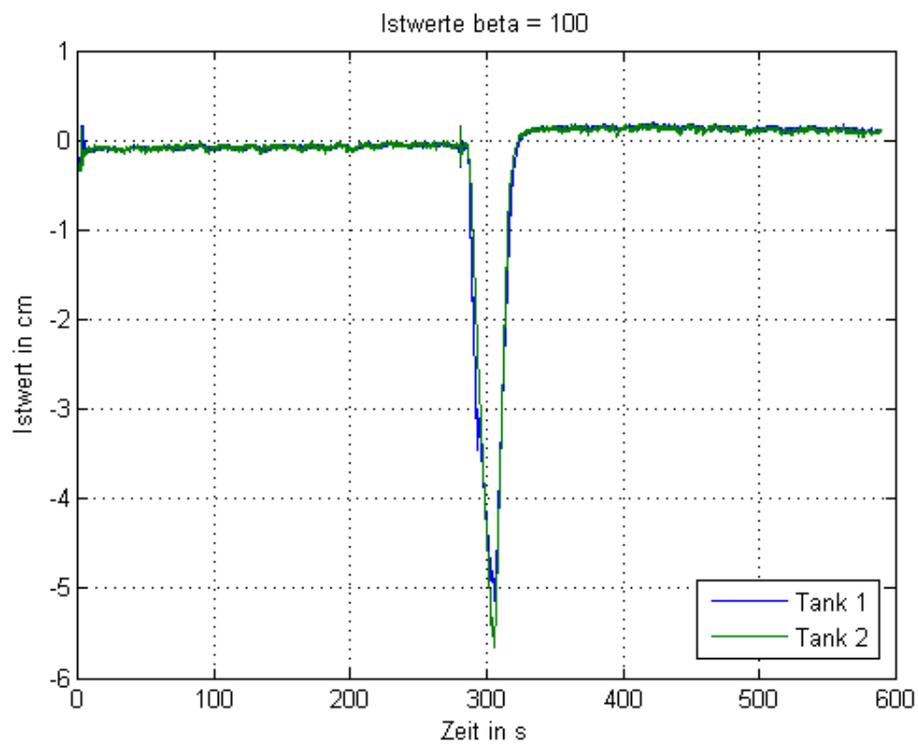
Abbildung 5.6: Istwerte $\beta=10$ Abbildung 5.7: Istwerte $\beta=00$

Abbildung 5.7 zeigt die grafische Darstellung der Istwerte für $\beta=100$. Dies ist der nach den Auswahlkriterien ausgewählte Wert. Es ist erkennbar, dass die Schwingung des System vollständig geglättet wurde. Die Überschwingweite liegt unterhalb der 0,2cm-Grenze. Mit einer Überschwingweite von 0,1392cm liegt diese minimal oberhalb der festgelegten Abweichung von $\pm 0,1$ cm. Das System befindet sich nach 80,1s im eingeschwungenen Zustand.

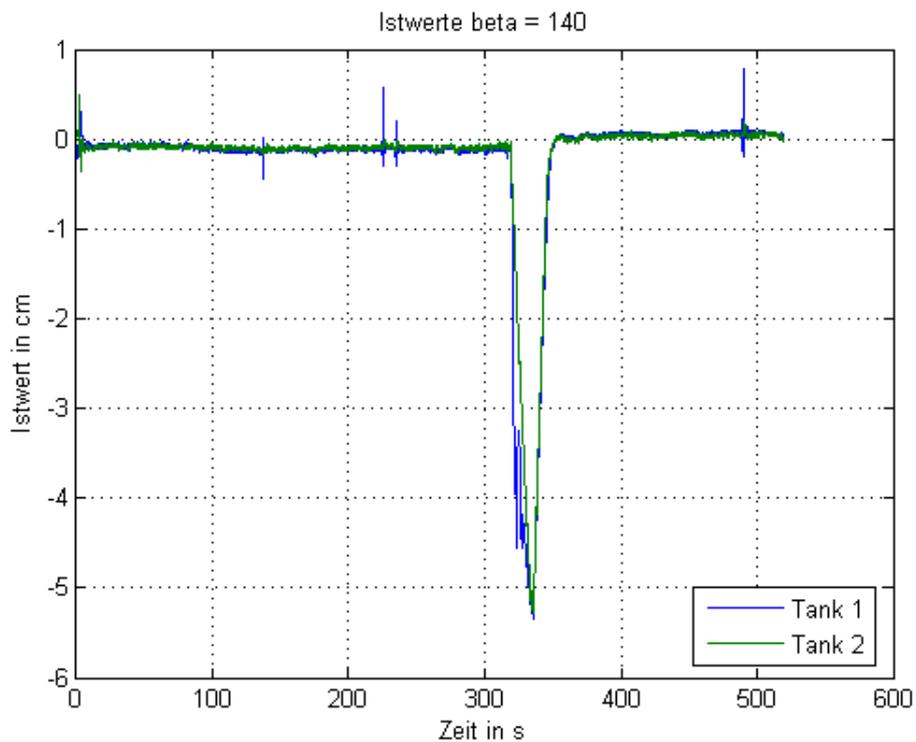


Abbildung 5.8: Istwerte $\beta=140$

In Abbildung 5.8 ist der Verlauf der Istwerte für ein β von 140 dargestellt. Das Testszenario wurde auch für höhere Werte als $\beta=110$ durchgeführt. Es ist aber aufgefallen, dass das System bei höheren Werten sehr empfindlich wird. Dies ist bei $\beta=140$ gut zu erkennen. Durch die erhöhte Empfindlichkeit, kommt es bei einigen Zeitpunkten zu einem erhöhten Zufluss der Pumpen, sodass die Füllstände kurzzeitig ansteigen und direkt wieder abfallen. Bei Werten für $\beta>140$ kommt es nicht mehr zu einem konstanten Zufluss. Die Pumpen wechseln zwischen Vollausschlag und keinem Zufluss.

5.4 PI-Regler

In Abbildung 5.9 ist das Simulinkmodell des fertigen PI-Reglers zu sehen. Grundsätzlich ist es das gleiche Modell wie in Abbildung 5.5, der Schalter, der für die Zuschaltung des P-Anteils notwendig war, wurde jedoch entfernt.

Der fertige PI-Regler besteht aus folgenden Parametern:

$$\alpha = 0,2 \quad (5.3)$$

$$\beta = 100 \quad (5.4)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_I = \begin{pmatrix} 0,8442 & -0,6494 \\ -0,5195 & 1,1688 \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_P = \begin{pmatrix} 0,8442 & -0,6494 \\ -0,5195 & 1,1688 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Mit Hilfe dieser Parameter können die Reglermatrizen \mathbf{K}_I und \mathbf{K}_P wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{K}_I = \alpha \cdot \tilde{\mathbf{K}}_I = 0,2 \cdot \begin{pmatrix} 0,8442 & -0,6494 \\ -0,5195 & 1,1688 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1688 & -0,129 \\ -0,103 & 0,2337 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

$$\mathbf{K}_P = \beta \cdot \tilde{\mathbf{K}}_P = 100 \cdot \begin{pmatrix} 0,8442 & -0,6494 \\ -0,5195 & 1,1688 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 84,42 & -64,94 \\ -51,95 & 116,88 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

6 Test

In diesem Kapitel wird der entwickelte Regler auf seine Funktionalität und Qualität getestet. Dafür wird zunächst überprüft, ob der Regler einer Sollwertänderung Folge leisten kann. Außerdem wird getestet, wie der Regler auf eine Leckage, also eine Störgröße, reagiert und ob diese kompensiert werden kann. Zum Schluss wird das Verhalten des Reglers mit Hilfe eines modellbasierten Reglers verglichen.

6.1 Sollwertfolge

Zunächst wird getestet, wie der Regler auf einen Sollwertsprung reagiert. Hierfür wird der Wert in den beiden "SSprung-Blöcken" des Simulinkmodells geändert. Der Sollwert von Tank 1 wird um 3cm verringert und der von Tank 2 um 3cm erhöht. Damit ergibt sich für Tank 1 ein neuer Füllstand von 41cm und für Tank 2 ein neuer Füllstand von 25cm.

Dieser Test wurde für verschiedene Wertekombinationen von α und β durchgeführt, um das Verhalten besser vergleichen zu können. Für den Vergleich wurden folgende Kombinationen ausgewählt:

1. $\alpha=0,2$ und $\beta=0$
2. $\alpha=0,2$ und $\beta=10$
3. $\alpha=0,2$ und $\beta=100$

Die Kombinationen werden hinsichtlich ihrer Einschwingzeit und Überschwingweite miteinander verglichen. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der beschriebenen Kombinationen dargestellt.

In Abbildung 6.1 ist der Verlauf der Istwerte bei einem Sollwertsprung für die erste Kombination dargestellt. Dabei handelt es sich um einen reinen I-Regler. Dadurch, dass der P-Anteil Null ist, schwingt das System stark und ist vergleichsweise langsam. Der Regler benötigt ca. 500 s um dem Sollwertsprung zu folgen und den eingeschwungenen Zustand zu erreichen. An Tank 2 ergibt sich eine maximale Überschwingweite von 1,8cm und an Tank 1 von -1,8cm. Dem Sollwertsprung wird Folge geleistet, jedoch ist die Regelung relativ langsam.

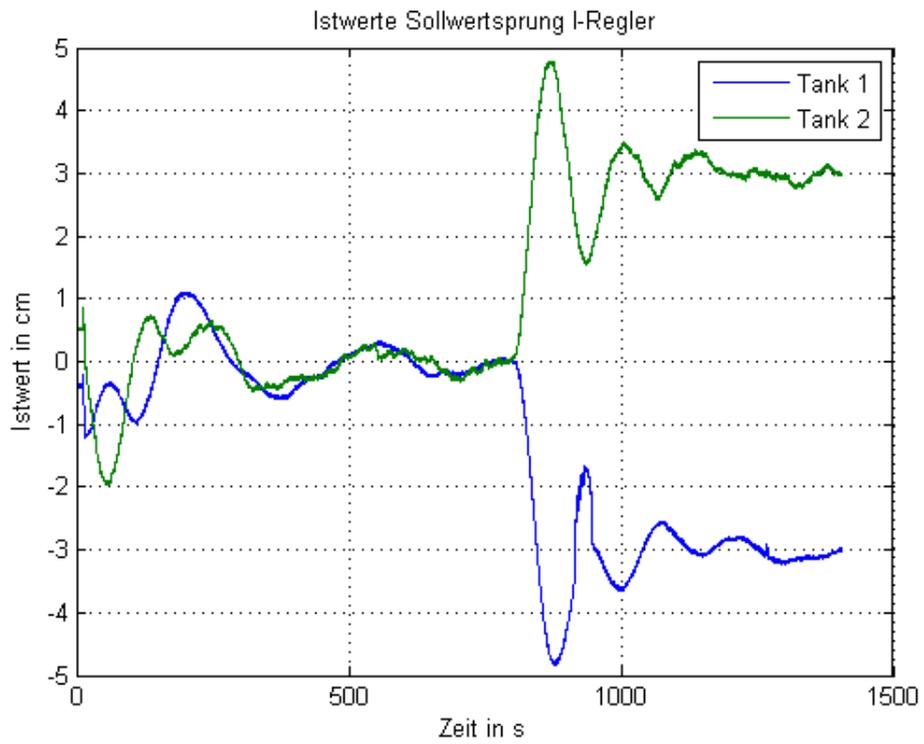


Abbildung 6.1: Istwerte Sollwertsprung I-Regler

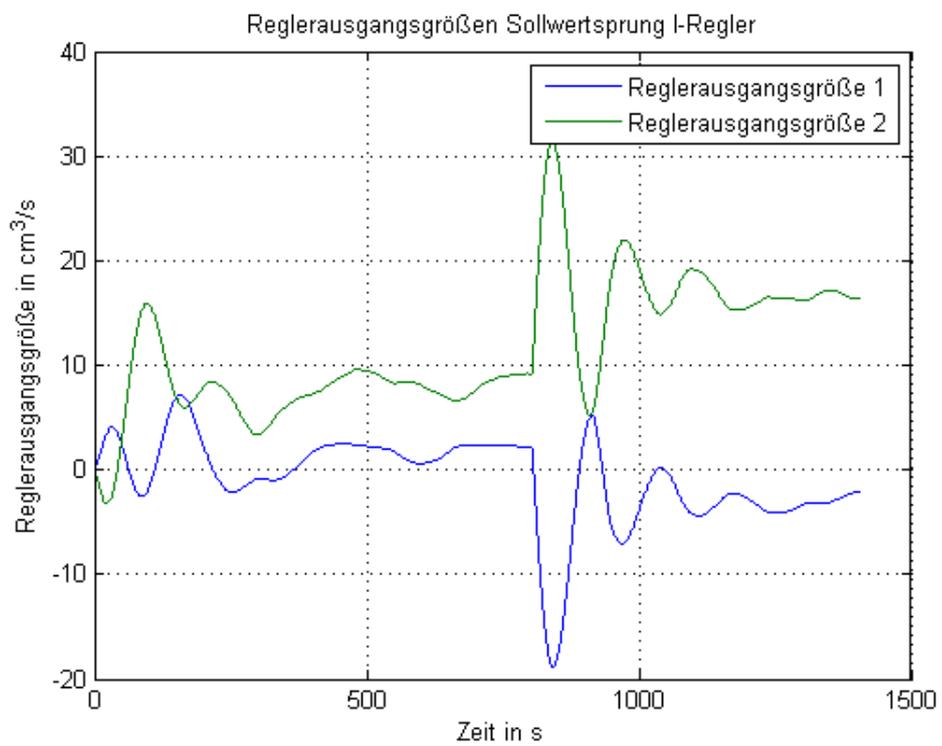


Abbildung 6.2: Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung I-Regler

Beobachtet man die Reglerausgangsgrößen (Stellgrößen abzüglich der eingestellten Zuflüsse) in Abbildung 6.2, ist die Schwingung gut erkennbar. Wie zu erwarten steigt die Reglerausgangsgröße von Tank 2 und die von Tank 1 sinkt. Nach ca. 1100s pendeln sich die Reglerausgangsgrößen ein.

Wird ein P-Anteil dazugeschaltet, verringert sich die Schwingung und das dynamische Verhalten verbessert sich. In Abbildung 6.3 sind die Istwerte bei einem Sollwertsprung für die zweite Testkombination zu sehen. Es ist erkennbar, dass die Schwingung abgenommen hat und die Regelung schneller ist. Nach ca. 200s ist der eingeschwungene Zustand erreicht. An Tank 2 entsteht kein Überschwinger und an Tank 2 beträgt dieser lediglich -0,3cm. Es ist deutlich erkennbar, dass sich das dynamische Verhalten im Vergleich zu dem zuvor beschriebenen I-Regler deutlich verbessert hat.

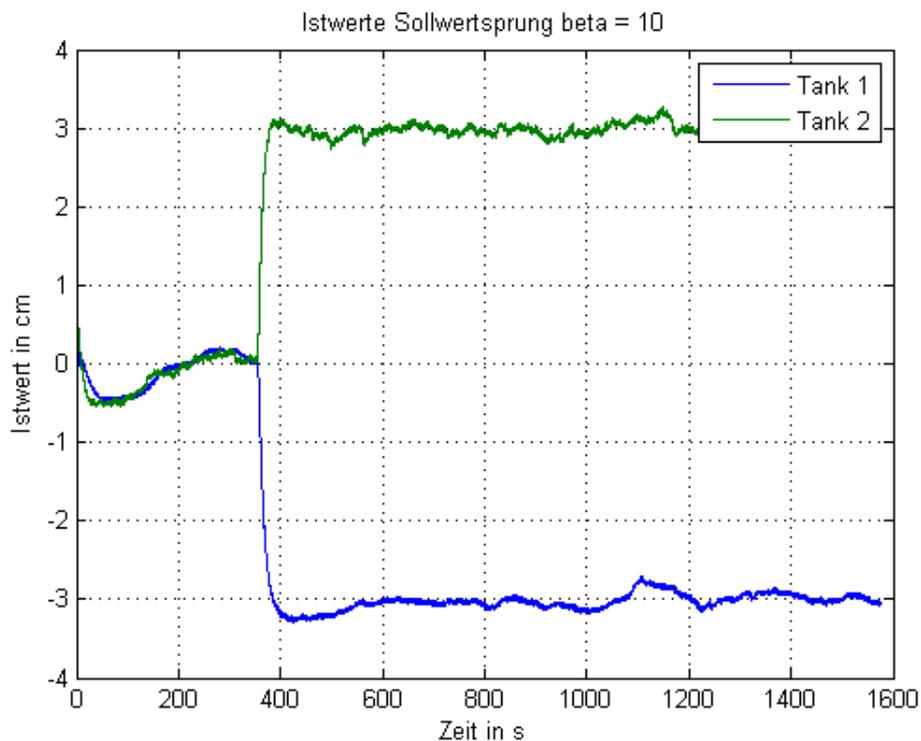


Abbildung 6.3: Istwerte Sollwertsprung $\beta=10$

Die Reglerausgangsgrößen in Abbildung 6.4 verhalten sich ebenfalls anders als die des I-Reglers. Auch hier hat sich die Schwingung stark verringert. Es ist erkennbar, dass es zu Anfang des Sollwertsprungs einen starken Ausschlag gibt und sich die Reglerausgangsgrößen anschließend einem Endwert nähern. Auch hier steigt die Reglerausgangsgröße für Tank 2 und die von Tank 1 sinkt. Betrachtet man den Ausschlag der Reglerausgangsgröße 1

ist erkennbar, dass diese so niedrig ist, dass sie die Pumpe 1 nicht nur ausschalten möchte sondern, wenn möglich, auch Wasser abpumpen möchte.

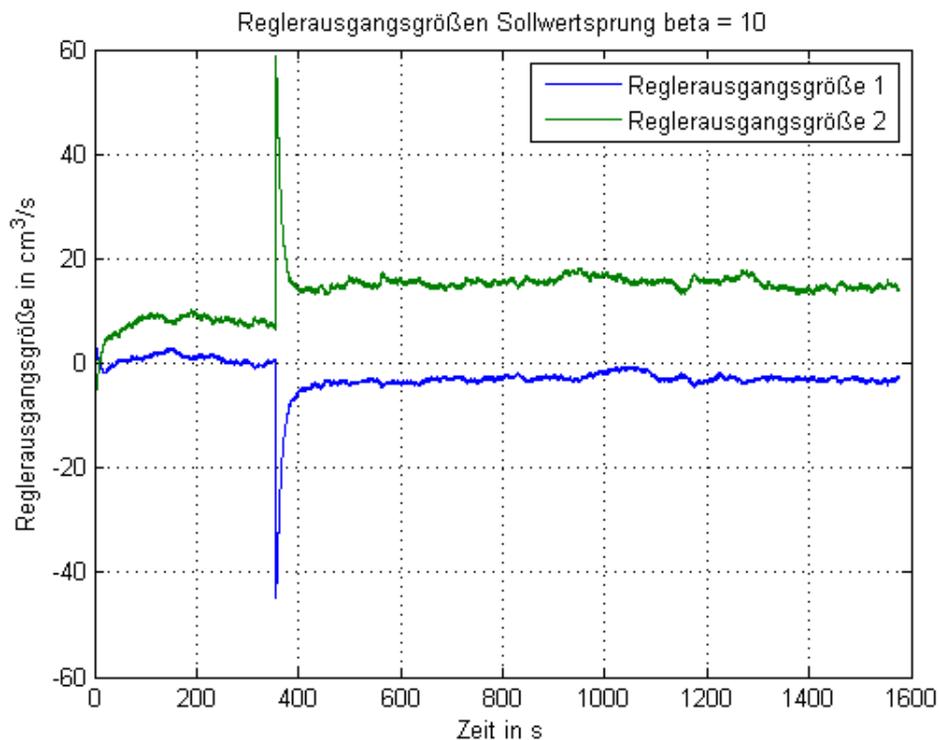
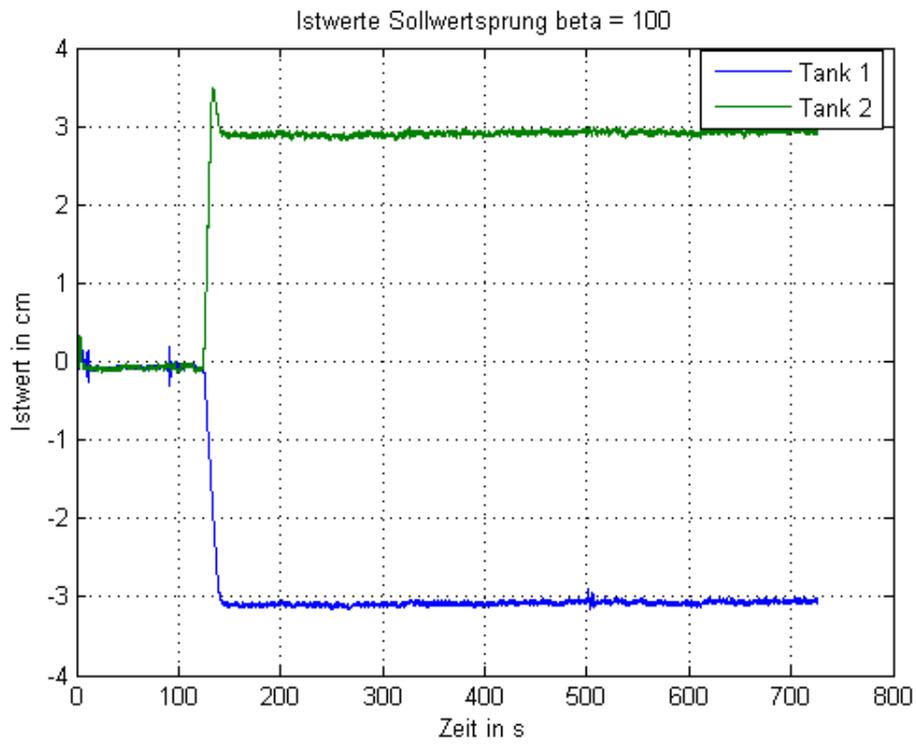
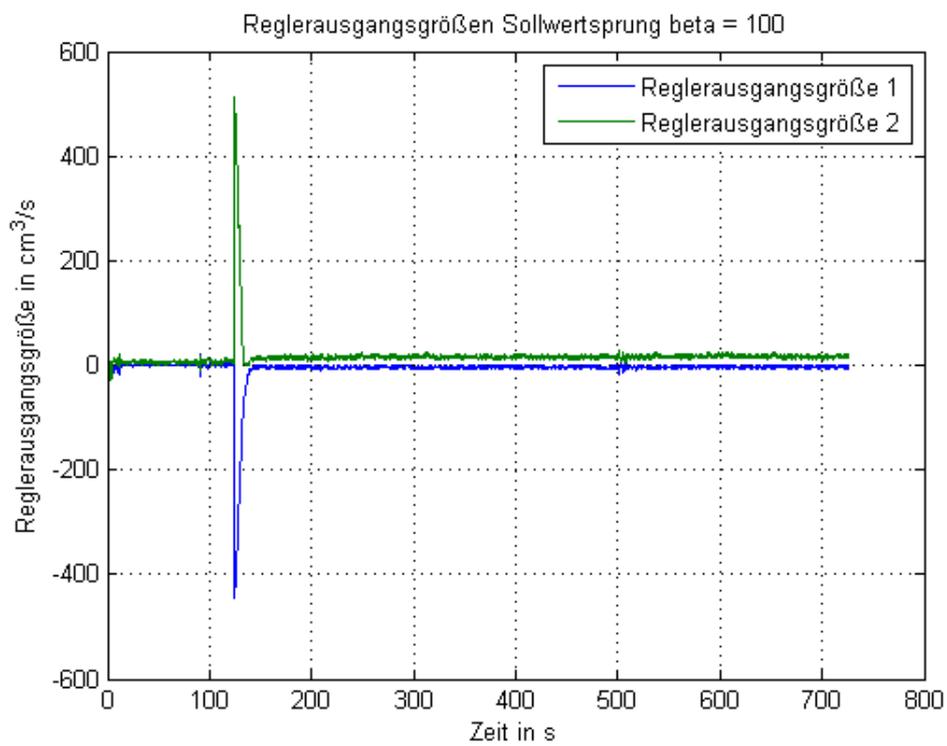


Abbildung 6.4: Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung $\beta=10$

Wird β erhöht, verbessert sich das dynamische Verhalten. Dies ist in Abbildung 6.5 zu erkennen. Die Schwingung des Systems wurde vollständig geglättet. Die Regelung folgt dem Sollwert und erreicht nach weniger als 50s den eingeschwingenen Zustand. An Tank 2 entsteht ein Überschwinger von 0,5cm und an Tank 1 von 0,1cm. Das dynamische Verhalten hat sich im Vergleich zur zweiten Kombination stark verbessert.

Beobachtet man die Reglerausgangsgrößen in Abbildung 6.6 ist erkennbar, dass diese in die Sättigung gehen. Die Reglerausgangsgröße hat ihr Maximum bei einem Zufluss von über $500 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$. Pumpe 2 hat jedoch einen maximalen Zufluss von $128 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$. Die Reglerausgangsgröße 1 hat ihr Minimum bei $-420 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$, was bedeutet, dass Pumpe 1 nicht nur ausgeschaltet, sondern Wasser abgepumpt werden soll. Bei diesem Dreitanksystem ist dies nicht möglich. Vergleicht man diese mit denen der ersten und zweiten Kombination ist ersichtlich, dass ein höheres β das dynamische Verhalten zwar verbessert, jedoch die Stellgrößen teurer werden. Dies bedeutet, dass die Regelung dafür sorgt, dass, sofern dies möglich ist, eine viel größere Menge zufließt als notwendig ist.

Abbildung 6.5: Istwerte Sollwertsprung $\beta=100$ Abbildung 6.6: Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung $\beta=100$

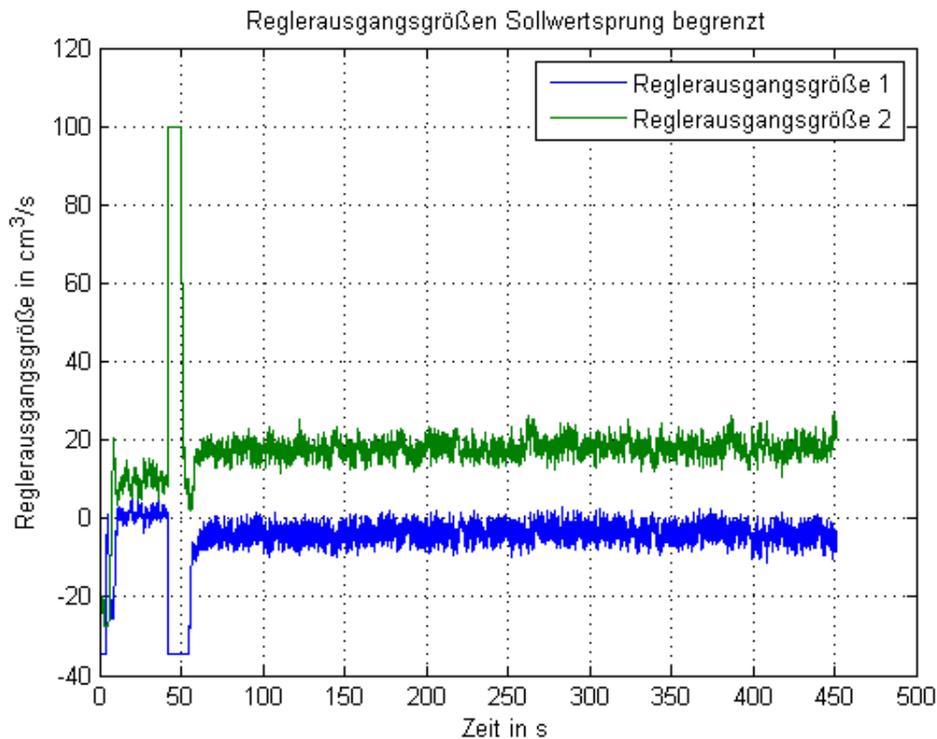


Abbildung 6.7: Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung $\beta=100$ mit Begrenzer

In der Praxis muss also entschieden werden, welcher Aspekt wichtiger ist. Es muss sich die Frage gestellt werden, ob die Regelung schnell, oder günstig sein soll. Im Falle dieses Dreitanksystems ist eine derartige Entscheidung nicht notwendig, weshalb der höhere Wert für β ausgewählt wurde, damit ein besseres dynamisches Verhalten erreicht wird. Damit die Stellgrößen nicht zu hoch bzw. zu niedrig werden, wurde ein Begrenzer in das Simulinkmodell eingefügt. Die Reglerausgangsgrößen mit Begrenzung sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Verläufe sind vergleichbar mit den Verläufen in Abbildung 6.6, jedoch hat die Reglerausgangsgröße 2 ihr Maximum bei einem Zufluss von $100 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ und Reglerausgangsgröße 1 ihr Minimum bei einem Zufluss von $-35 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$.

Zusätzlich wurde überprüft ob die Reglerausgangsgrößen auch für kleinere Sollwertsprünge in die Sättigung gehen. Bei einem Sollwertsprung von $\pm 0,5\text{cm}$ gehen sie Reglerausgangsgrößen bei einem β von 100 nicht in die Sättigung. In Abbildung 6.8 sind die Verläufe der Istwerte und in Abbildung 6.9 die Verläufe der Reglerausgangsgrößen dargestellt. Aus den Abbildungen geht hervor, dass die Sättigung in beiden Fällen nicht erreicht wird.

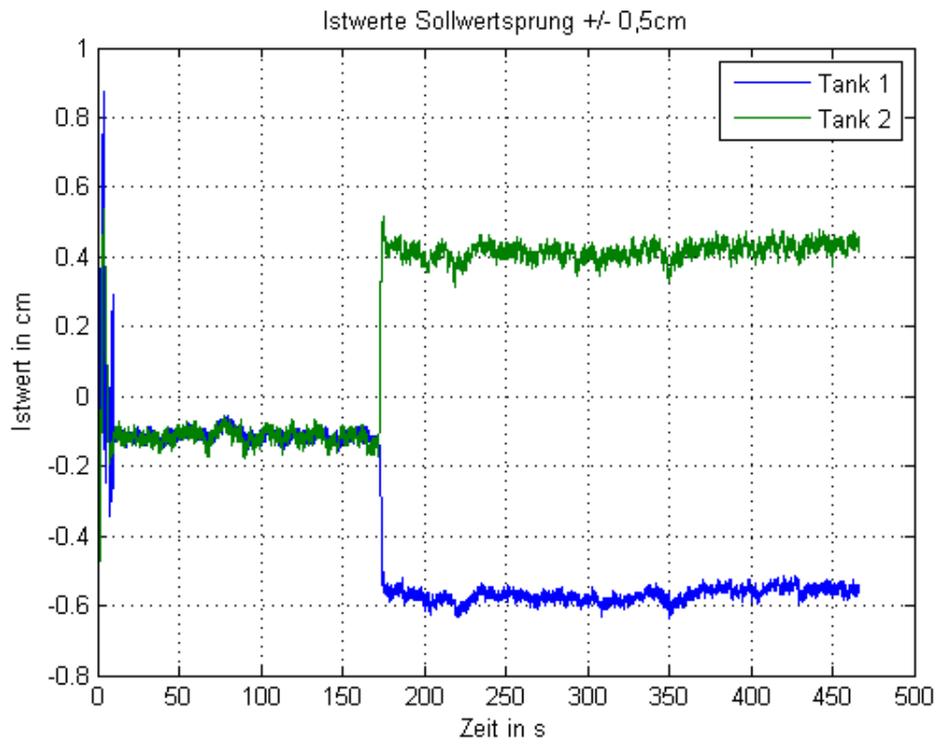


Abbildung 6.8: Istwerte Sollwertsprung 0,5cm

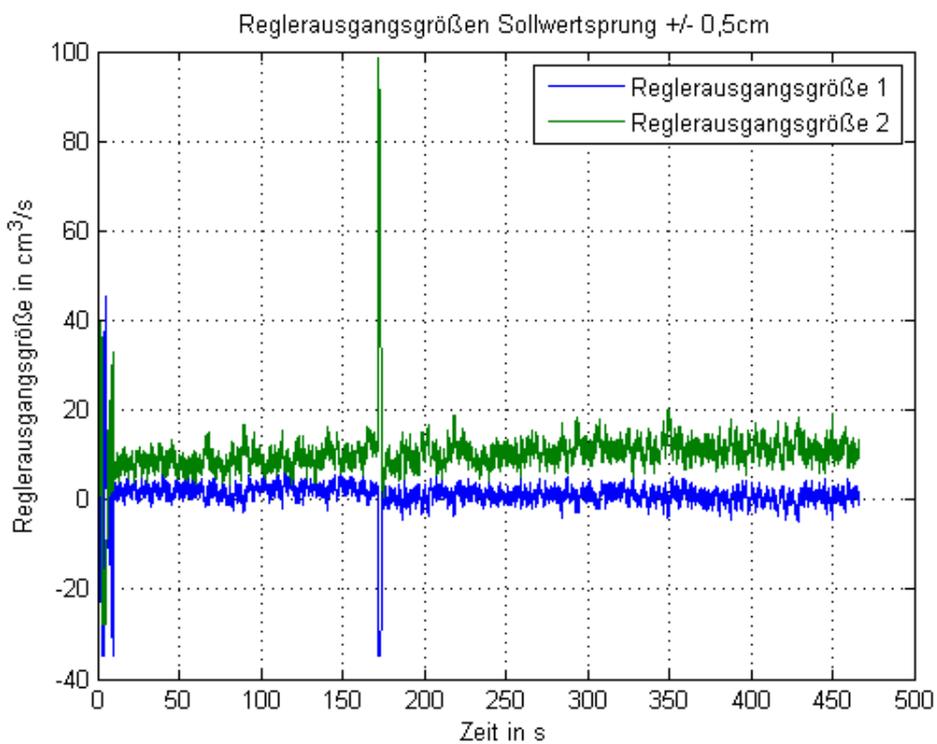


Abbildung 6.9: Reglerausgangsgrößen Sollwertsprung 0,5cm

6.2 Störgrößenkompensation

Der zweite Test überprüft, wie der Regler auf eine Störgröße reagiert. Dafür wird das Störventil HV2, welches an Tank 2 sitzt, geöffnet. Dieser Test wurde, wie in Kapitel 6.1 mit 3 Wertekombinationen durchgeführt. Es wurden dieselben Kombinationen wie im vorherigen Abschnitt verwendet.

Die Kombinationen werden hinsichtlich der Einschwingzeit und der Überschwingweite miteinander verglichen. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Verläufe der Istwerte und der Reglerausgangsgrößen für die verschiedenen Kombinationen dargestellt.

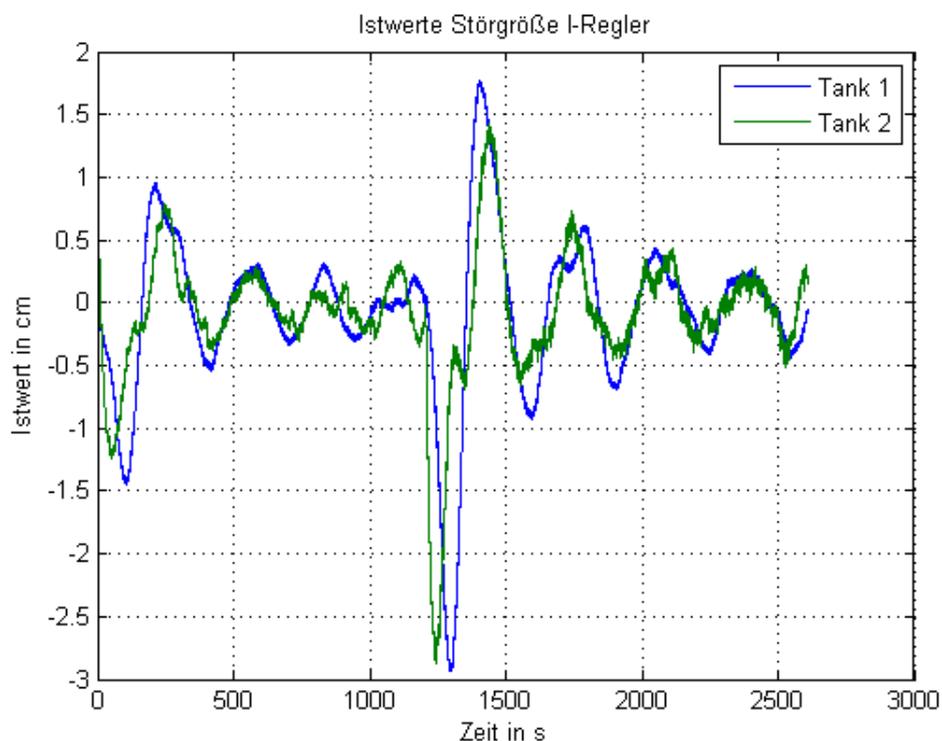


Abbildung 6.10: Störgrößenkompensation Istwerte I-Regler

Abbildung 6.10 zeigt die Verläufe der Istwerte für die erste Kombination. Es handelt sich hierbei, wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, um einen reinen I-Regler. Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, schwingt das System recht stark, da kein P-Anteil vorhanden ist. Der Regler benötigt ca. 1000s um die Störgröße zu kompensieren und den eingeschwungenen Zustand mit einer Abweichung von $\pm 0,5\text{cm}$ zu erreichen. An Tank 1 stellt sich eine maximale Überschwingweite von 1,75cm und an Tank 2 von 1,4cm. Die Störgröße wirkt sich auf beide Tanks mit einem Höhenverlust von 2,9cm aus.

Die Störgröße wird kompensiert, jedoch dauert dieser Vorgang recht lange und die Störgröße wirkt sich sichtbar auf die Füllhöhen aus.

Beobachtet man die Reglerausgangsgrößen in Abbildung 6.11 fällt auf, dass die Reglerausgangsgröße für Pumpe 1 zunächst abfällt. Dies liegt an dem Gegendruck, der auf das Ventil zwischen Tank 3 und Tank 2 und somit auch auf das Ventil zwischen Tank 1 und Tank 3 wirkt. Anschließend steigt die Reglerausgangsgröße kurzzeitig stark an. Im weiteren Verlauf nähert sich diese einem Endwert, welcher nur minimal größer ist als der Anfangswert. Daraus lässt sich schließen, dass keine starke Kopplung besteht. Die Reglerausgangsgröße für Pumpe 2 kompensiert die Störgröße fast alleine und steigt wie zu erwarten an.

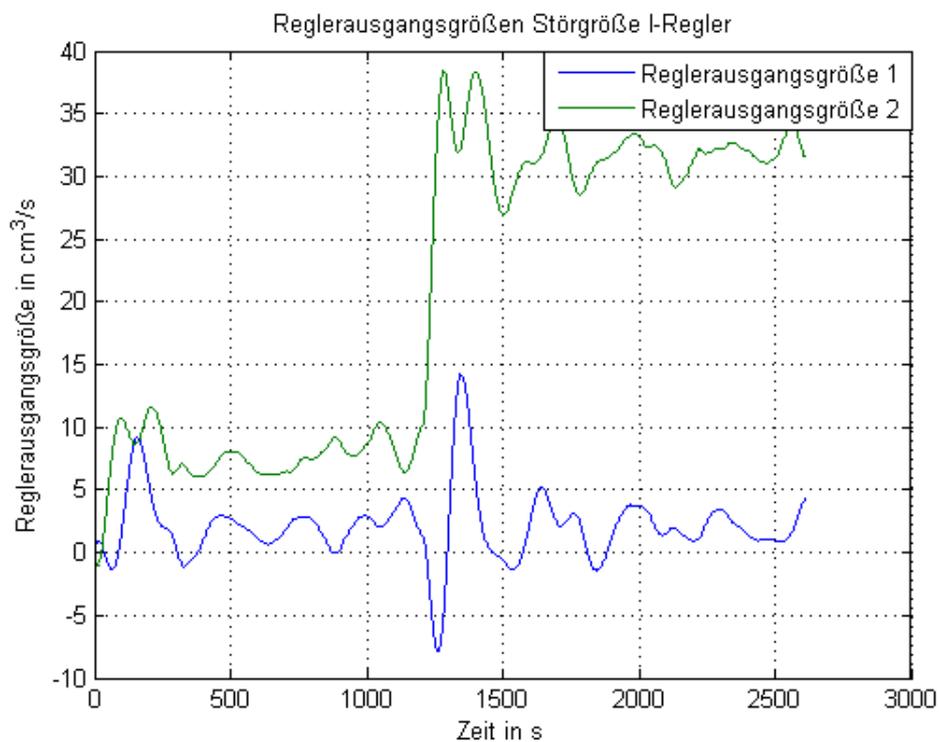


Abbildung 6.11: Störgrößenkompensation Reglerausgangsgrößen I-Regler

Wird ein P-Anteil dazu geschaltet verringert sich, wie bereits in Abschnitt 6.1 erwähnt, die Schwingung. Abbildung 6.12 zeigt den Verlauf der Istwerte für die zweite Kombination bei einer Leckage. Es ist erkennbar, dass die Schwingung im Vergleich zu Abbildung 6.10 abgenommen hat. Die Störgröße wirkt sich auf Tank 2 stärker aus als auf Tank 1. An Tank 2 sorgt sie für einen Füllstandsverlust von 1,5cm und an Tank 1 von 1,25cm. Nach einer Zeit von 450s ist die Störgröße kompensiert und das System befindet sich im eingeschwungenen Zustand mit einer Abweichung von $\pm 0,1$ cm. Die maximale Überschwingweite beträgt

für beide Tanks 0,15cm. Es ist erkennbar, dass sich das dynamische Verhalten des Reglers verbessert hat.

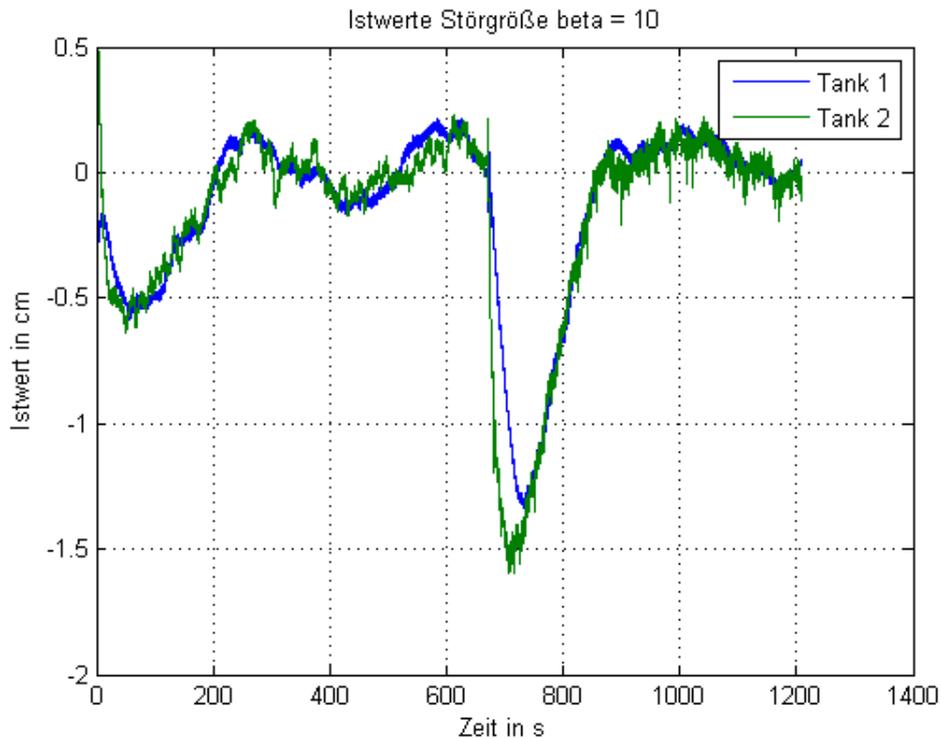
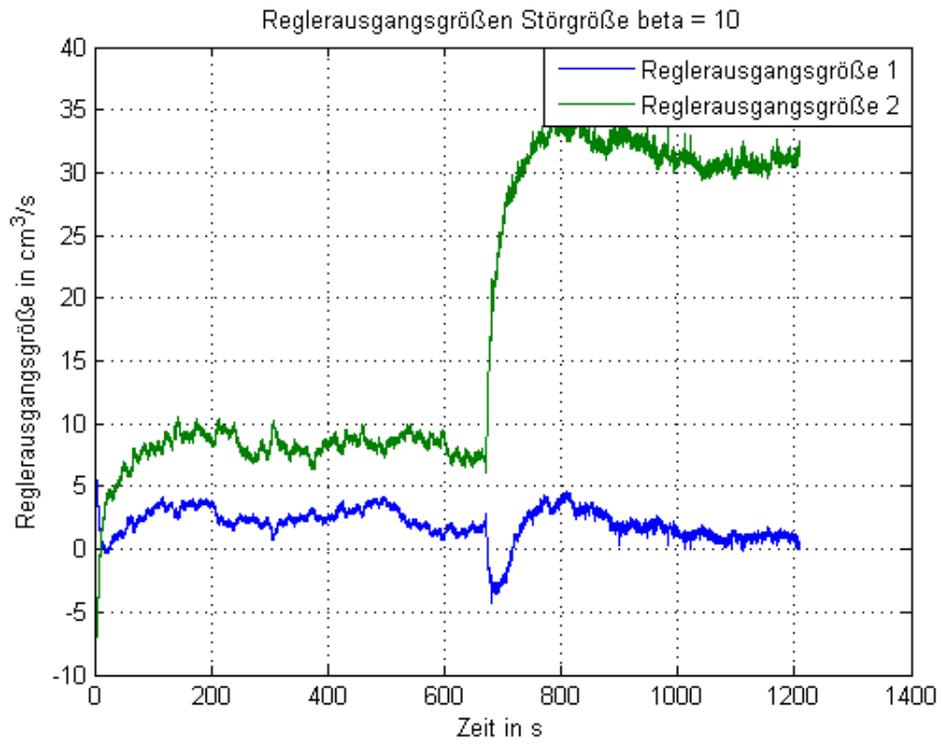
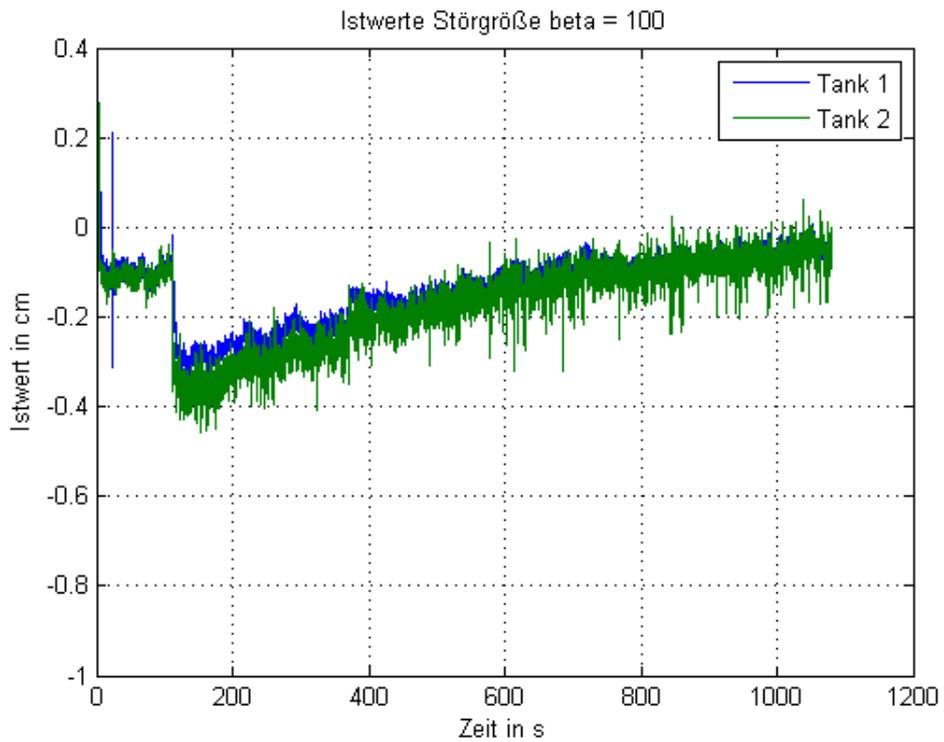


Abbildung 6.12: Störgrößenkompensation Istwerte $\beta=10$

Beobachtet man die Reglerausgangsgrößen in Abbildung 6.13, ist erkennbar, dass die Schwingung im Vergleich zum reinen I-Regler stark abgenommen hat. Ansonsten verhalten sie sich so wie in Abbildung 6.11. Auch hier fällt die Reglerausgangsgröße 1 mit Öffnen des Störventils zunächst ab. Das liegt an dem zuvor erwähnten Gegendruck auf die Verbindungsrohre. Hier ist ebenfalls erkennbar, dass eine geringe Kopplung besteht, da die Reglerausgangsgröße nicht ansteigt. Die Störgröße wird allein durch den Zufluss von Pumpe 2 kompensiert.

Abbildung 6.13: Störgrößenkompensation Reglerausgangsgrößen $\beta=10$ Abbildung 6.14: Störgrößenkompensation Istwerte $\beta=100$

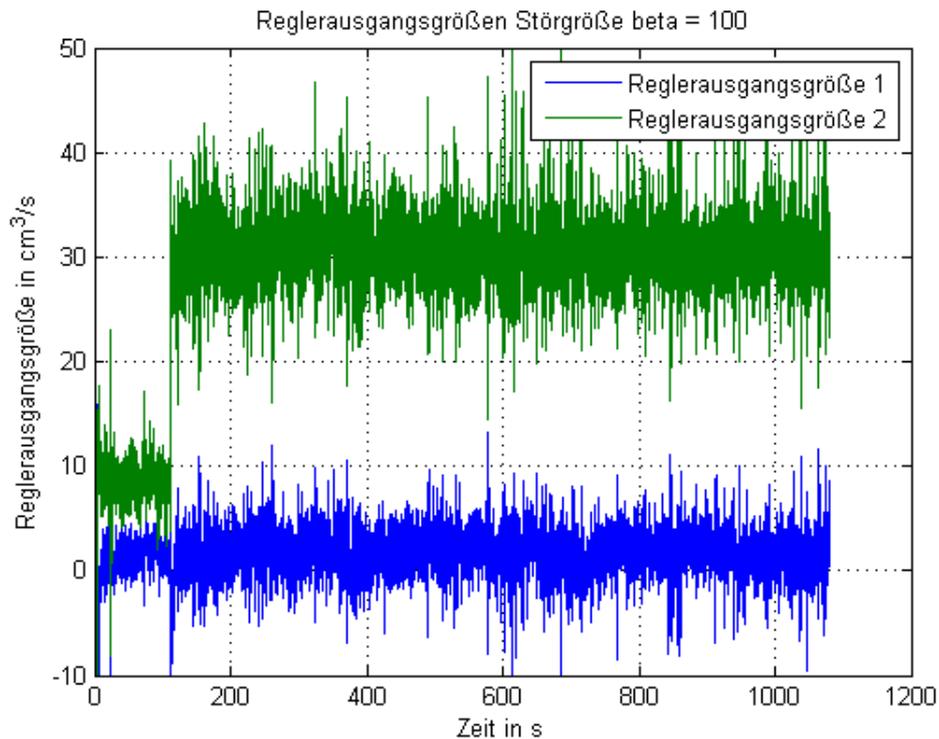


Abbildung 6.15: Störgrößenkompensation Reglerausgangsgrößen $\beta=100$

In Abbildung 6.14 ist der Verlauf der Istwerte für die dritte Kombination dargestellt. Dies sind die Werte des entwickelten PI-Reglers aus Kapitel 5.4. Die Schwingung des Systems wurde vollständig geglättet. Es ist ein leichtes Rauschen erkennbar, welches entsteht, da der Verlauf der Istwerte in einem Bereich von -1 bis 0,4cm dargestellt ist und die Messwerte des Sensors durch die Bewegung der Wasseroberfläche leicht schwanken. Die Einschwingzeit beträgt in diesem Fall ebenfalls 450s. Nach dieser Zeit ist die Störgröße kompensiert und das System befindet sich im eingeschwungenen Zustand mit einer Abweichung von $\pm 0,1$ cm. Der Regler ist also hinsichtlich der Störgrößenkompensation nicht schneller geworden. Jedoch wirkt sich die Störgröße nicht mehr so stark auf die Füllstände der Tanks aus. An Tank 1 sorgt die Störgröße für einen Höhenverlust von 0,3cm und an Tank 2 von 0,4 cm. Es gibt keine Überschinger.

In Abbildung 6.15 sind die Reglerausgangsgrößen für die dritte Kombination dargestellt. Die Schwingung wurde zwar geglättet, jedoch ist jetzt ein Rauschen erkennbar. Auch hier ist ersichtlich, dass die Reglerausgangsgröße 2 alleine die Störgröße kompensiert. Der Abfall der Reglerausgangsgröße 2 auf Grund des Gegendrucks ist nicht mehr vorhanden.

6.3 Vergleich mit modellbasiertem Regler

Abschließend soll der entwickelte PI-Regler mit einem modellbasierten Regler verglichen werden. Hierfür wurde der im ersten Versuch des Praktikums der Veranstaltung Mehrgrößenregelung aus dem Masterstudiengang Automatisierung entwickelte Regler verwendet. Die Berechnungen stammen aus [8]. In diesem Abschnitt werden lediglich die Reglermatrizen und das Simulationsmodell angegeben, da die Berechnung selbst in dieser Arbeit nicht thematisiert wird.

Die Parameter des modellbasierten Reglers lauten:

$$\mathbf{K}_I = \begin{pmatrix} 0,2286 & 0,0575 \\ 0,0502 & 0,2212 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

$$\mathbf{K}_P = \begin{pmatrix} 9,7487 & 1,0594 & 0,7337 \\ 0,9245 & 8,1996 & 0,8409 \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

In Abbildung 6.16 ist das verwendete Simulinkmodell dargestellt.

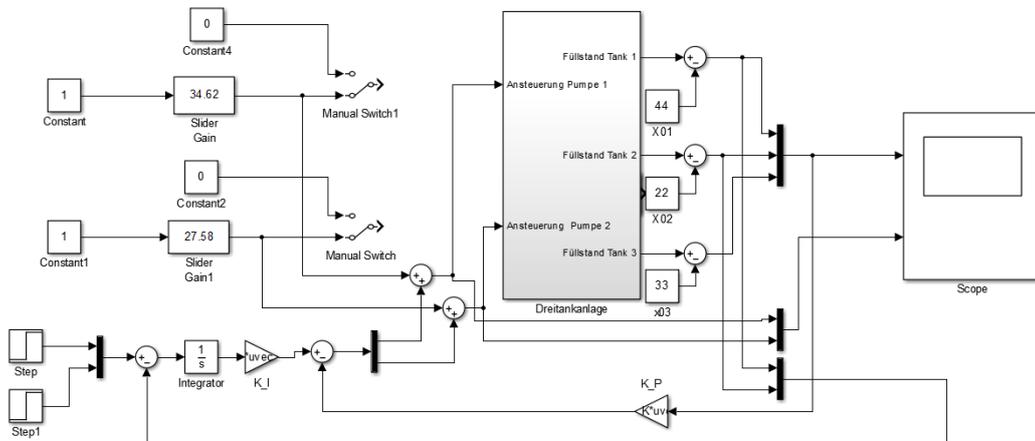


Abbildung 6.16: Simulinkmodell modellbasierter Regler

Anhand der Reglermatrizen und des Simulinkmodells sind erste Unterschiede zu dem in Kapitel 5 entwickelten Regler erkennbar. Schaut man sich die Matrix \mathbf{K}_P aus Gleichung 6.2 genauer an, ist erkennbar, dass es sich um eine 2x3-Matrix handelt. Bei dem entwickelten Regler hingegen handelt es sich um eine 2x2-Matrix. Dies ist auch anhand des Simulinkmodells sichtbar. Abbildung 6.16 zeigt, dass die Abweichungen von Tank 1, 2 und 3 mit \mathbf{K}_P multipliziert und zurückgeführt werden. Vergleicht man dies mit Abbildung 5.9 ist erkennbar,

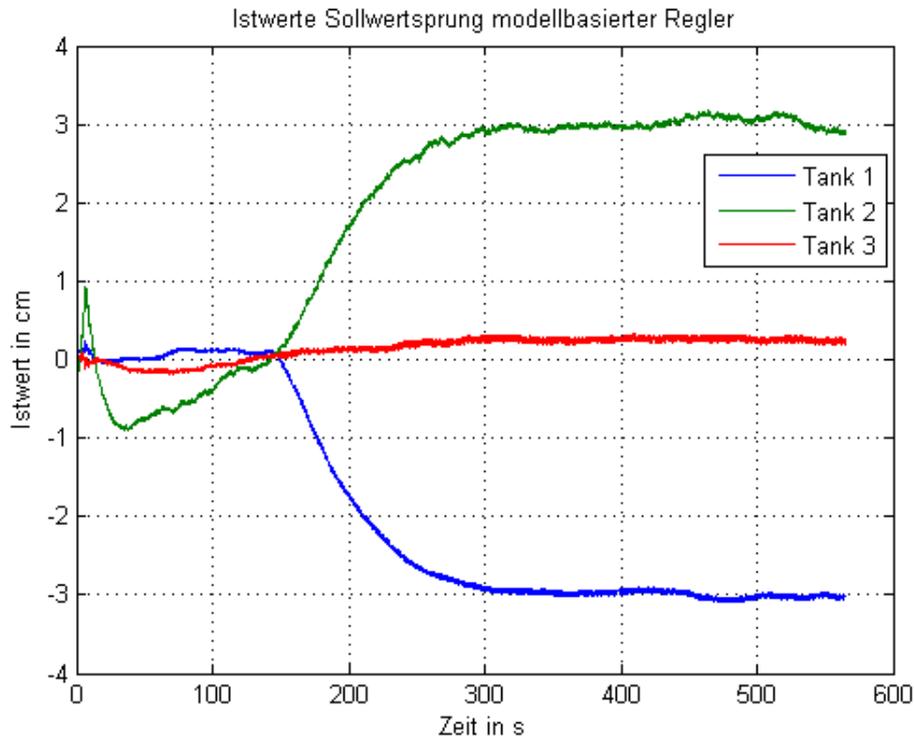


Abbildung 6.17: Istwerte Sollwertsprung modellbasierter Regler

dass dort nur die Abweichungen von Tank 1 und 2 zurückgeführt werden. Ein weiterer Unterschied ist, dass die Sollwertsprünge nicht über den P-Pfad gehen, sondern nur über den I-Pfad. In dem Simulinkmodell des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Reglers werden Sollwertsprünge über beide Pfade parallel geleitet.

Für den weiteren Vergleich, wurden die Sollwertfolge und die Störgrößenkompensation des modellbasierten Reglers getestet. Dafür wurden dieselben Testverfahren, wie bei dem entwickelten Regler angewendet. Die Sollwertfolge wird mit einem Sollwertsprung von -3cm an Tank 1 und +3cm an Tank 2 getestet. Für den Störgrößentest wurde das Störgrößenventil HV2 an Tank 2 geöffnet. Die Ergebnisse werden hinsichtlich der Einschwingzeit und der Überschwingweite mit den Ergebnissen aus den Abschnitten 6.1 und 6.2 verglichen.

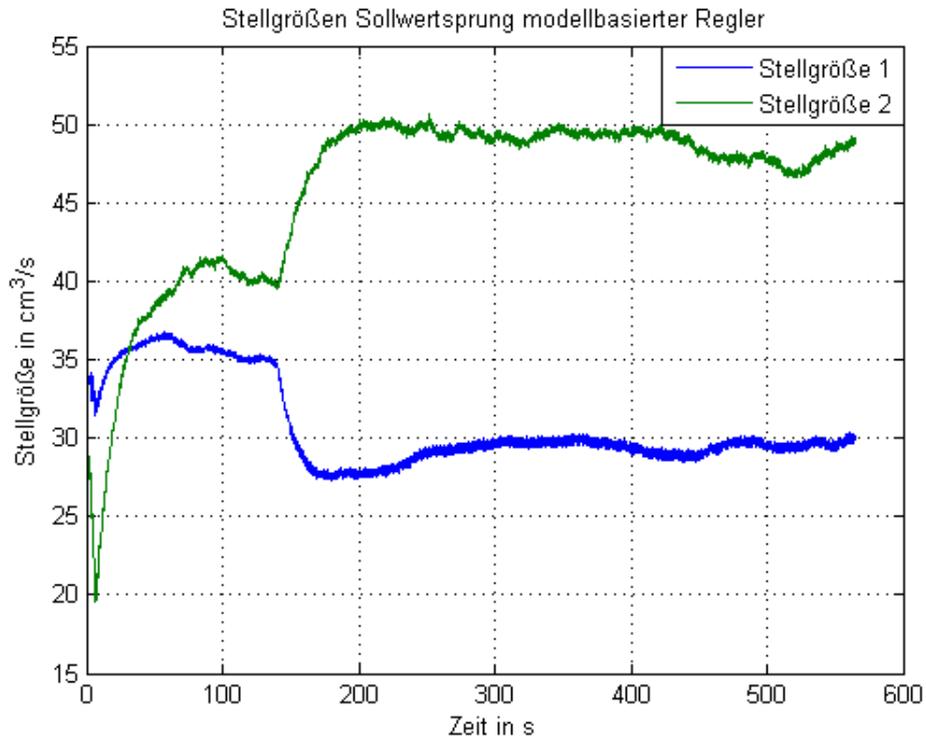


Abbildung 6.18: Stellgrößen Sollwertsprung modellbasierter Regler

In Abbildung 6.17 sind die Istwerte des modellbasierten Reglers für einen Sollwertsprung dargestellt. Nach einer Einschwingzeit von 150s wird dem Sollwert Folge geleistet und das System befindet sich im eingeschwungenen Zustand. Es sind keine Überschwinger vorhanden. Betrachtet man den Verlauf, dann ist erkennbar, dass die Istwerte sich asymptotisch dem Sollwert nähern.

Abbildung 6.18 stellt den Verlauf der Stellgrößen bei einem Sollwertsprung dar. Wie zu erwarten steigt die Stellgröße für Pumpe 2 an und die für Pumpe 1 fällt ab. Die Stellgrößen nähern sich asymptotisch einem Endwert.

Im Vergleich mit dem experimentell entwickelten Regler aus Kapitel 5.4, fällt auf, dass der experimentell entwickelte Regler einer Sollwertänderung schneller Folge leistet. Dieser besitzt eine Einschwingzeit von 50s, der modellbasierte Regler hingegen eine von 150s. Beim Vergleich der Reglerausgangsgrößen des entwickelten Reglers mit den Stellgrößen des modellbasierten Reglers fällt auf, dass die Reglerausgangsgrößen des entwickelten Reglers zunächst einen starken Ausschlag besitzen, anschließend wieder absinken und sich letztlich einem Endwert nähern (siehe Abbildung 6.6). Die Stellgrößen des modellbasierten Reglers

hingegen nähern sich asymptotisch einem Endwert. Außerdem gehen diese im Vergleich zu den anderen nicht in die Sättigung.

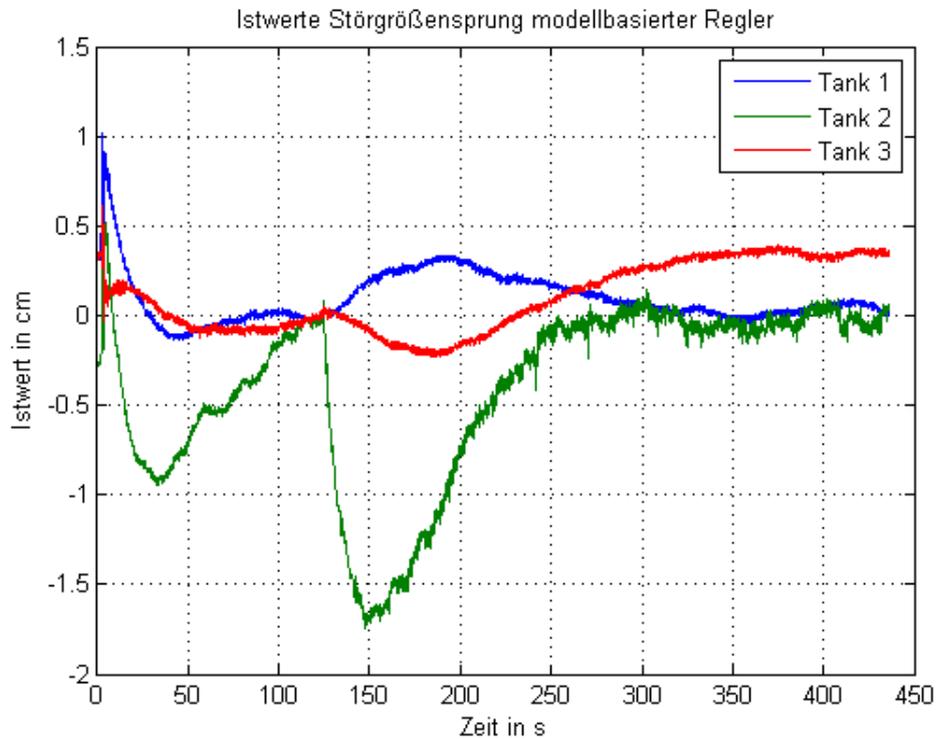


Abbildung 6.19: Istwerte Störgrößensprung modellbasierter Regler

In Abbildung 6.17 ist der Verlauf der Istwerte des modellbasierten Reglers bei einem Störgrößensprung dargestellt. Nach einer Einschwingzeit von 175s wird die Störung kompensiert und das System befindet sich im eingeschwungenen Zustand. Die Störgröße wirkt sich mit einem Füllstandsverlust von 1,6cm auf Tank 2 aus. Nach dem Öffnen des Störgrößensventils steigt zunächst die Füllhöhe von Tank 1 um 0,3cm. Anschließend sinkt diese wieder ab.

Der Verlauf der Stellgrößen bei einem Störgrößensprung befindet sich in Abbildung 6.20. Nach dem Öffnen des Störgrößensventils steigen die Stellgrößen der beiden Pumpen an. Die Stellgröße von Pumpe 1 sinkt jedoch nach ca. 100s wieder ab. Es ist erkennbar, dass die Störung allein von Pumpe 2 kompensiert wird.

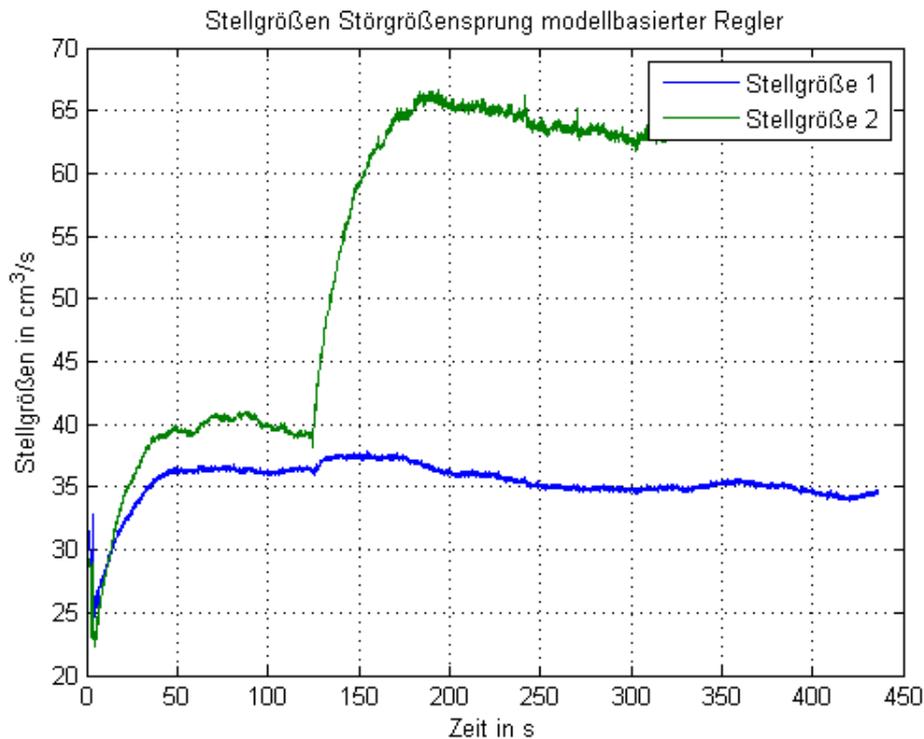


Abbildung 6.20: Stellgrößen Störgrößensprung modellbasierter Regler

Im Vergleich mit dem experimentell entwickelten Regler aus Abschnitt 5.4 ist erkennbar, dass der modellbasierte Regler die Störung schneller kompensiert. Dieser benötigt dafür nur 175s, der entwickelte Regler hingegen 450s. Jedoch wirkt sich die Störung, bei den modellbasierten Regler, stärker auf die Füllstände aus. In diesem Fall kommt es zu einem Höhenverlust an Tank 2 von 1,6cm. Bei dem entwickelten Regler hingegen kommt es nur zu einem Höhenverlust von 0,3cm an Tank 1 und von 0,4cm an Tank 2. Es fällt auf, dass sich bei dem Regler aus Kapitel 5.4 die Störgröße auf die Füllstände von beiden Tanks negativ auswirkt, wohingegen bei dem modellbasierten Regler nur der Füllstand von Tank 2 sinkt und der von Tank 1 ansteigt. Vergleicht man die Stell- und die Reglerausgangsgrößen miteinander ist ersichtlich, dass in beiden Fällen die Störung von Pumpe 2 kompensiert wird.

Insgesamt kann der in dieser Arbeit experimentell entwickelte Regler mit einem modellbasierten Regler verglichen werden. Dieser benötigt zwar mehr Zeit für die Kompensierung einer Störgröße, ist jedoch schneller in der Sollwertfolge. Ein Nachteil ist, dass die Stellgrößen des entwickelten Reglers in die Sättigung geht und somit, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, die Stellgrößen in der Realität teurer werden. Der entwickelte Regler erfüllt jedoch die Anforderungen und arbeitet so genau wie ein modellbasierter Regler.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wird der Inhalt dieser Arbeit zusammengefasst. Die wichtigsten Arbeitsschritte der Entwicklung des PI-Reglers für das verwendete Dreitanksystem werden noch einmal kurz rekapituliert. Außerdem soll ein Ausblick gegeben werden, wie das Thema in der Zukunft weiter bearbeitet und der Regler verbessert werden kann.

7.1 Zusammenfassung

Der PI-Regler wurde nach einem heuristischen Entwurfsansatz für das Dreitanksystem entwickelt und implementiert. Zunächst wurde das Dreitanksystem beschrieben und anschließend die benötigten Parameter experimentell ermittelt. Hierzu gehören die Kennlinien der Pumpen und Sensoren, sowie die Statikmatrix. Für die Ermittlung der Statikmatrix wurde das System in seine Ruhelage gebracht und die Endwerte der Ausgangsgröße nach einem Sprung der Eingangsgrößen gemessen. Mit Hilfe der Statikmatrix konnten die Matrizen für den Reglerentwurf berechnet werden. Anschließend wurden die Voraussetzungen für den beschriebenen Ansatz geprüft. Das Dreitanksystem erfüllt alle Voraussetzungen, somit konnte der Regler nach dem gewählten Entwurfsansatz entwickelt werden. Die Entwicklung des Reglers war dabei in zwei Arbeitsschritte aufgeteilt. Anfangs wurde ein reiner I-Regler entwickelt. Für diesen wurde mit Hilfe eines geeigneten Testverfahrens der Tuningfaktor α ermittelt. Im zweiten Schritt wurde ein P-Anteil dazugeschaltet. Mit Hilfe des gleichen Testverfahrens wurde der Tuningfaktor β ermittelt. Es wurden die Werte $\alpha=0,2$ und $\beta=100$ für den Regler ausgewählt. Der fertige PI-Regler wurde auf Sollwertfolge und Störgrößenkompensation getestet. Dabei wurden die Faktoren Überschwingweite und Einschwingzeit betrachtet. Der entwickelte Regler kann Sollwertänderungen schnell Folge leisten, benötigt jedoch einige Zeit um eine Störgröße zu kompensieren. Die Störgröße wirkt sich aber nicht stark auf die Füllhöhen der Tanks aus. Abschließend wurde der Regler mit einem modellbasierten Regler verglichen. Dabei wurden zunächst die Reglerparameter miteinander verglichen. Außerdem wurde der modellbasierte Regler ebenfalls auf Sollwertfolge und Störgrößenkompensation getestet. Die Ergebnisse wurden anschließend mit denen des entwickelten Reglers verglichen. Auf Grund der Tests und dem Vergleich, ist erkenntlich, dass der entwickelte Regler funktioniert und mit einem modellbasierten Regler mithalten kann.

7.2 Ausblick

In Kapitel 4.2 wurde erwähnt, dass wegen der Ungenauigkeit der Pumpen, der eigentliche Arbeitspunkt nicht eingestellt werden konnte. Wird der richtige Arbeitspunkt eingestellt, wird die Statikmatrix und somit auch die Regelung genauer. Dies wäre möglich, wenn die jetzigen Pumpen durch bessere, wie zum Beispiel Kreiselpumpen oder ähnliche, ersetzt würden. Eine weitere Möglichkeit um den Arbeitspunkt einzustellen wäre zunächst eine Regelung für die Pumpen zu entwerfen. So könnte garantiert werden, dass über eine längere Zeit ein konstanter Wasserzufluss vorhanden ist.

Eine weitere Erweiterungsmöglichkeit wäre ein Programm zu entwickeln, mit dem die Werte für α und β automatisch erhöht werden. Mit Hilfe dieses Programms und einem automatischen Start der Simulation, könnten verschiedene Tests über Nacht durchgeführt werden. Außerdem könnten die Werte in kleineren Schritten erhöht und getestet werden, um den Regler noch genauer zu machen. Aus Zeitgründen war dies jedoch nicht möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] BODE, Helmut: *Systeme der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink - Analyse und Simulation*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2013
- [2] FÖLLINGER, Otto: *Nichtlineare Regelungen 1 - Grundbegriffe, Anwendung der Zustandsebene, direkte Methode*. Oldenbourg, 1998
- [3] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer Vieweg, 2014
- [4] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 2 - Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung*. Springer Vieweg, 2014
- [5] MATHWORKS, Inc.: *MATLAB Primer R2012b*. MathWorks, Inc., 2012
- [6] RATER, Florian: *Bachelorthesis-Störgrößenbeobachter $f\tilde{A}_{\frac{1}{4}}^{-1}r$ ein Dreitankmodell*. HAW Hamburg, 2013
- [7] SCHULZ, Gerd: *Regelungstechnik 2 - Mehrgrößenregelung, Digitale Regelungstechnik, Fuzzy-Regelung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2008
- [8] WENCK, Prof. Dr.-Ing F.: *Vorlesungs- und Praktikumsunterlagen zur Veranstaltung Mehrgrößenregelung*. HAW Hamburg
- [9] WÖHLKE, Prof. Dr.-Ing W.: *Vorlesungsunterlagen zur Veranstaltung Grundlagen Regelungstechnik*. HAW Hamburg, 2013
- [10] ZEHRFELDT, Martin: *Diplomarbeit-Mehrgrößen-Zustandsregelung eines Dreitanksystems in Echtzeit*. HAW Hamburg, 1994

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 18. Januar 2016

Ort, Datum

Unterschrift